

CERN

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



Ein bisschen über CERN und
was wir hier machen

Der LHC Beschleuniger



CERN wurde 1954 gegründet: 12 europäische Länder

“Wissenschaft für den Frieden”

Heute: 23 Mitgliedsländer (zuletzt: Serbien, 24. März 2019)

8 assoziierte Mitgliedsländer oder Beitrittskandidaten
(zuletzt: Lettland, 2. August 2021)

- ~ 2'600 Staff (Angestellte)
- ~ 800 Fellows (Stipendiaten)
- ~ 12'500 “User” (Gastwissenschaftler)
- ~ 1000 weiteres Personal

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

Assoziierte Mitglieder in der Vorstufe zur Mitgliedschaft:

Estland, Slowenien, Zypern

Assoziierte Mitglieder: Indien, Kroatien, Lettland, Litauen, Pakistan, Türkei, Ukraine

Beobachter: Japan, Rußland*, Vereinigte Staaten von Amerika; Europäische Kommission, Joint Institute for Nuclear Research (JINR)*, UNESCO

Länder mit der Absicht auf (assoziierte) Mitgliedschaft:
Brasilien, Irland

* = ausgesetzt seit
8. März 2022 (Rußland) bzw.
25. März 2022 (JINR)



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)

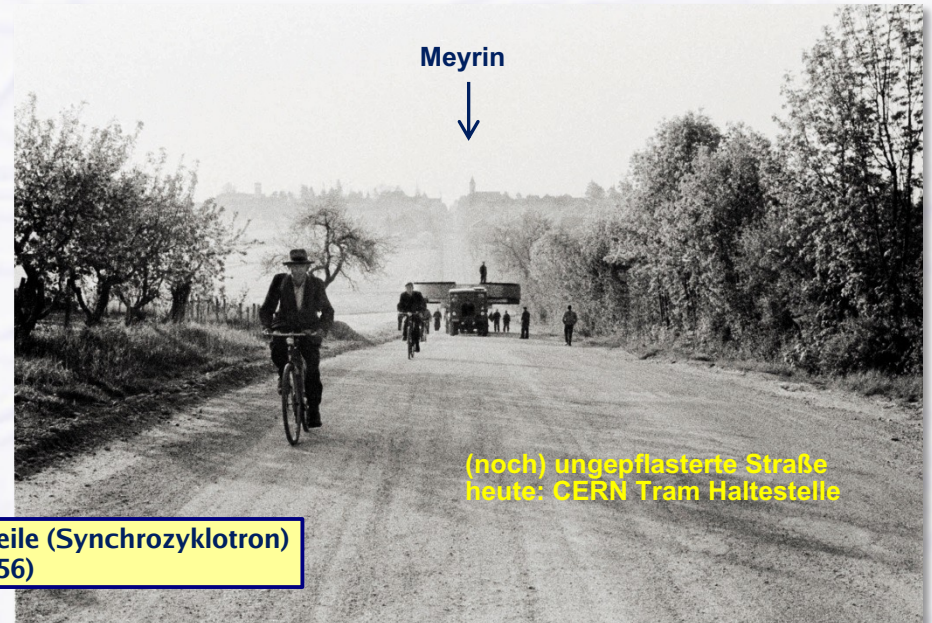
La Suisse du 30 octobre 1953



erste Bauarbeiten (17. Mai 1954)



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

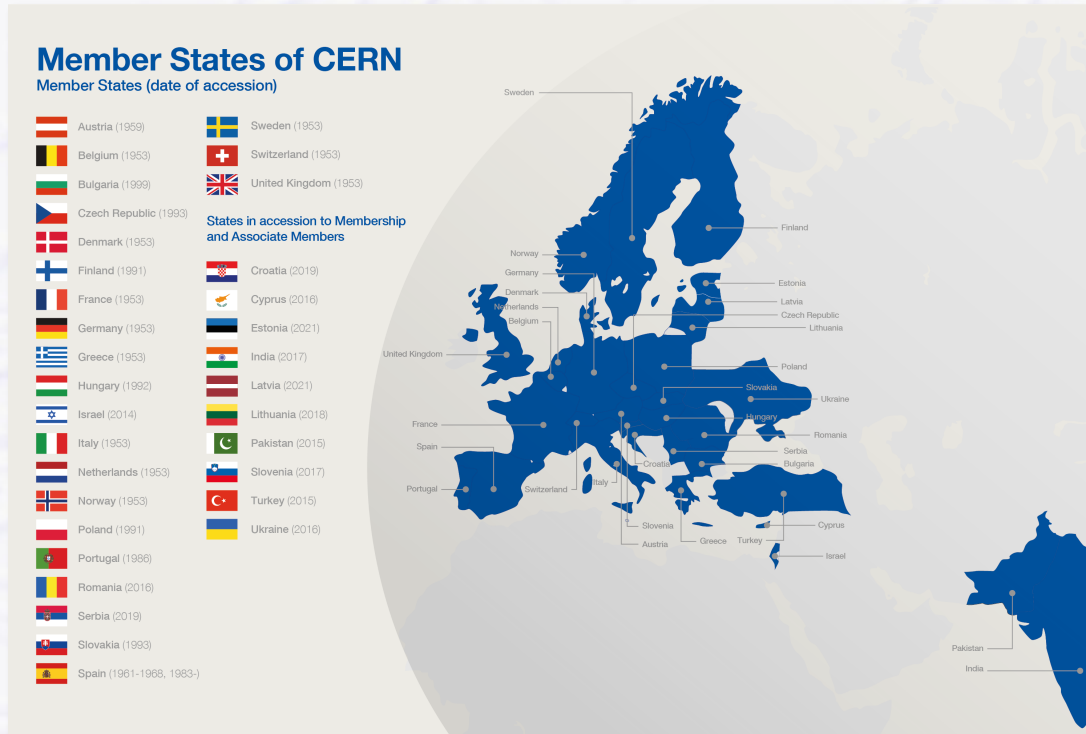


(noch) ungepflasterte Straße
heute: CERN Tram Haltestelle

CERN Budget 2022: 1405.1 MCHF

(Member States: 1174.5 MCHF, Associated Members: 31.5 MCHF, andere Quellen: 199.1 MCHF)

➔ **anteilig nach Bruttoinlandsprodukt der Mitgliedsländer**



➔ **entspricht ca. ~1400 M€**

➔ **TU München (größte deutsche TU):**

○ **1033.1 M€ (2021, ohne Klinikum)**

○ **50'500 Studierende (WS 2022/23)**

Member State	Contribution [%]
Austria	2.21
Belgium	2.78
Bulgaria	0.34
Czech Republic	1.13
Denmark	1.82
Finland	1.34
France	13.78
Germany	20.86
Greece	1.01
Hungary	0.73
Israel	2.00
Italy	10.37
Netherlands	4.75
Norway	2.27
Poland	2.96
Portugal	1.12
Romania	1.23
Serbia	0.26
Slovak Republic	0.52
Spain	7.44
Sweden	2.56
Switzerland	3.94
United Kingdom	14.58

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

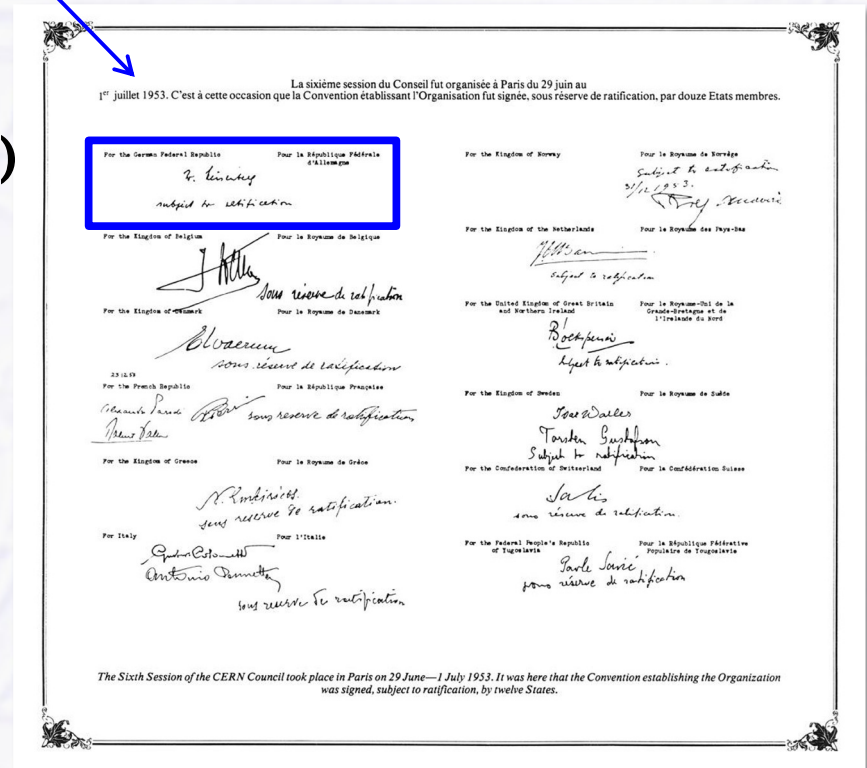
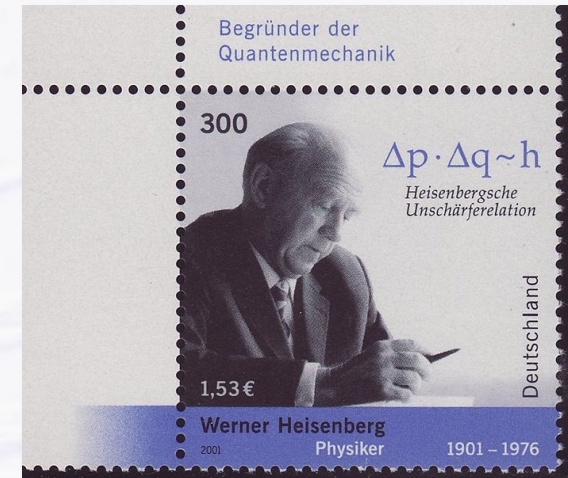
→ Nationales Labor: DESY (HH, Zeuthen)

→ 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

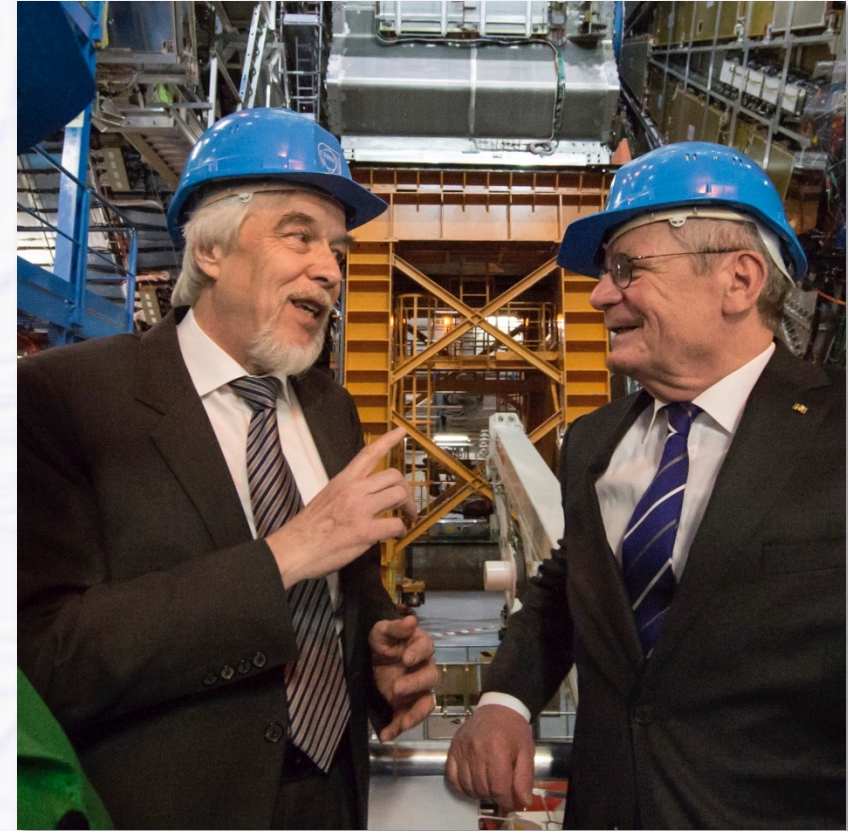
- gelb:** Universität (exp. und theo.)
- grau:** Universität (exp. oder theo. oder IT)
- rot:** Forschungszentrum (ausserhalb Universität)



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: Council

CERN Council

Präsident: Eliezer Rabinovici (IL)

23 Mitgliedsstaaten

2 Delegierte

10 Assoziierte Mitgliedsstaaten

2 Delegierte

Ex-Officio Mitglieder

Verschiedene Beobachter auf Einladung

Finance Committee

Vorsitzender: Umberto Dosselli (IT)

Scientific Policy Committee

Vorsitzender: Leonid Rivkin (CH)

Tripartite Employment Forum

Vorsitzender: Barbro Åsman (SE)

Pension Fund Governing Board

Vorsitzender: Ossi Malmberg (FI)

Deutsche Delegierte:

Volkmar Dietz (BMBF)

Klaus Desch (Universität Bonn)



CERN Management



Director General
F. Gianotti

Health, Safety and Environment
B. Delille

Legal Service
K. Baxter

Internal Audit
A. Glaser

Translation, Minutes and
Council Support J.Pym

**Accelerators and
Technology**
M. Lamont
(Deputy: M. Meddahi)

**Finance and
Human Resources**
R. Bello

**International
Relations**
C. Warakaulle

**Research and
Computing**
J. Mnich
(Deputy: P. Wells)

BE
R. Jones

TE
J.M. Jimenez

EN
K. Foraz

SY
B. Goddard

FAP
F. Sonnemann

IPT
C. Hartley

HR
J. Purvis

SCE
M. Capeans

IR-DS

IR-ECO

Experimental Physics
M. Krammer

Theoretical Physics
G. Giudice

IT
E. Porcari

Legend

Sector

Department

Unit

Ausbildungsprogramme am CERN

- **Summer Students (2 – 3 Monate, ~350 Studierende)**
 - Studierende im 3. – 4. Jahr,
70% Physik – 30% Ingenieurwissenschaften und Informatik
 - 5 Wochen Vormittags-Vorlesungen + Arbeit in einer CERN Gruppe (kleines Projekt)
- **Technical Students (6 – 12 Monate, ~180 Studierende)**
 - Masterstudierende in technischen Bereichen
 - **Sonderprogramm Baden-Württemberg (einige FHs + KIT) und Rheinland-Pfalz**
- **Doctoral Students (3 Jahre, ~260 Promovierende)**
 - Doktorierende mit technisch orientierten Themenbereichen
 - **Deutsches Sonderprogramm (Wolfgang-Gentner-Programm)**
- **Fellows (2 – 3 Jahre, ~850 Fellows), verschiedene Programme**
 - Early Careers: Bachelor oder Master Abschluss erforderlich
 - Research Fellowships: Promotion erforderlich

<https://careers.cern/>

Lehrer- und Schülerausbildung

- **High School Teachers Programme (HST)**

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

- **National Teacher Programmes (in Landessprache, 1 Woche)**

- 2017: 31 Kurse mit 952 Physik-Lehrern

- **S'Cool LAB**

- Experimente für Schüler

- Bau einer Nebelkammer
 - Röntgen-Röhre + Experimente
 - Supraleitung
 - Fadenstrahlrohr
 - ATLAS Magnetmodell

- 2017:

- 7240 Schüler aus 58 Ländern



CERN Gelände

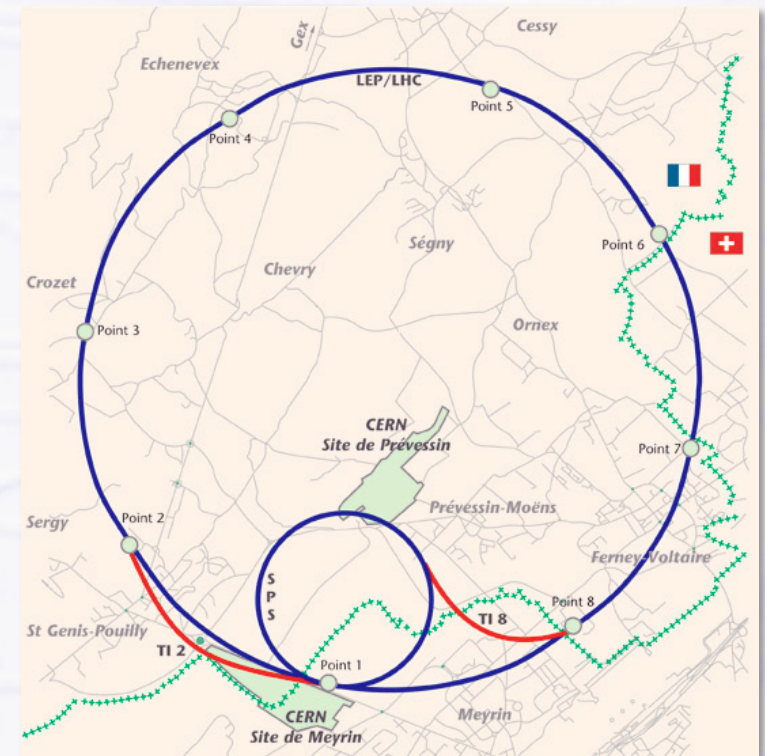
- 2 grosse Standorte

- 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.)



