



Exploring the frontiers of knowledge

CERN

Das europäische Forschungszentrum für Teilchenphysik
(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



CERN, Higgs & Co.

Der LHC Beschleuniger

CERN wurde 1954 gegründet: 12 europäische Länder “Wissenschaft für den Frieden”

Heute: 21 Mitgliedsländer (zuletzt: Israel, 6. Jan 2014)

4 assoziierte Mitgliedsländer oder Beitrittskandidaten (zuletzt: Pakistan, 31. Juli 2015)

~ 2500 Angestellte

~ 1000 weiteres Personal

> 11000 “Benutzer” (Gastwissenschaftler)

Budget (2013) ~1250 MSFr

Mitgliedsländer: Österreich, Belgien, Bulgarien, Tschechische Republik, Dänemark, Finnland, Frankreich, **Deutschland**, Griechenland, Ungarn, Israel, Italien, Niederlande, Norwegen, Polen, Portugal, Slowakei, Spanien, Schweden, Schweiz und Großbritannien

Beitrittskandidaten: Rumänien (Beitritt voraussichtlich Ende 2015)

Assoziierte Mitglieder in der Vorstufe zur Mitgliedschaft: Serbien

Assoziierte Mitglieder: Pakistan, Türkei

Staaten mit der Absicht auf (assoziierte) Mitgliedschaft:

Aserbaidschan, Brasilien, Rußland, Slovenien, Ukraine, Zypern

Beobachter: Indien, Japan, Rußland, Vereinigte Staaten von Amerika; Europäische Kommission, Joint Institute for Nuclear Research und UNESCO



Der Beginn von CERN

● 1946

- erste Ideen zur Gründung einer internationalen (europäischen) Wissenschaftsorganisation unmittelbar nach dem 2. Weltkrieg

● Dezember 1949

- erster konkreter Vorschlag bei der UNESCO Conference in Lausanne

● Dezember 1951 und Februar 1952

- Unterzeichnung eines Regierungsabkommen bei der UNESCO zur Gründung eines vorläufigen CERN Rates

● 4. Oktober 1952

- vorläufiger CERN Rat entscheidet sich für Meyrin bei Genf als Standort (andere Vorschläge: Arnheim, Kopenhagen, Paris)
 - Gelände verfügbar, bereits existierende internationale Gemeinschaft, Neutralität

● 29. September 1954

- Abkommen unterzeichnet von 9/12 Ländern, **offizieller CERN-Geburtstag**

Frühe Fotos

Sur le terrain du futur institut nucléaire

Begehung des zukünftigen Standorts in Meyrin (30. Oktober 1953)



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)

(Photo Freddy Bertrand, Genève)

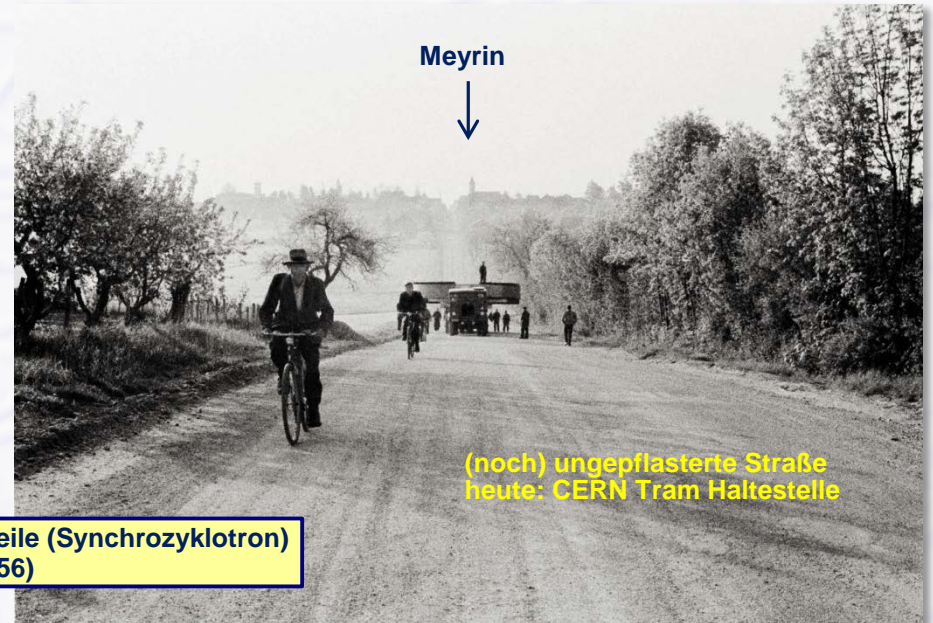
La Suisse du 30 octobre 1953



erste Bauarbeiten (17. Mai 1954)



Transport der ersten Beschleunigerteile (Synchrozyklotron) durch Meyrin (1956)



(noch) ungepflasterte Straße heute: CERN Tram Haltestelle

CERN heute

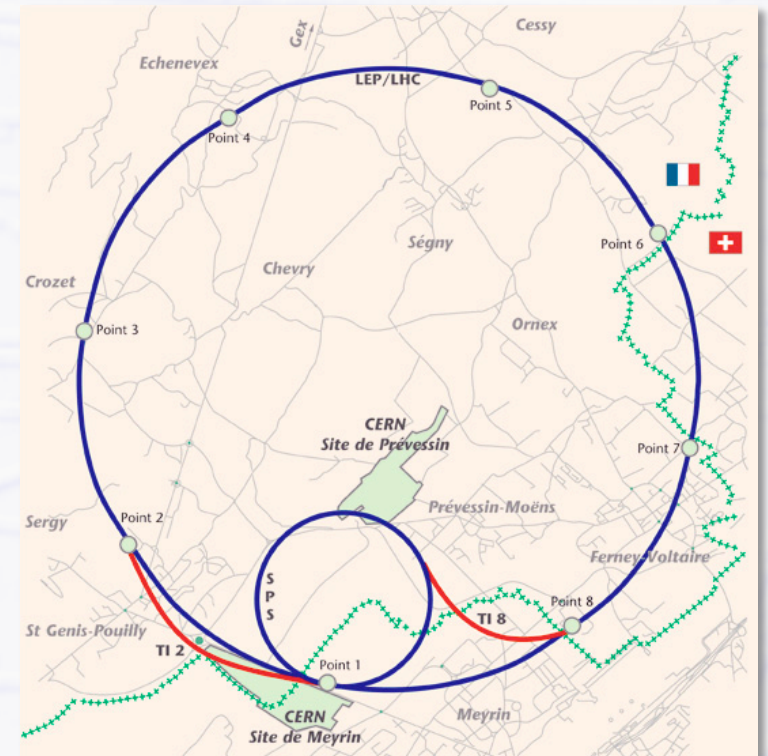
● 2 grosse Standorte

→ Meyrin (Schweiz, mit Erweiterung nach Frankreich Ende 1960er Jahre)

→ Preveessin (Frankreich, seit 1970er Jahre, zunächst eigenständig)

● 8 kleinere Standorte entlang des LHC Tunnels (in CH, F)

● weitere kleinere Standorte (SPS, LHC Magnethalle usw.)

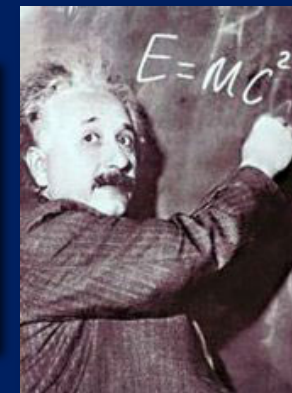




Die Aufgaben von CERN

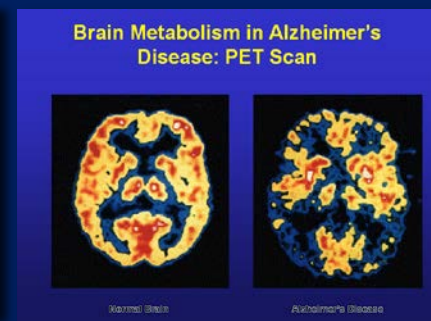
□ **Vorantreiben** der Grenzen des Wissens

den Urknall erforschen ...wie und was war die Materie in den ersten Momenten nach dem Urknall?



□ **Entwicklung** neuer Techniken für Beschleuniger und Detektoren

Informationstechnologie - das Web
Medizin - Diagnose und Therapie



Research

□ **Ausbildung** von Wissenschaftlern und Ingenieuren von morgen



□ **Zusammenführen** von Menschen aus verschiedenen Ländern und Kulturen



CERN Budget 2013: 1246.5 MSFr

- Entspricht großer Universität
 - z.B. TU München (38'000 Studenten)
- Anteilig nach Bruttosozialprodukt

Country	Contribution [%]
Austria	2.22
Belgium	2.77
Bulgaria	0.28
Czech Republic	1.07
Denmark	1.77
Finland	1.43
France	15.57
Germany	20.29
Greece	1.79
Hungary	0.68
Italy	11.78
Netherlands	4.61
Norway	2.50
Poland	2.72
Portugal	1.23
Slovak Republic	0.51
Spain	8.53
Sweden	2.55
Switzerland	3.19
United Kingdom	14.51



Deutschland und CERN

- (West-)Deutschland ist einer der ersten 12 CERN Gründerstaaten (1954)

→ Werner Heisenberg (Nobelpreisträger 1932) (unterzeichnete CERN Vertragsurkunde)

- Teilchenphysik hatte immer eine hohe Bedeutung in Deutschland

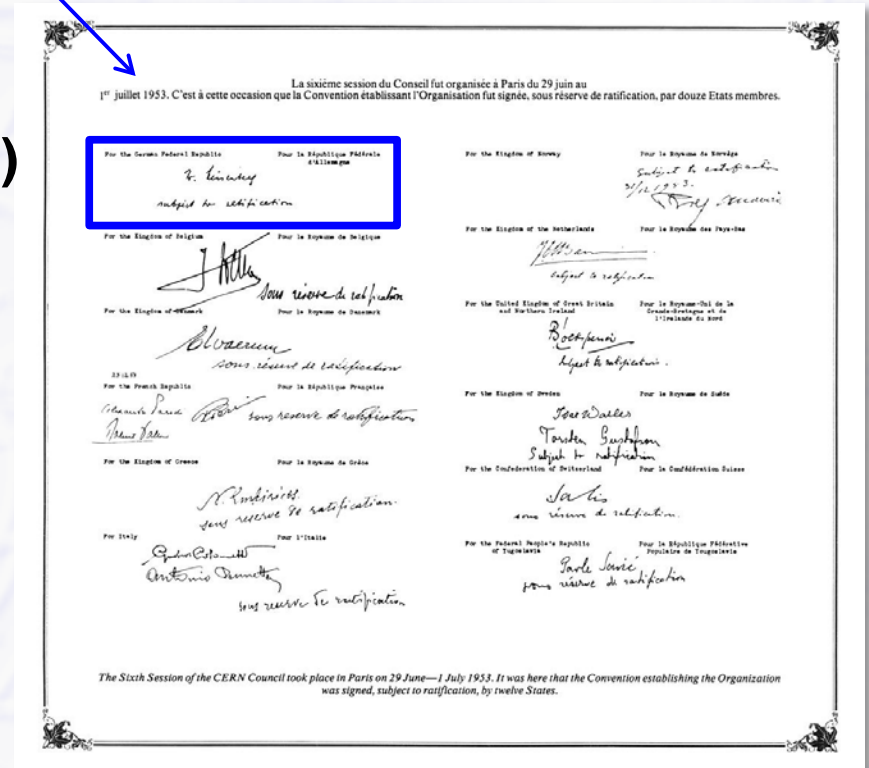
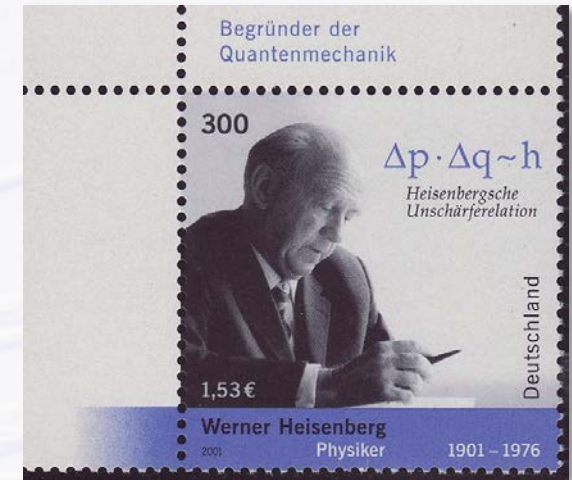
→ Nationales Labor: DESY (HH, Zeuthen)

→ Internationales Labor mit starker deutscher Beteiligung: CERN

- Zwei deutsche CERN General-Direktoren (beide vormals DESY)

→ **Herwig Schopper** (1981 – 1988)

→ **Rolf-Dieter Heuer** (2009 – 2015)



Teilchenphysik in Deutschland

- **Universitäten und Forschungszentren in Deutschland**
 - **Universitäten mit sowohl experimenteller und theoretischer Teilchenphysik: 14**
 - **Universitäten mit entweder experimenteller oder theoretischer Teilchenphysik: 12**
 - **Forschungszentren (Standorte) ausserhalb Universitäten: 6**

gelb:	Universität (exp. und theo.)
grau:	Universität (exp. oder theo. oder IT)
rot:	Forschungszentrum (ausserhalb Universität)



Deutsche Prominenz am CERN



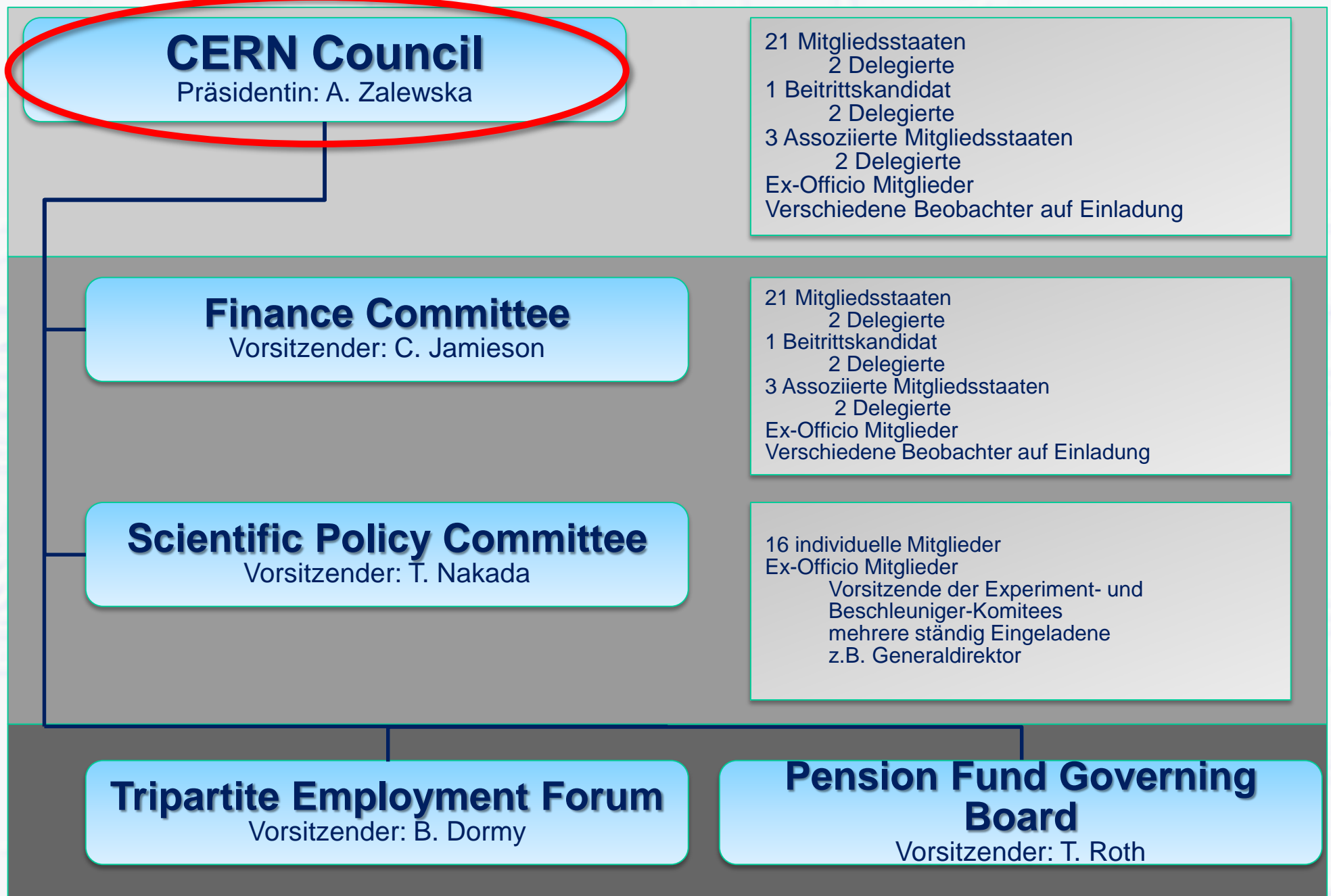
**Bundeskanzlerin Angela Merkel,
April 2008**



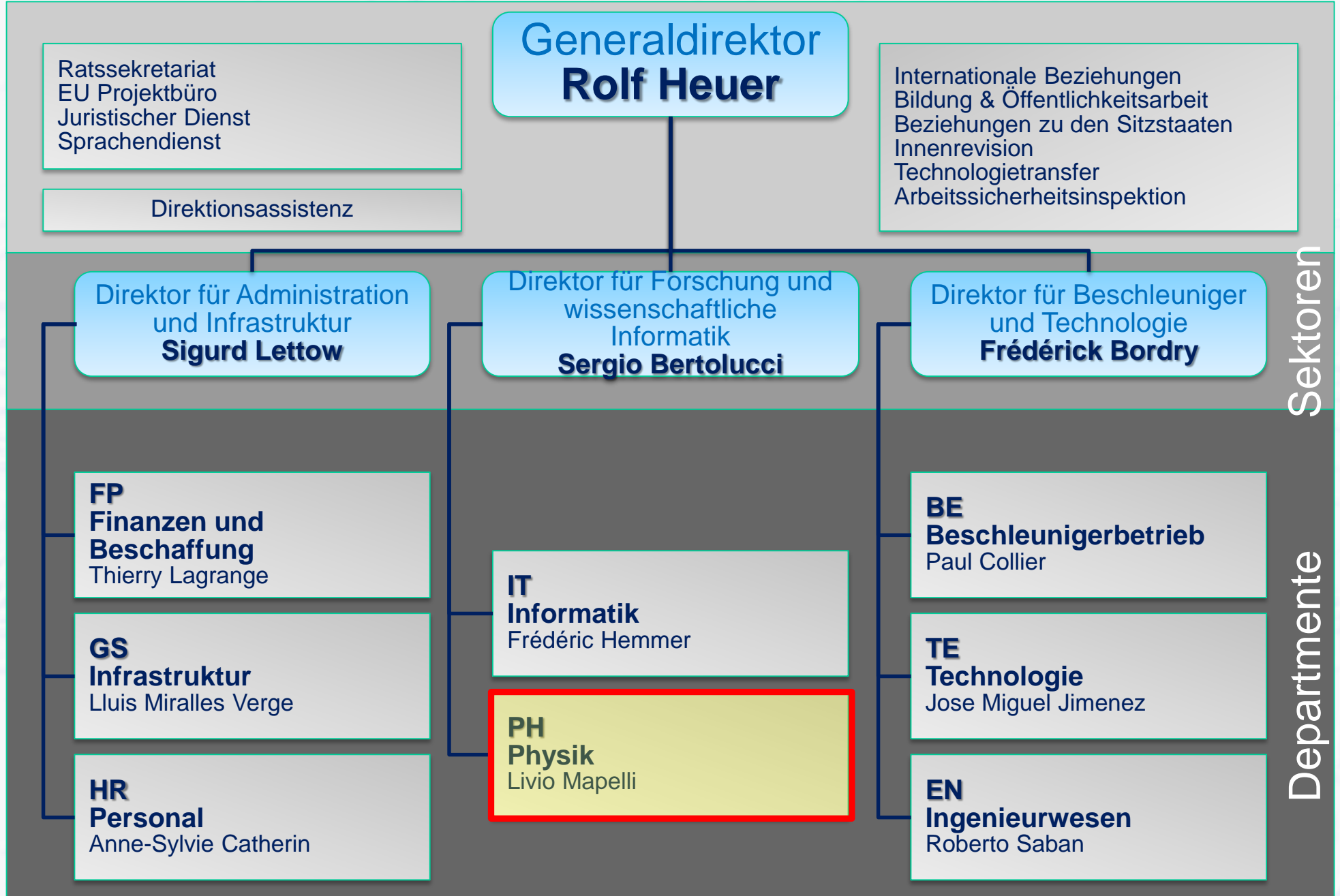
**Bundespräsident Joachim Gauck,
April 2014**

- **+ Ministerinnen für Bildung und Forschung (Johanna Wanka, Annette Schavan, Edelgard Bulmahn), weitere Landesminister, Staatssekretäre, Uni-Rektoren...**

CERN Organisation: "Der Aufsichtsrat"



CERN Management



Sektoren

Departmente

Aufgabenteilung im CERN

- Hauptanteil der CERN Angestellten: **Ingenieure und Techniker**
 - nur 13% Physiker
- CERN ist beides:
Technologielabor + wissenschaftliches Zentrum
 - CERN Angestellte: **Technologie** (hauptsächlich)
 - Design, Bau und Betrieb grosser Beschleunigeranlagen (Infrastruktur “provider”)
 - CERN “Benutzer” aus Universitäten und anderen Forschungszentren: **Wissenschaft** (hauptsächlich)
 - Design, Bau, Betrieb der Teilchendetektoren und Physikdatenanalyse
- Teilchenkollisionen sind Schnittstelle zwischen CERN Angestellten und Gastwissenschaftlern
 - Erzeugung der Kollisionen: CERN Angestellte
 - Analyse der Kollisionsprodukte: Gastwissenschaftler

Distribution of All CERN Users by Nationality on 14 January 2014

~11'000 CERN "Benutzer" (Gastwissenschaftler) aus Instituten in 62 Ländern (~11.3% aus Deutschland) und mit 100 Nationalitäten

MEMBER STATES 6352

Austria	99
Belgium	106
Bulgaria	75
Czech Republic	202
Denmark	53
Finland	87
France	751
Germany	1150
Greece	152
Hungary	68
Israel	51
Italy	1686
Netherlands	153
Norway	61
Poland	229
Portugal	109
Slovakia	88
Spain	337
Sweden	75
Switzerland	180
United Kingdom	640

OBSERVERS 2571

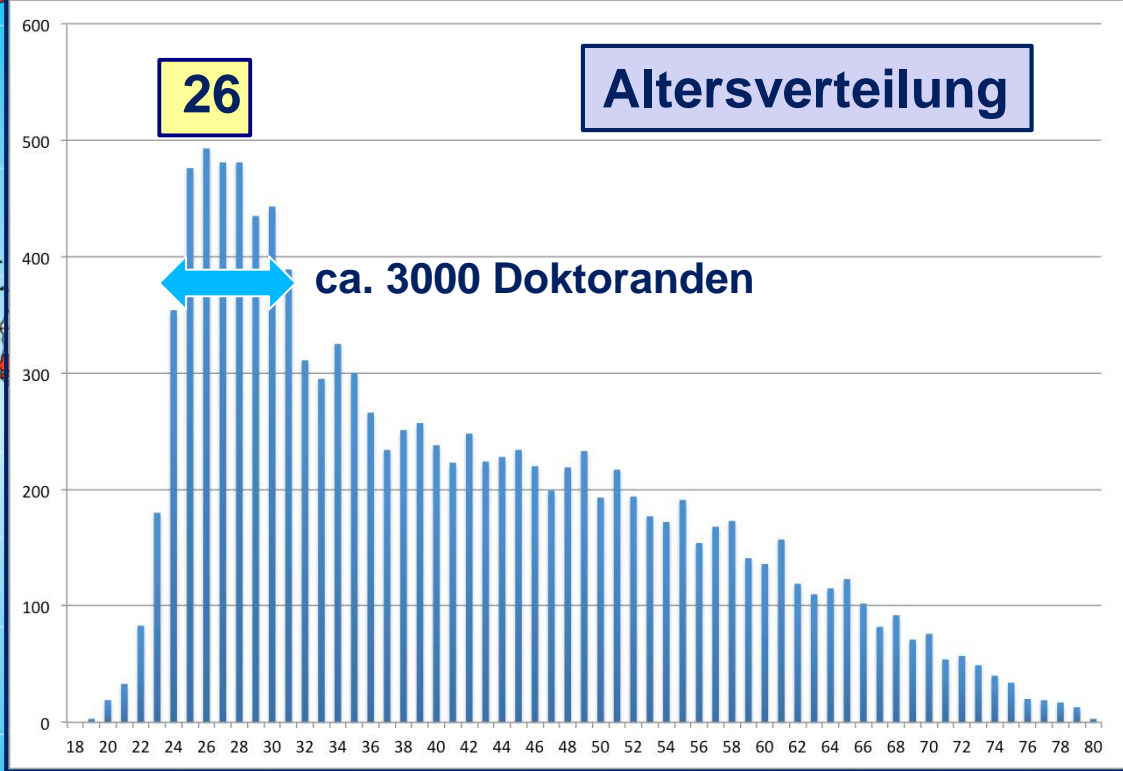
India	220
Japan	244
Russia	982
Turkey	146
USA	979

CANDIDATE FOR ACCESSION 118

Romania	118
---------	-----

ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP 41

Serbia	41
--------	----



OTHERS

Afghanistan	1	Bolivia	3	Cuba	7	Iran	28	Madagascar	4	Philippines	1	Tunisia	6
Albania	2	Bosnia & Herzegovina	1	Cyprus	16	Ireland	22	Malaysia	15	Saudi Arabia	3	Ukraine	55
Algeria	8	Brazil	108	Ecuador	3	Jordan	2	Mauritius	1	Senegal	1	Uzbekistan	4
Argentina	11	Cameroon	1	Egypt	19	Kazakhstan	1	Mexico	64	Singapore	2	Venezuela	9
Armenia	25	Canada	134	El Salvador	1	Kenya	1	Montenegro	3	Sint Maarten	2	Viet Nam	9
Australia	25	Cape Verde	1	Estonia	16	Korea, D.P.R.	1	Morocco	12	Slovenia	27	Zimbabwe	2
Azerbaijan	8	Chile	12	Georgia	36	Korea Rep.	117	Nepal	5	South Africa	16		
Bangladesh	4	China	280	Gibraltar	1	Kuwait	1	New Zealand	7	Sri Lanka	5		
Belarus	47	China (Taipei)	45	Hong Kong	1	Lebanon	12	Pakistan	41	Syria	2		
		Colombia	30	Iceland	4	Lithuania	19	Palestine (O.T.)	4	Thailand	12		
		Croatia	35	Indonesia	1	Luxembourg	4	Peru	8	T.F.Y.R.O.M.	1		

1415

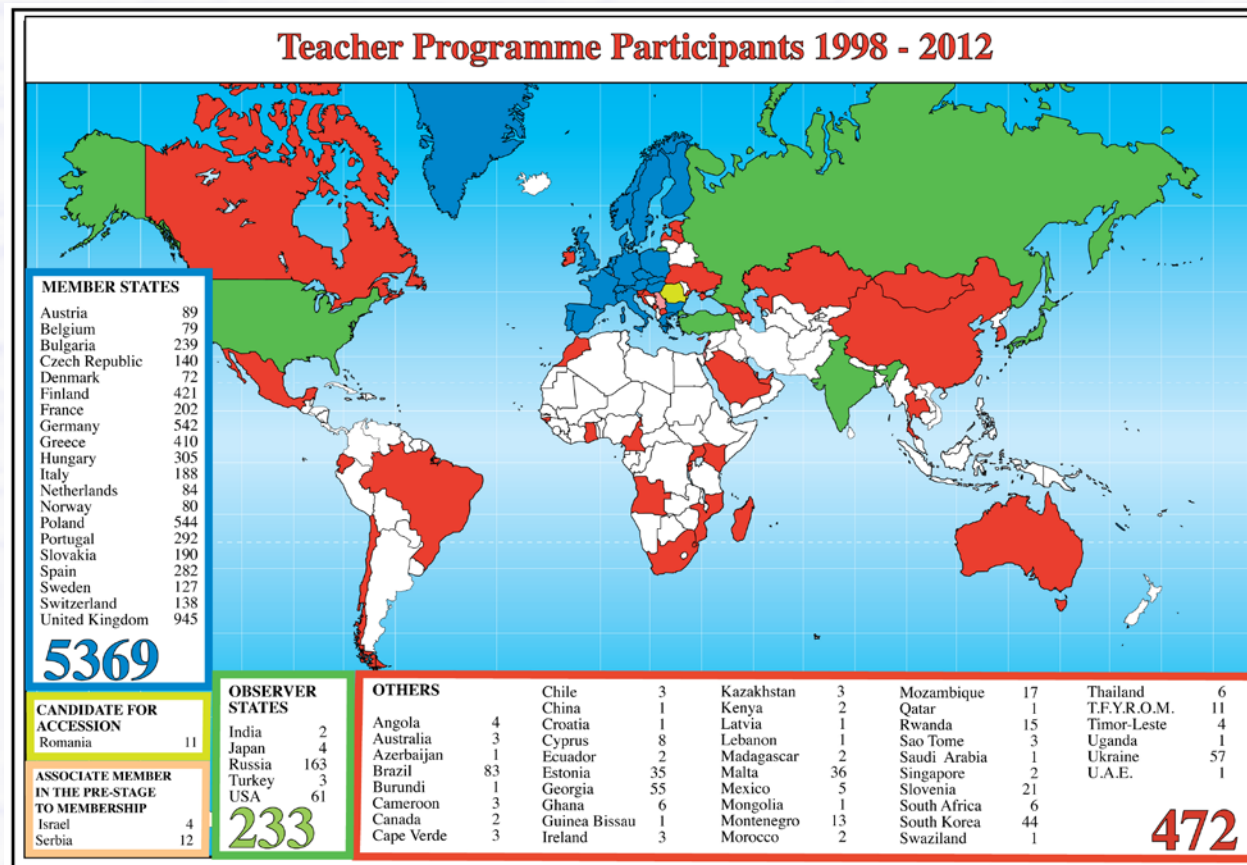
Lehrerausbildung

High School Teachers Programme (HST)

→ 3 Wochen im Sommer, ~40-50 Teilnehmer/Jahr, auf Englisch

National Teacher Programmes (in Landessprache, 1 Woche)

→ ~35 Kurse/Jahr (verschiedene Sprachen), ~1'200 Lehrer/Jahr



CERN's wissenschaftliche Aufgaben

- **Grundlagenforschung** mit Elementarteilchen bei höchsten Energien (Hochenergiephysik)
 - Bau und Betrieb des weltweit grössten Teilchenbeschleunigers **LHC (Large Hadron Collider)** seit 2009
 - 27 km Tunnel, **4 (riesige) Teilchendetektoren** in unterirdischen Kavernen
 - **Wissenschaftliche Ziele**
 - Suche nach dem **Higgs Teilchen (GEFUNDEN!)** + präzise Vermessung der Eigenschaften
 - Suche nach **neuen Teilchen** (z.B. dunkle Materie Teilchen)
- **Weitere Forschungsgebiete (Auswahl):**
 - **Antimaterie** (5 Experimente am Antiprotonen “Entschleuniger” AD)
 - Unterschiede zu Materie, Spektroskopie, Anziehung im Schwerfeld
 - **Neutrinooszillationen** (Neutrinostrahl nach Italien, **OPERA + ICARUS**)
 - Umwandlung von Muon-Neutrinos in Tau-Neutrinos
 - **Proton-Struktur (COMPASS Experiment)**

Wissenschaftliche Vielfalt am CERN

● ISOLDE Radioaktive Ionenstrahlen

- Grundlagenforschung an radioaktiven Isotopen
- neu: MEDICIS (radioaktive Isotope für die Medizinforschung)

● nTOF (neutron Time-of-Flight Facility)

- nukleare Astrophysik + Kernphysik, Dosimetrie + Strahlungsschäden

● CLOUD Experiment

- Einfluß von kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung

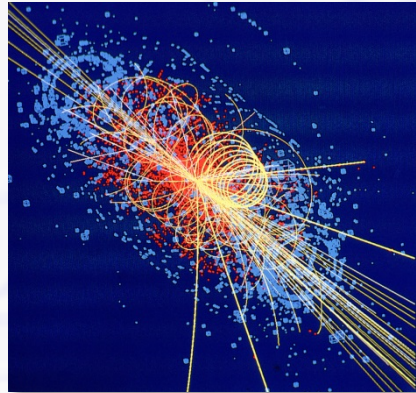


● AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

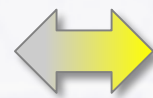
- Suche nach Antimaterie in kosmischer Strahlung
- Auf der International Space Station mit vorletztem Space Shuttle Flug STS-134 im Mai 2011
- AMS Kontrollzentrum am CERN



“Spin-offs” der Teilchenphysik: medizinische Anwendungen

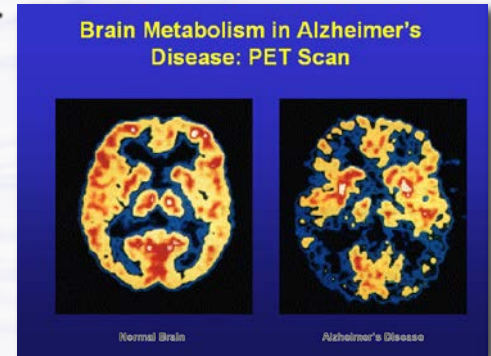
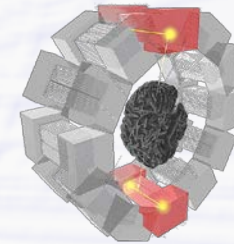


Nachweis von
Teilchen

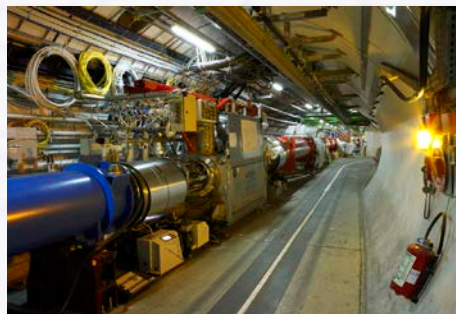


Bildgebung PET Scanner

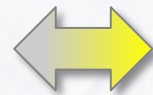
Klinischer Test in
Portugal eines neuen
Brustdarstellungs-
Systems (ClearPEM)



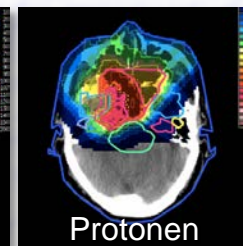
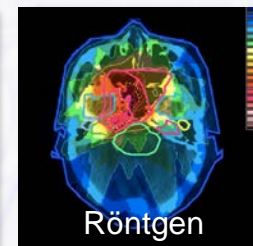
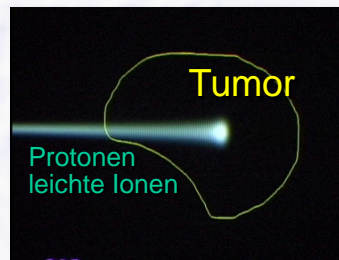
PET = Positron Electron Tomography
(Positronen = Antimaterie)



Beschleunigte Teilchenstrahlen
~30'000 Beschleuniger weltweit
davon ~17'000 für medizinische Zwecke



Hadronentherapie



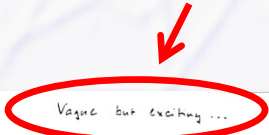
Europa und Japan
sind führend in
Ionenstrahltherapie

>70'000 Patienten weltweit behandelt (30 Anlagen)
davon >21'000 Patienten in Europa (9 Anlagen)

CERN: "Where the Web was born..."

Die Idee von Tim Berners-Lee
(März 1989):

Kommentar des Chefs:
"Vague but exciting..."



CERN DD/OC
Information Management: A Proposal
March 1989

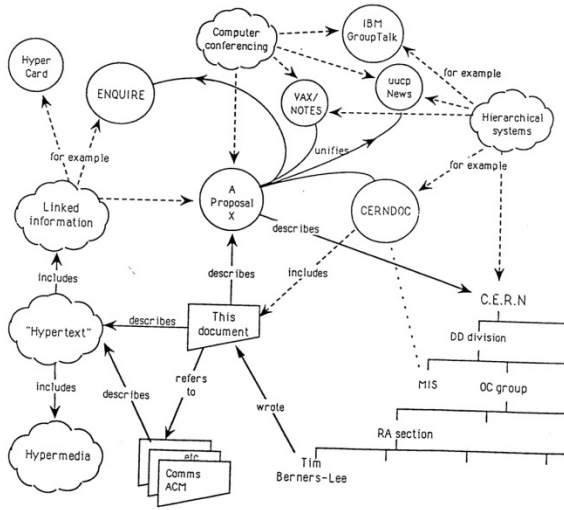
Tim Berners-Lee, CERN/DD

Information Management: A Proposal

Abstract

This proposal concerns the management of general information about accelerators and experiments at CERN. It discusses the problems of loss of information about complex evolving systems and derives a solution based on a distributed hypertext system.

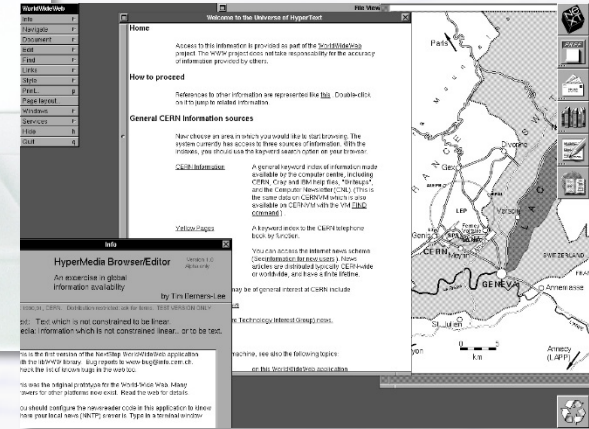
Keywords: Hypertext, Computer conferencing, Document retrieval, Information management, Project control



Der erste Web Server: ein NEXT computer
(Januar 1990)



Screenshot



2 Jahre später im Büro
(Februar 1991)

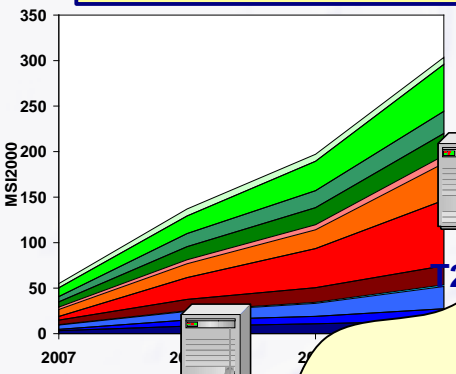


20. Jahrestag
(März 2009)

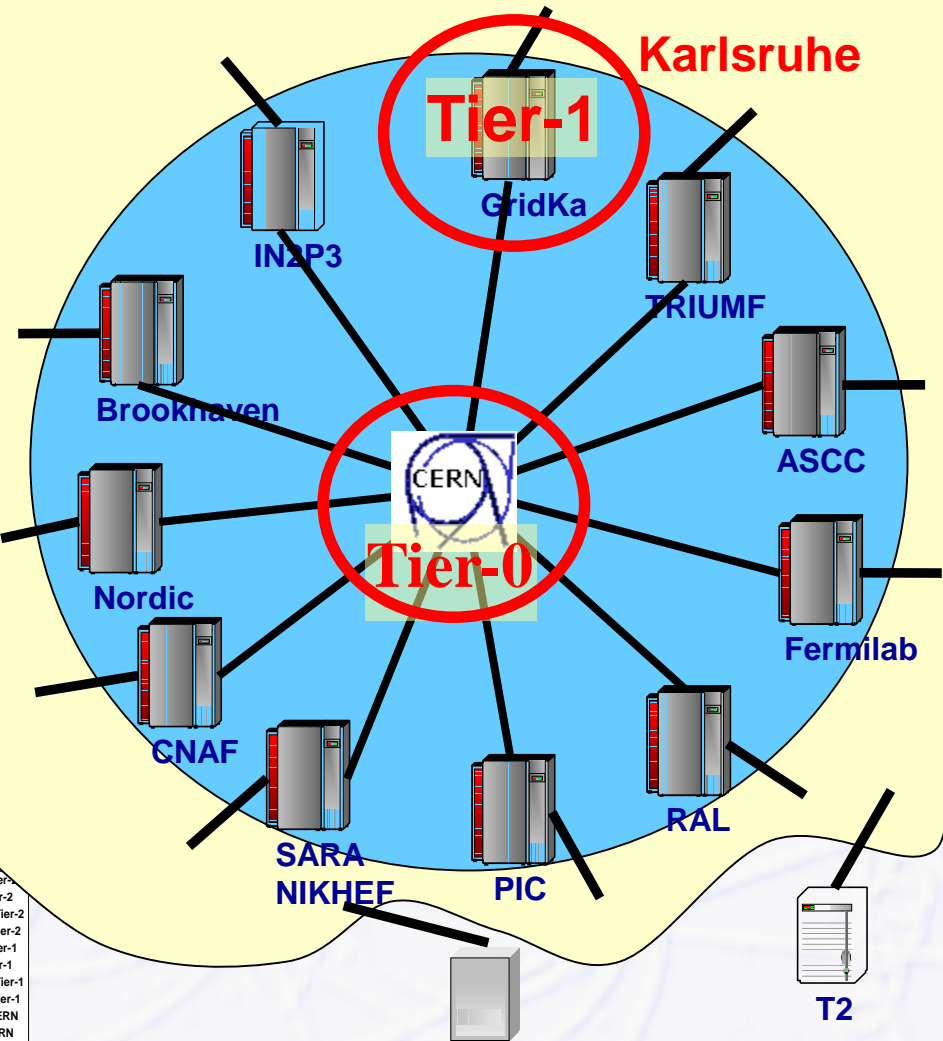
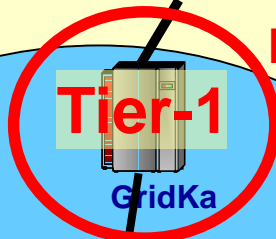
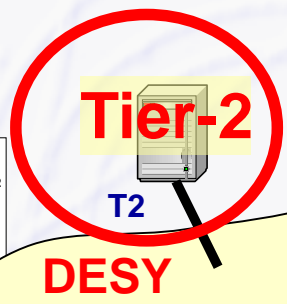
Anstieg ~100 MSI2k/year
~10'000 Intel Core 2 Duo / Jahr

1 Tier-0
10 Tier-1
~100 Tier-2

Das Grid



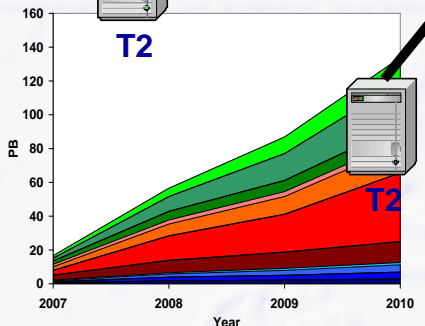
- LHCb-Tier-2
- CMS-Tier-2
- ATLAS-Tier-2
- ALICE-Tier-2
- LHCb-Tier-1
- CMS-Tier-1
- ATLAS-Tier-1
- ALICE-Tier-1
- LHCb-CERN
- CMS-CERN
- ATLAS-CERN
- ALICE-CERN



CPU

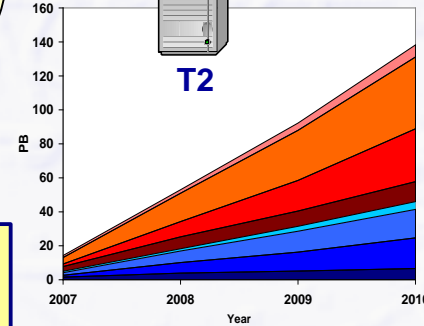
Disk

Tape



- LHCb-Tier-1
- CMS-Tier-1
- ATLAS-Tier-1
- ALICE-Tier-1
- LHCb-CERN
- CMS-CERN
- ATLAS-CERN
- ALICE-CERN

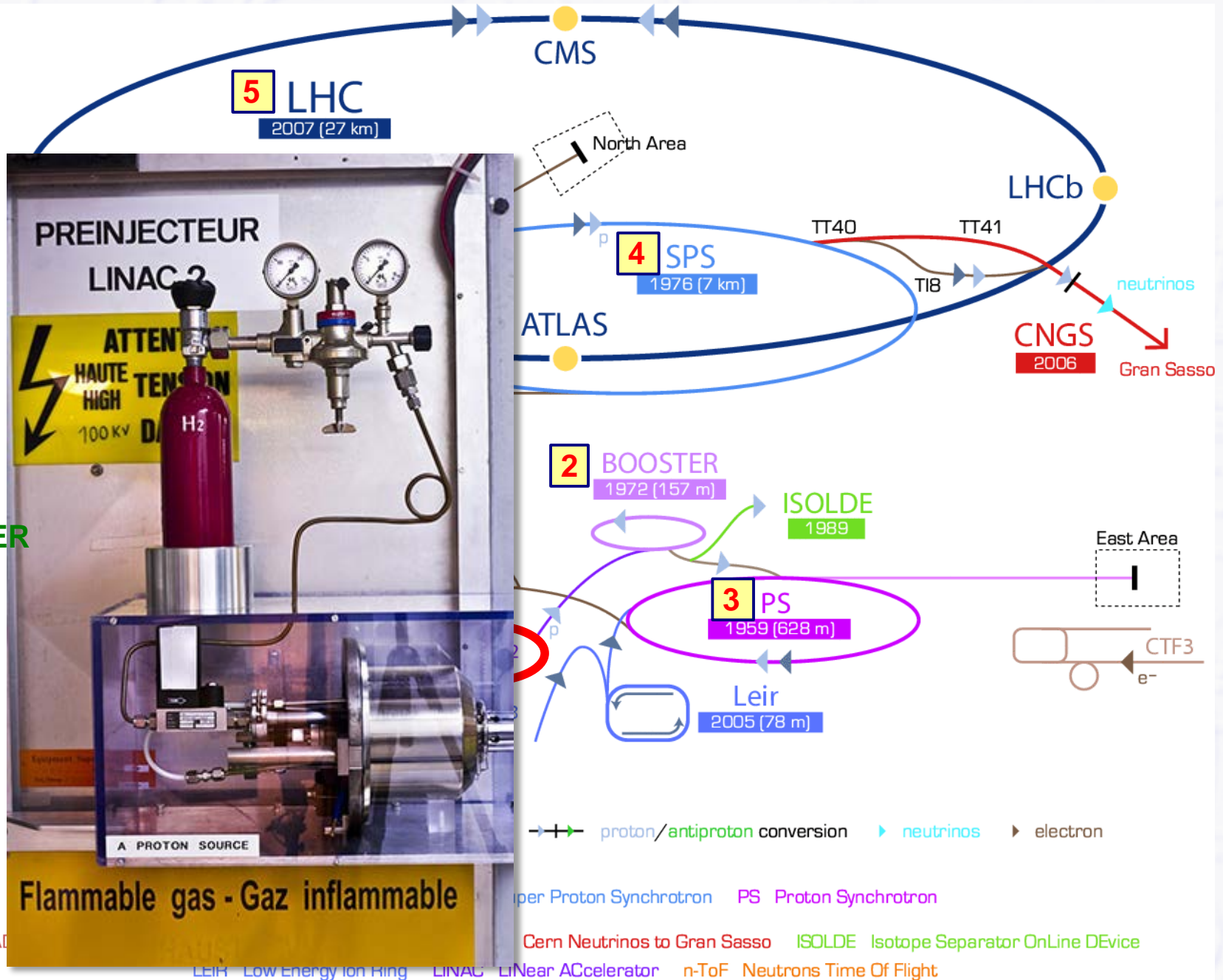
LHC Datenmenge 2010-12: 75 PB
(17'000 disks + 52'000 tapes am CERN)



- LHCb-Tier-1
- CMS-Tier-1
- ATLAS-Tier-1
- ALICE-Tier-1
- LHCb-CERN
- CMS-CERN
- ATLAS-CERN
- ALICE-CERN

CERN Beschleuniger Komplex

- 7 TeV
- 5 ↑ LHC
- 450 GeV
- 4 ↑ SPS
- 26 GeV
- 3 ↑ PS
- 1.4 GeV
- 2 ↑ BOOSTER
- 50 MeV
- 1 ↑ LINAC2



Der LHC: ~30 Jahre... und länger...

1984: Erste Ideen zum LHC (2 x 5.9 TeV) und SSC (2 x 20 TeV), LEP Tunnelbau beginnt

Idee 1984: LHC über existierenden LEP Beschleuniger

1984

1988: SSC genehmigt (Waxahachie, Texas)

1989: Erste Kollisionen bei LEP und SLC, F&E für LHC Detektoren beginnt

1993: SSC Bau gestoppt!!!

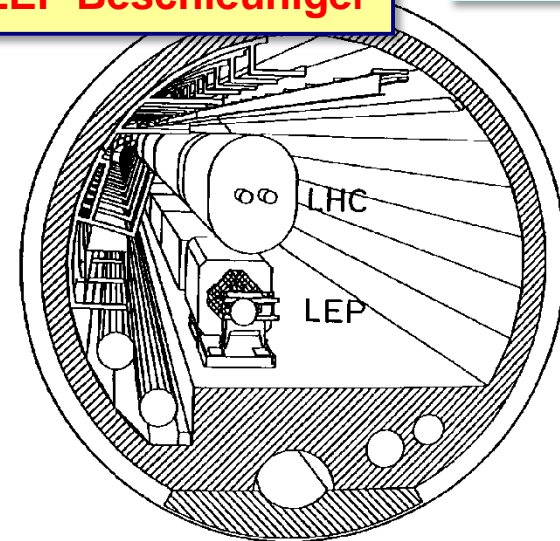
1994: LHC genehmigt (geplanter Start 2005)

1995: Entdeckung des top Quark am Fermilab durch CDF (und D0), ATLAS und CMS genehmigt

1998: Beginn des LHC Baus

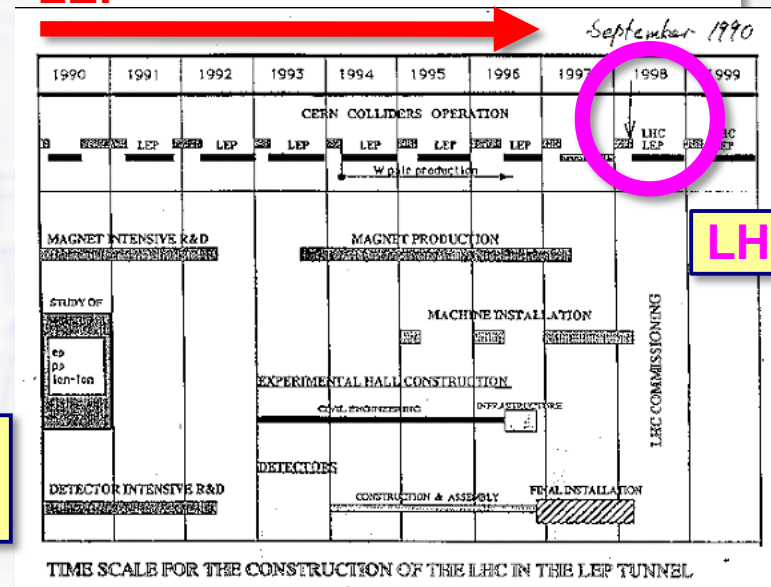
2000: Ende von LEP, kein Higgs gefunden...

2008: LHC Start



LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

LEP



Plan 1990:
LHC Start 1998...