Grundlagenforschung

→ ...ist mehr als nur Erkenntnisgewinn

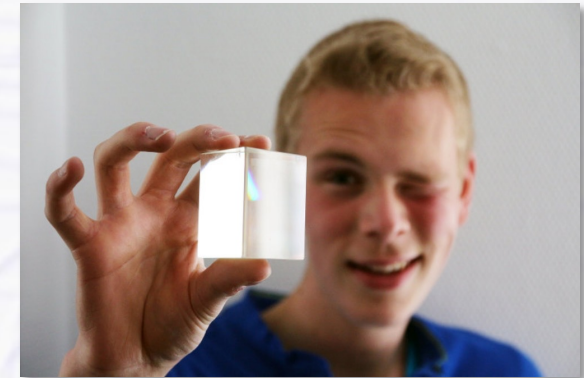
Erkenntnisfortschritt benötigt Technologiefortschritt

- die meisten benötigten Technologien müssen erst entwickelt werden
- und führen oft zu Anwendungen ausserhalb der Grundlagenforschung



Grundlagenforschung ist Talentschmiede

- Ausbildung von jungen Wissenschaftlern (Master-Studierende, Doktoranden, Post-Docs) im internationalen Umfeld
- erworbene Fähigkeiten können später gut in Industrie und Wirtschaft eingesetzt werden



Völkerverständigung: Brücken zwischen Nationen

- Grundlagenforschung ist international
- unterschiedliche Kulturen und Denkweisen ergänzen sich und haben gemeinsame Ziele



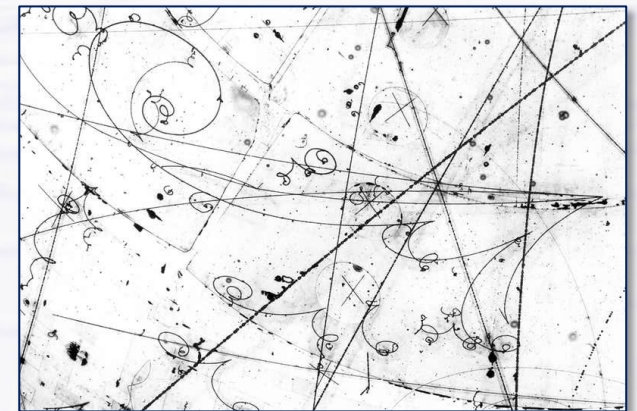
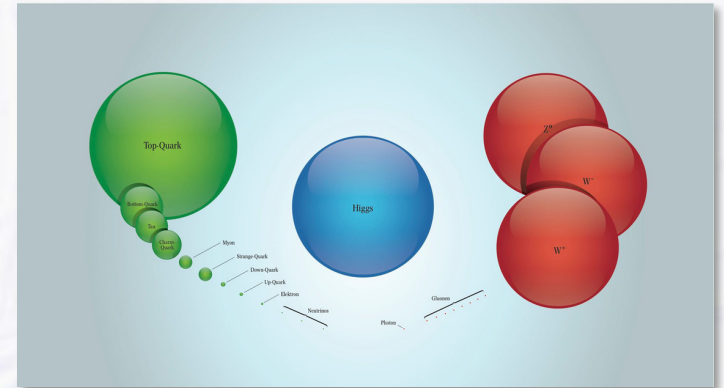
Teilchenphysik

- ist Teil der Grundlagenforschung
- befasst sich mit dem Aufbau und der Wechselwirkung von Materie

- Erforschung des Aufbaus aus kleinsten elementaren Teilchen
- Erforschung des Zusammenhalts und der Kräfte zwischen der Materie

- versucht, elementare Fragen zu beantworten

- woraus bestehen wir?
- wie entstand unser Universum, wie hat es sich entwickelt?
- was sind die elementaren Bestandteile des Universums?



Geschichte des Universums

Der Urknall (Big Bang) war der Anfang von Raum und Zeit

→ Teilchenphysik bei hohen Energien (durch Beschleuniger) kann den Zustand des Universums nur **10⁻¹² s nach dem Urknall erforschen**

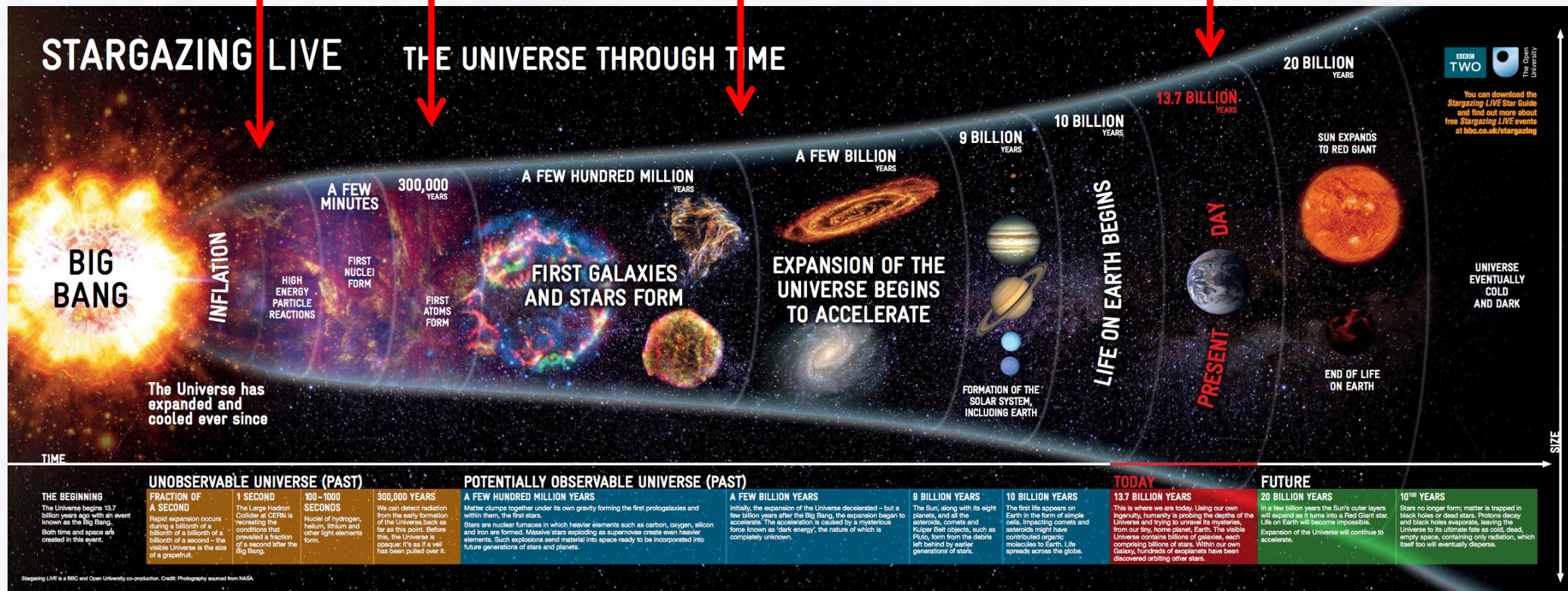
Die Energie in den Teilchenkollisionen ist die gleiche wie im frühen Universum

LHC

Satelliten

Teleskope

heute (13.7 x 10⁹ Jahre nach dem Urknall)



CERN's wissenschaftliche Aufgaben

● Beantwortung fundamentaler Fragen

→ Warum haben Teilchen Masse (sind schwer)?

- Newton konnte dies nicht erklären, aber Higgs...



Higgs
Boson

→ Aus was besteht 96% des Universums?

- Nur 4% besteht aus Elementarteilchen, die wir kennen. Und der Rest???

→ Warum gibt es im Universum keine Antimaterie?

- Materie und Antimaterie sollte gleichermaßen nach dem Urknall entstanden sein. Es scheint nur Materie im Universum zu geben. Wo ist die Antimaterie?

→ Wie war der Zustand der Materie kurz nach dem „Urknall“?

- Wie hat sich unser Universum daraus entwickelt?

● Letztlichendlich: Warum gibt es uns überhaupt?

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** (6 Experimente am Antiprotonen “Entschleuniger” AD)
 - Unterschiede zu Materie, Spektroskopie, Anziehung im Schwerfeld
 - **Proton-Struktur (COMPASS Experiment)**
 - **seltene Kaon Zerfälle (NA62)** $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \approx 10^{-10}$
 - sensitiv auf Abweichungen vom Standardmodell

Wissenschaftliche Vielfalt am CERN

● ISOLDE Radioaktive Ionenstrahlen

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

● nTOF (neutron Time-of-Flight Facility)

- nukleare Astrophysik + Kernphysik,
Dosimetrie + Strahlungsschäden

● CLOUD Experiment

- Einfluß von kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung



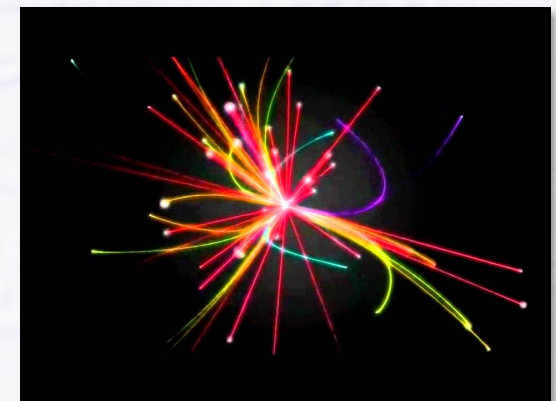
● AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

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



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 Gastwissenschaftler aus Universitäten und anderen Forschungszentren: **Wissenschaft** (hauptsächlich)
 - Design, Bau, Betrieb der Teilchendetektoren und Physikdatenanalyse
- Teilchenkollisionspunkt ist Schnittstelle zwischen CERN Angestellten und Gastwissenschaftlern
 - Erzeugung der Kollisionen
 - **CERN Angestellte**
 - Vermessung und Analyse der Kollisionen
 - **Gastwissenschaftler**



Distribution of All CERN Users by Nationality on 29 September 2020

**11'865 CERN Gastwissenschaftler aus Instituten
in 76 Ländern (10.3% aus Deutschland) und mit 113 Nationalitäten (9.7% Deutsche)**

MEMBER STATES

6 951

Austria	95
Belgium	108
Bulgaria	68
Czech Republic	207
Denmark	43
Finland	76
France	772
Germany	1 151
Greece	212
Hungary	73
Israel	54
Italy	1 806
Netherlands	157
Norway	56
Poland	303
Portugal	90
Romania	135
Serbia	46
Slovakia	119
Spain	403
Sweden	70
Switzerland	204
United Kingdom	703

OBSERVERS 2 384

Japan	242
Russia	1 092
USA	1 050

ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

52

Cyprus	19
Slovenia	33

ASSOCIATE MEMBERS

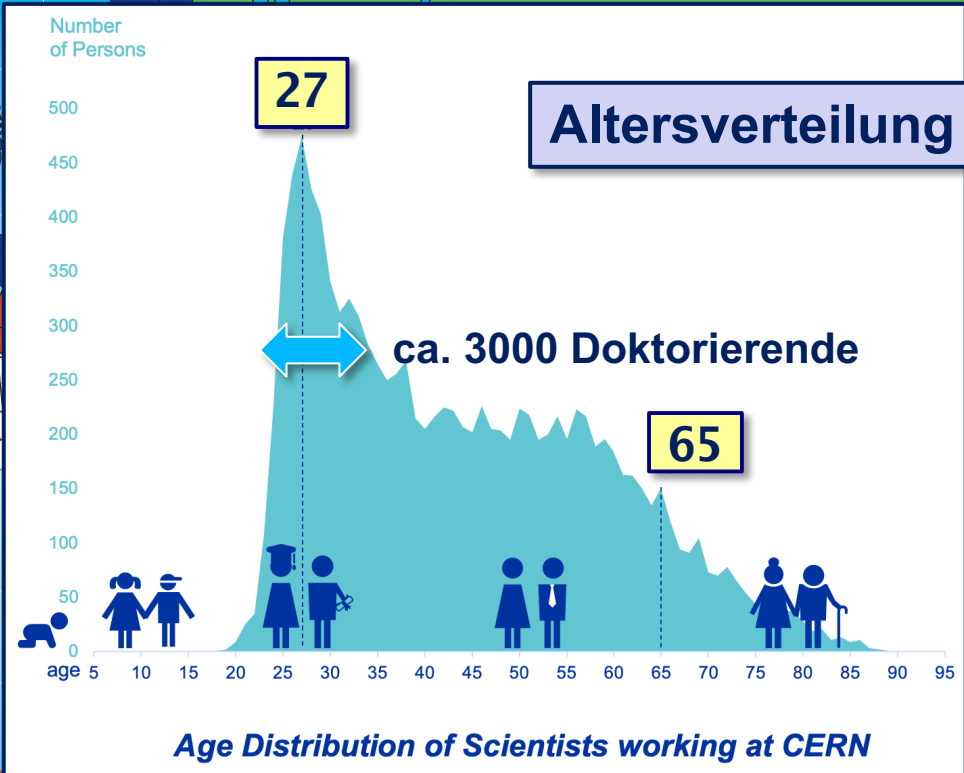
728

Croatia	44
India	351
Lithuania	24
Pakistan	60
Turkey	161
Ukraine	88

OTHERS

Bolivia	2	El Salvador	1	Jamaica	1	Montenegro	8	Saint Kitts	Uzbekistan	3	
Bosnia & Herzegovina	3	Estonia	14	Jordan	3	Morocco	27	and Nevis	1	Venezuela	9
Bostwana	1	Georgia	53	Kazakhstan	10	Nepal	8	Saudi Arabia	2	Viet Nam	9
Albania	2	Brazil	117	Ghana	1	Kenya	1	New Zealand	6	Senegal	1
Algeria	9	Burundi	1	Gibraltar	1	Korea	148	Nigeria	2	Singapore	4
Argentina	21	Canada	147	Guatemala	2	Kosovo	1	North Korea	3	South Africa	45
Armenia	14	Chile	22	Hong Kong	2	Kyrgyzstan	1	North Macedonia	2	Sri Lanka	6
Australia	28	China	548	Honduras	1	Latvia	7	Oman	1	Sudan	1
Azerbaijan	6	Colombia	34	Iceland	5	Lebanon	23	Palestine	7	Syria	3
Bahrain	2	Congo	1	Indonesia	10	Luxembourg	3	Paraguay	1	Taiwan	41
Bangladesh	6	Cuba	15	Iran	50	Malaysia	16	Peru	7	Thailand	22
Belarus	50	Ecuador	9	Iraq	1	Malta	5	Philippines	4	Tunisia	6
Benin	1	Egypt	24	Ireland	16	Mexico	77	Uruguay	1		

1 750



Die Teilchenwelt 1948

● Einige wenige “Elementarteilchen”

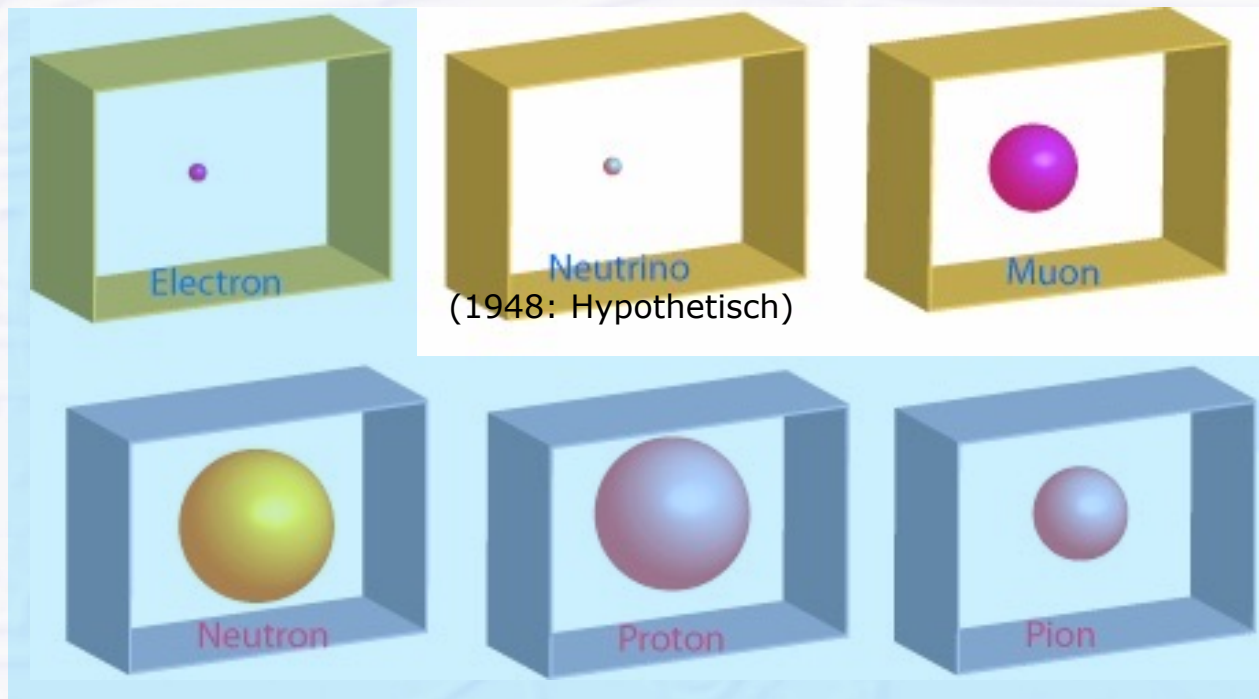
→ Bestandteile des Atoms

○ **Elektron** = Hülle

○ **Proton, Neutron** = Kern mit **Pion** als Teilchen, notwendig zum Zusammenhalt

→ **Neutrino** (hypothetisch) zur Erklärung des Betazerfalls der Neutronen

→ **Myon** in der Höhenstrahlung gefunden, aber unklare “Funktion”