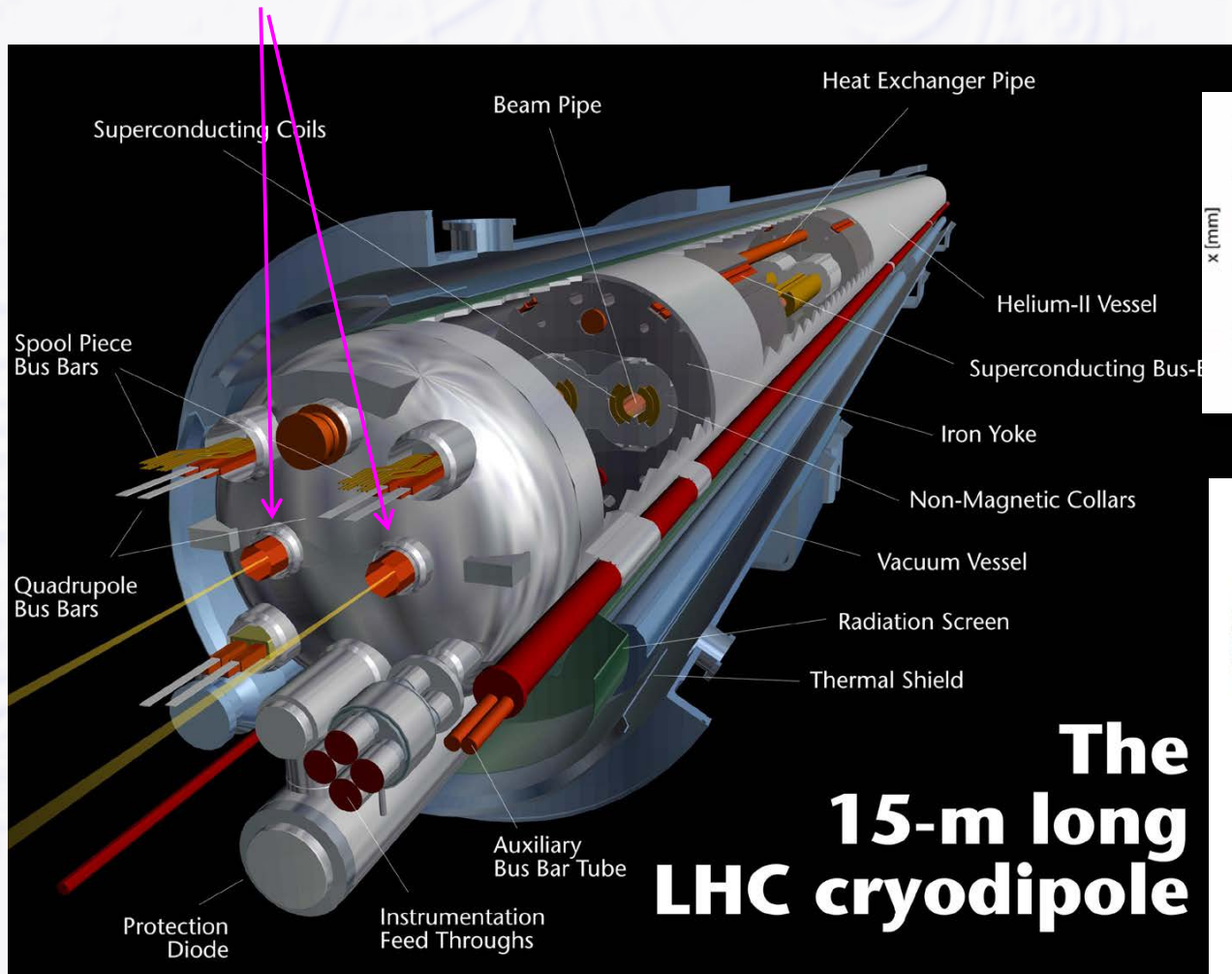
LHC

LHC in Zahlen

- **1232 Dipole, 8.33 Tesla @ 7 TeV bei 11850 A**
 - + 392 Quadrupole
 - + 3700 Multipol-Korrektur-Magnete + 2500 andere Korrektur-Magnete
 - 1200 Tonnen NbTi supraleitendes Kabel mit 7600 km Länge
 - gespeicherte Energie im Magnetfeld 10 GJ ($\frac{1}{2} LI^2$)
- **gesamte Kaltmasse: 30'000 Tonnen**
 - **120 Tonnen suprafluides Helium** (1.9 K) zur Kühlung
 - Energie für Quench: 0.5 - 20 mJ/cm³ = 10⁷ Protonen bei 7 TeV
- **Anzahl der Stromverbindungen zwischen Magneten**
 - 10'000 supraleitende Verbindungen zwischen Dipolen
 - 50'000 Verbindungen für Korrektur-Magnete
- **Vakuum: 10⁻¹⁰ mbar = 3 Millionen Moleküle pro cm³**

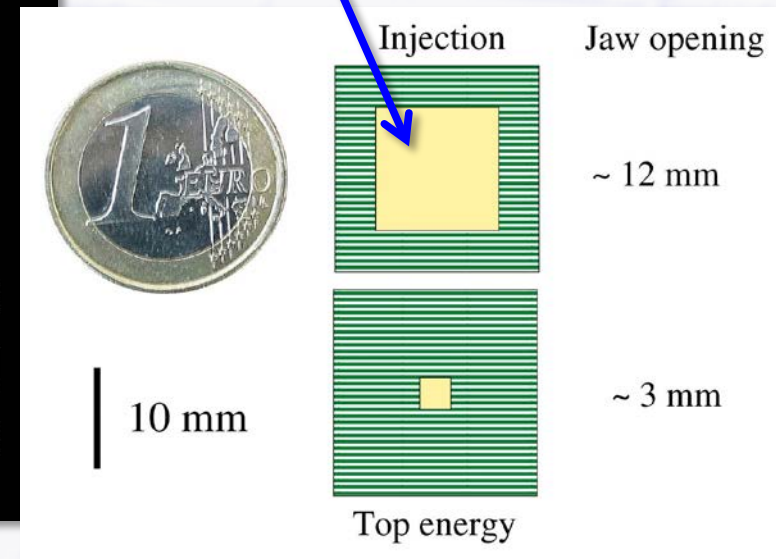
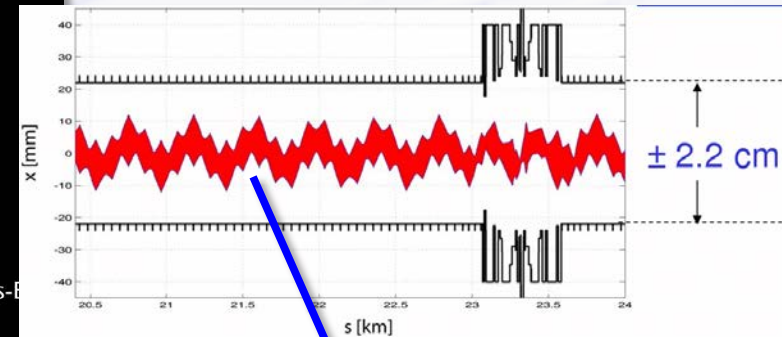
LHC Dipole

2 kleine Strahlen in einem Magnet



**The
15-m long
LHC cryodipole**

**Größe der Vakuumkammer
und Strahlgröße**



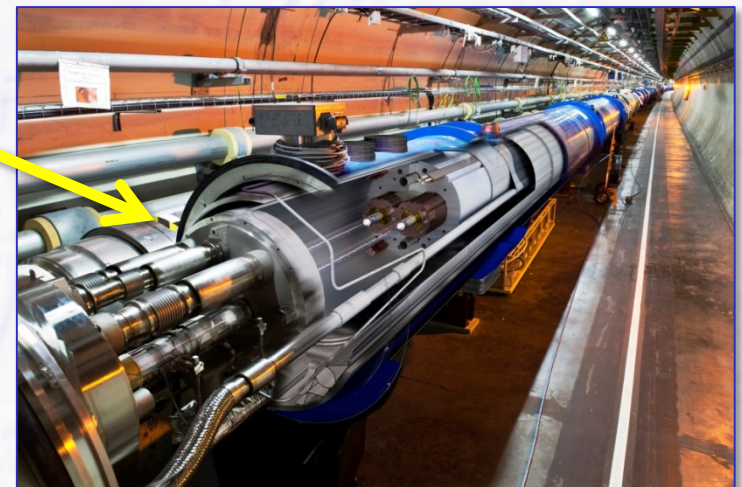
**sehr kleine Öffnung (kleine Vakuumkammer)
= kompakter Magnet = geringere Kaltmasse**

LHC Tunnel

- Umfang: 27 km
- Durchmesser: 3.8 m

Umfangreiche Spitzentechnologien

- Supraleitung
- Magnete
- Vakuum
- Hochfrequenz
- Strahlkontrolle
- Sicherheit



gespeicherte LHC Strahlenergie

- 2808 Teilchenbündel, 1.1×10^{11} Protonen/Bündel @ 7 TeV
- 350 MJ gespeicherte Energie pro Protonstrahl

Airbus A320 (78 t) bei 340 km/h



ICE 3 Zug (420 t) bei 147 km/h



Queen Mary 2 (150'000 t) bei 4.2 Knoten (7.8 km/h)



Größtes Problem bei LHC ist die Kontrolle der gespeicherten Energie

Der LHC Beam Dump

- 350 MJ Beamenergie müssen in $\sim 250 \mu\text{s}$ abgebaut werden (3 Umläufe)

→ instantane Strahlleistung auf dump = 1.4 TW

- Strahl Absorber aus Graphit

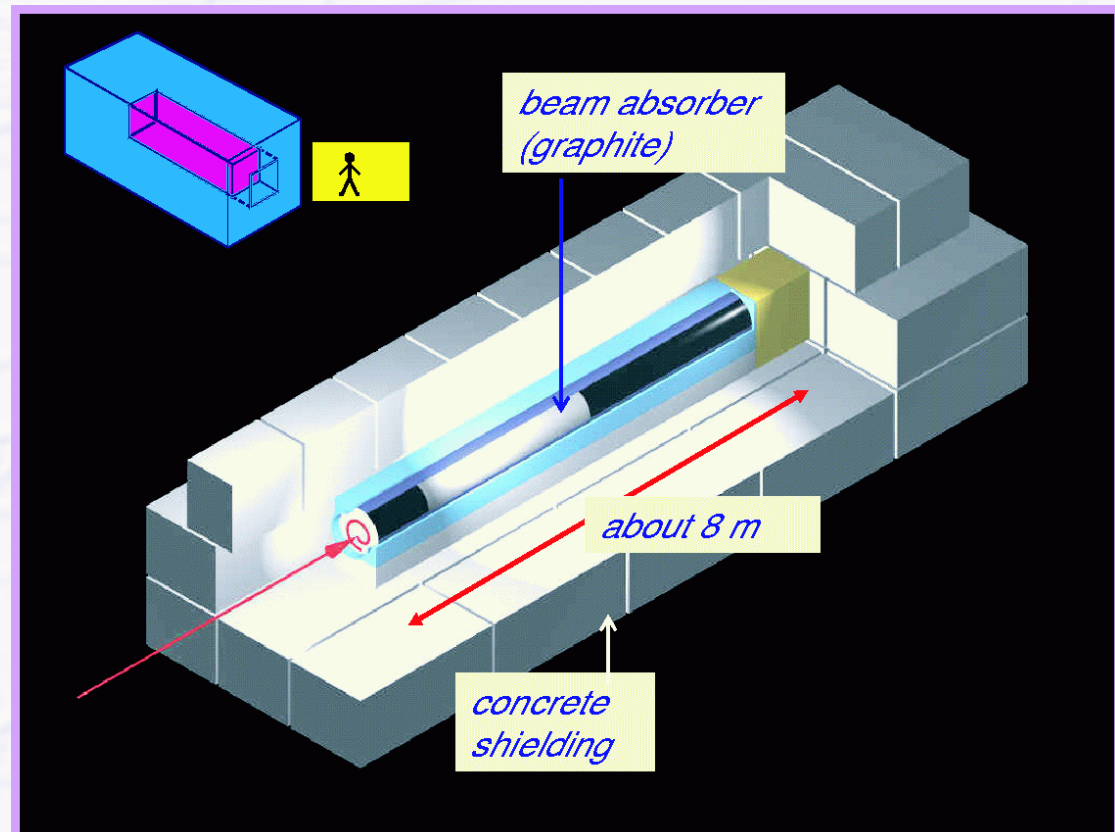
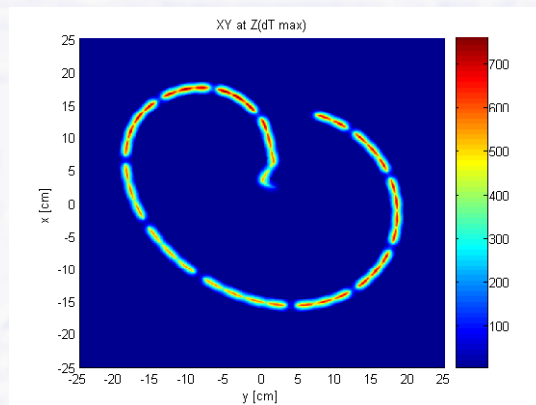
→ Schmelzpunkt $\sim 3700 \text{ }^\circ\text{C}$

→ Aufheizung bis $\sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$

- Auch notwendig

→ “dilution kicker”

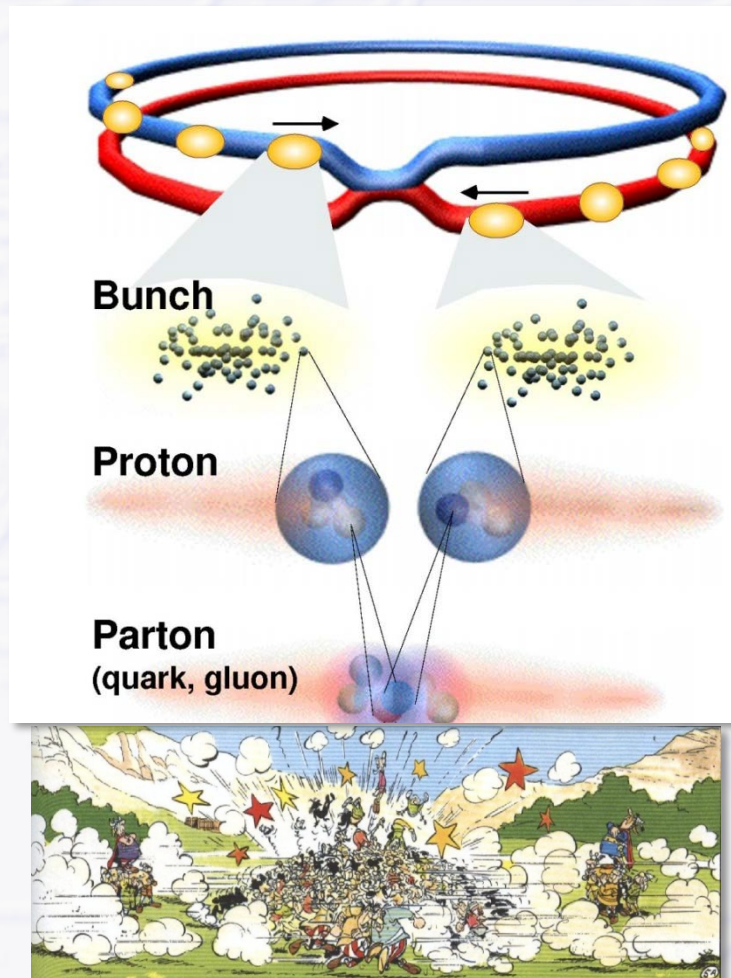
→ Strahl trifft spiral-förmig auf



Proton – Proton Kollisionen* im LHC

- * = Der LHC kann auch schwere Bleikerne (Schwerionen) beschleunigen und kollidieren lassen

→ Spezialexperiment für Schwerionenphysik: ALICE



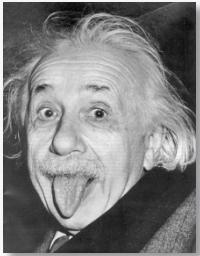
Proton – Proton
(Design Parameter)

2808 x 2808 Protonenbündel (bunches)
mit 7.5 m Abstand (25 ns zeitlich)
 1.1×10^{11} Protonen/Bündel

$\sim 10^9$ pp Kollisionen/s
= Überlagerung von $\sim 20 \dots 30$ pp-Kollisionen
pro Strahlkreuzung: **pile-up**

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor
pro Strahlkreuzung

Methoden der Teilchenphysik

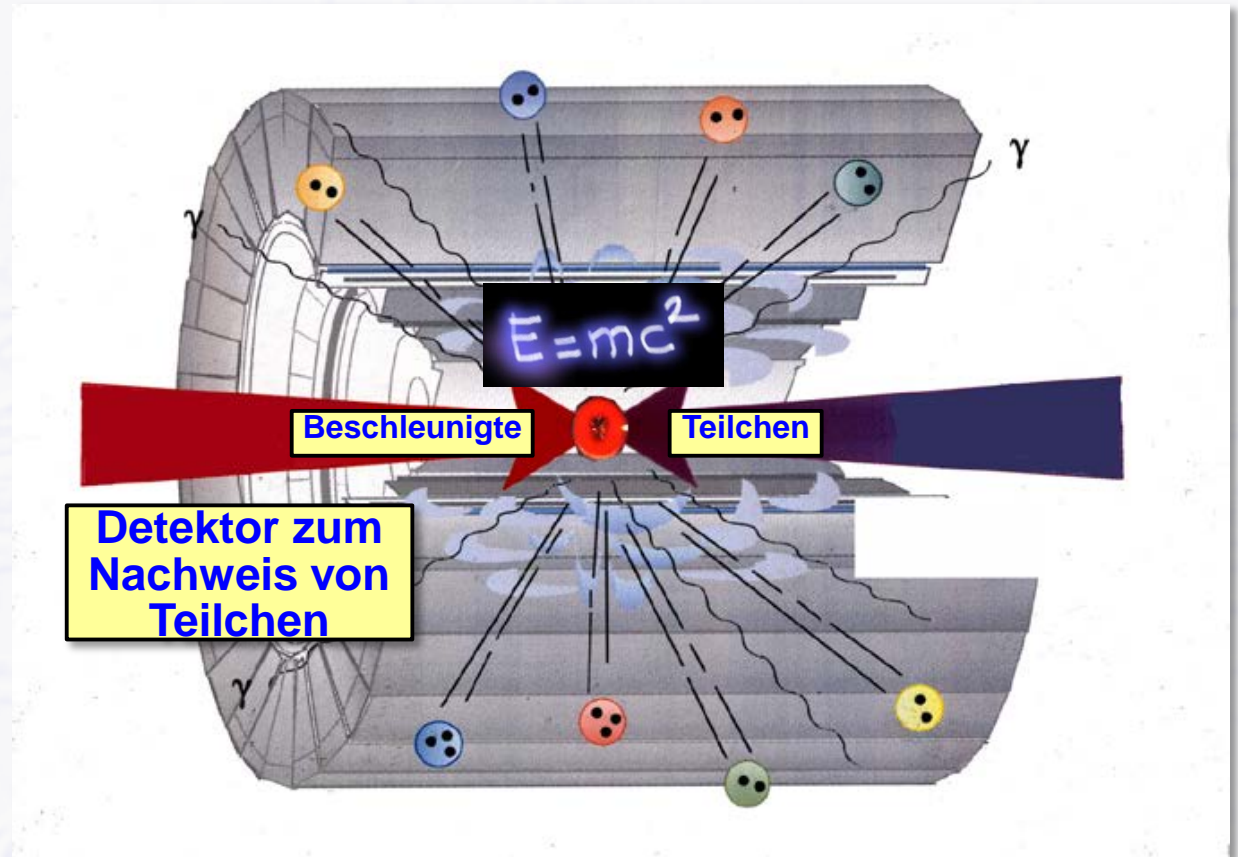


**Einstein
(1905):**

**Materie ist
konzentrierte Energie!**

**Materie lässt sich in
Energie umwandeln
und umgekehrt!**

$$E = m c^2$$

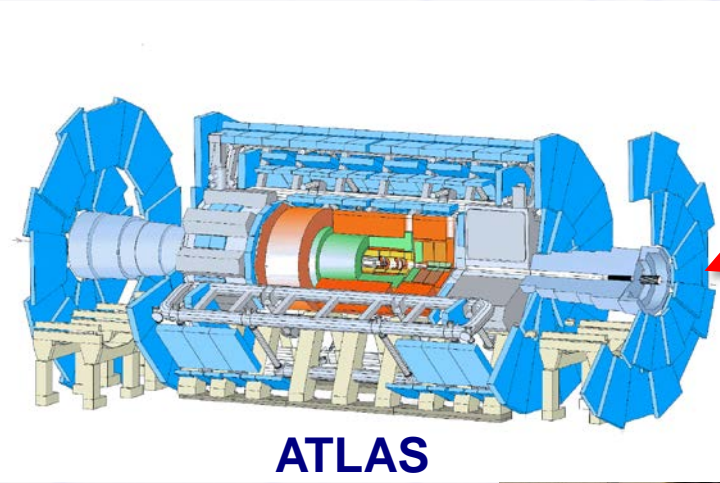


● Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger

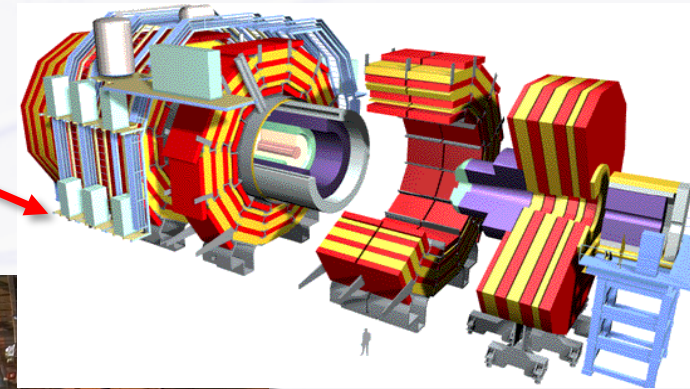
- Protonen werden beschleunigt ⇒ **kinetische Energie**
- **Umwandlung der kinetischen Energie** bei der Kollision in **Materie**
- **Neue Teilchen entstehen** (neue Materie) und müssen **vermessen** werden

LHC Detektoren

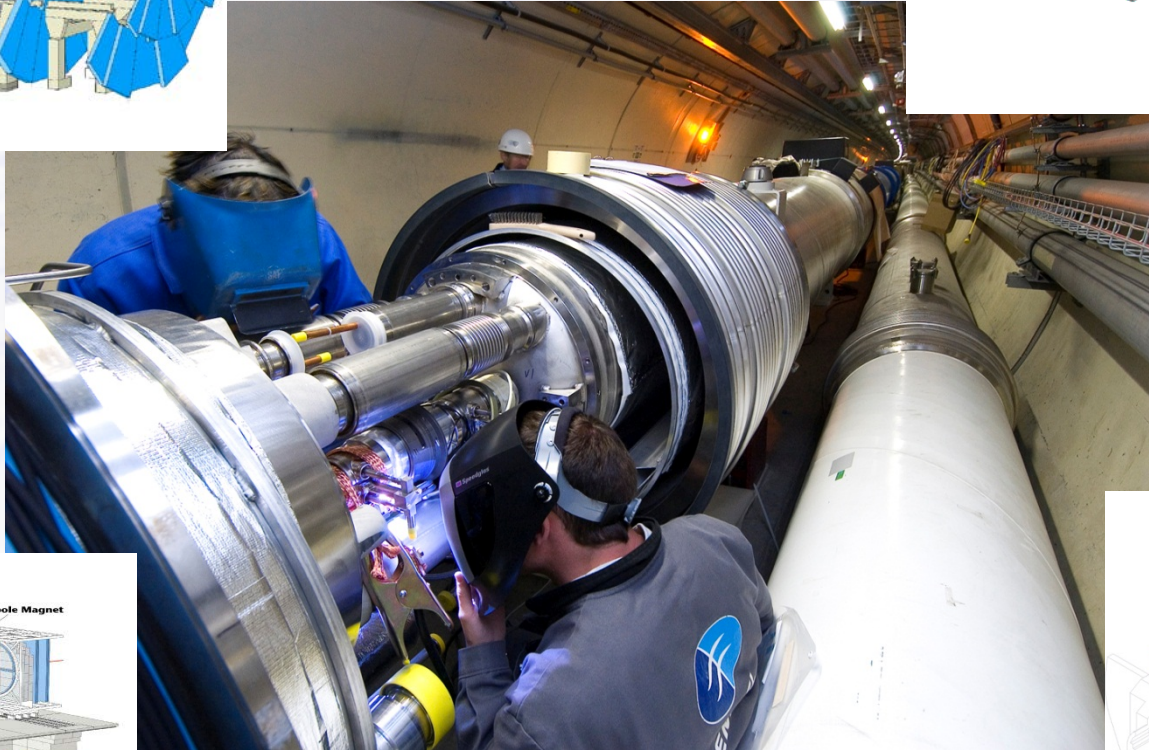
Vielzweckdetektoren
(gut für alles...)