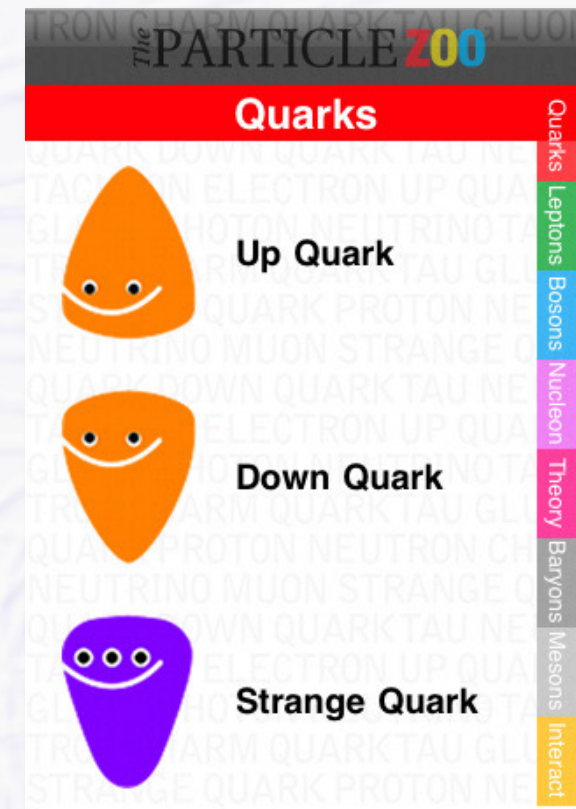
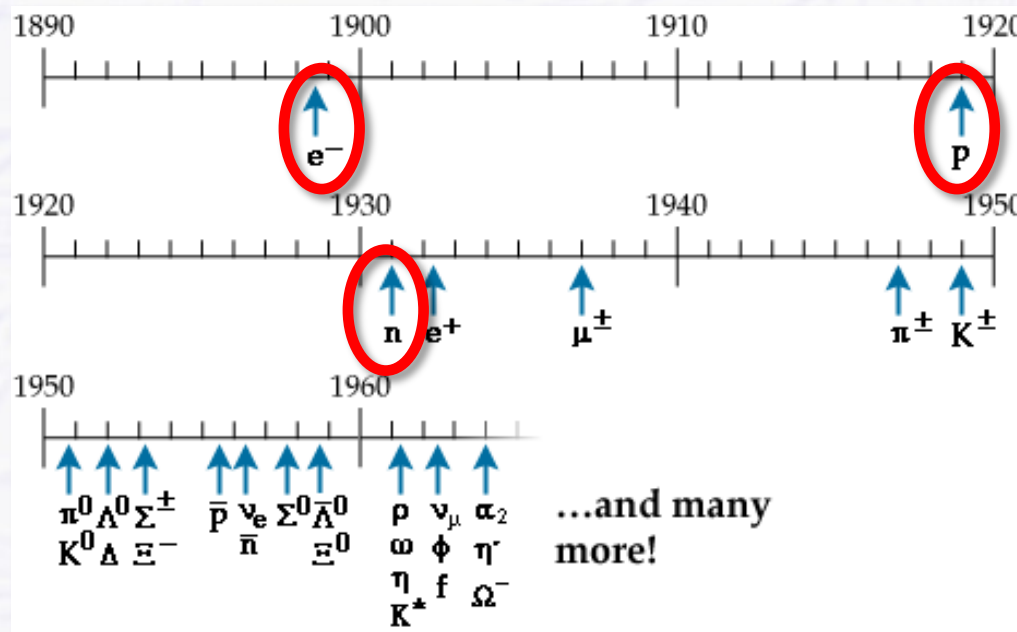


Teilchenphysik in den 1950...60ern

● 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**

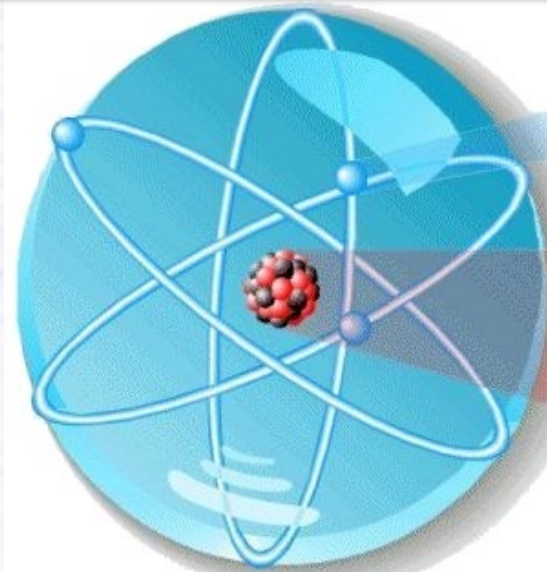
→ Wie erhalten Teilchen ihre (verschiedene) Masse? → **Higgs** (1964/2012)

Aufbau der Materie

- **Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur**
 - nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar (“punktförmig“)

Atom:
Philosophisch: Demokrit, 4. Jh. vor Christus
Theoretisch/Experimentell: Einstein/Perrin,
Erklärung/Messung der Brown'sche Bewegung, 1905

Elektron:
J.J. Thomson, Kathodenstrahlen, 1897



atom $\sim 10^{-8}$ cm



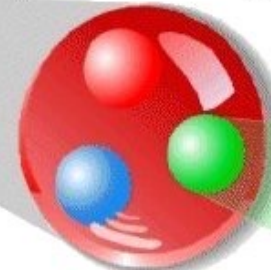
electron
 $< 10^{-16}$ cm



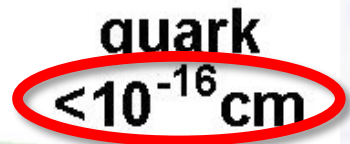
nucleus
 $\sim 10^{-12}$ cm

proton
(neutron)

Proton: Rutherford, 1919
Neutron: Chadwick, 1932



$\sim 10^{-13}$ cm



quark
 $< 10^{-16}$ cm

Atomkern:
Rutherford, Streuung von
 α -Teilchen (Heliumkernen)
an Goldatomen, 1910

Quark-Modell:
Gell-Mann, Zweig, 1964

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

Quarks

Leptonen

Überschwere, sehr instabile Materie

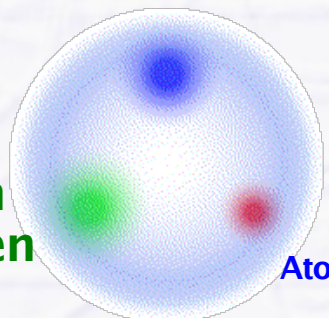
Schwere, instabile Materie

Normale, stabile Materie

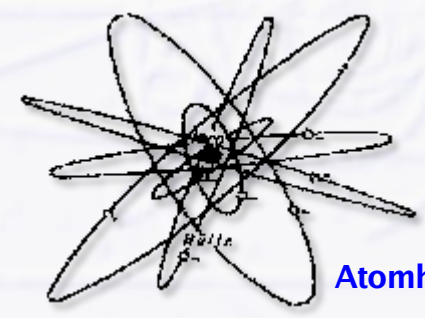
	Quarks		Leptonen	
Generation 3	t Top	b Bottom	τ Tau	ν_τ Tau-neutrino
Generation 2	c Charm	s Strange	μ Muon	ν_μ Muon-neutrino
Generation 1	u Up	d Down	e Electron	ν_e Electron-neutrino

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

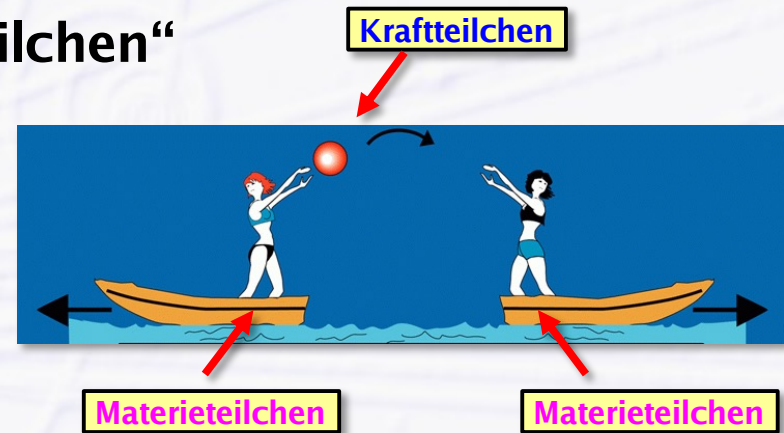
- Vermittlung der Kräfte durch “Kraftteilchen“

- **Kraftteilchen sind Bosonen**

- ganzzahliger Spin (Eigendrehimpuls in Einheiten von \hbar)

- **Materieteilchen sind Fermionen**

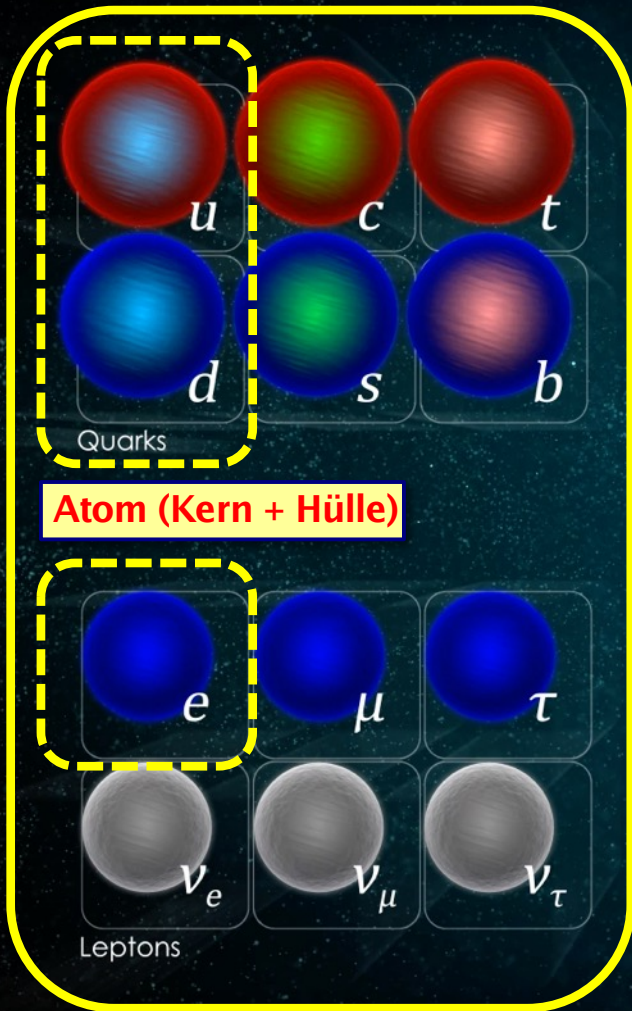
- halbzahliger Spin



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

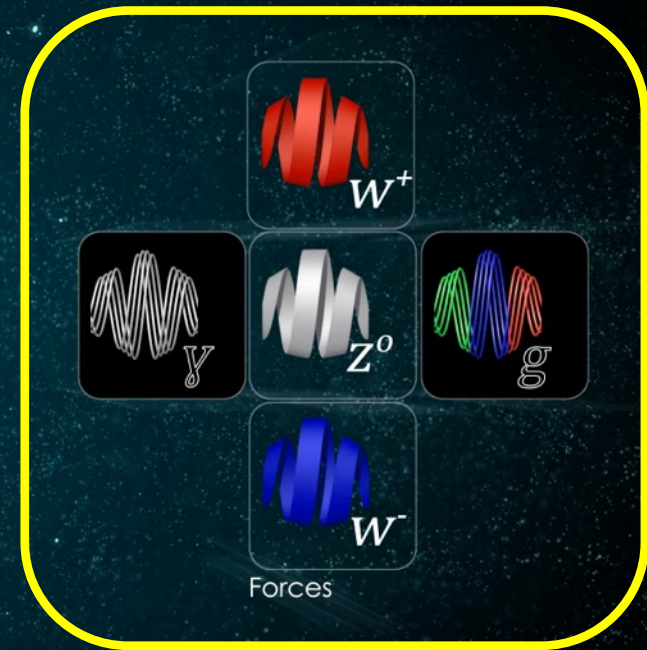
- Entwickelt seit den 1960er Jahren



Masse
(Higgs Teilchen)



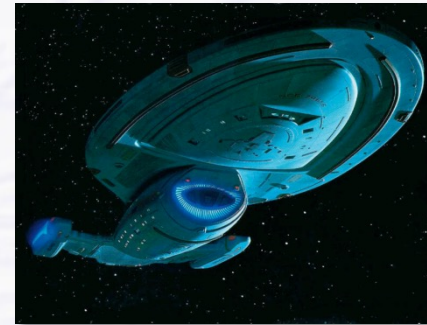
Higgs boson



Kräfte (Kraftteilchen)

Antimaterie

- Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
- **Antiteilchen** verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung



Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV/c ²]	Elektrische Ladung [e]	(Anti-) Name
Elektron	- 1	0.0005	+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938	- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

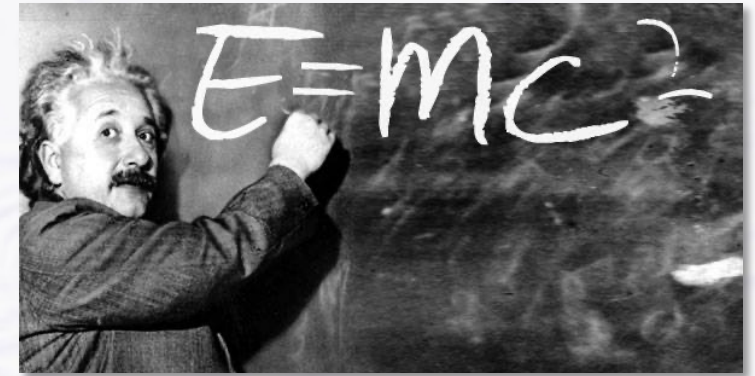
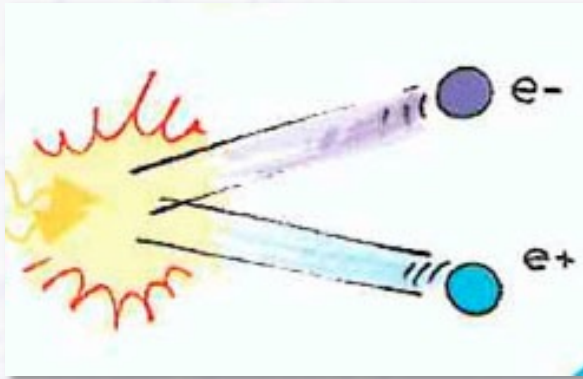
Wasserstoff

Anti-Wasserstoff

Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Erzeugung von Antimaterie

● Umwandlung von Energie in Masse



$$E \rightarrow mc^2$$

● Produktion von Antiprotonen am CERN

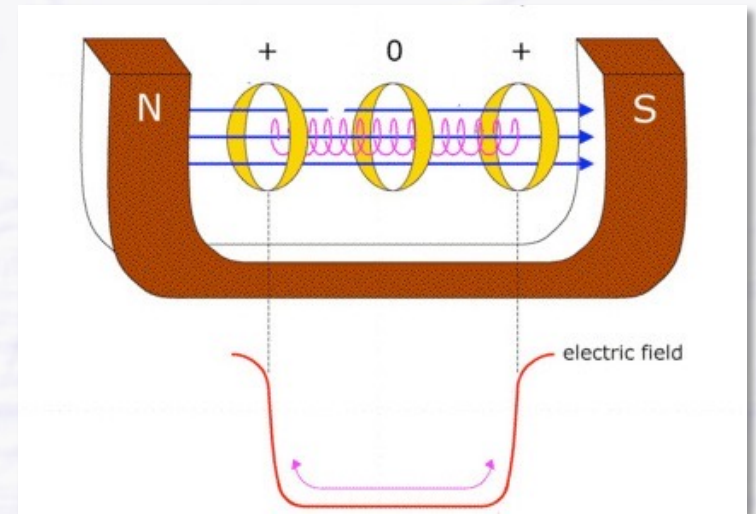
- intensiver Teilchen-Strahl mit hoher Energie (aus Beschleuniger) trifft auf Materieblock
- **Erzeugung** von neuen Teilchen und Anti-Teilchen aller Art
- **Aussortieren von Anti-Protonen** (Filterung durch Magnetfelder)
- **Verlangsamen der Anti-Protonen und Speicherung**



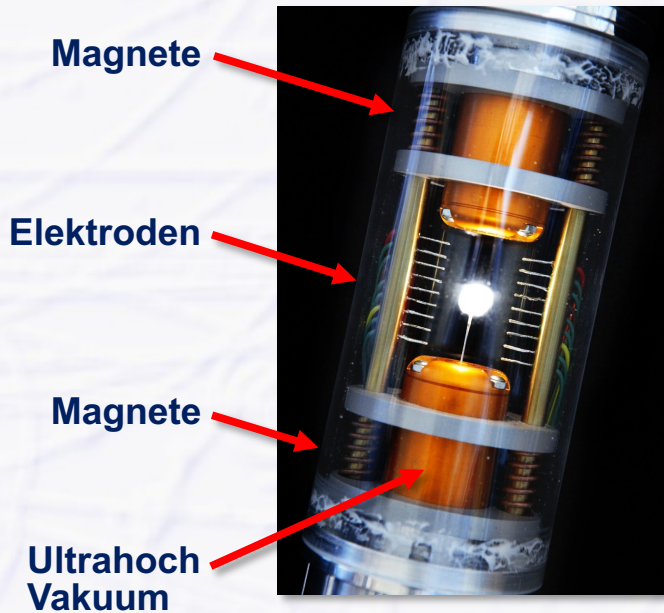
Speicherung von Antimaterie

Speicherung in Antimaterie-„Falle“

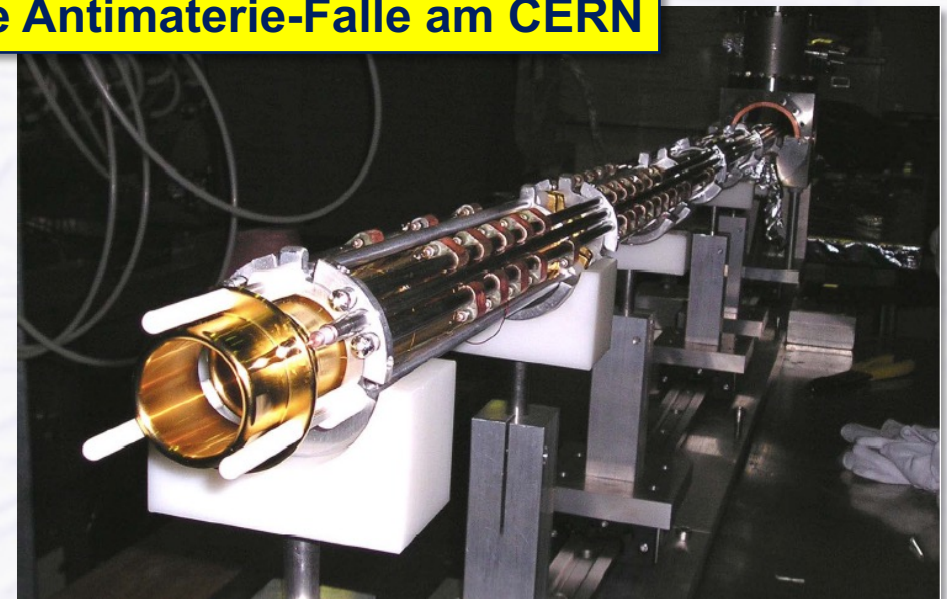
→ Kombination von magn.+ el. Feldern



Filmversion aus „Illuminati“



Echte Antimaterie-Falle am CERN



→ Speicherdauer: ~viele Monate

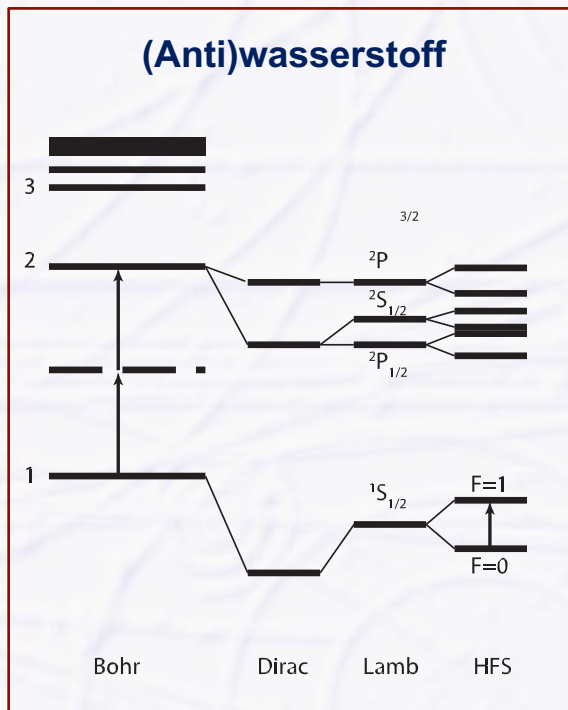
→ ~10 Millionen Anti-Protonen

○ geplant: ~1 Milliarde Anti-Protonen

○ = 0.000 000 000 000 002 Gramm (0.002 picogramm)