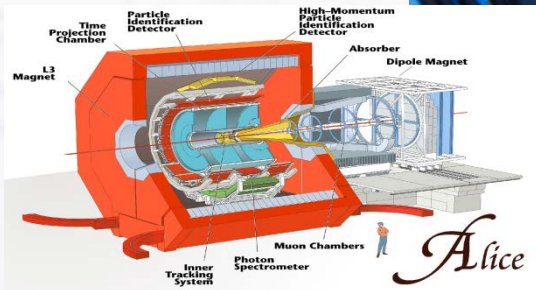
ATLAS



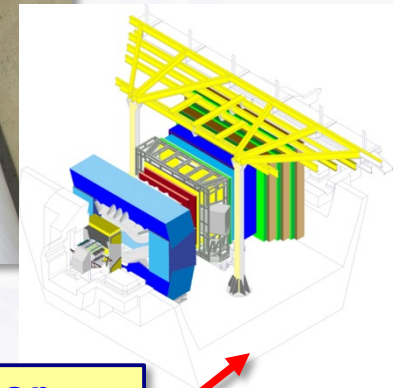
CMS



ALICE



Spezialdetektor für
Schwerionenkollisionen

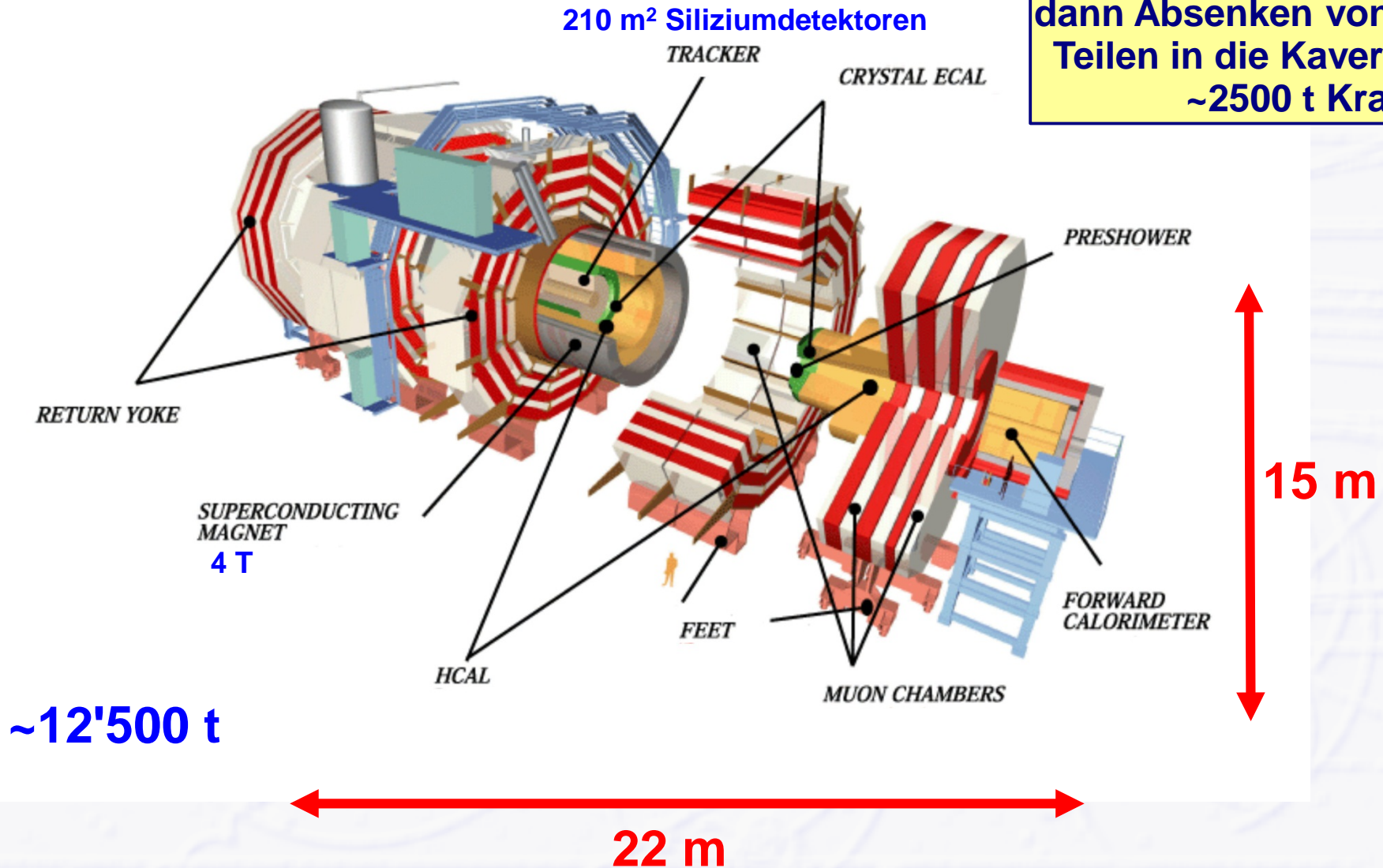


Spezialdetektor
für Physik mit b-Quarks

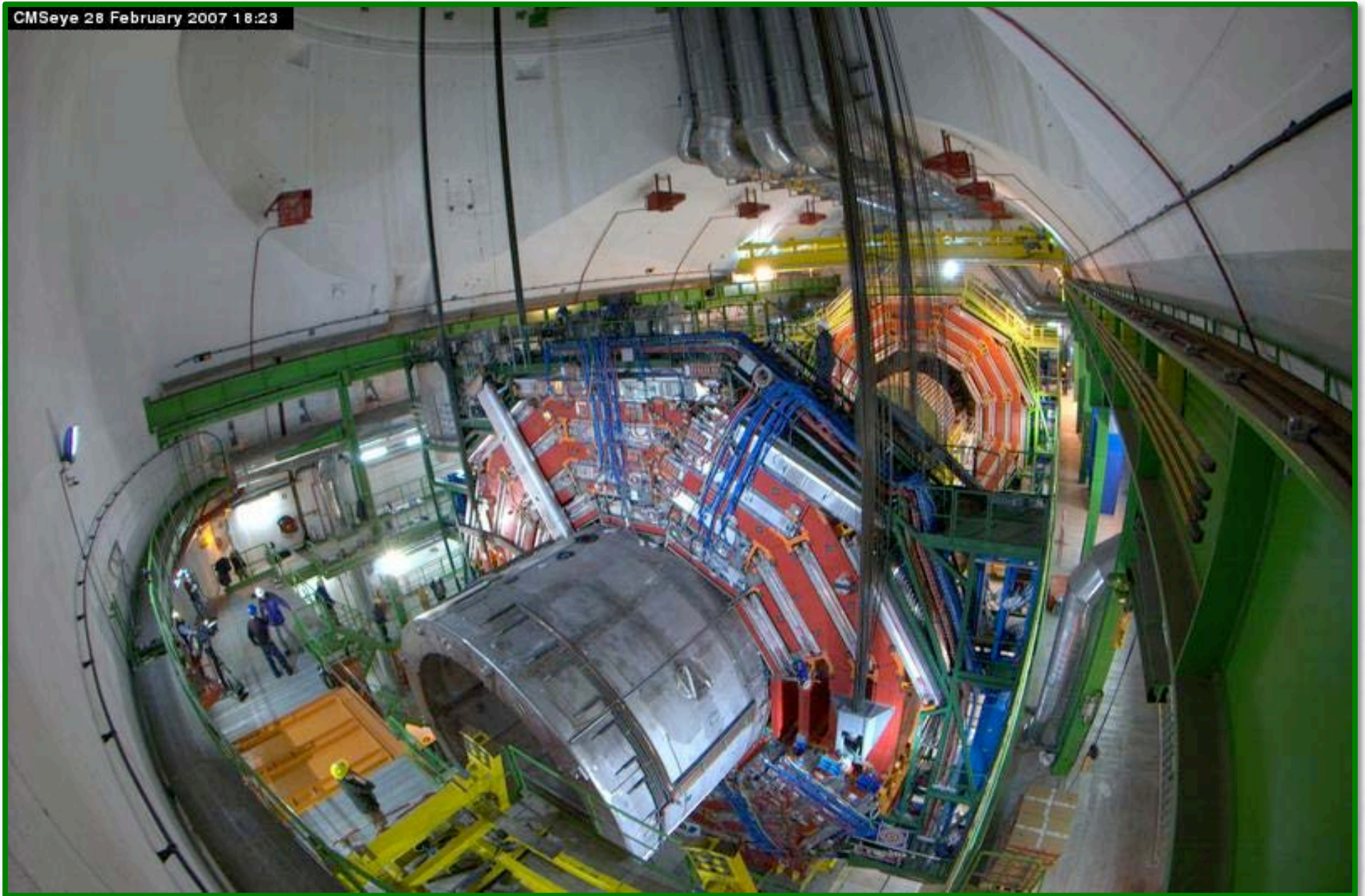
LHCb

CMS (Compact Muon Spectrometer)

**Aufbau an der Oberfläche,
dann Absenken von 5 großen
Teilen in die Kaverne durch
~2500 t Kran**

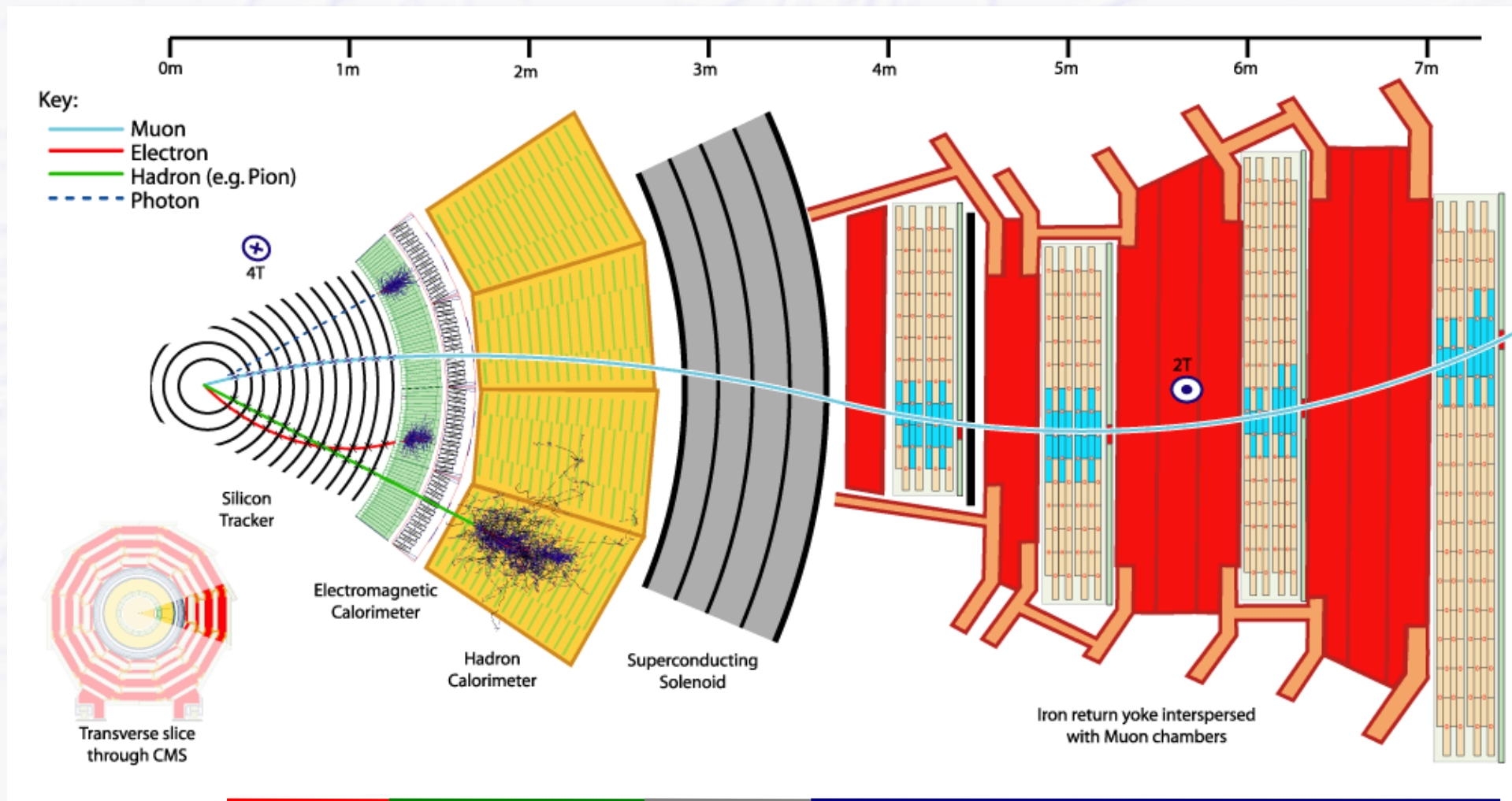


Abenkung des 2000 t CMS Mittelteils



Ein typischer Teilchendetektor

● Schnitt durch den CMS Detektor



Spurdet. Kalorimeter

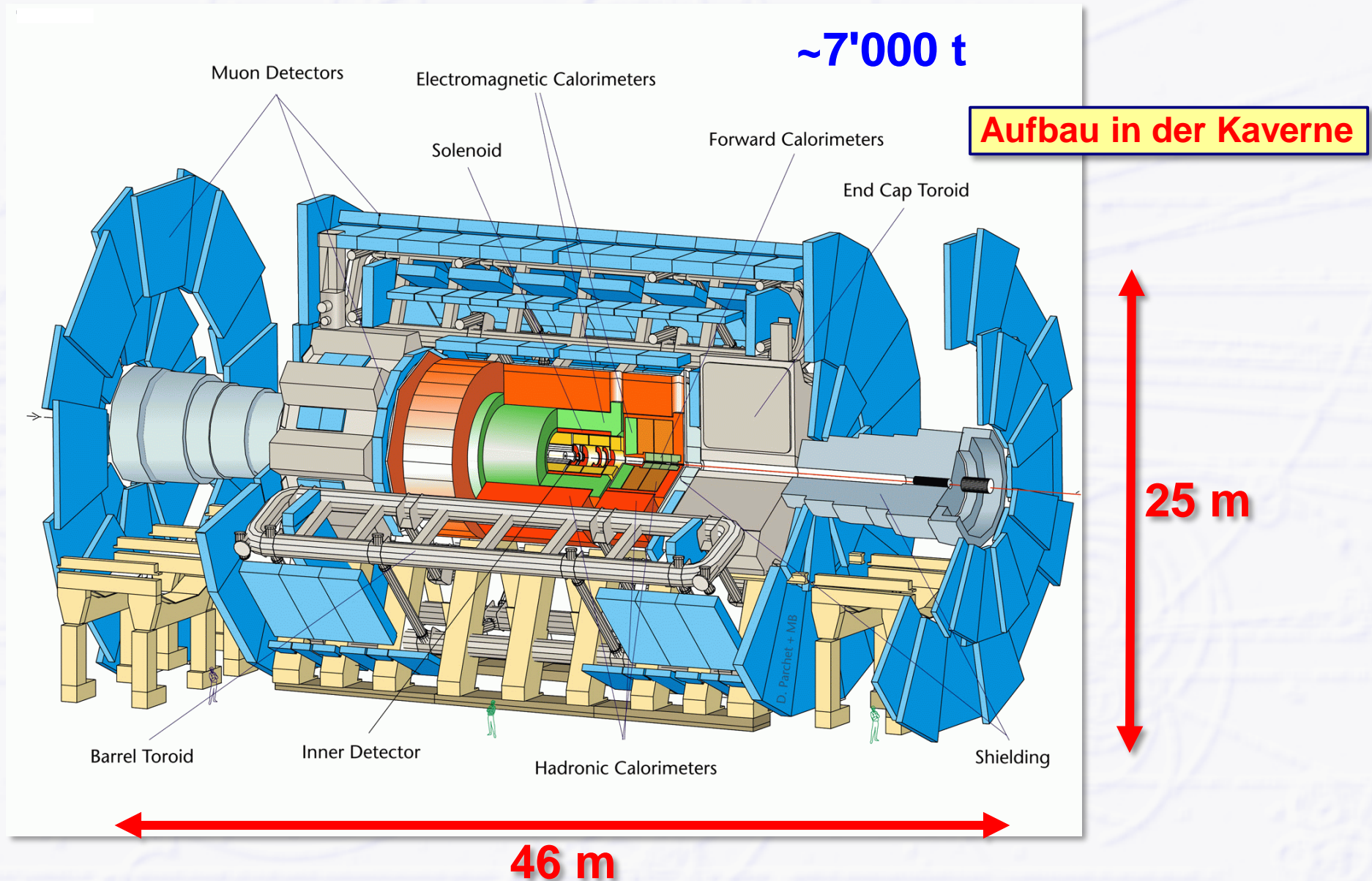
p

E

Spule

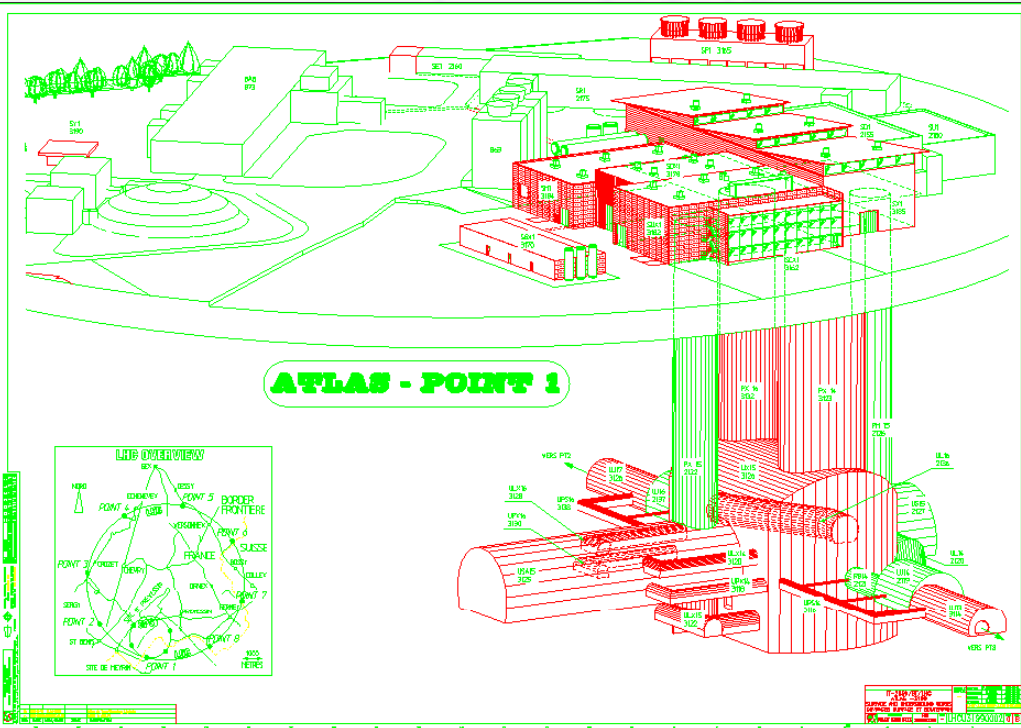
Myon-Detektor und Eisenrückflußjoch
Myon-Identifizierung/-impulsmessung

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



ATLAS unterirdische Kaverne

**Große Kaverne,
2 Materialschächte 18m + 12m Ø,
2 kleine Schächte für Fahrstühle + Treppen**



**Länge = 55 m
Breite = 32 m
Höhe = 35 m**

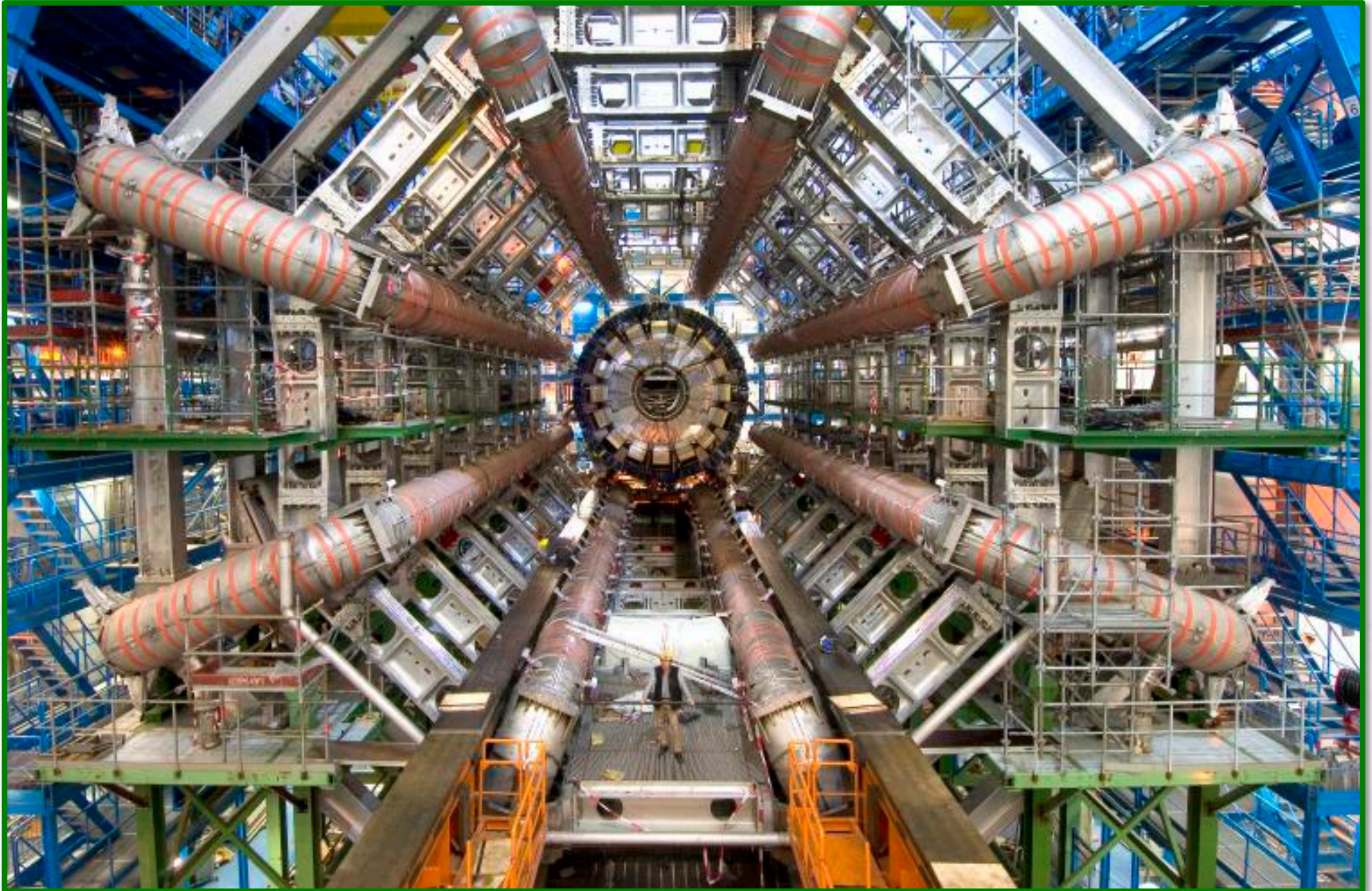
Beginn des ATLAS Detektoraufbaus



Transport und Absenkung der ersten supraleitenden Barrel Toroid Spule



ATLAS Barrel Toroid fertiggestellt (Nov 2005)



Detektortechnologie und Kunst

Bühnenbild der Oper "Les Troyens" in Valencia, Oktober 2009

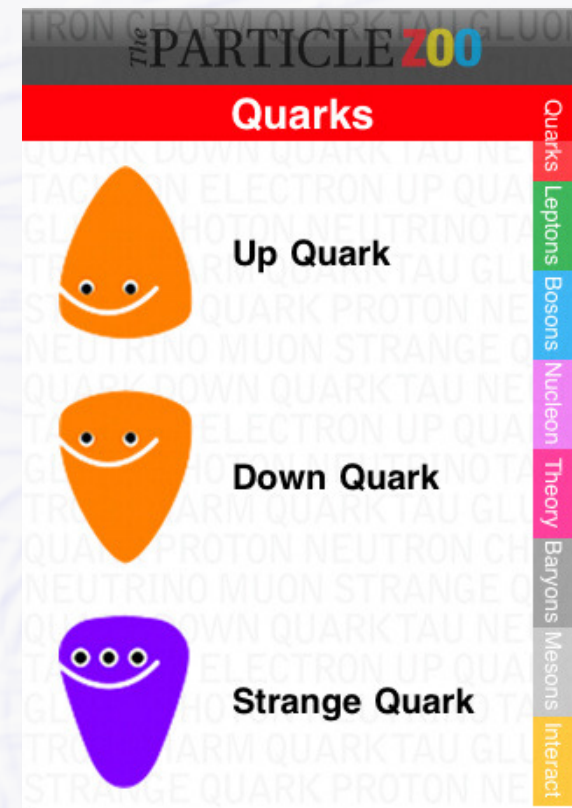
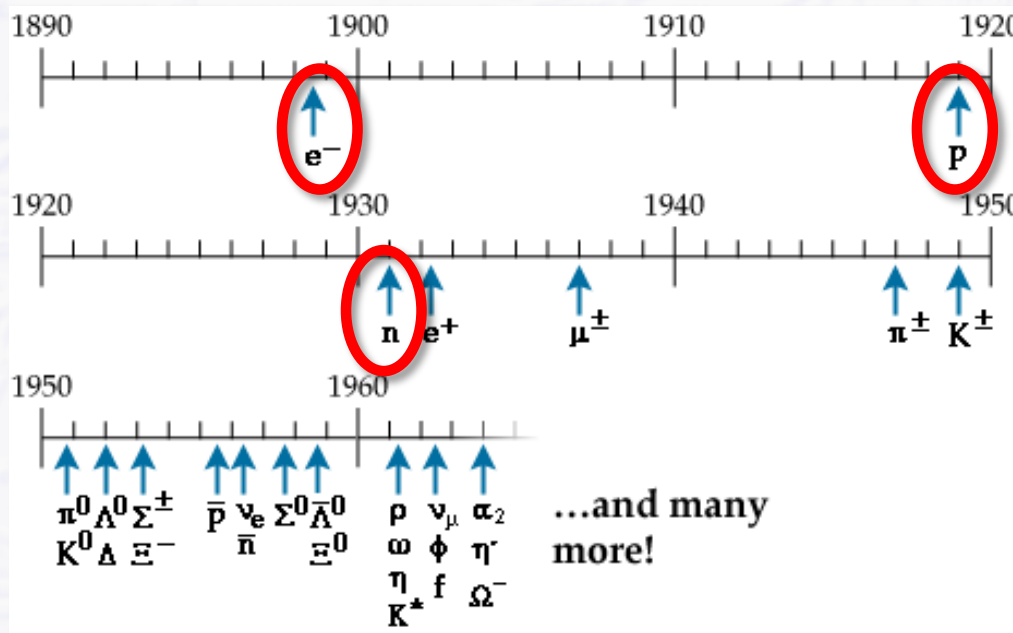


Teilchenphysik in den 1950...60ern

Viele neue Teilchen wurden entdeckt (“Teilchenzoo”)

→ möglich gemacht durch immer stärkere Beschleuniger

→ 1959: CERN Proton Synchrotron (noch heute in Betrieb)



Fundamentale Fragen

→ Was sind grundlegenden Bausteine der Materie? → **Quarktheorie (1964)**

→ Welche Kräfte wirken zwischen den Materieteilchen? → **Standardmodell**

→ Wie erhalten Teilchen ihre (verschiedene) Masse? → **Higgs (1964/2012)**

Das Standardmodell – Materie

Alle bekannte Materie besteht aus nur wenigen elementaren Teilchen

...aber in 3 verschiedenen Versionen ("Generationen")

...und für jedes Teilchen gibt es noch ein Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung

mit starker Wechselwirkung

ohne starke Wechselwirkung

Überschwere, sehr instabile Materie

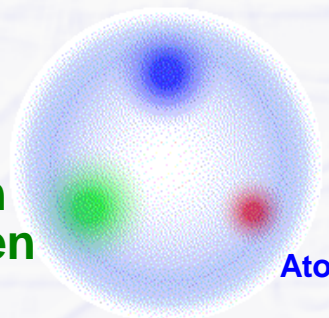
Schwere, instabile Materie

Normale, stabile Materie

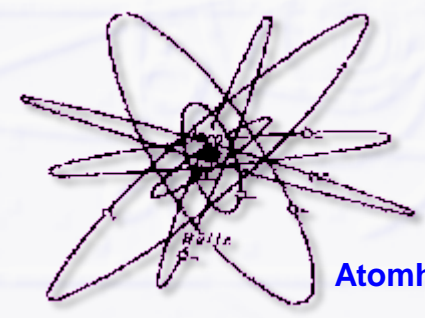
	Quarks		Leptonen	
Generation 3	t Top	b Bottom	τ Tau	ν_τ Tau-neutrino
Generation 2	c Charm	s Strange	μ Muon	ν_μ Muon-neutrino
Generation 1	u Up	d Down	e Electron	ν_e Electron-neutrino

WIR und alles, was wir um uns sehen!