Experimente mit Antimaterie

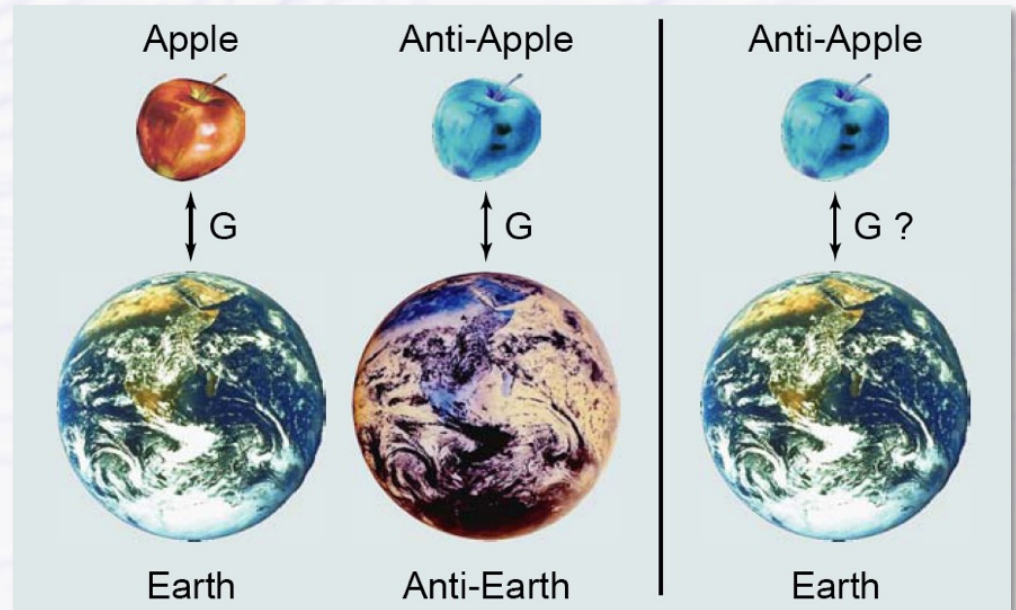
Spektroskopie



Gravitation

gemessen: erwartet:

???



- Vergleich der Spektren von Wasserstoff und Antiwasserstoff
- Übereinstimmung auf $< 10^{-14}$

- Keine Vorhersage für die Anziehung / Abstoßung von Materie und Antimaterie
- **Antigravitation???**
- bisher noch nicht gemessen

Anwendung von Antiteilchen

- Antiteilchen sind Alltag in der medizinischen Diagnostik!!!

- Positronen Emissions Tomographie (PET)

 - entwickelt in den 1970er Jahren

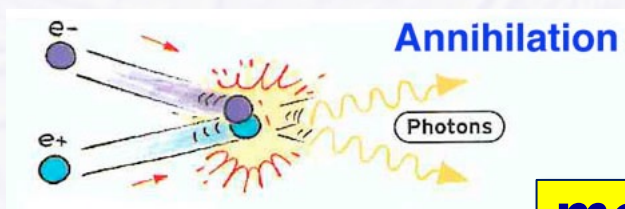
 - Verwendung von **radioaktiv markiertem Zucker**

 - Zucker ist bevorzugt an Stellen hohen Energiebedarfs vorhanden

 - **Gehirn, Tumor**

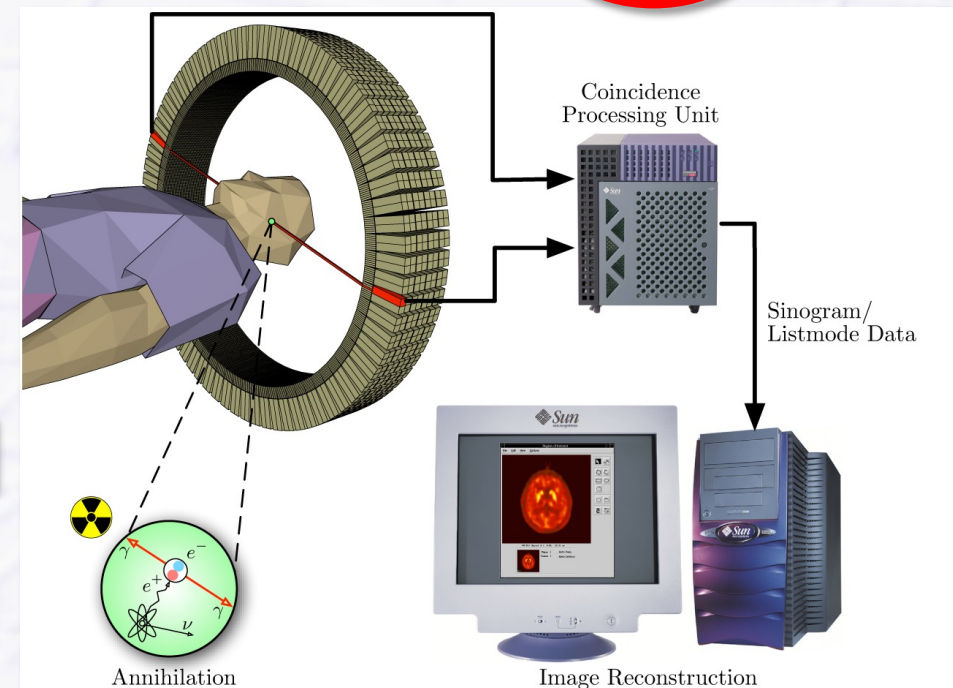
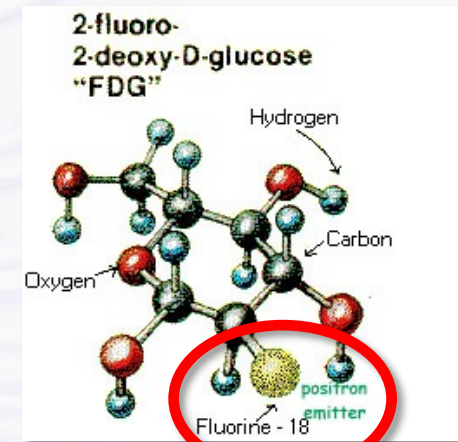
 - **^{18}F zerfällt unter Aussendung eines Positrons (Antiteilchen!!!)**

 - **Annihilation mit Elektron unter Aussendung zweier Photonen**



$$mc^2 \rightarrow E$$

 - **Nachweis der Photonen durch Detektor, damit Rekonstruktion der Orte hohen Energiebedarfs im Körper**

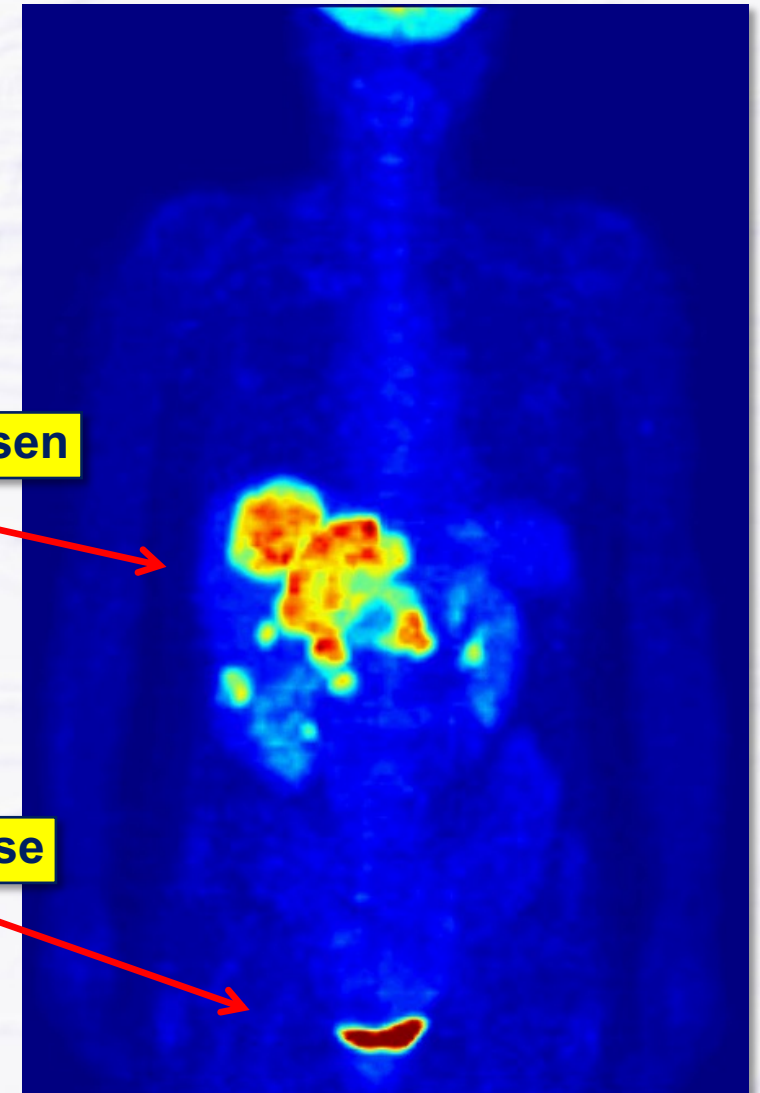
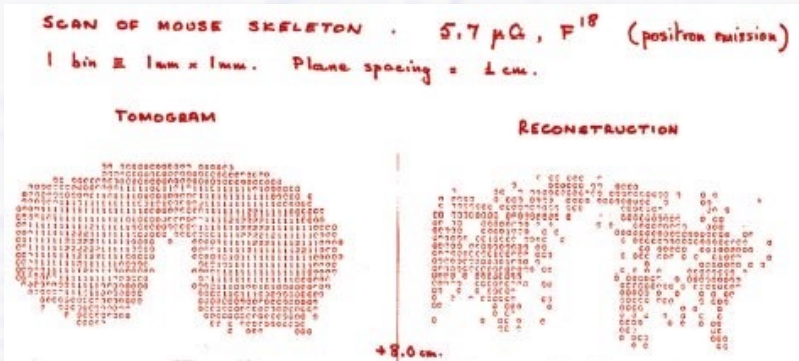


Positronen Emissions Tomographie

- Visualisierung von Bereichen hohen Energiebedarfs im Körper

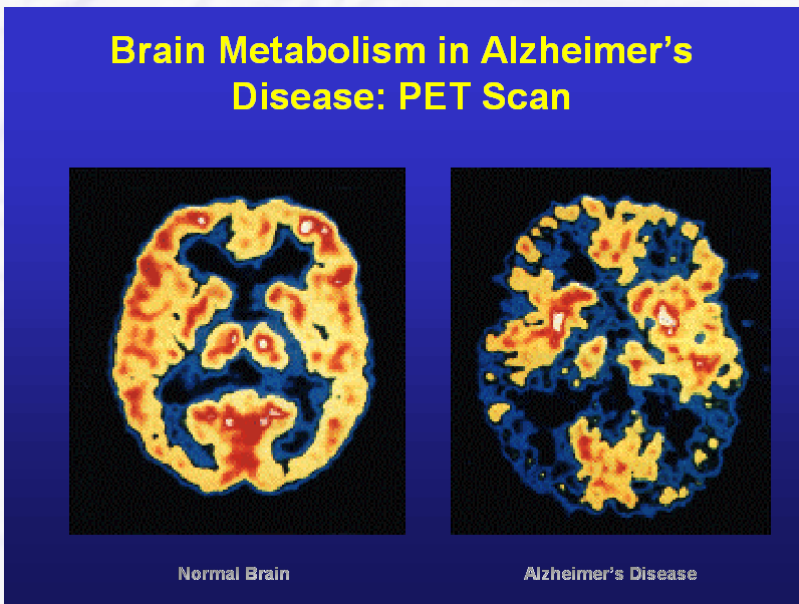
erster 2D PET Scan einer Maus am CERN 1977

heutige 3D Visualisierung



heutiger 2D PET Scan

Leber-Metastasen



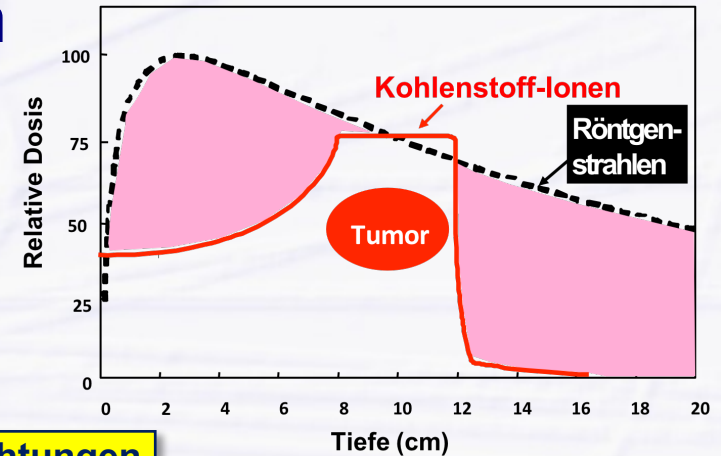
Urin in Blase

Hadron-Therapie

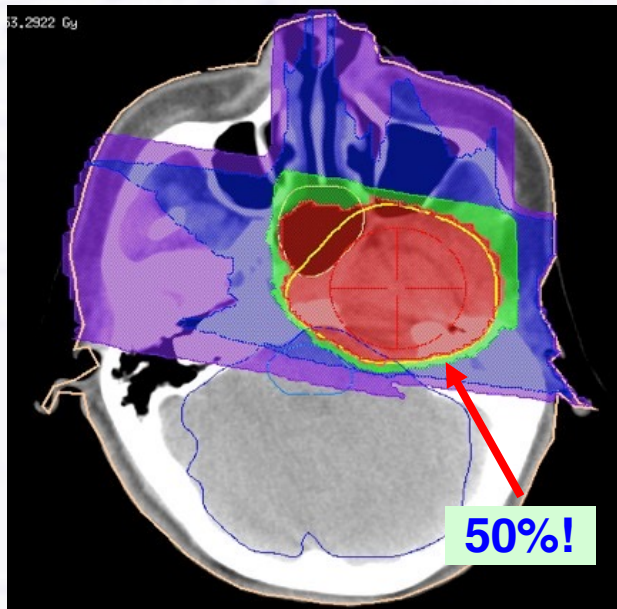
● Tumorbehandlung mit Protonenstrahlen oder (besser) Teilchenstrahlen aus Kohlenstoff-Ionen

➔ Vorteile gegenüber Röntgenstrahlen

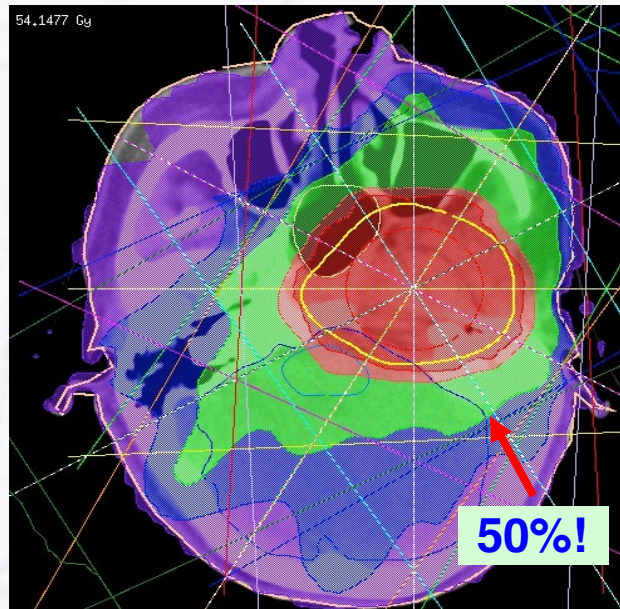
- Eindringtiefe steuerbar (über Energie der Ionen)
- dadurch maximale Energie gezielt auf Tumor
- weniger Schädigung gesunden Gewebes



Kohlenstoff-Ionen, 3 Richtungen



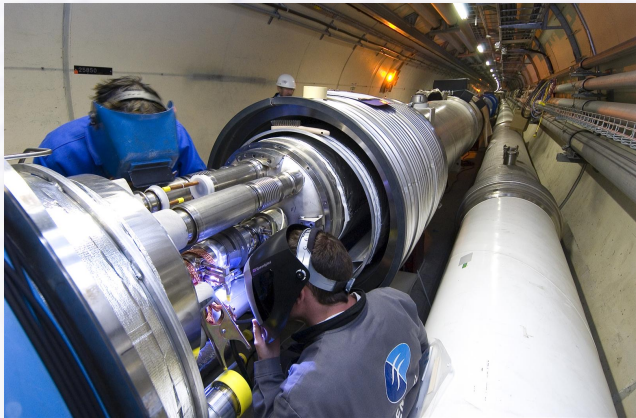
Röntgenstrahlung, 9 Richtungen



Teilchenphysik und Technologie

● Teilchen-Beschleuniger

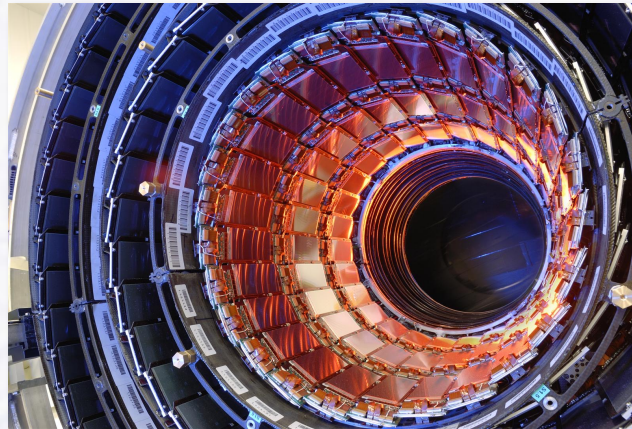
- Erzeugung verschiedener Teilchenarten
- Beschleunigung und Transport
- Speicherung und Führung von Teilchenstrahlen