Protonen
Neutronen



Atomkern



Atomhülle

Wechselwirkungen

● Austausch von Kräften zwischen (Anti-)Materie-Teilchen erfolgt durch 4 verschiedene Wechselwirkungen

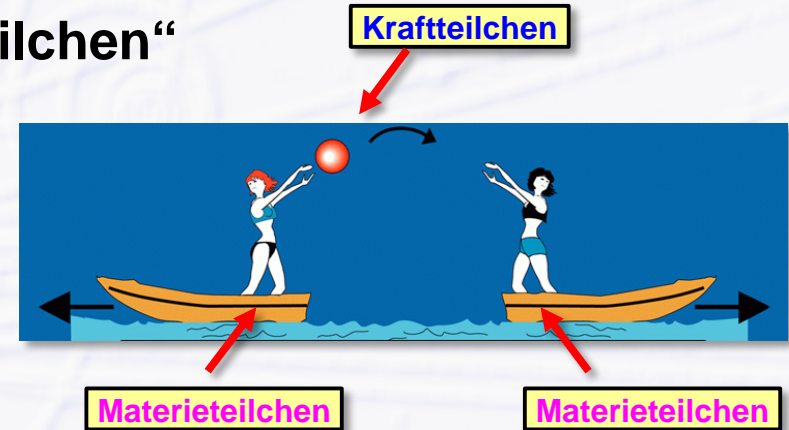
→ Vermittlung der Kräfte durch “Kraftteilchen“

→ **Kraftteilchen sind Bosonen**

- ganzzahliger Spin (Eigendrehimpuls in Einheiten von \hbar)

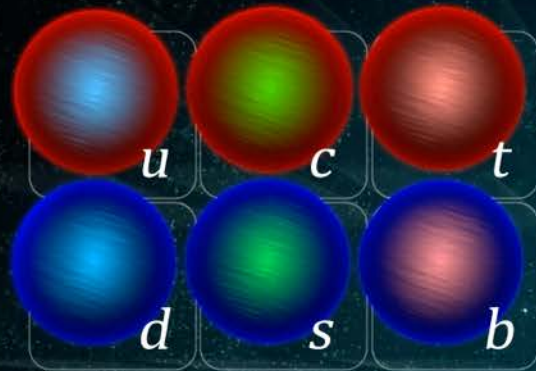
→ **Materieteilchen sind Fermionen**

- halbzahliger Spin

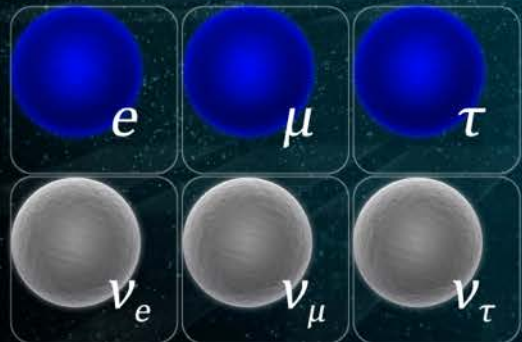


Wechselwirkung	relative Stärke	Reichweite	Kraftteilchen	Wirkung
stark	1	10^{-15} m	8 Gluonen	Kernkraft, Zusammenhalt von Protonen, Neutronen etc.
elektromagnetisch	10^{-2}	∞	Photon	Elektrizität, Magnetismus, Licht
schwach	10^{-5}	10^{-18} m	W^+ , W^- , Z^0	Radioaktivität, Zerfälle
Gravitation	10^{-38}	∞	“Graviton“	Schwerkraft

Das Standardmodell auf einen Blick



Quarks



Leptons



Higgs boson



Forces

Physikgeschichte 1964

● Drei wichtige Veröffentlichungen in der gleichen Ausgabe von Physical Review Letters 1964 über Erzeugung von Masse

- Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons
Francois **Englert** and Robert **Brout**
Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964), eingesendet 26. Juni 1964
- Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons
Peter W. **Higgs**
Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964), eingesendet 31. August 1964
- Global Conservation Laws and Massless Particles
Gerald S. **Guralnik**, Carl R. **Hagen**, and Thomas W. **Kibble**
Phys. Rev. Lett. 13, 585 (1964), eingesendet 12. Oktober 1964



Veröffentlichung von Higgs 1964 (1½ Seiten)

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson³ has drawn attention: that the scalar zero-mass excitations of a superconducting neutral Fermi gas become longitudinal plasmon modes of finite mass when the gas is charged.

The simplest theory which exhibits this behavior is a gauge-invariant version of a model used by Goldstone² himself: Two real⁴ scalar fields φ_1, φ_2 and a real vector field A_μ interact through the Lagrangian density

$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}, \quad (1)$$

where

$$\nabla_\mu \varphi_1 = \partial_\mu \varphi_1 - eA_\mu \varphi_2,$$

$$\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + eA_\mu \varphi_1,$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu.$$

e is a dimensionless coupling constant, and the metric is taken as $-+++$. L is invariant under simultaneous gauge transformations of the first kind on $\varphi_1 \pm i\varphi_2$ and of the second kind on A_μ . Let us suppose that $V'(\varphi_0^2) = 0$, $V''(\varphi_0^2) > 0$; then spontaneous breakdown of U(1) symmetry occurs. Consider the equations [derived from (1) by treating $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, and A_μ as small quantities] governing the propagation of small oscillations

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1), \\ G_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \quad (3)$$

into the form

$$\partial_\mu B^\mu = 0, \quad \partial_\nu G^{\mu\nu} + e^2 \varphi_0^2 B^\mu = 0. \quad (4)$$

Equation (4) describes vector waves whose quanta have (bare) mass $e\varphi_0$. In the absence of the gauge field coupling ($e = 0$) the situation is quite different: Equations (2a) and (2c) describe zero-mass scalar and vector bosons, respectively. In passing, we note that the right-hand side of (2c) is just the linear approximation to the conserved current: It is linear in the vector potential, gauge invariance being maintained by the presence of the gradient term.⁵

When one considers theoretical models in which spontaneous breakdown of symmetry under a semisimple group occurs, one encounters a variety of possible situations corresponding to the various distinct irreducible representations to which the scalar fields may belong; the gauge field always belongs to the adjoint representation.⁶ The model of the most immediate interest is that in which the scalar fields form an octet under SU(3): Here one finds the possibility of two nonvanishing vacuum expectation values, which may be chosen to be the two $Y = 0$, $I_3 = 0$ members of the octet.⁷ There are two massive scalar bosons with just these quantum numbers; the remaining six components of the scalar octet combine with the corresponding components of the gauge-field octet to describe

massive vector bosons. There are two $I = \frac{1}{2}$ vector doublets, degenerate in mass between $Y = \pm 1$ but with an electromagnetic mass splitting between $I_3 = \pm \frac{1}{2}$, and the $I_3 = \pm 1$ components of a $Y = 0$, $I = 1$ triplet whose mass is entirely electromagnetic. The two $Y = 0$, $I = 0$ gauge fields remain massless: This is associated with the residual unbroken symmetry under the Abelian group generated by Y and I_3 . It may be expected that when a further mechanism (presumably related to the weak interactions) is introduced in order to break Y conservation, one of these gauge fields will acquire mass, leaving the photon as the only massless vector particle. A detailed discussion of these questions will be presented elsewhere.

It is worth noting that an essential feature of the type of theory which has been described in this note is the prediction of incomplete multiplets of scalar and vector bosons.⁸ It is to be expected that this feature will appear also in theories in which the symmetry-breaking scalar fields are not elementary dynamic variables but bilinear combinations of Fermi fields.⁹

¹P. W. Higgs, to be published.

²J. Goldstone, Nuovo Cimento **19**, 154 (1961);

J. Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, Phys. Rev. **127**, 965 (1962).

³P. W. Anderson, Phys. Rev. **130**, 439 (1963).

⁴In the present note the model is discussed mainly in classical terms; nothing is proved about the quantized theory. It should be understood, therefore, that the conclusions which are presented concerning the masses of particles are conjectures based on the quantization of linearized classical field equations. However, essentially the same conclusions have been reached independently by F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Letters **13**, 321 (1964): These authors discuss the same model quantum mechanically in lowest order perturbation theory about the self-consistent vacuum.

⁵In the theory of superconductivity such a term arises from collective excitations of the Fermi gas.

⁶See, for example, S. L. Glashow and M. Gell-Mann, Ann. Phys. (N. Y.) **15**, 437 (1961).

⁷These are just the parameters which, if the scalar octet interacts with baryons and mesons, lead to the Gell-Mann-Okubo and electromagnetic mass splittings: See S. Coleman and S. L. Glashow, Phys. Rev. **134**, B671 (1964).

⁸Tentative proposals that incomplete SU(3) octets of scalar particles exist have been made by a number of people. Such a rôle, as an isolated $Y = \pm 1$, $I = \frac{1}{2}$ state, was proposed for the κ meson (725 MeV) by Y. Nambu and J. J. Sakurai, Phys. Rev. Letters **11**, 42 (1963). More recently the possibility that the σ meson (385 MeV) may be the $Y = I = 0$ member of an incomplete octet has been considered by L. M. Brown, Phys. Rev. Letters **13**, 42 (1964).

⁹In the theory of superconductivity the scalar fields are associated with fermion pairs; the doubly charged excitation responsible for the quantization of magnetic flux is then the surviving member of a U(1) doublet.

➡ erste Version abgelehnt

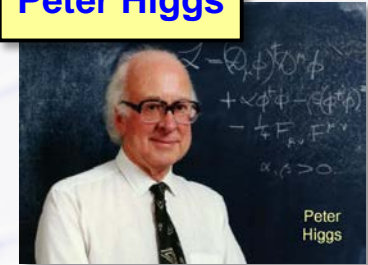
- Gutachter war Yoichiro Nambu, der vorschlug, einen Abschnitt über die Auswirkungen der Theorie hinzuzufügen
- Higgs ergänzte, daß die Anregung des Feldes zu einem neuen Teilchen führen würde...

➡ ...getauft "Higgs boson"

- durch Theoretiker Ben Lee auf der Rochester Konferenz 1966

Higgs-Mechanismus

Peter Higgs



Das Standardmodell ist (war) fast komplett

→ alle Materie- und Kraftteilchen wurden gefunden

- zuletzt: top-quark (1995), tau-neutrino (2000)

→ **aber: alle Teilchen haben im Standardmodell keine Masse**

Idee von Peter Higgs (1964) und anderen

→ **Das Vakuum ist nie leer, sondern immer erfüllt mit einem Higgs-Feld**

- Higgs-Feld ähnlich elektrischem Feld oder Magnetfeld

→ **Das Higgs-Feld existiert überall im gesamten Universum**

- **zunächst masselose Teilchen wechselwirken ständig mit dem Higgs-Feld**

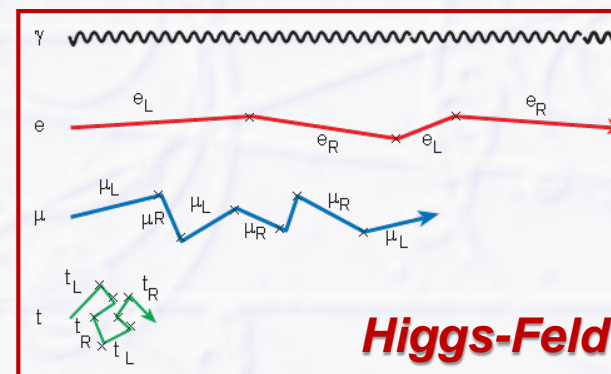
- **Wechselwirkung verursacht "Trägheit" = Teilchen erhält träge Masse**

keine Masse: Photon

geringe Masse: Elektron

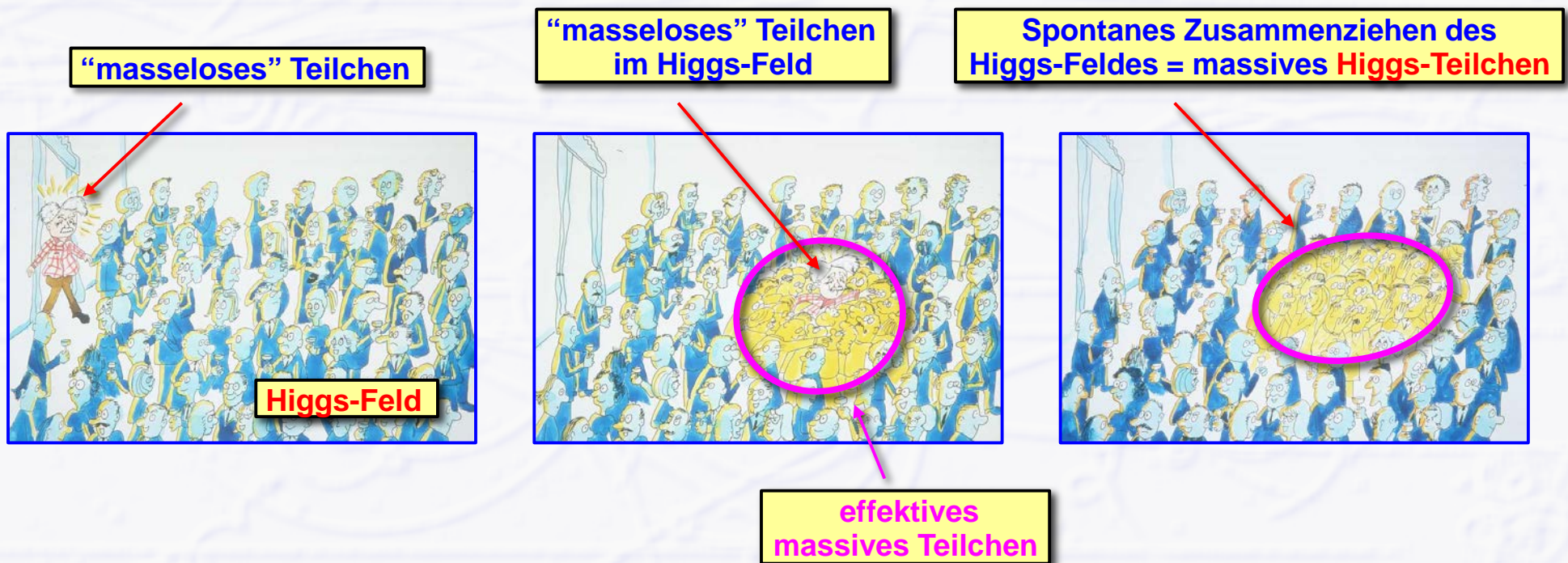
mittelschwere Masse: Myon

sehr schwere Masse: Top-Quark



Higgs-Feld \rightarrow Higgs-Teilchen

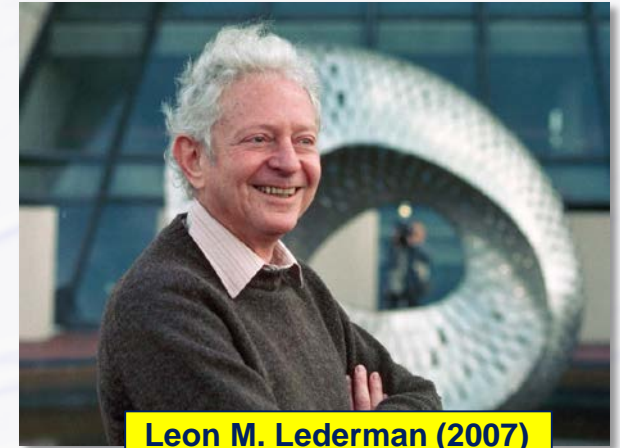
- **Dave Miller (UC London) 1993 zum damaligen britischen Wissenschaftsminister auf dessen Frage zur Bedeutung des Higgs-Teilchens**
 - ...und warum er dafür Steuergelder ausgeben sollte
 - ➔ **Vergleich mit politischer Partei (Parteimitglieder = Higgs-Feld) und dem plötzlichen Auftreten der Parteivorsitzenden (masseloses Teilchen)**



“Das Gottesteilchen”

● “erfunden” von Leon M. Lederman

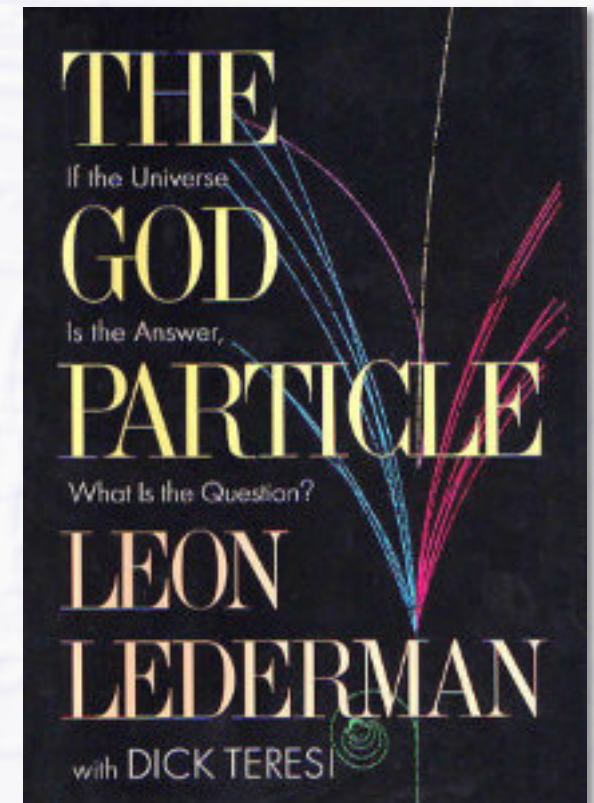
- geboren 1922, früherer Fermilab Direktor
- Nobelpreis 1988 (mit Melvin Schwartz und Jack Steinberger) für die Entdeckung des Myon Neutrinos 1962



● Lederman schrieb 1993 ein Buch über Teilchenphysik und das Higgs Boson (mit Wissenschaftsjournalist Dick Teresi)

- und gab dem Higgs Boson den Spitznamen **“Das Gottesteilchen”**

- weil das Teilchen "so central to the state of physics today, so crucial to our final understanding of the structure of matter, yet so elusive"
- und weil "the publisher wouldn't let us call it the **Goddamn Particle**, though that might be a more appropriate title, given its villainous nature and the expense it is causing."



“Erstes Higgs” am LHC (4. April 2008)



LHC Start – 10. September 2008



Größtes Medienevent in der Geschichte der Wissenschaft

- Top News weltweit (keine weiteren Katastrophen, Politikevents etc.)
- Eurovision live satellite feed von 9:00-18:00 + Webcast
 - 2500 TV Ausstrahlungen
 - mehrere hundert Millionen Zuschauer
- 260 akkreditierte Journalisten
 - 5800 Presseartikel
- 100 Millionen Hits auf den CERN Webseiten



CERN Control Centre (LHC Kontrollraum)



LHC Start in deutschen Medien

DAS GRÖSSTE EXPERIMENT ALLER ZEITEN

Ab heute urknallt's

Frankfurter Allgemeine
ZEITUNG FÜR DEUTSCHLAND

1.794 € 2008/4 K.A.Z. im Internet-Nachdruck

Jetzt geht es rund

Das Forschungszentrum Cern nimmt heute der größte Teilchenbeschleuniger der Welt den Betrieb auf



Das Streiflicht
Die LHC-Partikel werden heute zum ersten Mal im Uhrzeigersinn durch den 27 Kilometer langen Teilchenbeschleuniger geleitet. Die Teilchen werden dabei auf eine Geschwindigkeit von fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die Teilchen werden dabei auf eine Geschwindigkeit von fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die Teilchen werden dabei auf eine Geschwindigkeit von fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

„Ich muss gar nichts“: Warum Nicolas Hayek Aktionäre ignoriert / Wirtschaft

Süddeutsche Zeitung

NEUESTE NACHRICHTEN AUS POLITIK, KULTUR, WIRTSCHAFT UND SPORT

München, Donnerstag, 11. September 2008

Das größte Experiment der Menschheit



Die Urknall-Maschine läuft
Das Weltwunder der Teilchenphysik hat heute den ersten Teilchenbeschleuniger der Welt in Betrieb genommen. Die Teilchen werden dabei auf eine Geschwindigkeit von fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die Teilchen werden dabei auf eine Geschwindigkeit von fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

Karlsruhe uneinig
Verfassungsrichter beraten über Pendlereinschleife

Bedienungschiff bleibt vielen Senioren erspart

Verschwinden wir in einem schwarzen Loch?

Nicht Dritter
Vorbericht: Kuhn




Zertrümmern und Erkennen

Die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“

DER SPIEGEL

Die Sekunde Null



KulturSPIEGEL

Die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“

DER TAGESSPIEGEL

Die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“

Ikone des Behindertensports: Marianne Buggenhagen gewinnt mit 55 Jahren Gold – Seite 19

Zurück im Job: Wie sieben Berliner wieder Arbeit fanden – Seite 11

Auf ewig mit Stil: Karl Lagerfeld feiert 75. Geburtstag – Seite 28

Supermaschine am Start

Berlin: Rot-Rot ohne Opposition



Die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“

Der LHC Unfall – 19. September 2008

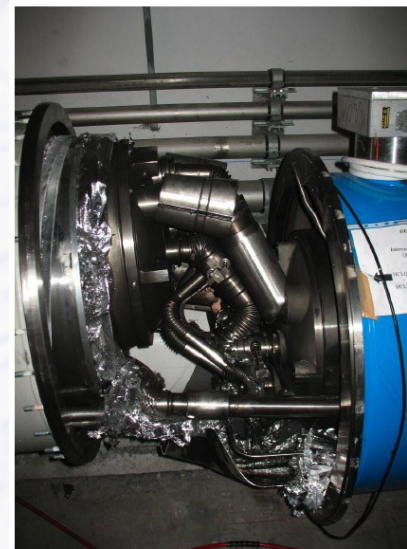
● Aufschmelzen einer schlechten Stromverbindung (13'000 A)

- sehr heisser elektrischer Lichtbogen
- Zerstörung der unmittelbaren Umgebung
- ➔ + Heliumgas Druckwelle
- weitere mechanische Verschiebungen über 700 m Strecke

● Reparatur über mehr als 1 Jahr

- Entdeckung weiterer Schwachstellen, die mehr Zeit benötigt hätten
- ➔ Entscheidung 2009: LHC Betrieb vorerst nur bei $\sim 1/2$ **Energie** von 2010-12
- danach lange Instandsetzungsphase 2013-14

● **Volle Energie ab 2015**



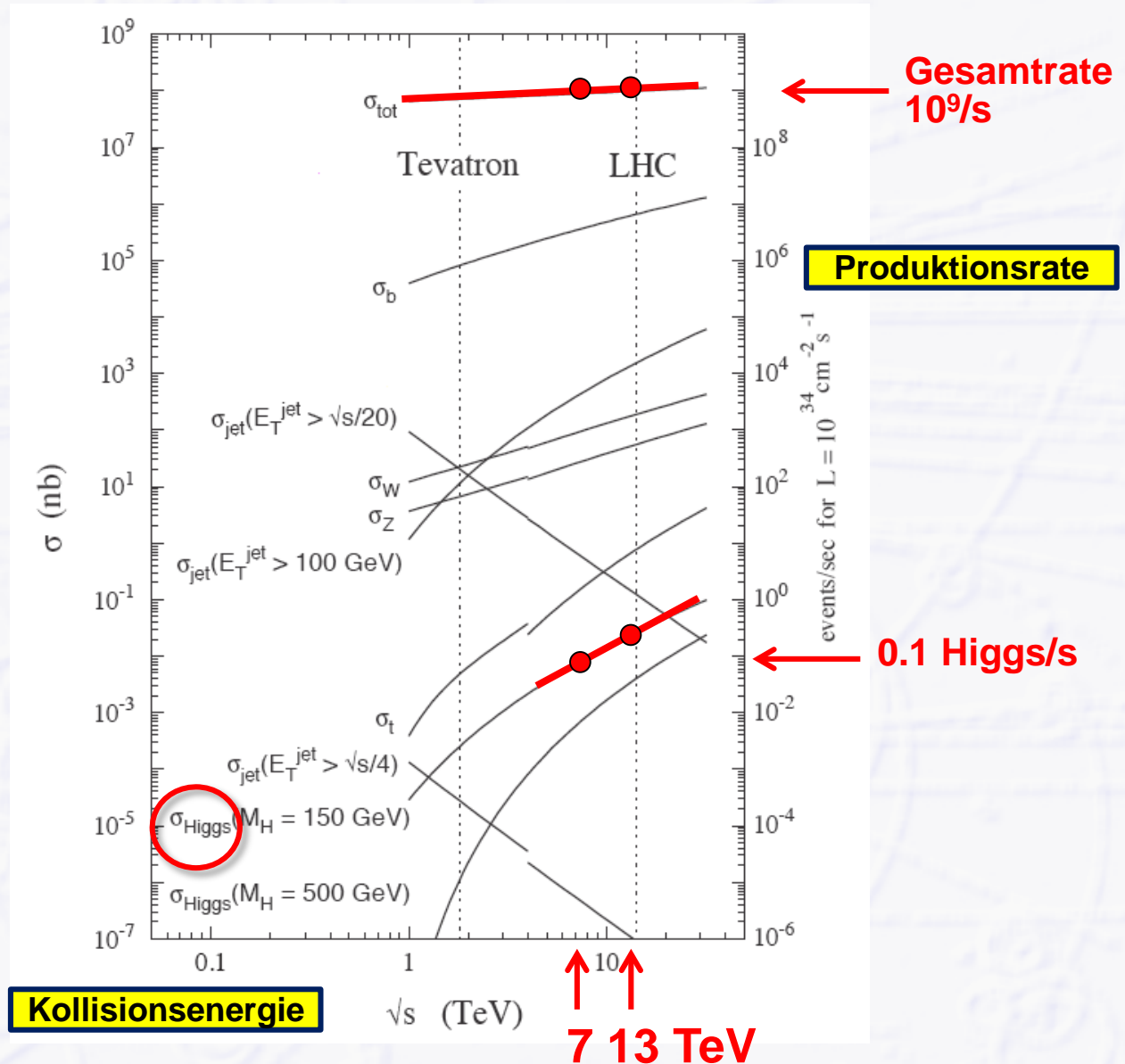
Erste LHC Kollisionen bei hoher Energie

ATLAS Kontrollraum



Higgs Produktionsrate am LHC

- **Produktionsrate:**
~100 Higgs-Teilchen pro Stunde
- 2010 - 2012 wurden ca. **300'000 Higgs-Teilchen** bei ATLAS produziert
- **ABER: Higgs-Teilchen zerfallen sofort nach der Erzeugung**
 - nur wenige (seltene) Zerfallskanäle eignen sich zum Nachweis
- **nur ~1'000 Higgs-Teilchen** wurden nachgewiesen