CERN Large Hadron Collider LHC

● Teilchen-Detektoren

- Präzise Messung von Teilchenwechselwirkungen
- Simulation
- Rekonstruktion und bildgebende Verfahren



CMS Silizium Spurdetektor

● Computing

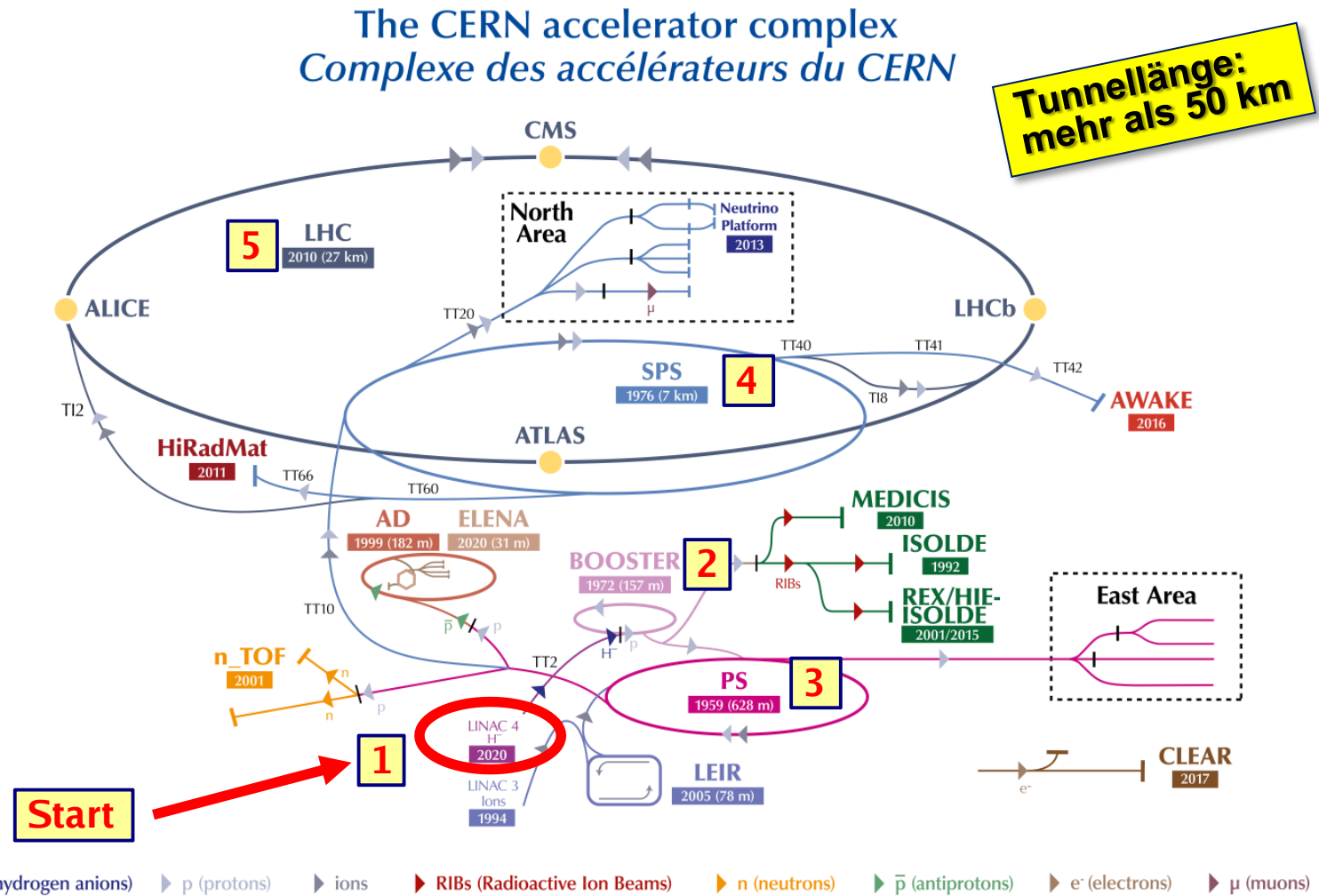
- Trigger und Datenprozessierung in Echtzeit
- Visualisierung
- Simulationsrechnungen
- verteiltes Rechnen (Cloud)
- Datenanalyse



CERN Computer Centre

CERN Beschleuniger Komplex

- 7 TeV (7'000'000'000'000 eV)
- 5 ↑ LHC
- 450 GeV (450'000'000'000 eV)
- 4 ↑ SPS
- 26 GeV (26'000'000'000 eV)
- 3 ↑ PS
- 2 GeV (2'000'000'000 eV)
- 2 ↑ BOOSTER
- 160 MeV (160'000'000 eV)
- 1 ↑ LINAC4
- 0 eV



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



Der LHC: ~40 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!!!

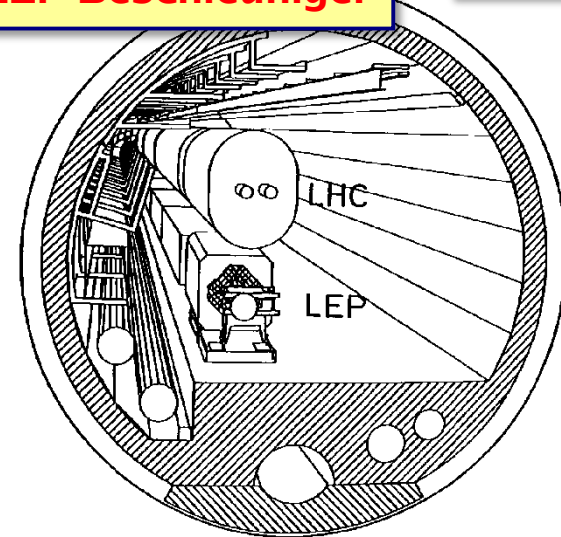
1994: LHC genehmigt (geplanter Start 2005)

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

1998: Beginn des LHC Baus

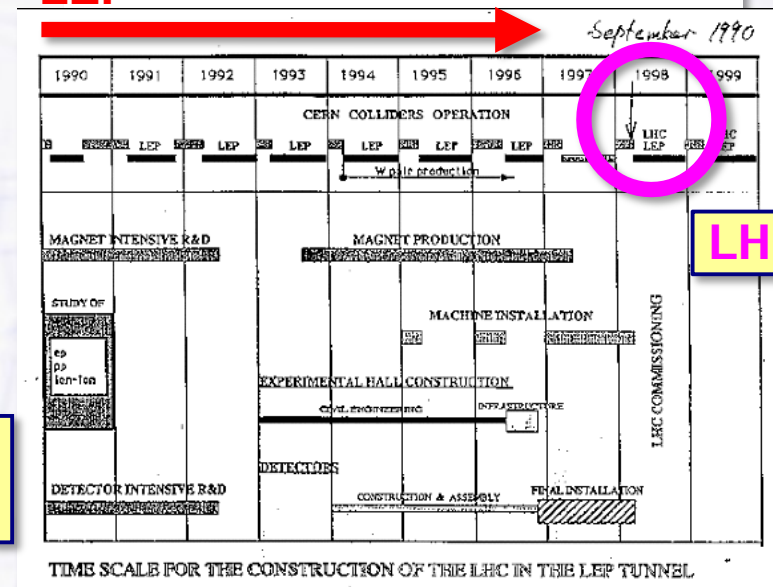
2000: Ende von LEP, kein Higgs gefunden...

2008: LHC Start



LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

LEP



LHC

Plan 1990:
LHC Start 1998...

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**

CERN Large Hadron Collider LHC

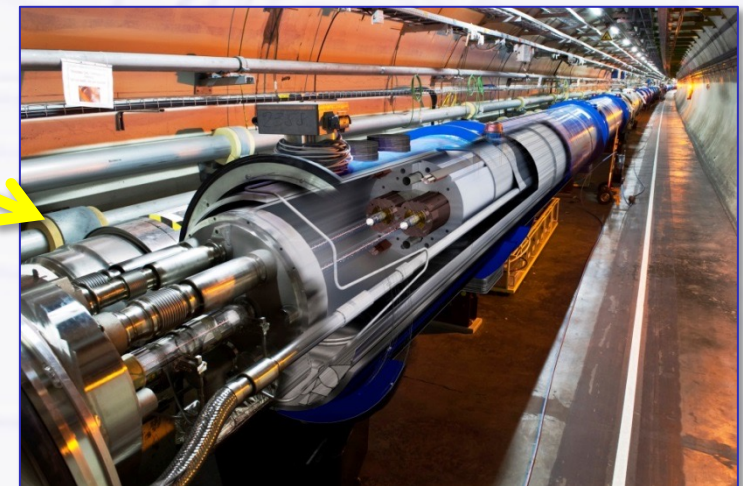
- Umfang: 27 km
- Tunnel mit 3.8 m Durchmesser
- 100 m unter der Erdoberfläche

Umfangreiche Spitzentechnologien

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



- Die meisten Technologien mussten erst entwickelt werden



LHC Magnete

- LHC Magnete sind ein komplexes High-Tech-Produkt mit hohen Anforderungen an Qualität und Präzision
- Entwicklung durch CERN, Fertigung durch europäische Industrie
 - 1/3 Italien, 1/3 Frankreich, 1/3 Deutschland
 - wichtiger Technologietransfer zum Bau kostengünstiger, starker Magnete z.B. für Magnet-Resonanz-Tomographen

LHC Magnetfertigung



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



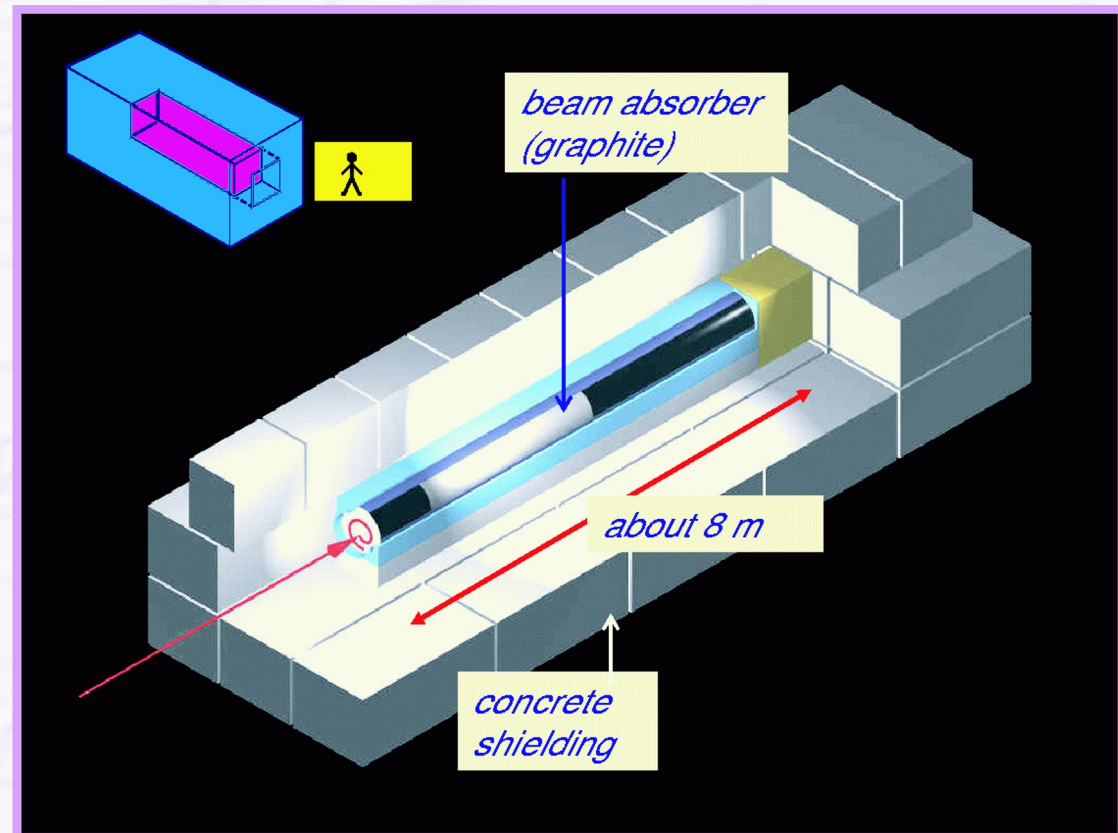
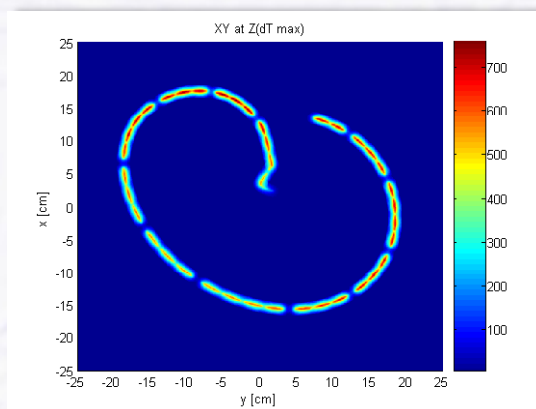
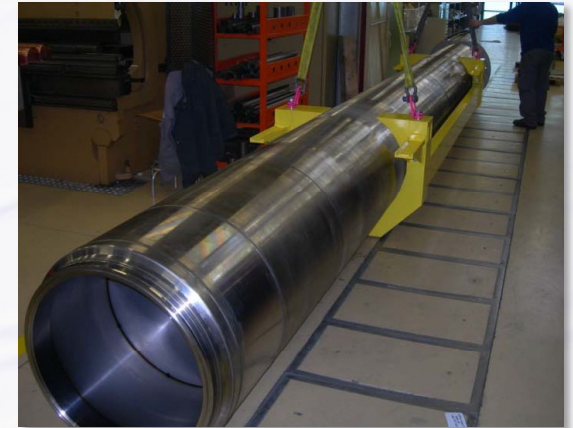
Queen Mary 2 (150'000 t) bei 4.2 Knoten (7.8 km/h)



Größtes Problem bei LHC ist die Kontrolle der gespeicherten Energie

Der LHC Beam Dump

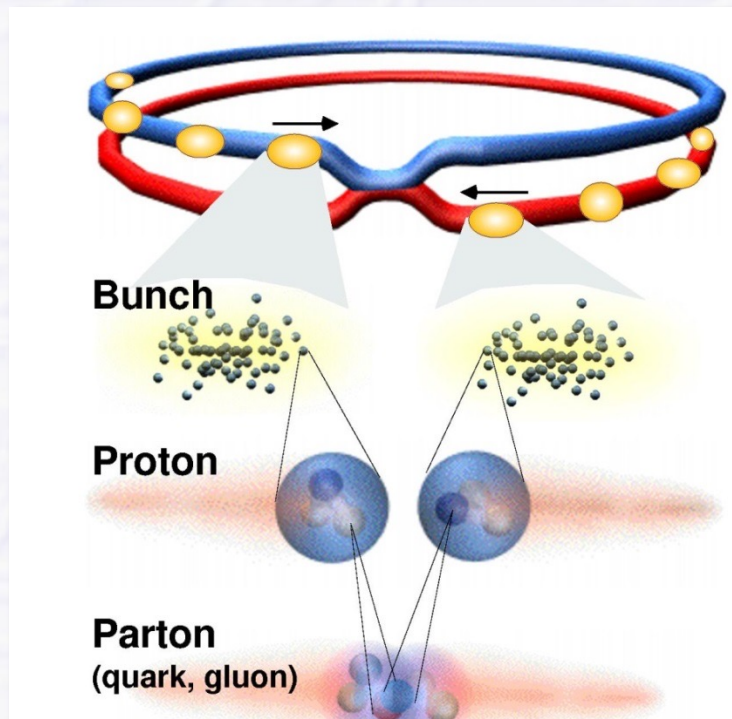
- 350 MJ Beamenergie müssen in $\sim 250 \mu\text{s}$ abgebaut werden (3 Umläufe)
 - instantane Strahlleistung auf dump = 1.4 TW
- Strahl Absorber aus Graphit
 - Schmelzpunkt $\sim 3700 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Aufheizung bis $\sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$
- Auch notwendig
 - “dilution kicker”
 - 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

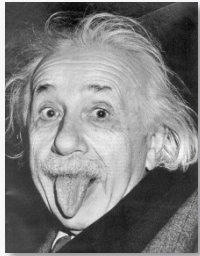
$\sim 10^9$ pp Kollisionen/s

= Überlagerung von ~ 50 pp-Kollisionen
pro Strahlkreuzung: **pile-up**

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor
pro Strahlkreuzung



Methoden der Teilchenphysik

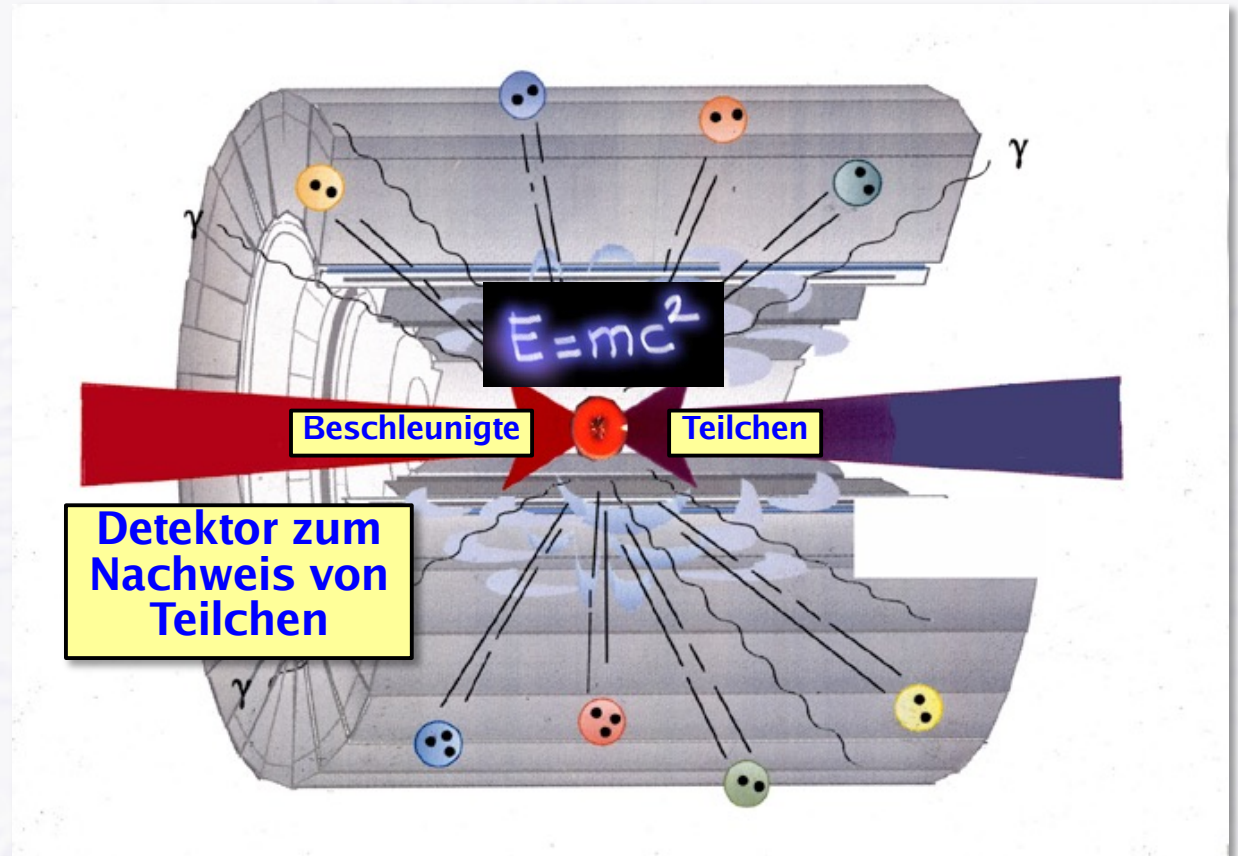


**Einstein
(1905):**

**Materie ist
konzentrierte Energie!**

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

$$E = m c^2$$

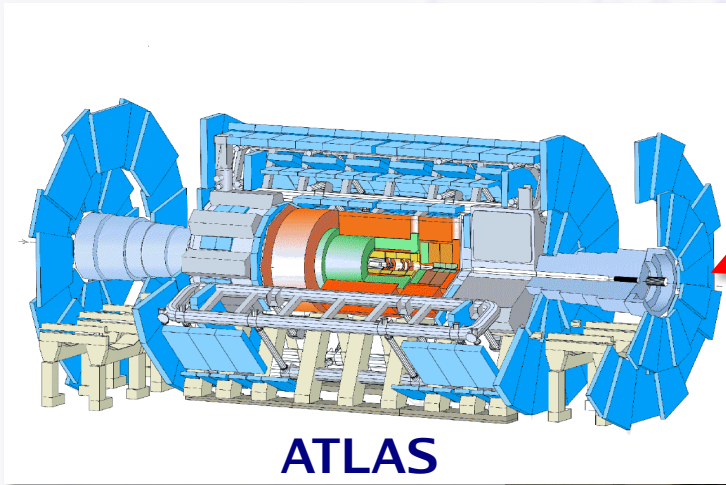


● Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger

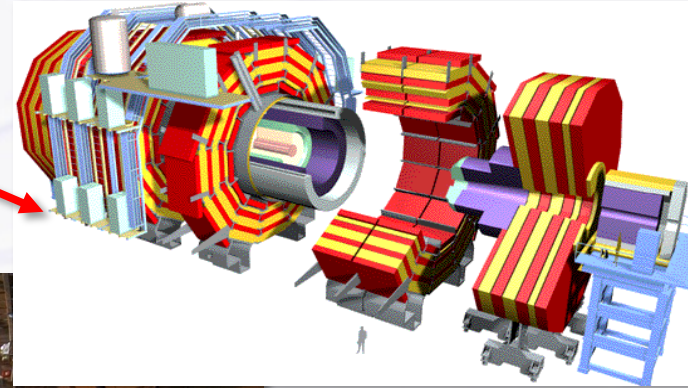
- Protonen werden beschleunigt ⇒ **kinetische Energie**
- **Umwandlung der kinetischen Energie** bei der Kollision in **Materie**
- **Neue Teilchen entstehen** (neue Materie) und müssen **vermessen** werden

LHC Detektoren

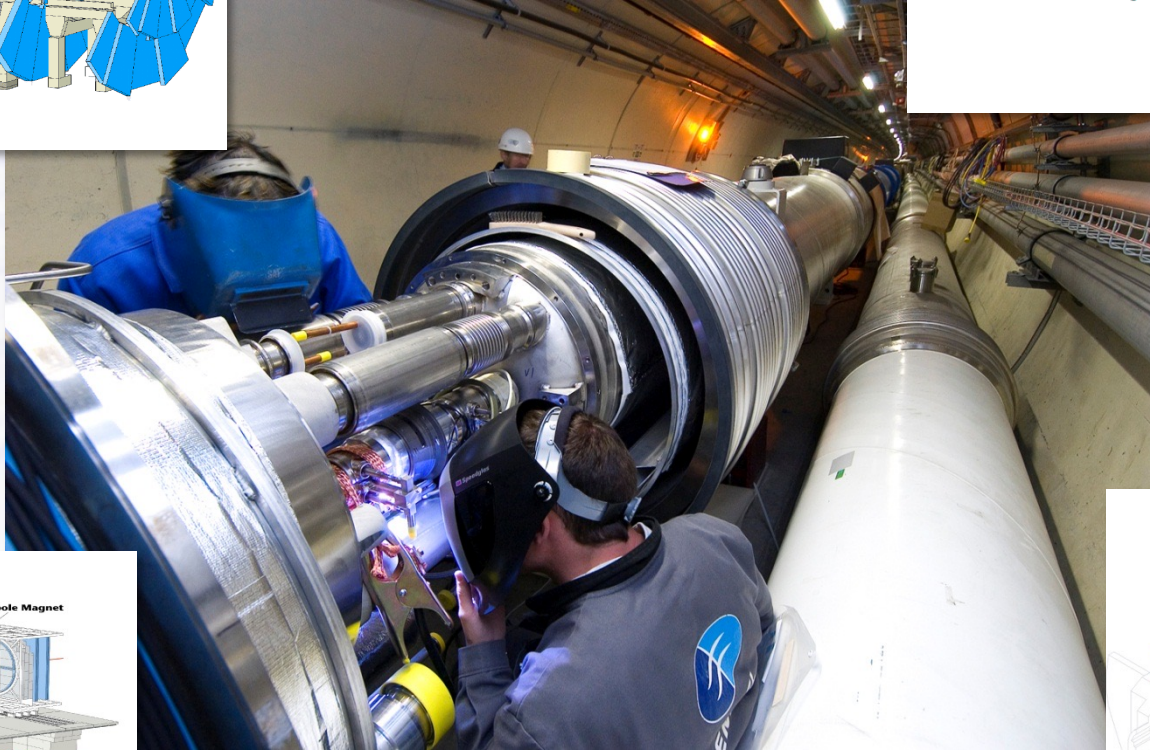
Vielzweckdetektoren
(gut für alles...)



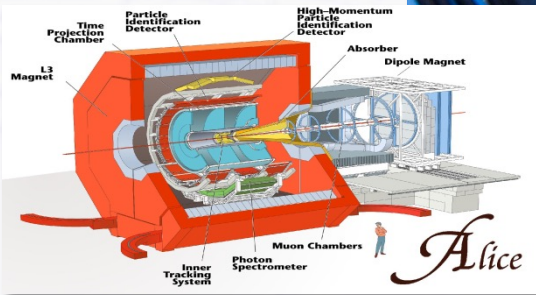
ATLAS



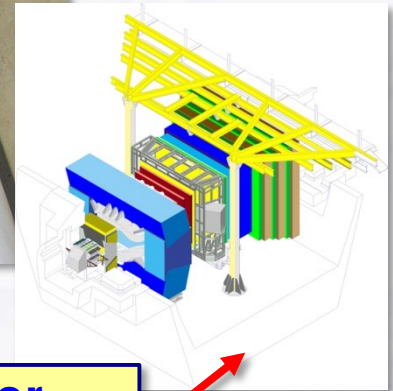
CMS



ALICE



Spezialdetektor für
Schwerionenkollisionen

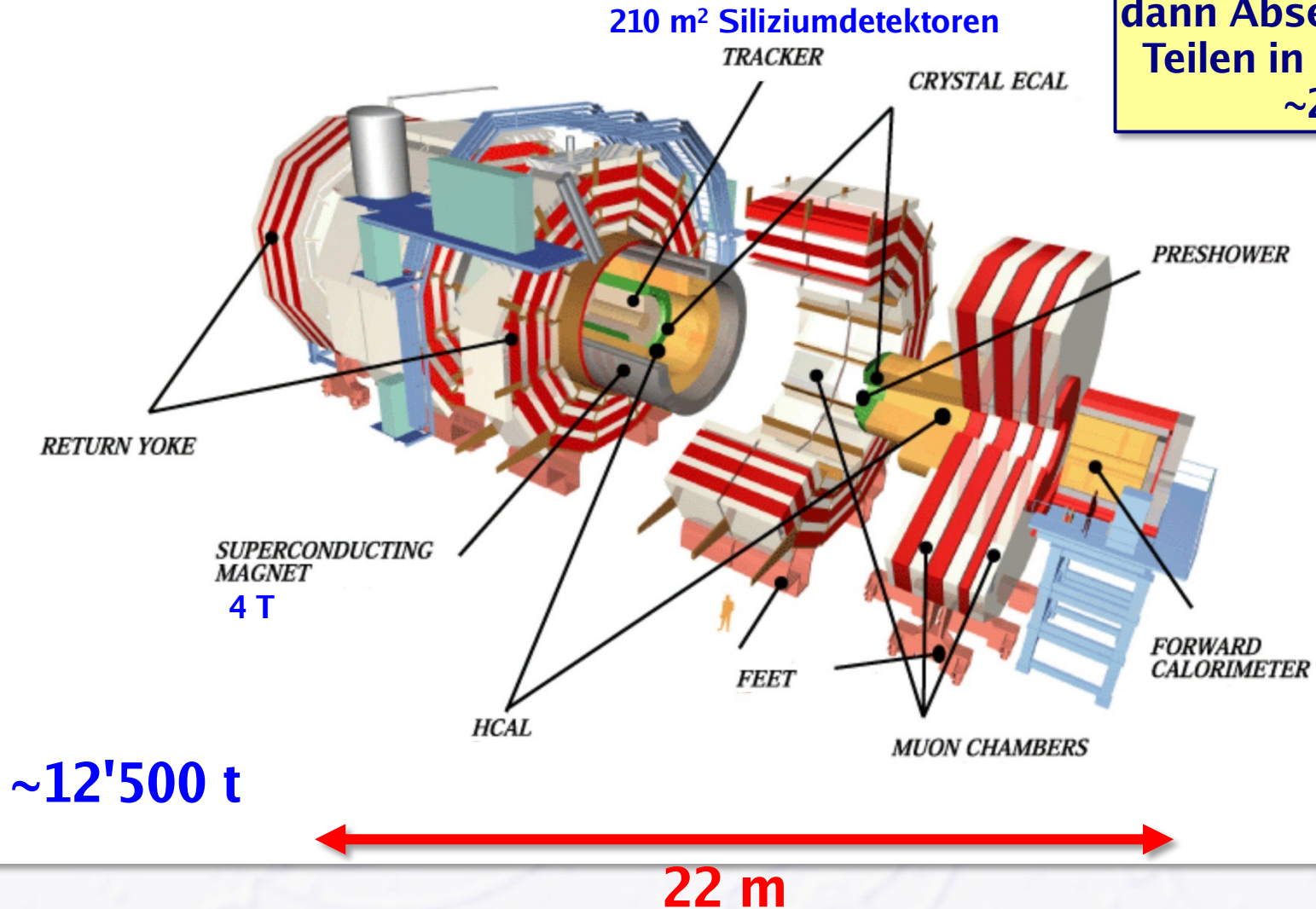


Spezialdetektor
für Physik mit b-Quarks

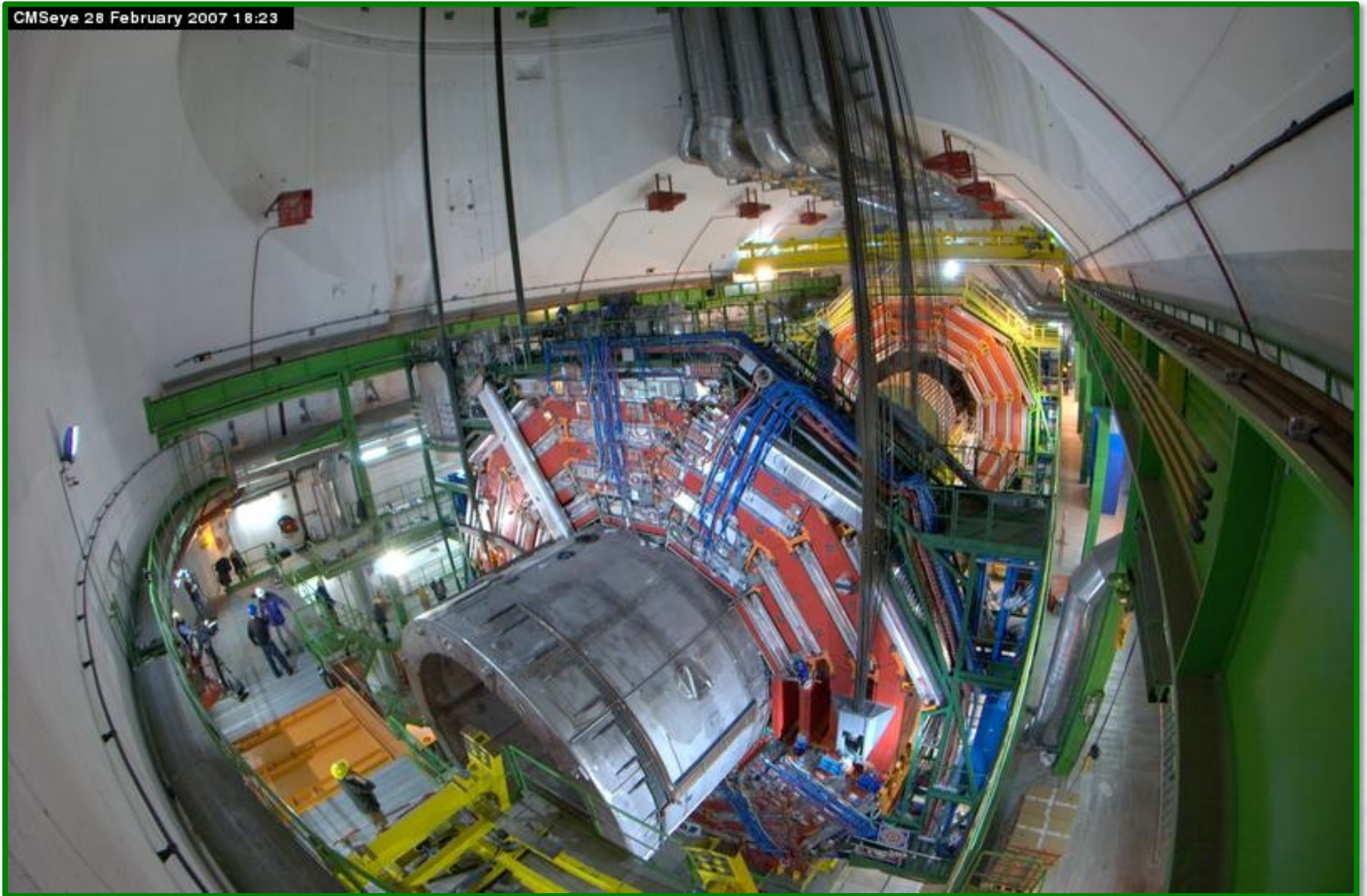
LHCb

CMS (Compact Muon Spectrometer)