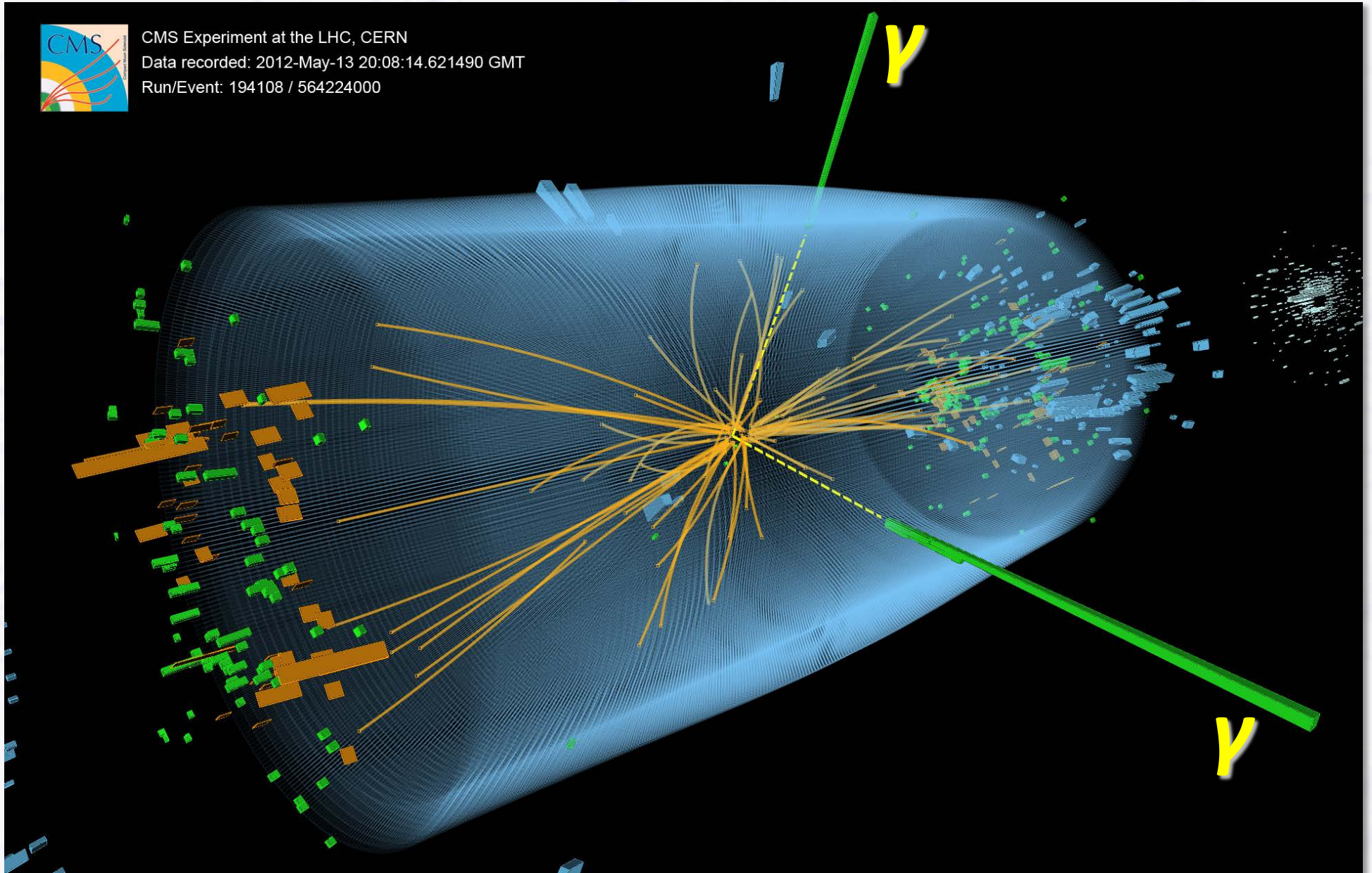
Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012



Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



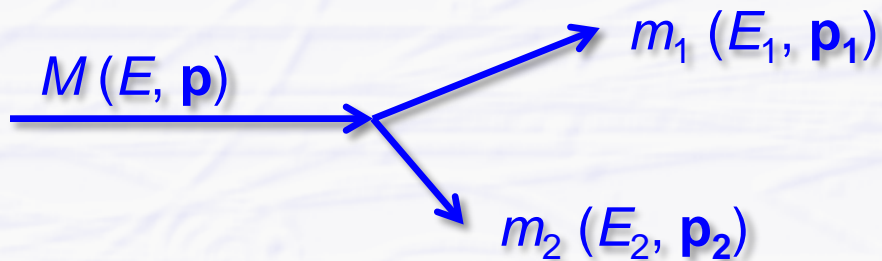
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Wie misst man Teilchenmassen?

- Die Ruhemasse M eines Teilchens ist konstant in allen Bezugssystemen (= **“invariante Masse”**)

→ Beim Zerfall des Teilchens bleibt die invariante Masse des Systems der Tochterteilchen erhalten



Invariante Masse

$$\begin{aligned}
 M^2 &= (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\|^2 \\
 &= m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2)
 \end{aligned}$$

- Spezialfall: masselose Tochterteilchen**

→ z.B. Higgszerfall in 2 Photonen: $H \rightarrow \gamma \gamma$

$$\begin{aligned}
 M^2 &= (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\|^2 \\
 &= [(p_1, 0, 0, p_1) + (p_2, 0, p_2 \sin \theta, p_2 \cos \theta)]^2 = (p_1 + p_2)^2 - p_2^2 \sin^2 \theta - (p_1 + p_2 \cos \theta)^2 \\
 &= \boxed{2p_1 p_2 (1 - \cos \theta)}
 \end{aligned}$$

- Messung der Higgsmasse aus Photonimpulsen + Winkel**

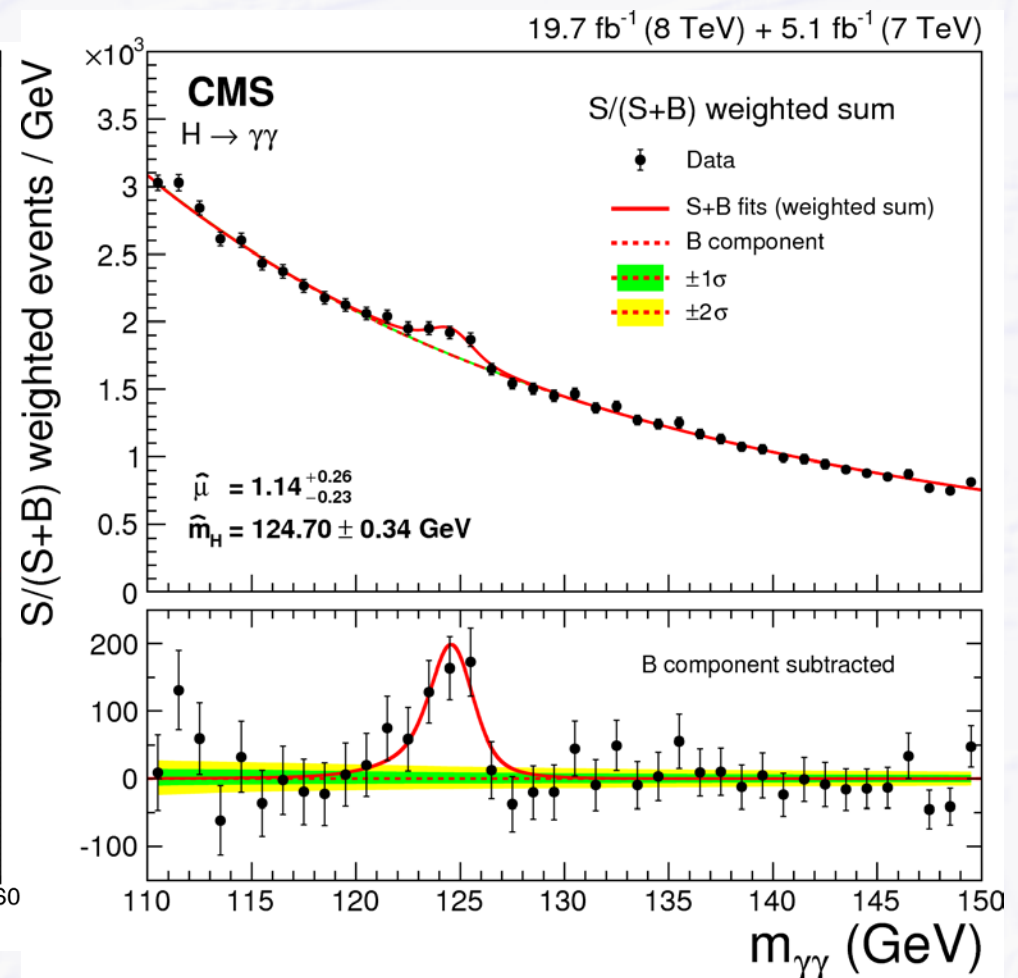
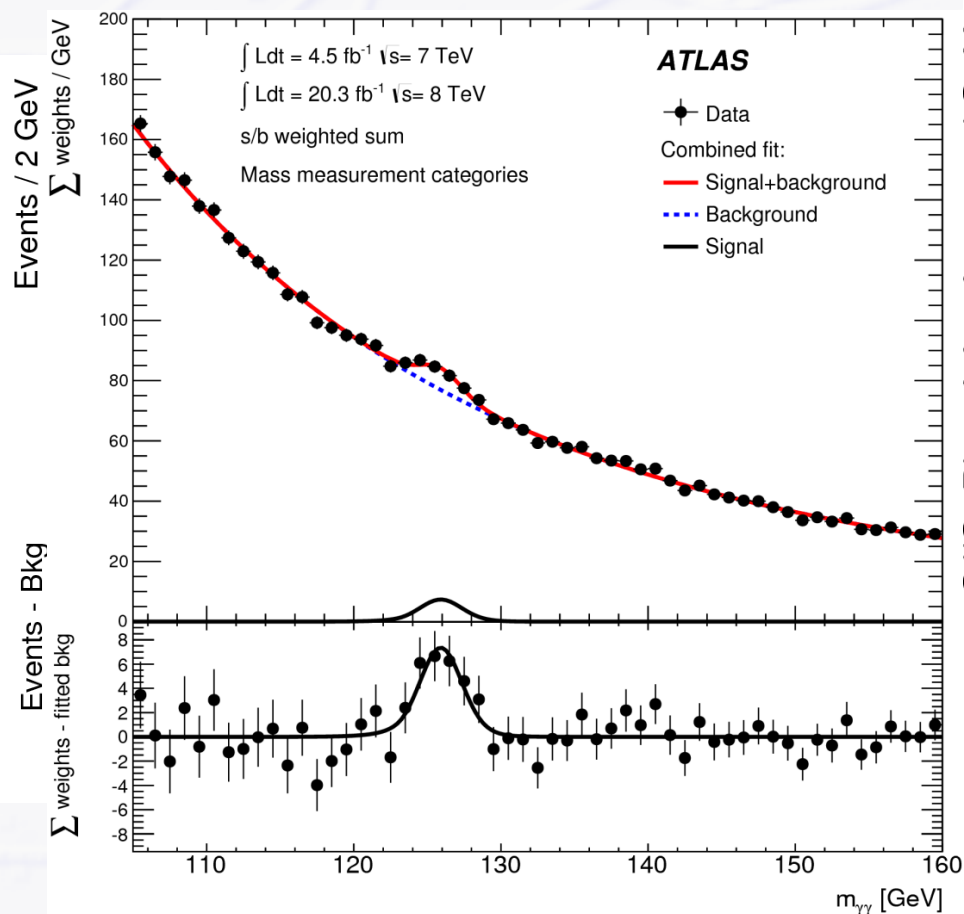
$H \rightarrow \gamma\gamma$

● **Bester Zerfallskanal für $M_H < 120$ GeV**

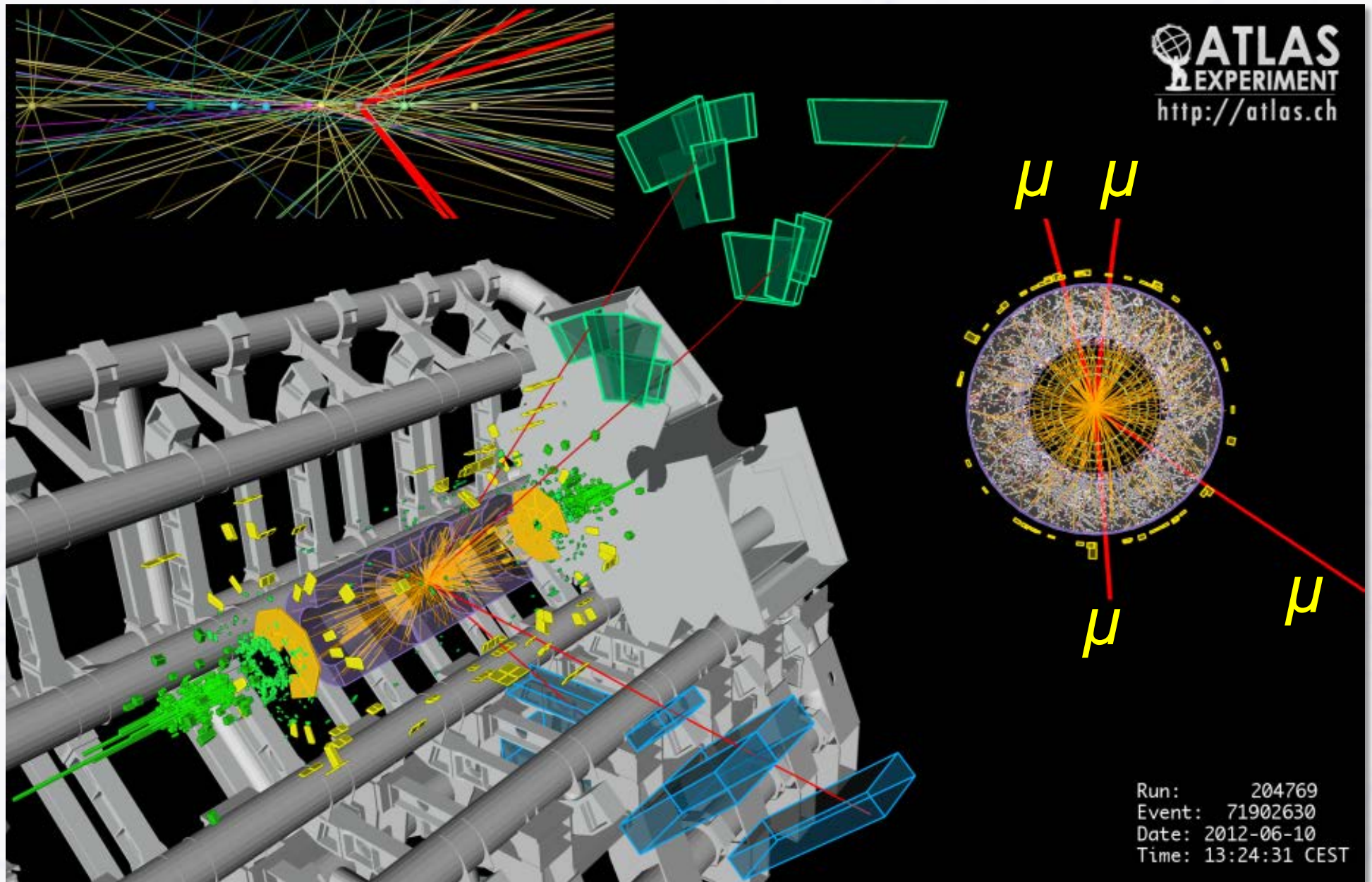
➔ **zweitbester Zerfallskanal für $120 < M_H < 130$ GeV**

● **Trotzdem nur kleines Signal über großem Untergrund**

Stand: 16. Juni 2014



Higgs Zerfall $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

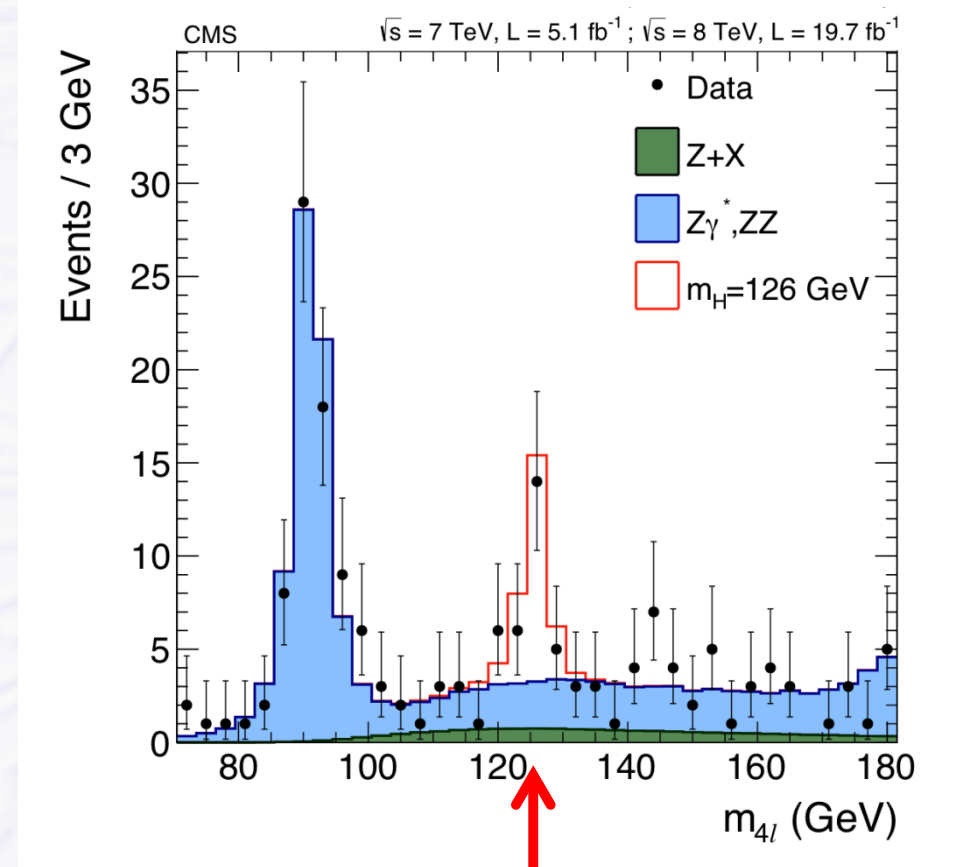
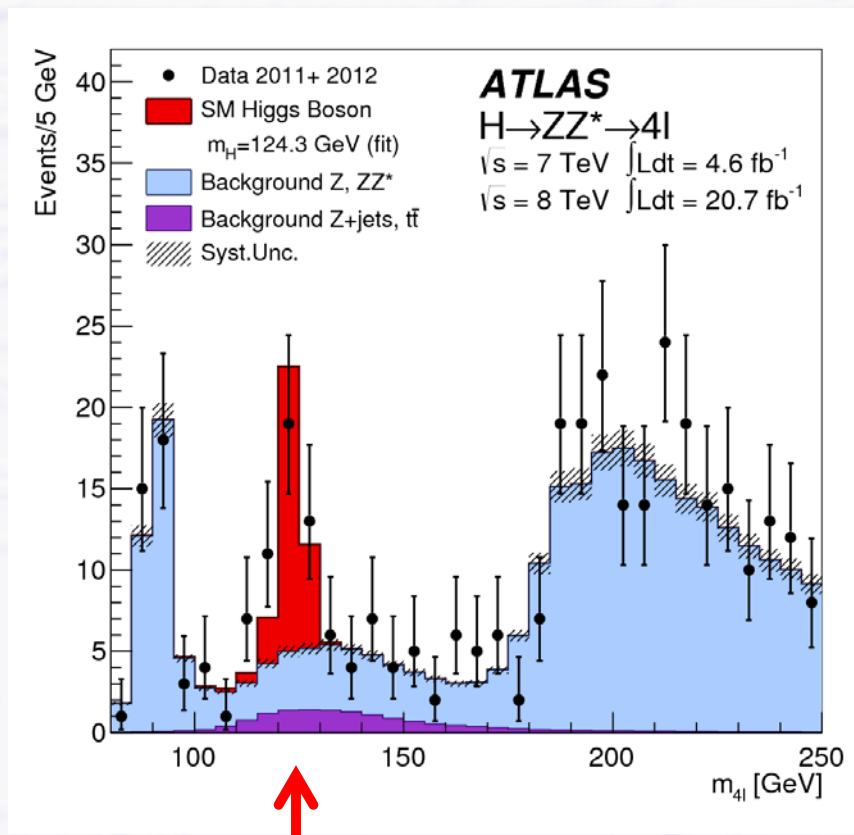


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Leptons}$

● "Goldener Zerfallskanal"

- praktisch "kein" Untergrund
- bester Zerfallskanal für $200 \text{ GeV} < M_H < 300 \text{ GeV}$
- zweitbeste Zerfallskanal (nach WW) für $130 \text{ GeV} < M_H < 200 \text{ GeV}$
- ➔ aber sehr viel bessere Massenauflösung als WW

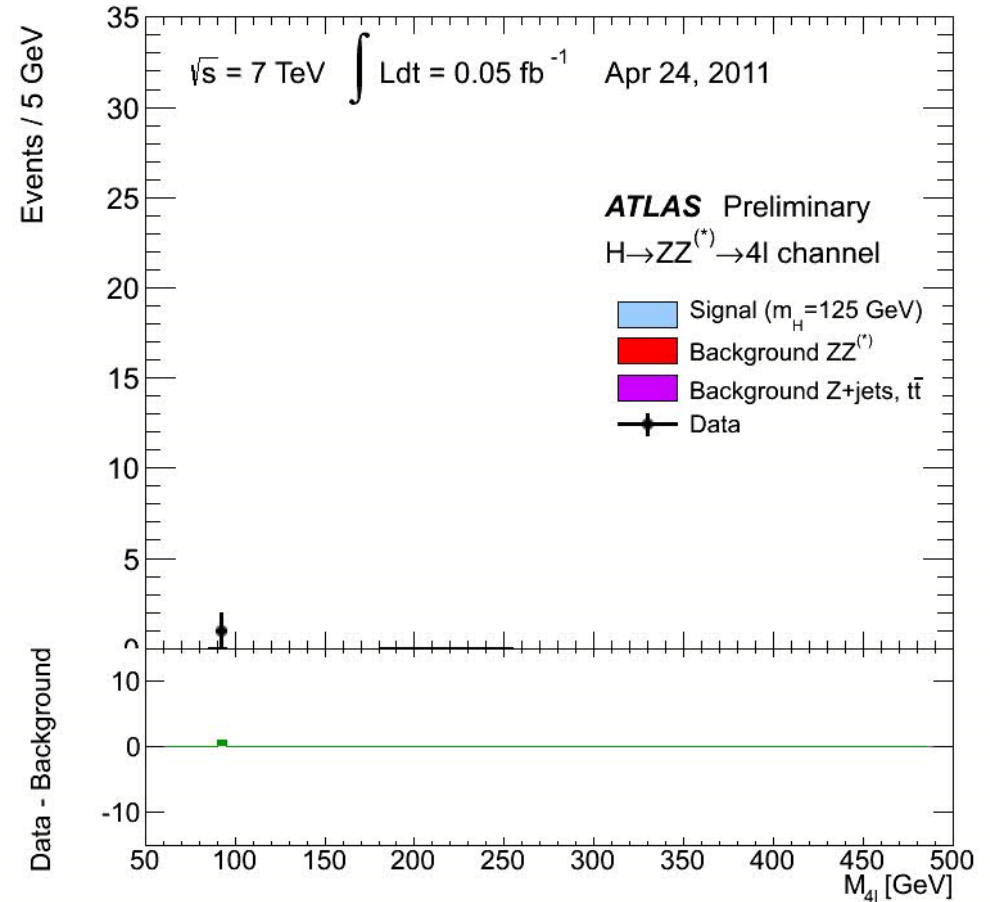
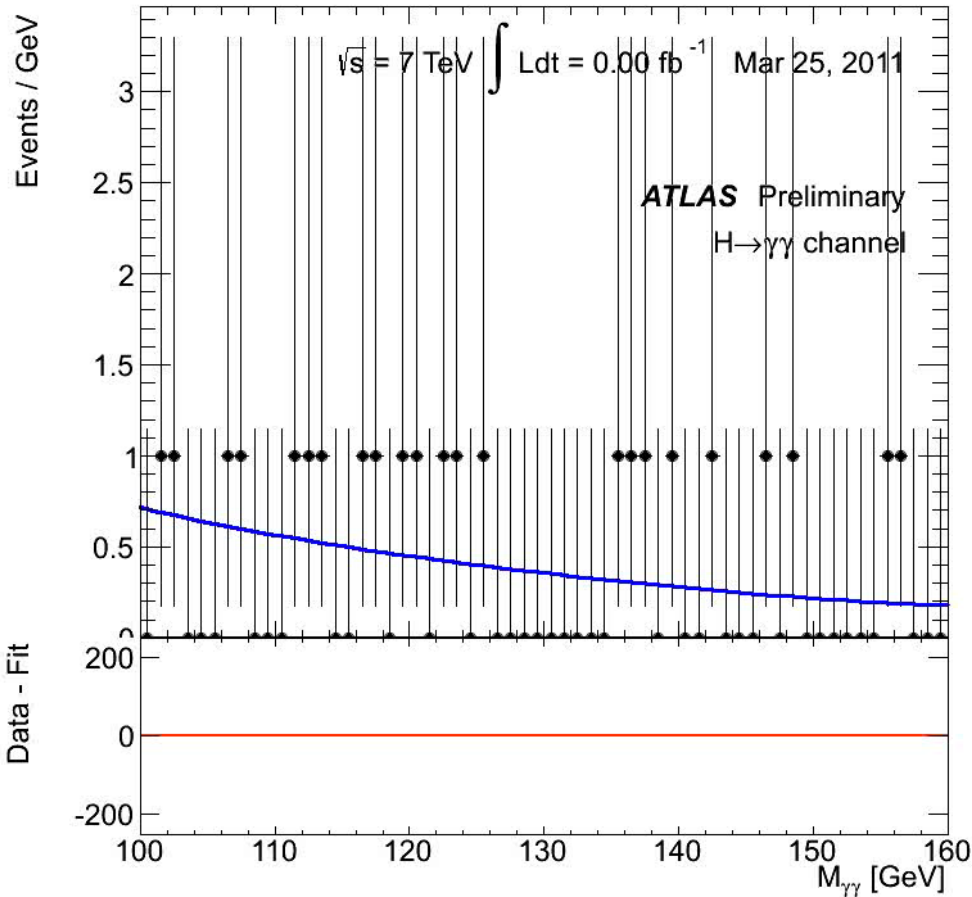
Stand: 16. Juni 2014



Higgs Signifikanz wächst mit der Zeit...