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

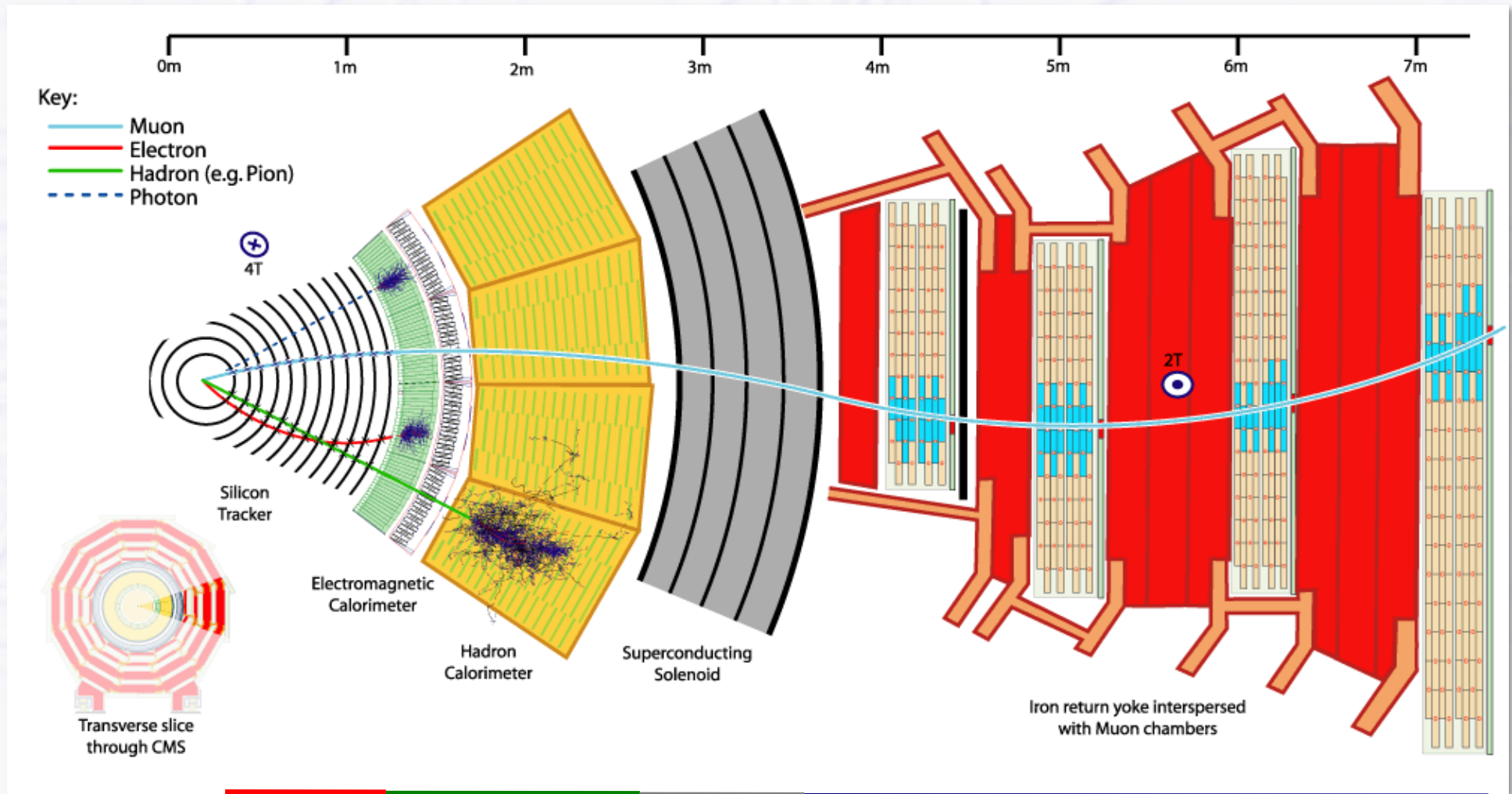


Absenkung des 2000 t CMS Mittelteils



Ein typischer Teilchendetektor

● Schnitt durch den CMS Detektor



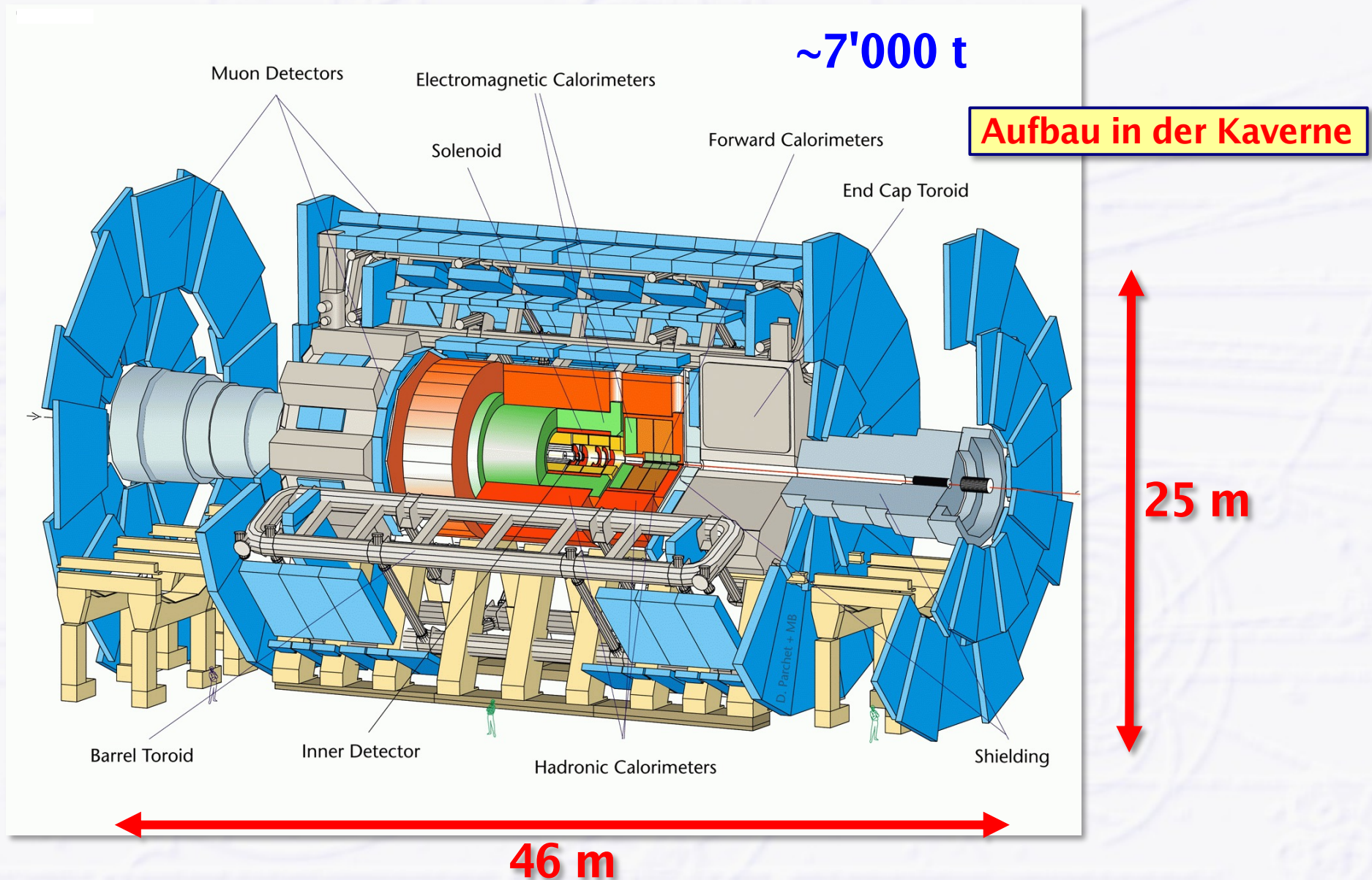
Spur-Det.
Impuls-Messung

Kalorimeter
Energie-Messung

Magnet-Spule

Myon-Detektor und Eisenrückflußjoch
Myon-Identifizierung und -impulsmessung

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

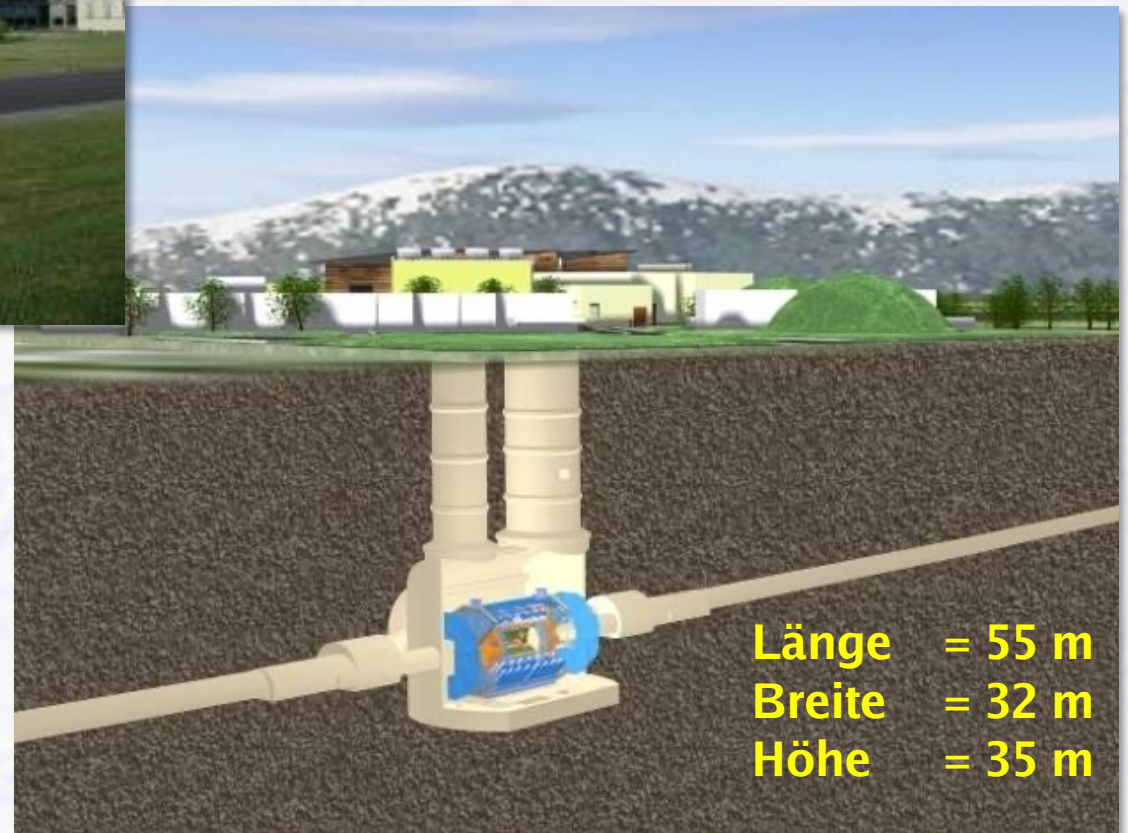


ATLAS unterirdische Kaverne



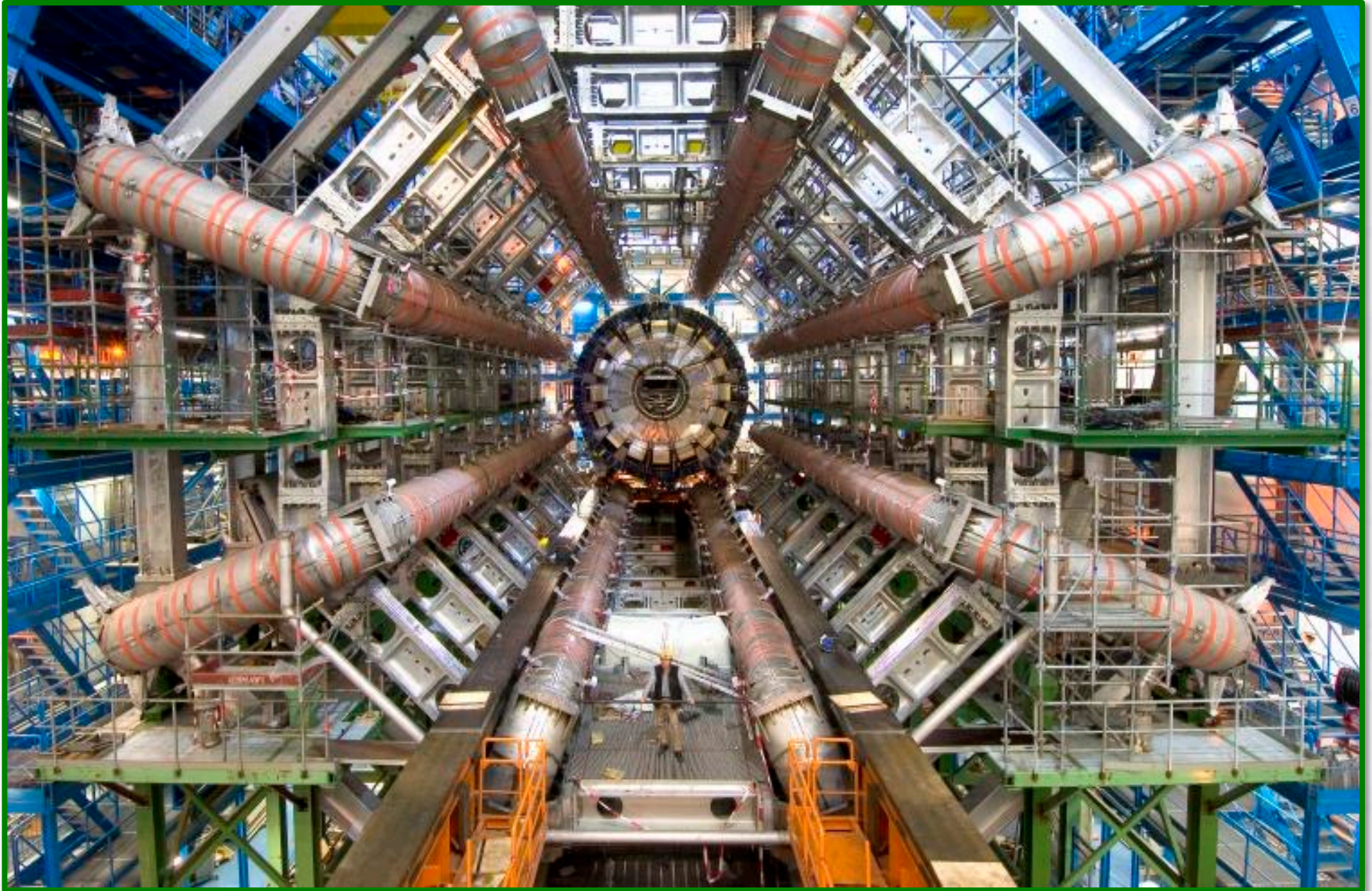
ATLAS Detektor im Vergleich zum 5-stöckigen ATLAS+CMS Hauptgebäude am CERN

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



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

ATLAS Barrel Toroid fertiggestellt (Nov 2005)



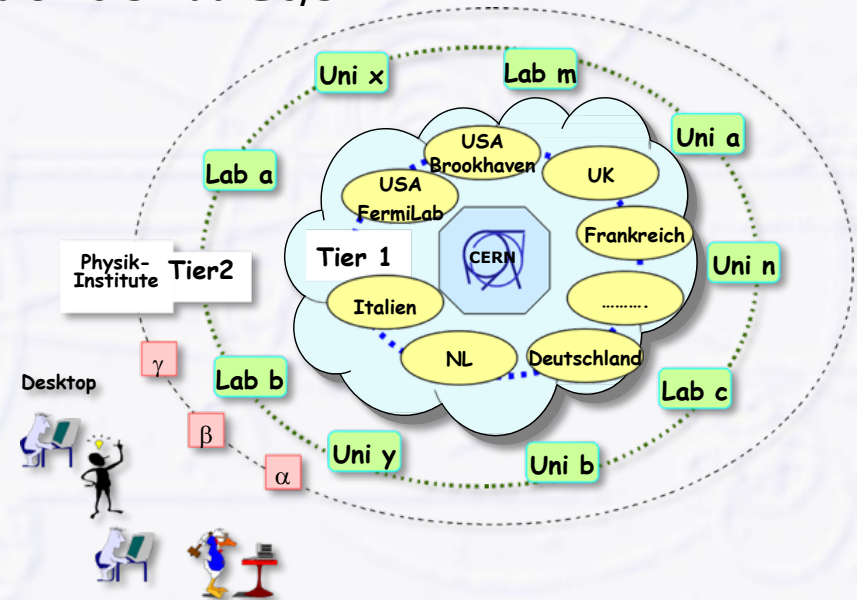
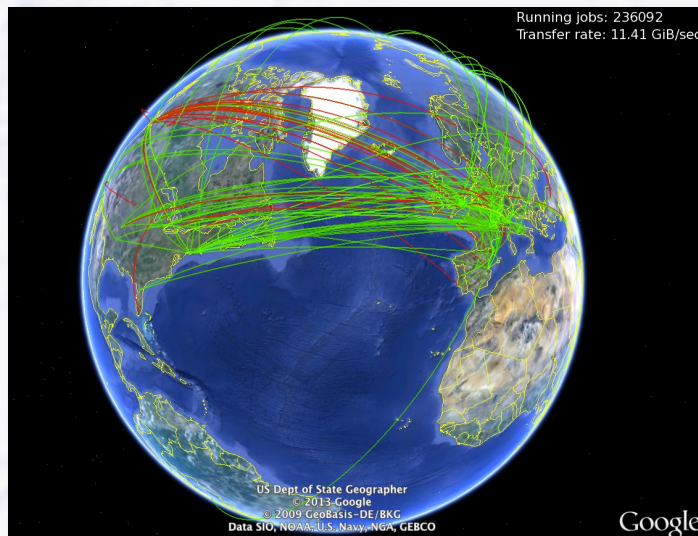
Detektortechnologie und Kunst

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



Datenverarbeitung

- Rohdatenrate eines LHC Experiments: 1 PB/s (1 000 000 GB/s)
 - zu gross für permanente Speicherung
 - 2-stufige Filterung: 1 PB/s → 1 TB/s → 1 GB/s (Speicherung)
- Datenrekonstruktion und -analyse durch weltweites Computer-Netzwerk (LHC Computing Grid)
 - gestartet 2002, Vorläufer des heutigen “Cloud-Computing”
 - mehr als 170 Rechenzentren in 42 Ländern
 - 1 Mill. CPU cores, 1 Exabyte (1000 PB = 1 000 000 TB) Speicherkapazität
 - Netzwerk-Verbindungen zwischen Rechenzentren bis 100 Gb/s



Datenanalyse

- Suche die Nadel im Heuhaufen...