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow 4l$

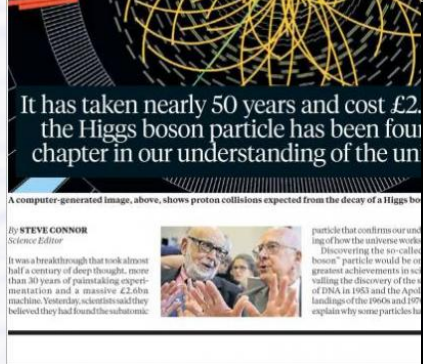
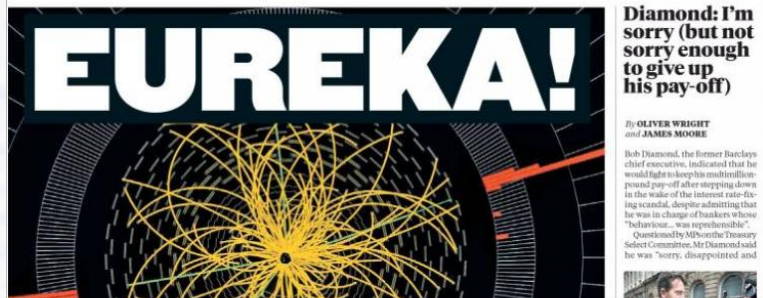


Higgs hier

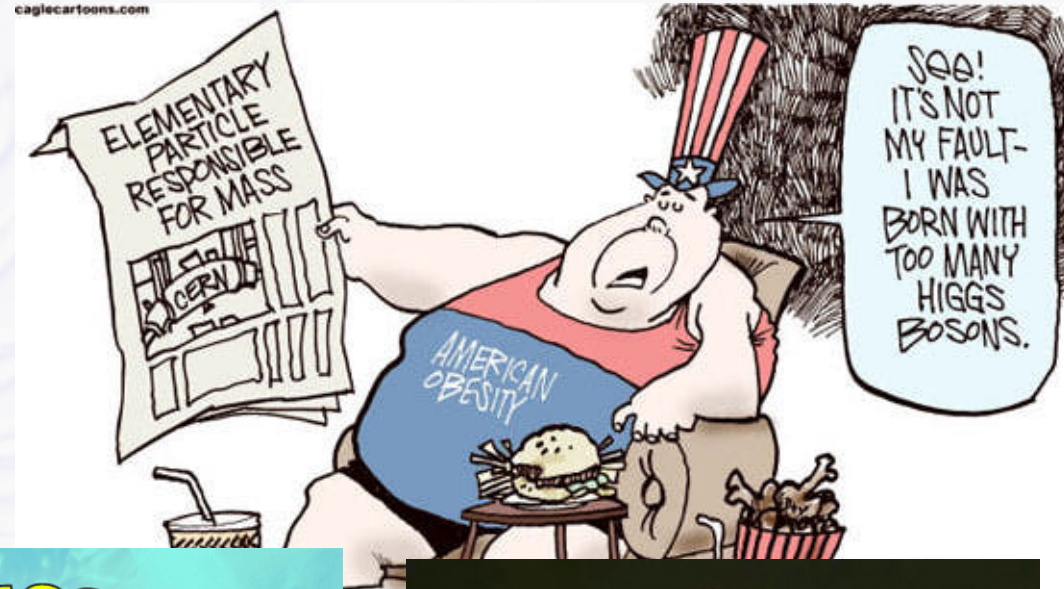
Alle Daten von 2011 + 2012

Higgs hier

Higgs in den Medien



Higgs wird Allgemeingut...



YOU ARE THE HIGGS BOSON OF MY LIFE

BECAUSE WITHOUT YOU MY UNIVERSE WOULDN'T "MATTER"

GAIN MASS FAST!



HIGGS BOSON PILLS™

CLICK HERE!!1!

WARNING: TAKING TOO MUCH OF THESE PILLS MAY TURN YOU INTO A BLACK HOLE

© FROGSICLE.COM

SAY GOD PARTICLE

ONE MORE GODDAMN TIME

Nach der Entdeckung

- Entdeckung ist nur der Anfang...

- Weitere Messungen nötig

- **Masse**

- wichtig für die „Stabilität des Universums“

- **Signalstärken** der Zerfälle in Vektorbosonen und Fermionen

- zerfällt das Teilchen wie im Standardmodell vorhergesagt (Signalstärke = 1)?
- oder gibt es Abweichungen → kein Standardmodell-Higgs?

- **Spin (und Parität = Symmetrieverhalten bei Raumspiegelung)**

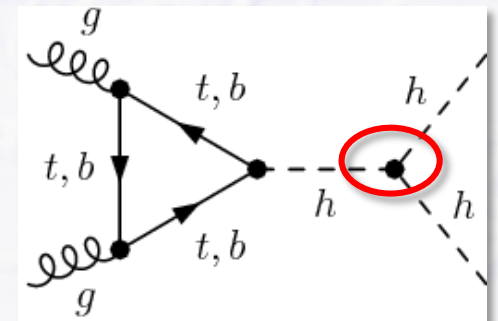
- Higgs-Feld ist ein **skalares Feld**
- → Higgs-Teilchen muss Spin 0 haben (und positive Parität)

- **Kopplungskonstanten** an Vektorbosonen und Fermionen

- sind die Kopplungen proportional zu den Teilchenmassen?

- der “heilige Gral”: Higgs “**Selbstwechselwirkung**”

- in ferner Zukunft...
- braucht seeeehr vieeeele Daten (~2035?)



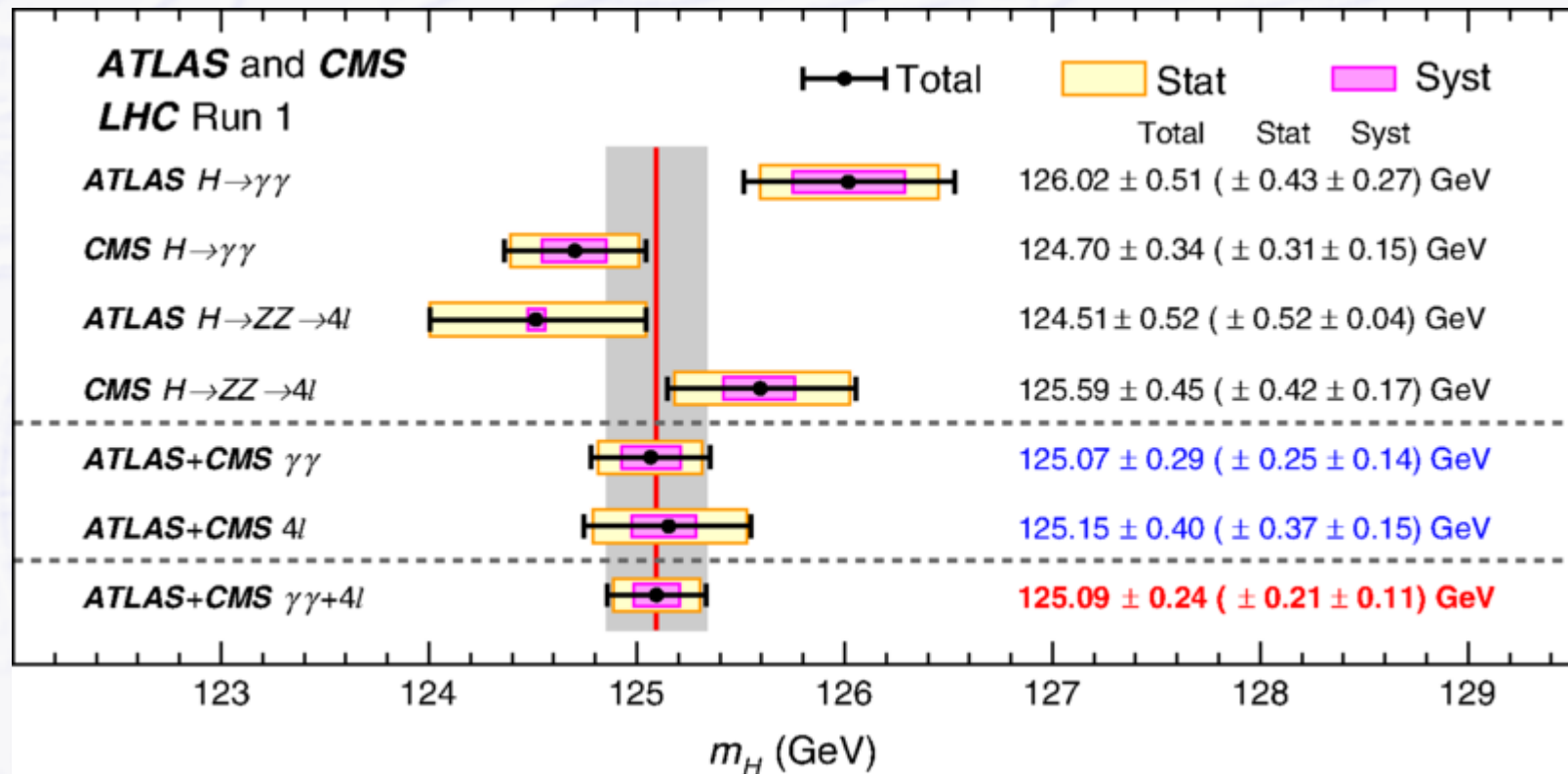
Higgs Masse

Higgs-Masse = freier Parameter im Standardmodell

- o muss so genau wie möglich gemessen werden (keine Vorhersage der Theorie)

→ Kombinierte Messung von ATLAS und CMS (Mai 2015)

- o verwendet Zerfallskanäle mit der besten Massenauflösung: $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



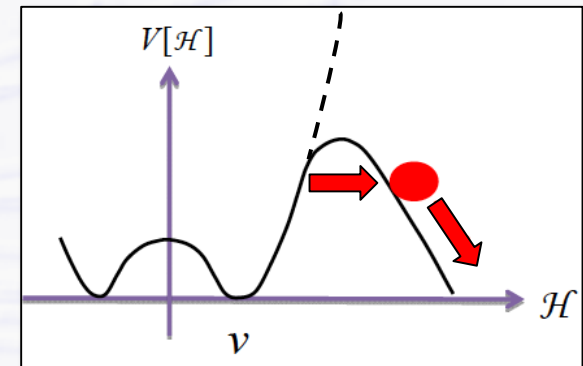
→ Messunsicherheit nur **0.19%(!)**



Stabilität des Vakuums

● Ist das Vakuum (= unser Universum) stabil?

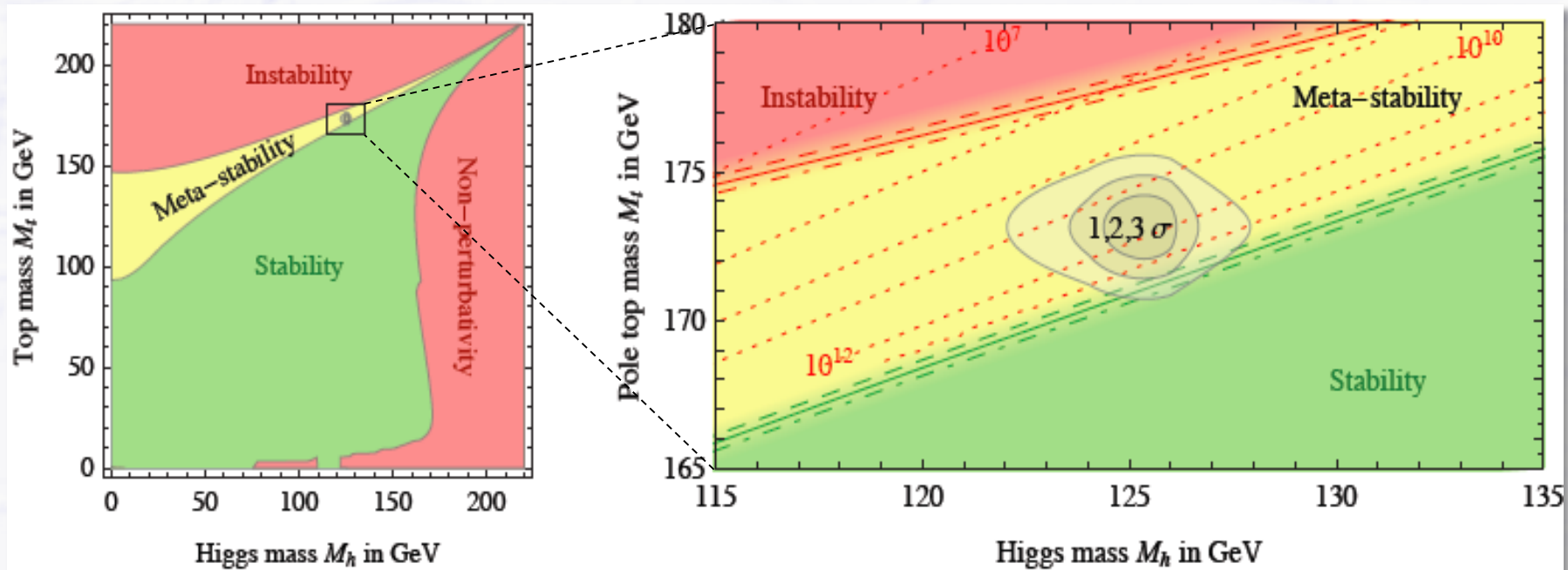
- entspricht die Vakuumenergie (durch das Higgs-Feld) nur einem lokalen Minimum des Higgs-Potentials?
- gibt es evtl. einen Zustand geringerer Energie?
- könnte das Vakuum zu diesem Zustand durchtunneln?



→ hängt ab von Top- und **Higgs-Masse**

→ Vorläufiges Ergebnis: Das Vakuum ist **meta-stabil**

- Aber: **Durchtunnelzeit** im Bereich von **10^{100} Jahren...**

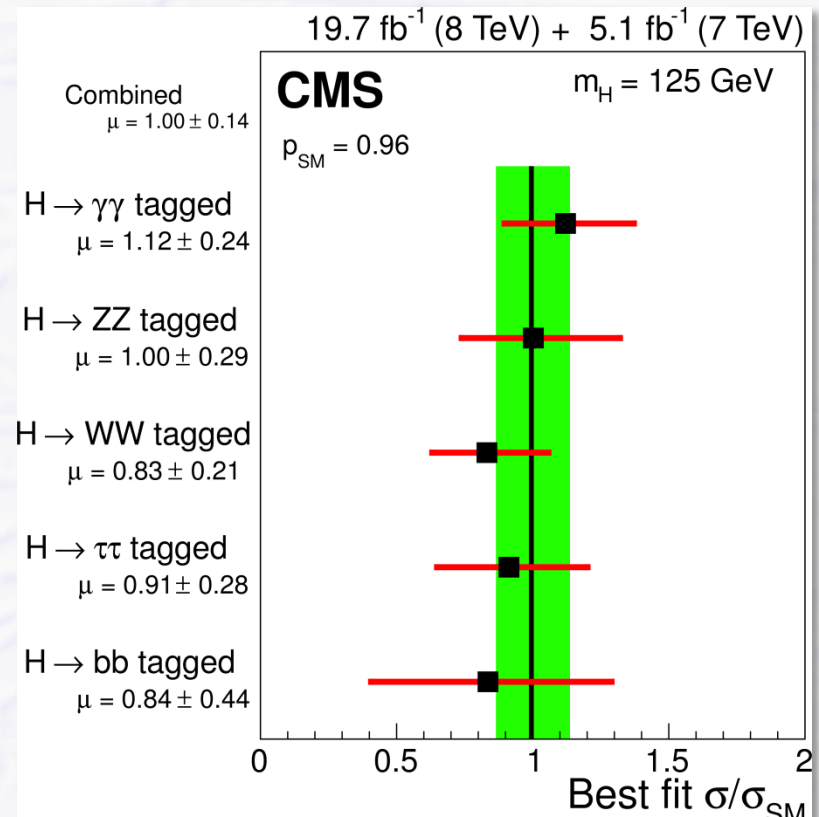
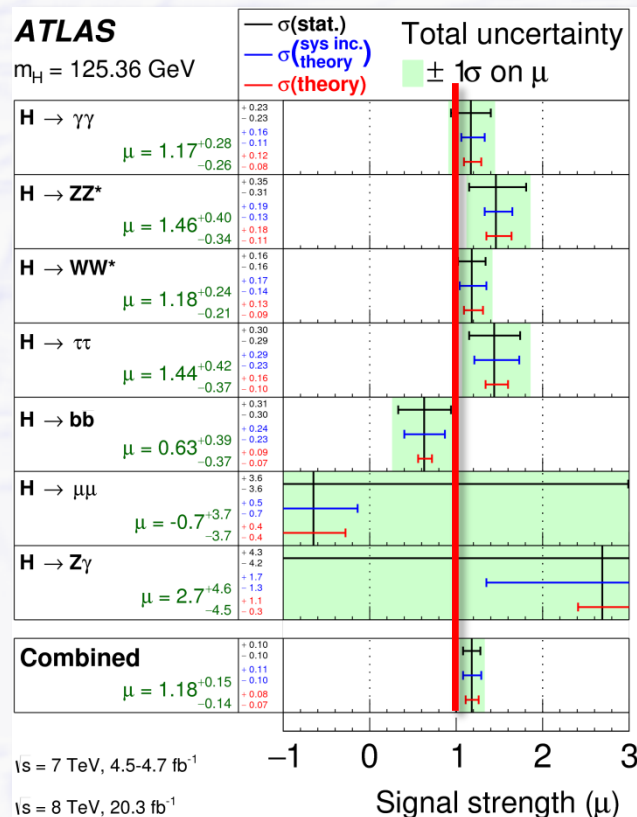


Standardmodell Higgs?

- Signalstärken der gemessenen Zerfallskanäle passen zur Vorhersage für ein **Standardmodell Higgs** (aber noch nicht 100% sicher), Masse ist konsistent zwischen ATLAS und CMS

→ **ATLAS:** $\sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.18 \pm 0.15$, $m_{\text{H}} = 125.36 \pm 0.37$ (stat.) ± 0.18 (sys.)

→ **CMS:** $\sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.00 \pm 0.14$, $m_{\text{H}} = 125.02 \pm 0.27$ (stat.) ± 0.15 (sys.)



Spin und Parität?

→ **Spin** = Eigendrehimpuls (in Einheiten von $\hbar = \frac{h}{2\pi}$)

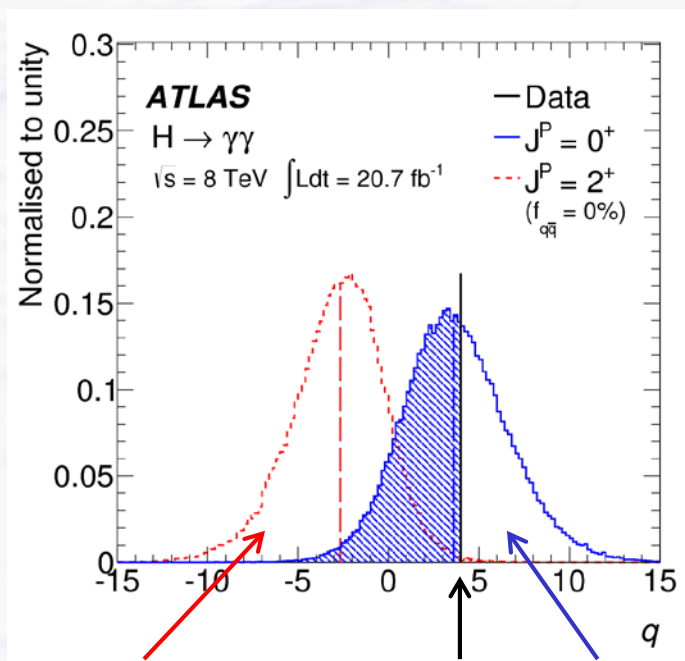
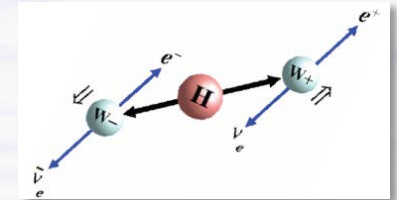
→ **Parität** = Symmetrieverhalten der Wellenfunktion bei Raumspiegelung

◦ echter Skalar = "+"; Pseudoskalar = "-", z.B. Skalarprodukt aus 3 Vektoren: $\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c})$

● **Neues Teilchen zerfällt in Photonen → Spin muss 0 oder 2 sein**

→ möglich: $0^-, 0^+, 2^-, 2^+$ (+ oder - entspricht Parität)

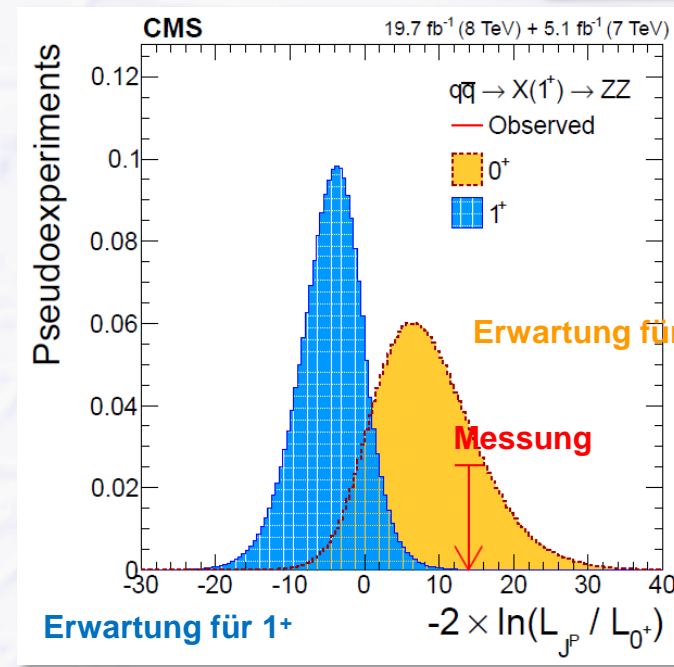
→ **Messung aus Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte**



Erwartung für 2^+

Messung

Erwartung für 0^+



Higgs und Massenerzeugung?

Erwartung:

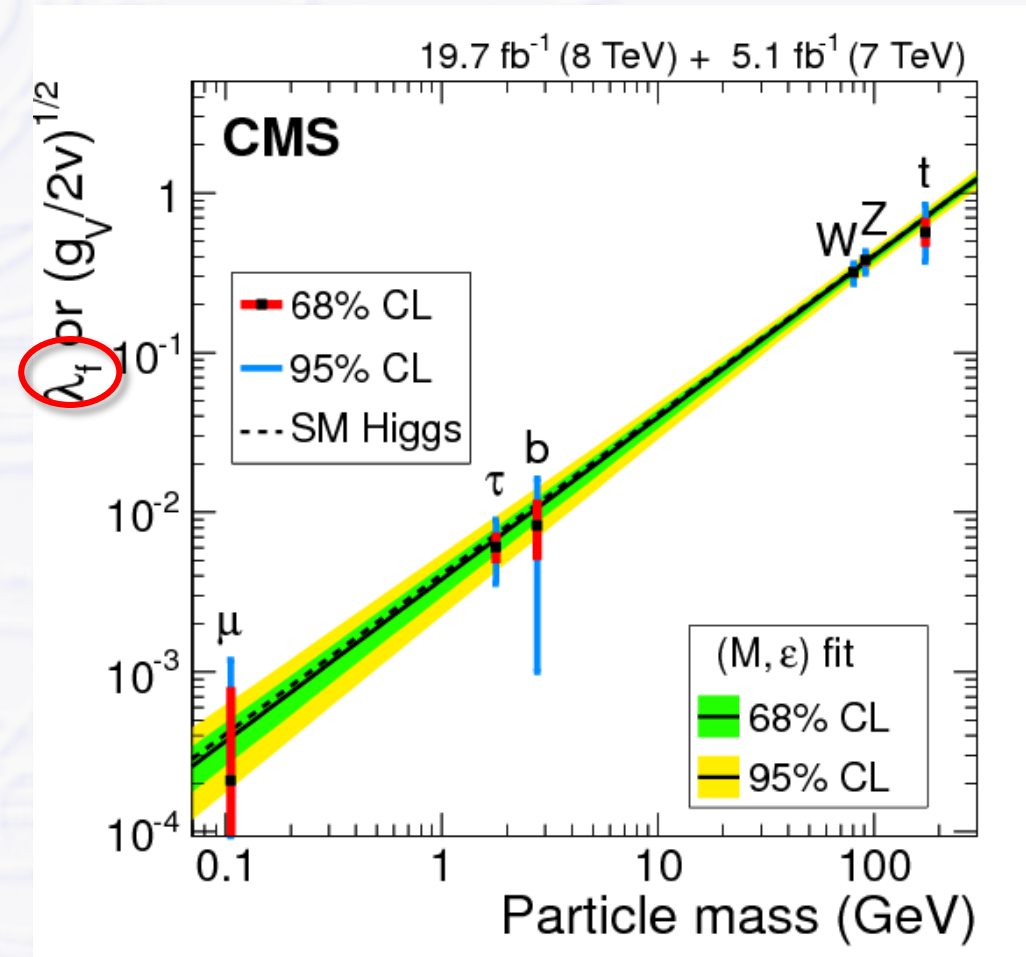
Wenn Higgs-Mechanismus verantwortlich für die Erzeugung der Masse

→ **Kopplungsstärke λ des Higgs-Potentials proportional zur entsprechenden Teilchenmasse M**

$$V(\Phi) = +\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

→ $\lambda \propto M$

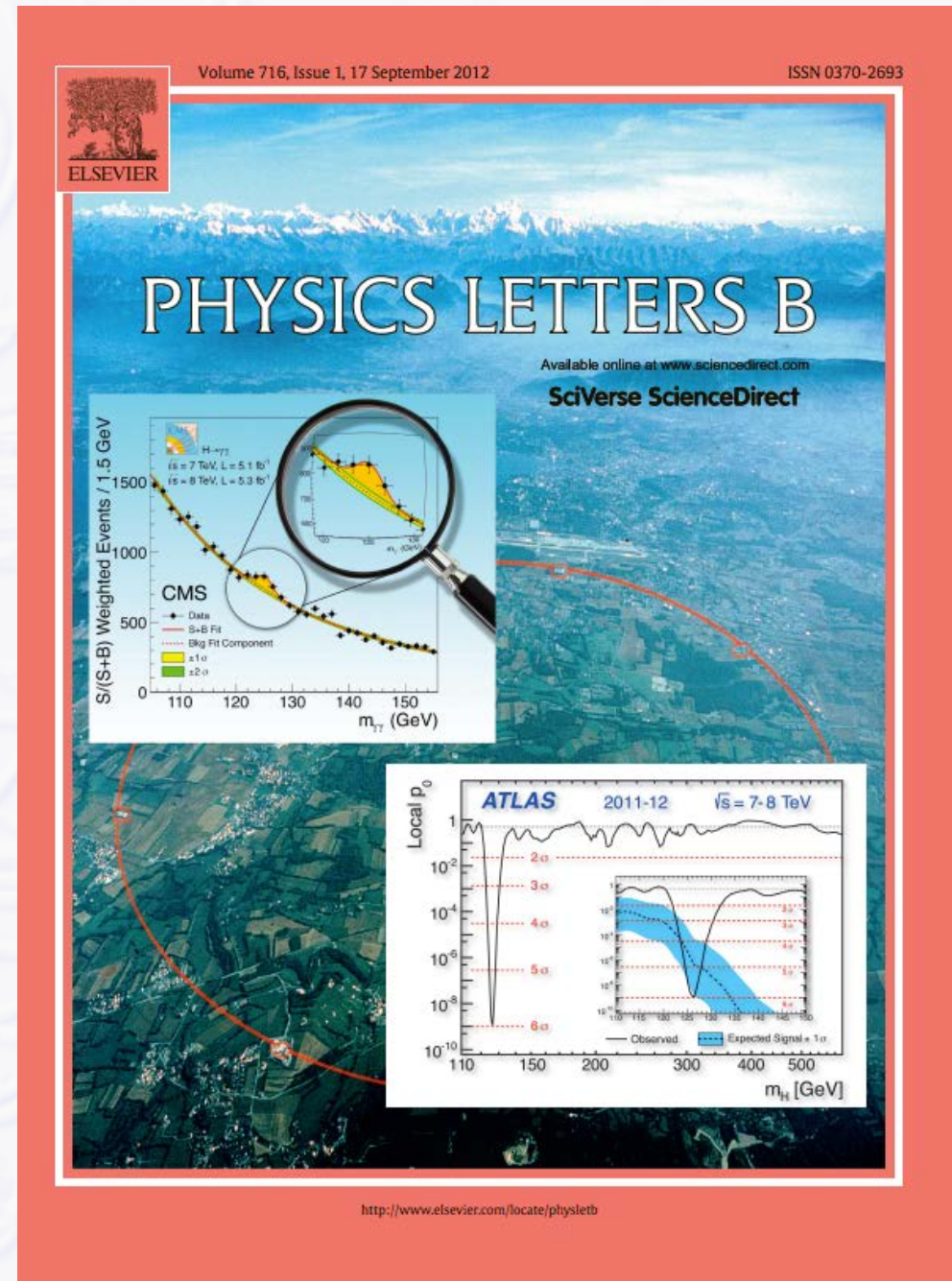
Je größer die Masse, je stärker die Kopplung an das Higgs-Feld ✓



Higgs: Stand der Erkenntnisse (2014)

- Entdeckung eines **neuen Teilchens** im **Juli 2012**
 - Es ist **ein Boson** (Spin 0 oder 2)
 - Damals nicht klar: ein Higgs?
- Klar seit **März 2013**
 - Ja, es ist **ein Higgs Boson**
 - Spin 0 (konsistent mit Higgs)
- **Noch nicht klar** (wird noch Jahre dauern...)
 - **Welche Art Higgs Boson?**
 - ein **Standardmodell Higgs?**
 - dann gibt es nur ein Higgs Teilchen, **DAS "Peter Higgs" Boson**
 - ein **SUSY Higgs?**
 - dann sollte es mindestens 5 verschiedene Higgs Teilchen geben

vielleicht haben wir gerade nur das erste gefunden und es kommen noch mehr...

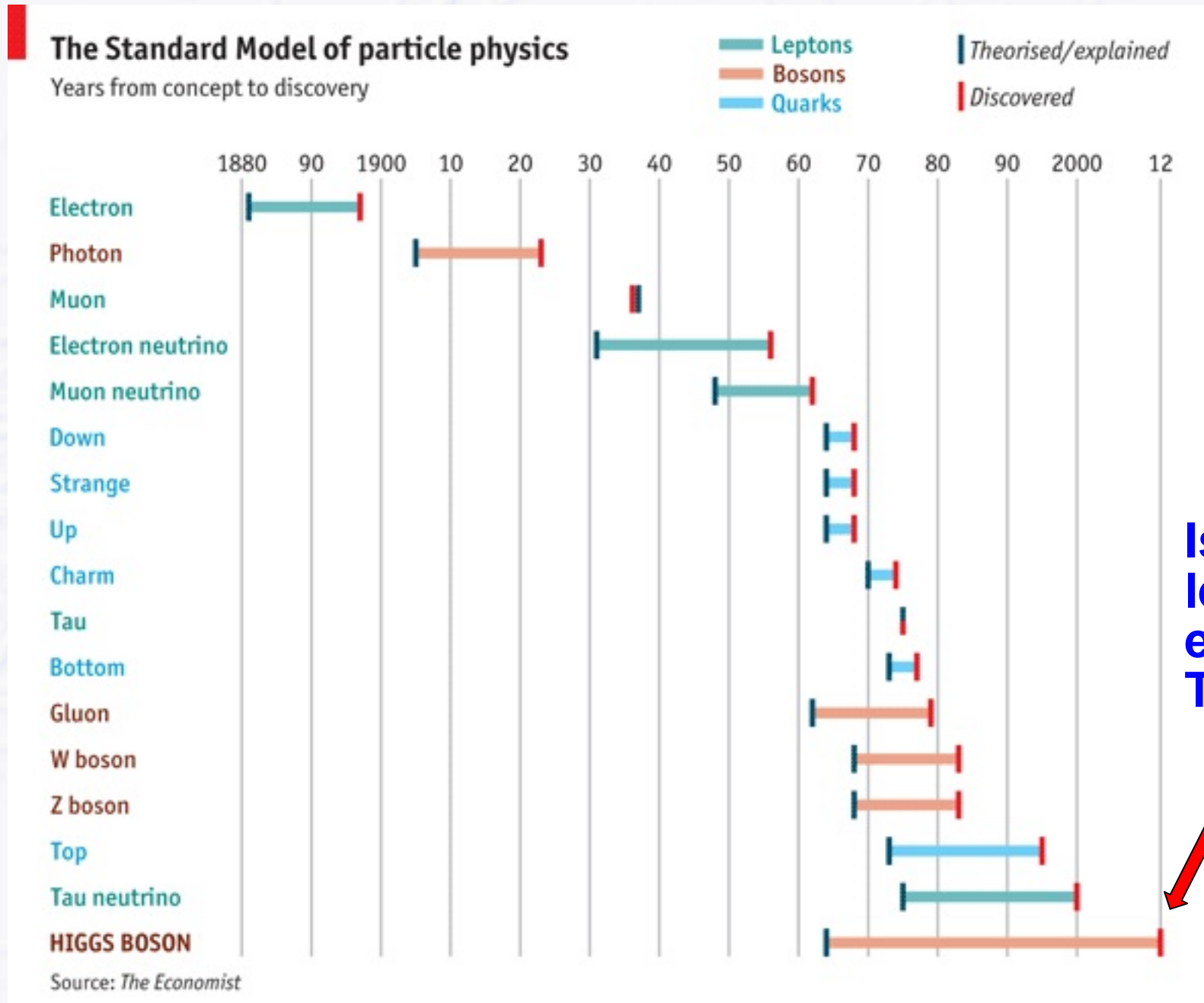


Nobelpreis für Englert und Higgs 2013

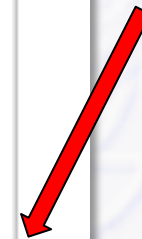
“...for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the **discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.**”



Standardmodell Teilchenentdeckungen



Ist dies das letzte zu entdeckende Teilchen?



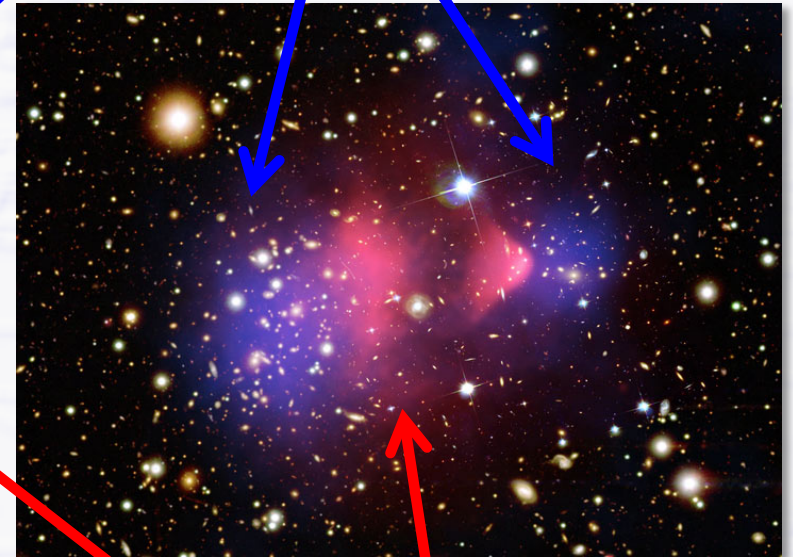
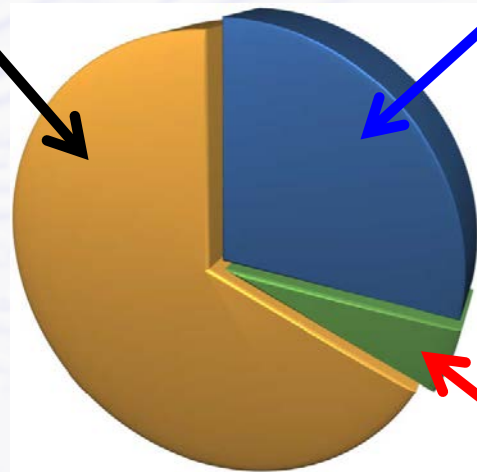
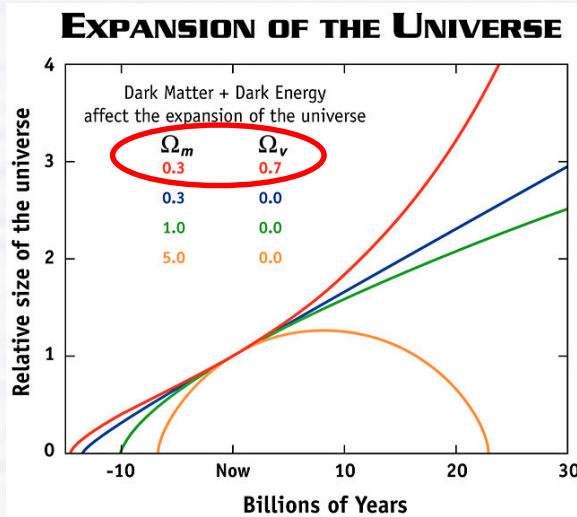
Bestandteile des Universums

- Parameter basierend auf Daten von Planck + WMAP polarisation + highL + BAO

SUSY?
2022/23

Dunkle Energie:
69.2% ± 1.0%

Dunkle Materie:
25.7% ± 0.4%



Gewöhnliche Materie:
4.82% ± 0.05%

Abgeleitete Größen

- **Hubble Konstante:** $67.80 \pm 0.77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- **Alter des Universums:** 13.798 ± 0.037 Milliarden Jahre

Konsequenzen für Higgs

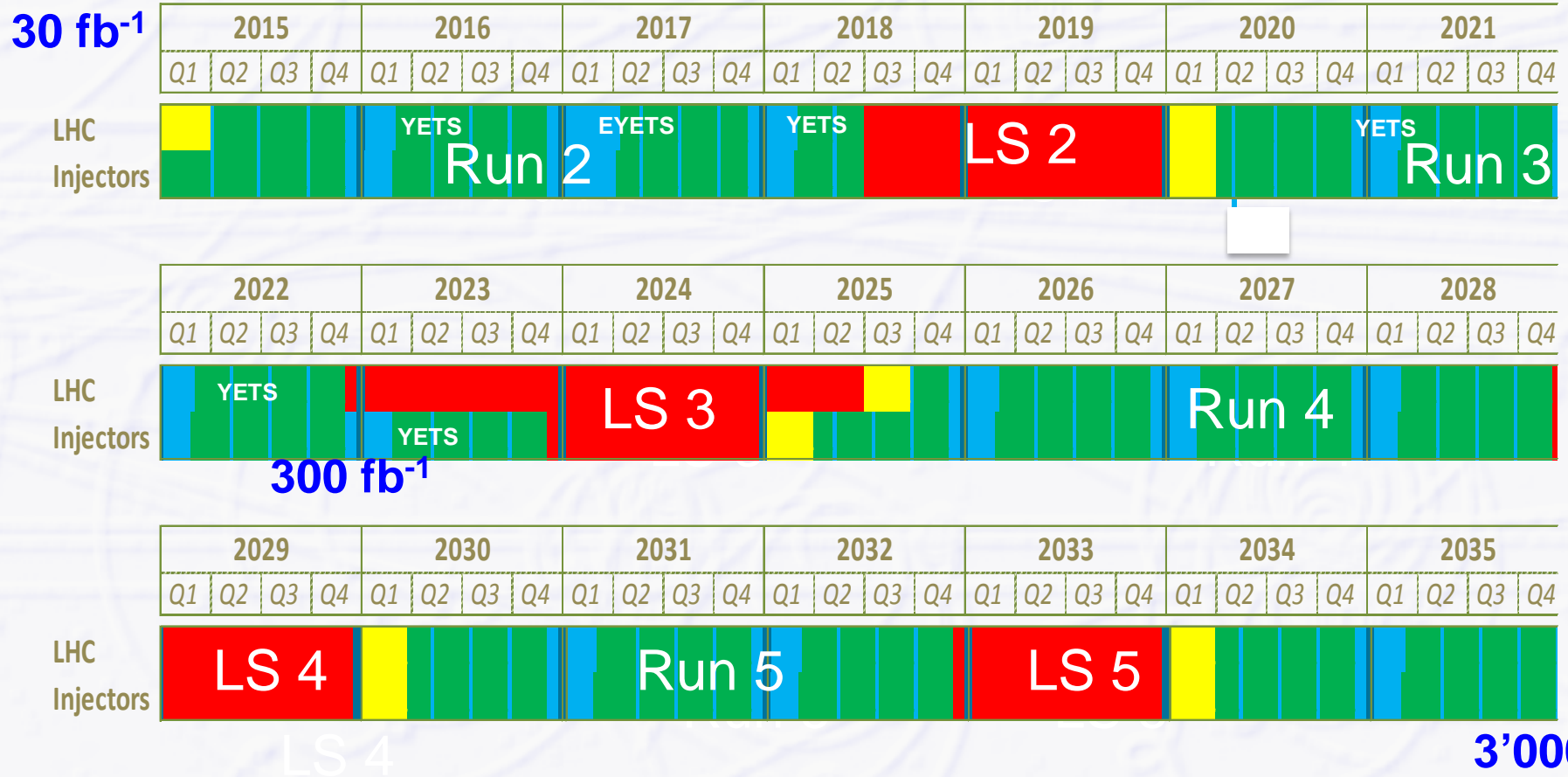
- Minimal Supersymmetric Model (MSSM) hat 5 Higgs Teilchen

Teilchen	el. Ladung	Spin/Parität	Masse
h^0	0	0^+	leicht (< 133 GeV)
H^0	0	0^+	schwer
H^+	+1	0^+	schwer
H^-	-1	0^+	schwer
A^0	0	0^-	schwer

- Leichtestes MSSM Higgs (h^0) ist sehr ähnlich zum Standardmodell Higgs
- Ist das entdeckte Higgs das leichte h^0 im MSSM Modell?
 - wenn ja → es gibt noch mehr Higgse zu entdecken
 - Zerfälle von h^0 und H_{SM} sind sehr ähnlich, 5-10% Unterschied bei Zerfallswahrscheinlichkeiten
 - Zerfallswahrscheinlichkeiten müssen präzise gemessen werden → mehr Daten

LHC: Wie geht es weiter?

LS2 start 2018 (Juli) → 18 Monate + 3 Monate BC
 LS3 LHC: start 2023 → 30 Monate + 3 Monate BC
 Vorbeschleuniger: 2024 → 13 Monate + 3 Monate BC



(Extended) Year End Technical Stop: (E)YETS

LHC schedule approved by CERN management and LHC experiments spokespersons and technical coordinators (December 2013)

Zukunft 1a: e^+e^- @ 0.5 TeV →

ILC = International Linear Collider

● Elektron-Positron Collider

→ **0.5 – 1 TeV**, 2 x 25 km Länge

- basierend auf supraleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- technologisch ausgereift
- 5% “Prototyp” derzeit im Bau (freier Elektronenlaser XFEL am DESY, Hamburg)



● “Higgs-Fabrik”

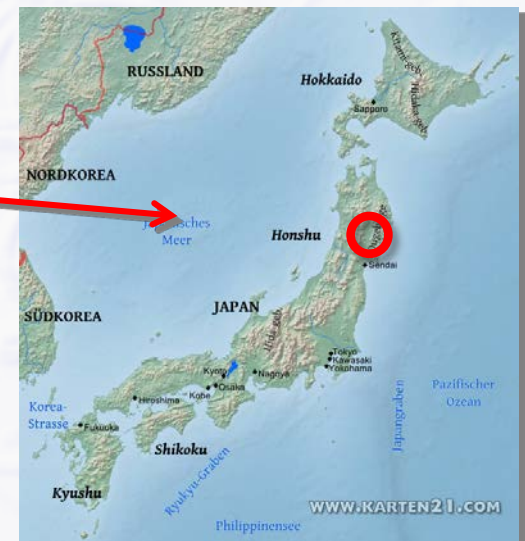
→ Präzisionsmessungen des Higgs (und Top-Quarks)

- Vorteil gegenüber Hadron Collider: nur wenig störender Untergrund anderer Reaktionen

● Japan hat Standort angeboten

→ nördlich von Sendai

- derzeit Evaluierung durch japanisches Komitee
- Komiteebericht für Ende März 2016 erwartet
- danach (bei positiver Empfehlung) Partnersuche
- weltweites Projekt: Japan (50-60%) + europäische + US-Beteiligung
- mögliche Entscheidung in 2-3 Jahren



Zukunft 1b: e^+e^- @ 3 TeV →

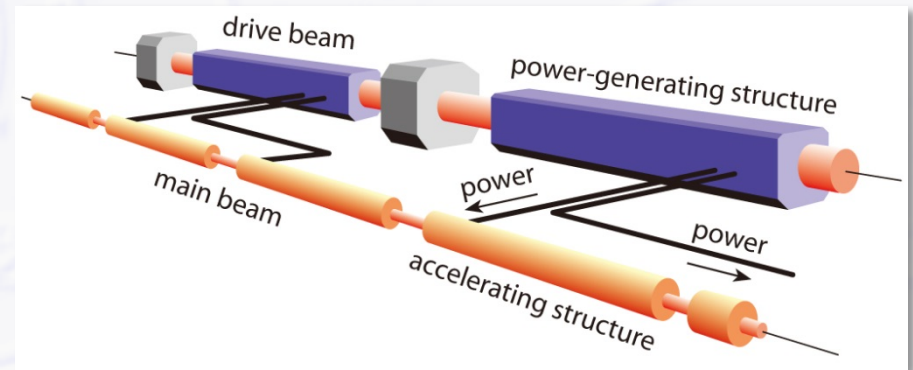


CLIC = Compact Linear Collider

Elektron-Positron Collider

→ **3 TeV**, 2 x 25 km Länge

- basierend auf normalleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- 2 Strahlen: “drive beam + main beam”
- Energieübertragung von einem niederenergetischen intensiven Strahl zu einem hochenergetischen zweiten Strahl, technologische Studie bis 2018



“SUSY-Fabrik”

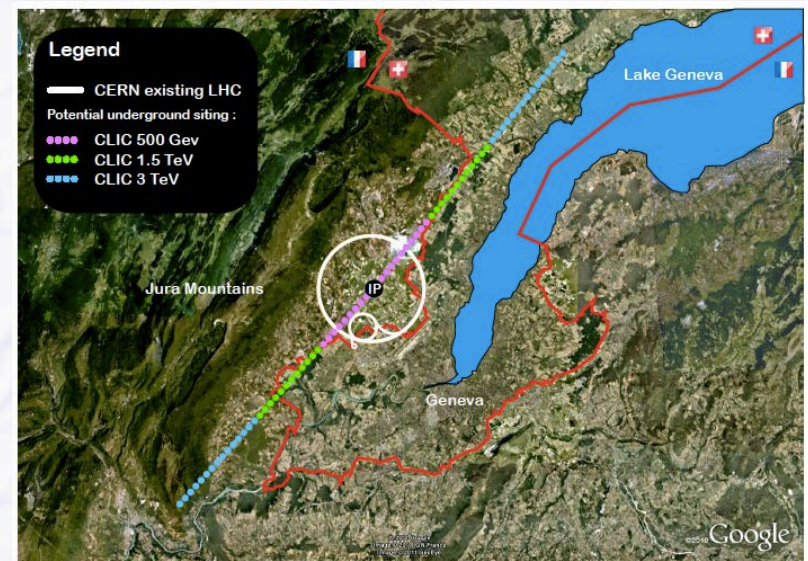
→ Präzisionsmessungen von SUSY Teilchen

- falls SUSY bei LHC gefunden
- komplementär zu LHC

Möglicher Standort: CERN

→ entlang des Jura

→ Wechselwirkungspunkt am CERN



Zukunft 2: neuer pp Collider → FCC

FCC = Future Circular Collider

- Konzeptstudie eines 80-100 km Tunnel in der Region Genf

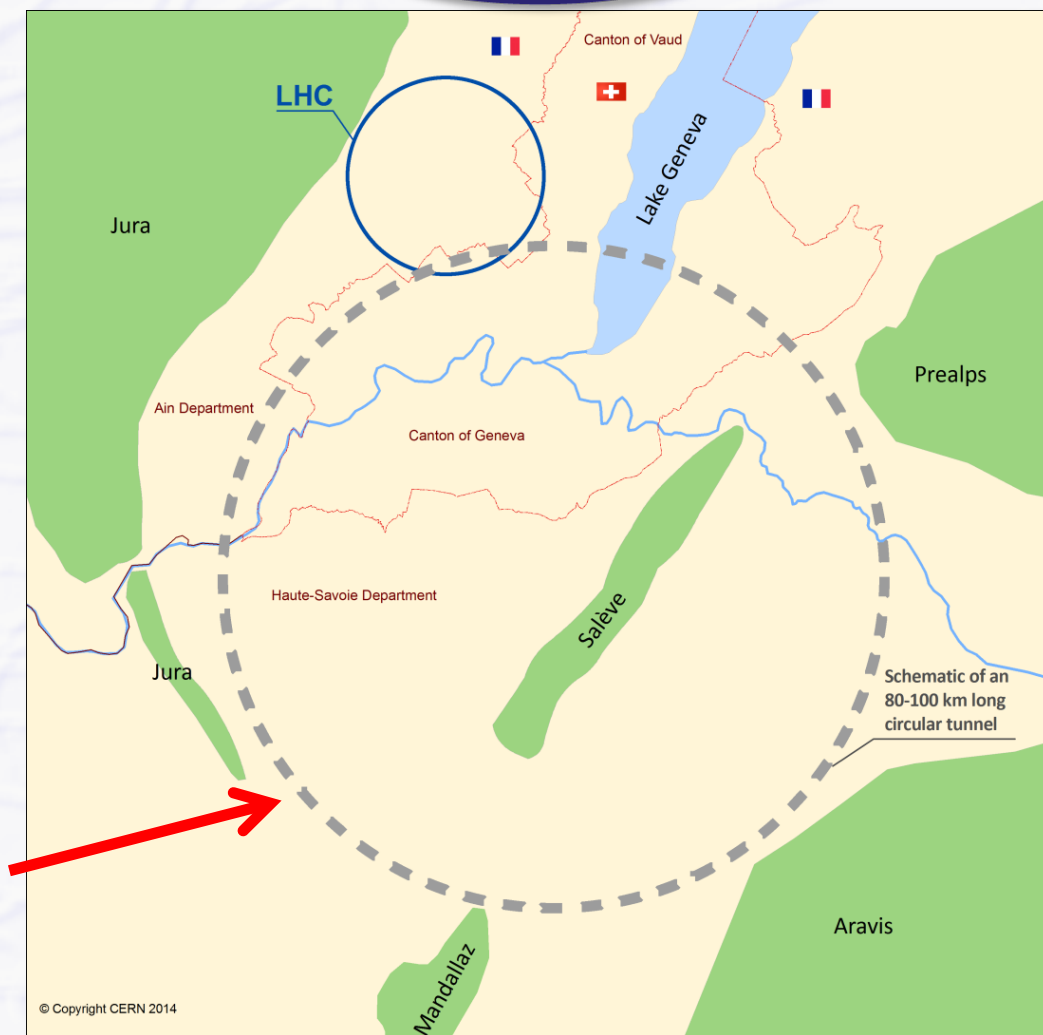
→ mit Möglichkeiten für e^+e^- (FCC-ee) und p-e (FCC-he)

- Studie soll bis ~2018 erstellt werden

Entwicklung neuer supraleitender Magnete nötig (Nb₃Sn statt NbTi oder Hochtemperatur-Supraleiter)

→ Physikzielsetzung?

16 T → 100 TeV bei 100 km
20 T → 100 TeV bei 80 km



Aussichten

● LHC läuft bis 2035

- derzeit Run 2 mit 13 TeV (evtl. 13.5 TeV) bis 2018, Run 3 bis 2023
- ab 2025 “high luminosity“ LHC
- Ziel: **3000 fb⁻¹ = 100x** mehr Daten als Run 1 (Higgs-Entdeckung)

● Nächster Update der European Strategy for Particle Physics ~2018/19 (nach Ende von LHC Run 2)

→ Input (neben anderem):

- SUSY bei LHC? Oder andere neue Phänomene???
- ILC genehmigt in Japan?
- CLIC Technologie machbar?
- FCC Machbarkeit, Kosten, Physikzielsetzung?

→ Output:

- Welche Richtung soll die (Hochenergie-)Teilchenphysik einschlagen?
- Was wird DAS Zukunftsprojekt nach LHC Ende ab 2035?

Die nächsten Jahrzehnte bleiben spannend...