- Heuhaufen: 1 Nadel in 40 Millionen Halmen

- ...oder das Higgs-Teilchen im LHC

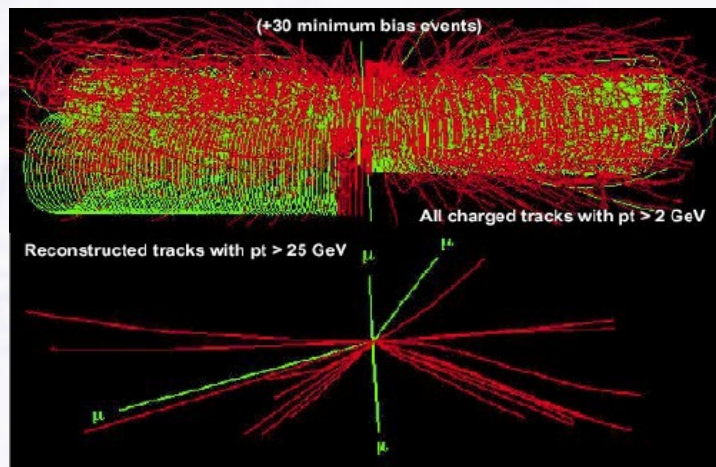
- LHC: 1 Higgs in 100 Milliarden Kollisionen

- erfordert leistungsfähige Algorithmen zur Suche und Filterung



- Data Mining in LHC Daten

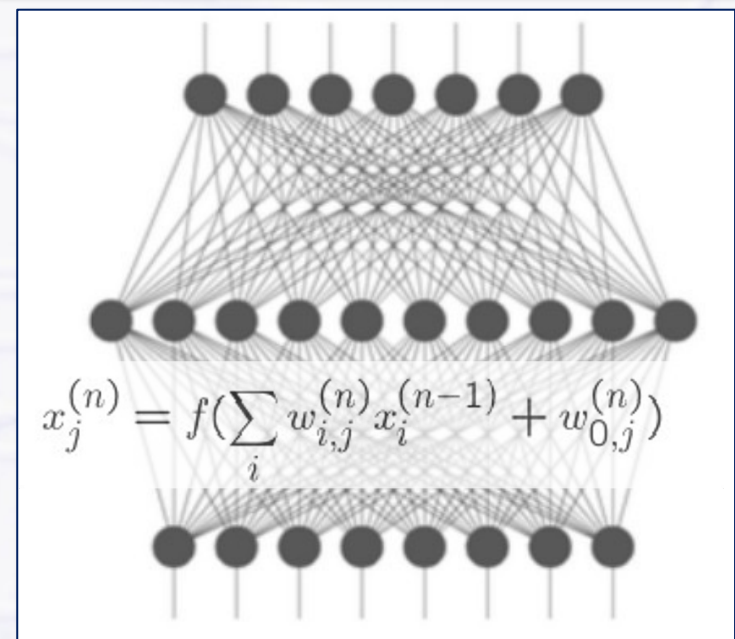
ungefiltert



Higgs-Zerfall
in 4 Myonen

- Ähnliche Verfahren zunehmend bei Industrie und Banken

Anwendung künstlicher neuronaler Netze



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

1989 am CERN

- Start des neuen Large Electron Positron Colliders LEP stand bevor
- Wachsende Anzahl Gastwissenschaftler (4'500) aus immer mehr Ländern
- Wunsch nach besserem Informationsaustausch entstand

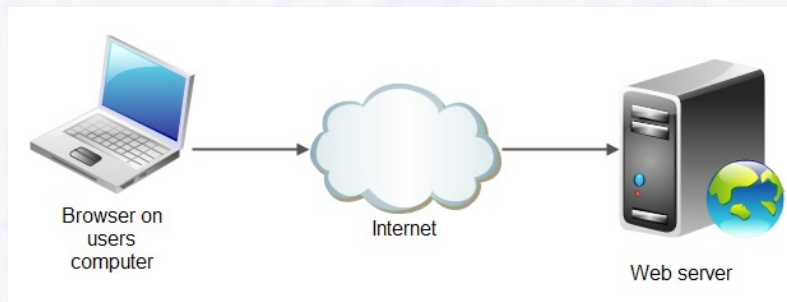
Idee von Tim Berners-Lee (März 1989)

➔ Nutzer verbinden sich durch einen **Browser** über das Internet mit einem **Server**

http Protokoll (<http://cern.ch>)

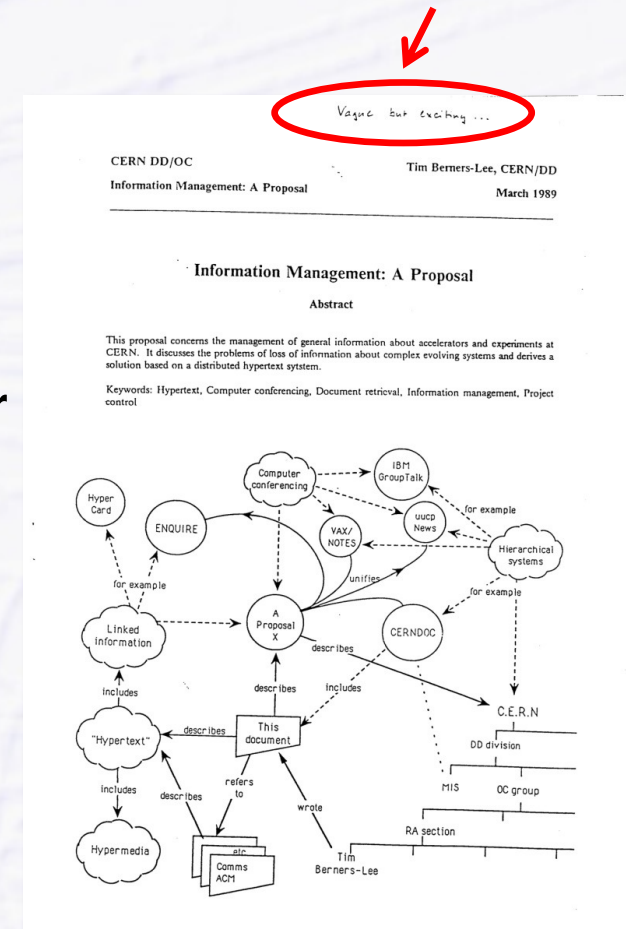
➔ **Server** schickt Information an **Browser** zurück, der die Information darstellt

html Seitenbeschreibung mit Links zu anderen Servern



Kommentar des damaligen Chefs:

"Vague but exciting..."



Erster Vorschlag von Tim Berners-Lee, spätere Konzeptentwicklung zusammen mit Robert Cailliau

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

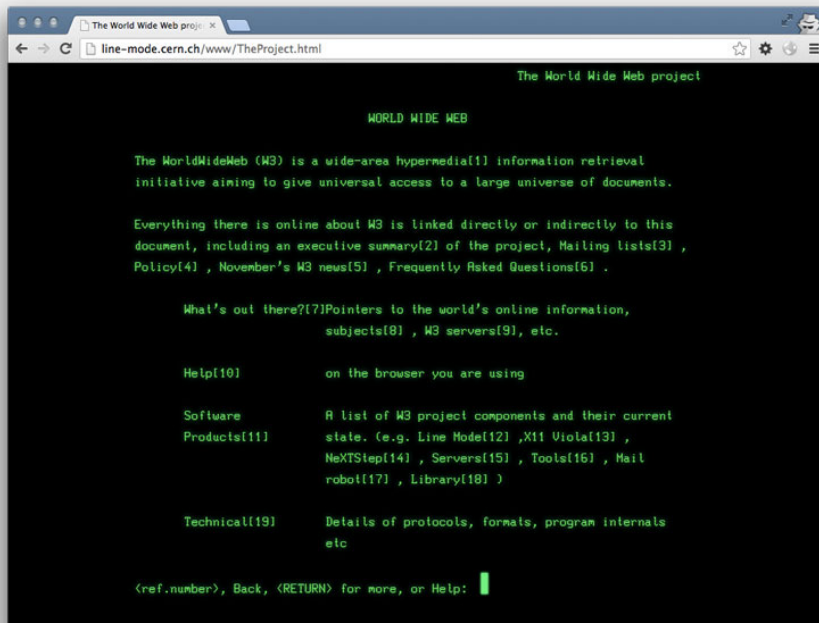
Erster Webserver Januar 1991

→ ein NeXT computer

- NeXT durch Steve Jobs 1985 gegründet
- 1997 durch Apple übernommen

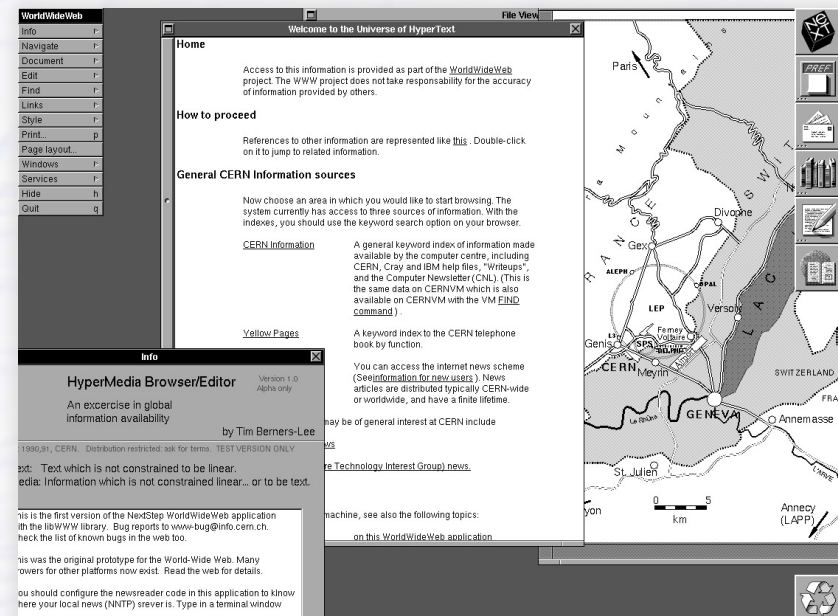
Erster Webbrowser

→ noch "line-mode" (ohne Maus)



<http://line-mode.cern.ch/www/hypertext/WWW/TheProject.html>

Später mit Maus und Graphik



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

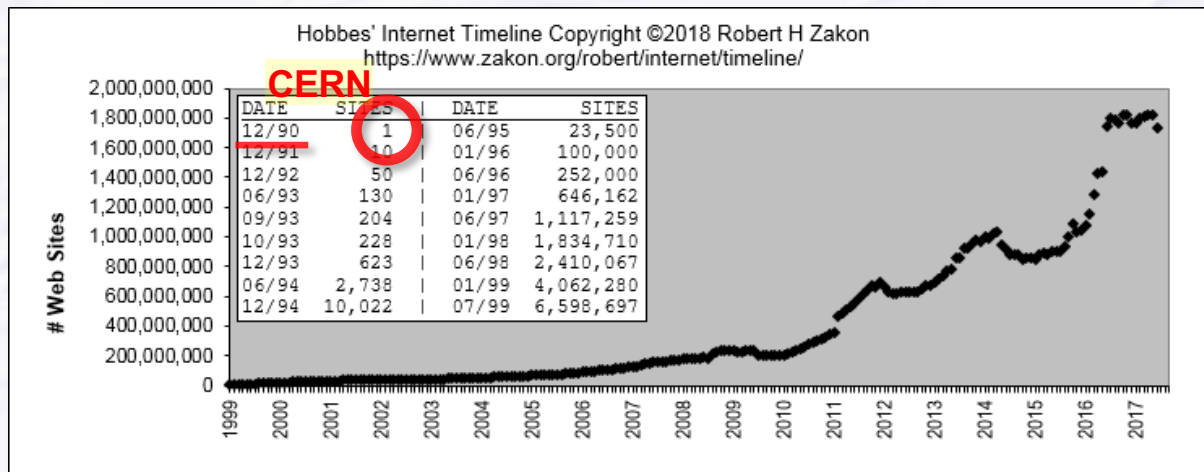
Freigabe des WWW durch CERN im April 1993

→ unentgeltlich, ohne Lizenzgebühren

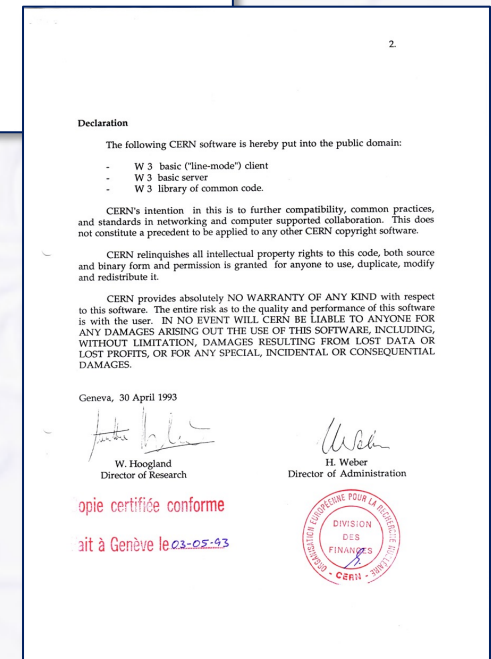
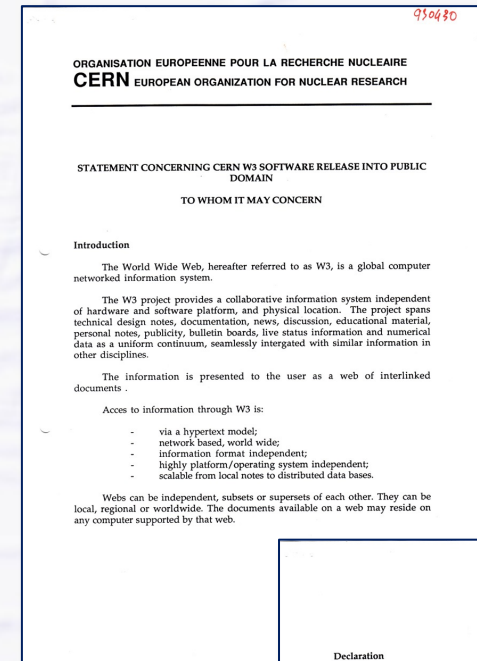
- ca. 50 Webserver weltweit Anfang 1993,
- mehr als 500 im Oktober 1993

Seither (fast) ständiges Wachstum

→ ca. 1.8 Mrd. websites 2017



→ im Jahr 2000 erreichten die Gewinne der Web-basierten Firmen die Gesamtsumme des CERN-Budgets seit Gründung 1954



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 $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

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

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

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

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

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

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

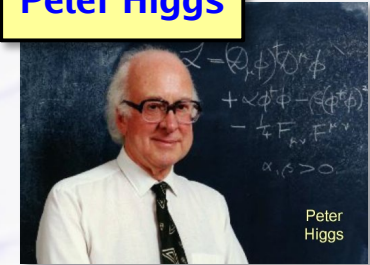
- Gutachter war Yoichiro Nambu, der vorschlug, einen Abschnitt über die Auswirkungen der Theorie hinzuzufügen
- Higgs ergänzte, daß die Anregung des Feldes zu einem neuen Teilchen führen würde...

➔ ...getauft "Higgs boson"

- durch Theoretiker Ben Lee auf der Rochester Konferenz 1966

Higgs-Mechanismus

Peter Higgs



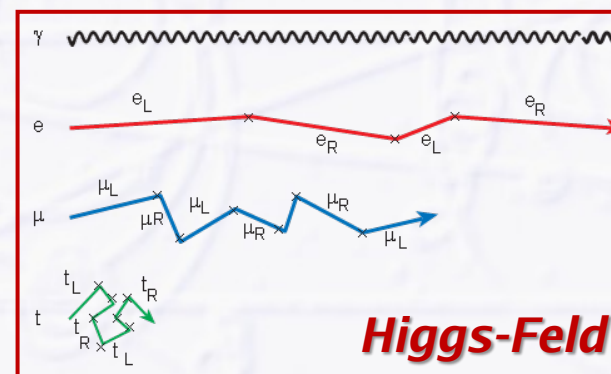
- **Das Standardmodell ist (war) fast komplett**
 - alle Materie- und Kraftteilchen wurden gefunden
 - zuletzt: top-quark (1995), tau-neutrino (2000)
 - **aber: alle Teilchen haben im Standardmodell keine Masse**
- **Idee von Peter Higgs (1964) und anderen**
 - **Das Vakuum ist nie leer, sondern immer 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

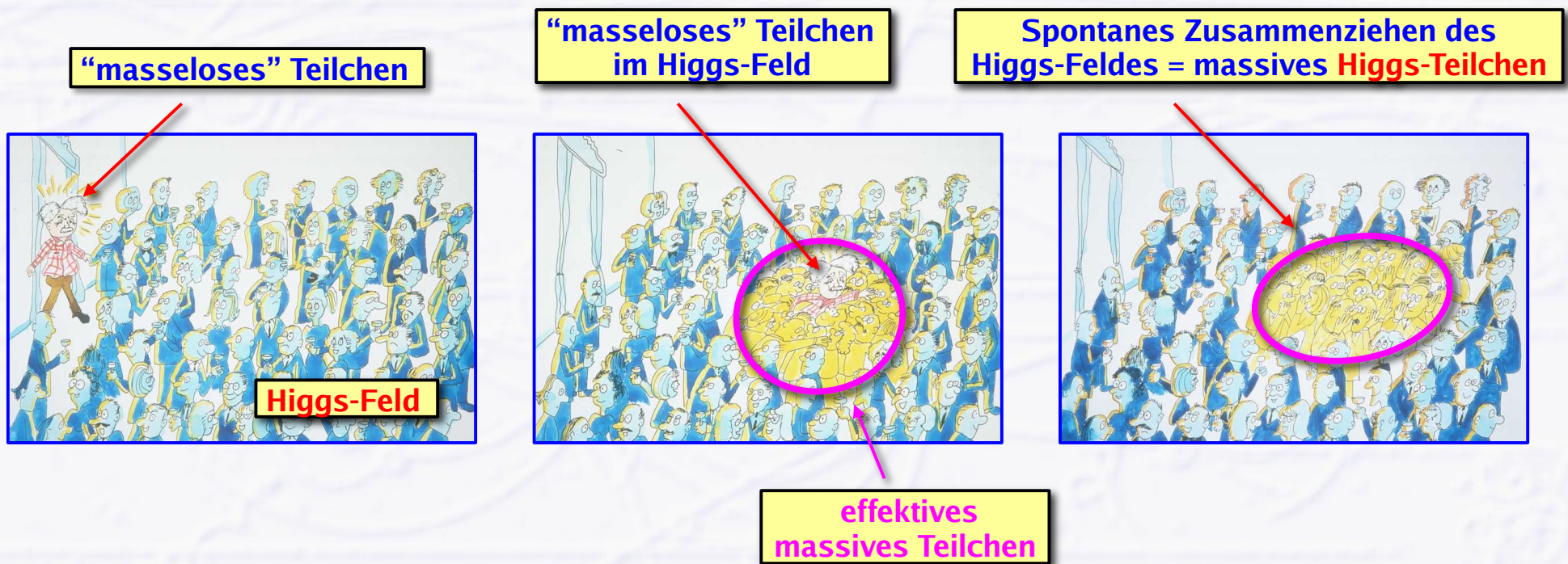
mittelschwere Masse: Myon

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)**



Higgs-Feld \rightarrow Higgs-Teilchen

- Higgs-Feld = Wasserfläche, Higgs-Teilchen = Wassertropfen

Higgs-Feld

Higgs-Teilchen

Zerfall

Anregung

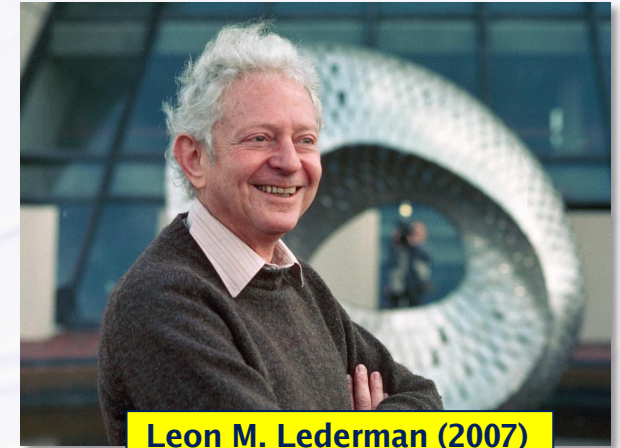
Wellen (Nachweis)

[Credits: stepvideolabs \(2014\)](#)

“Das Gottesteilchen”

- “erfunden” von Leon M. Lederman

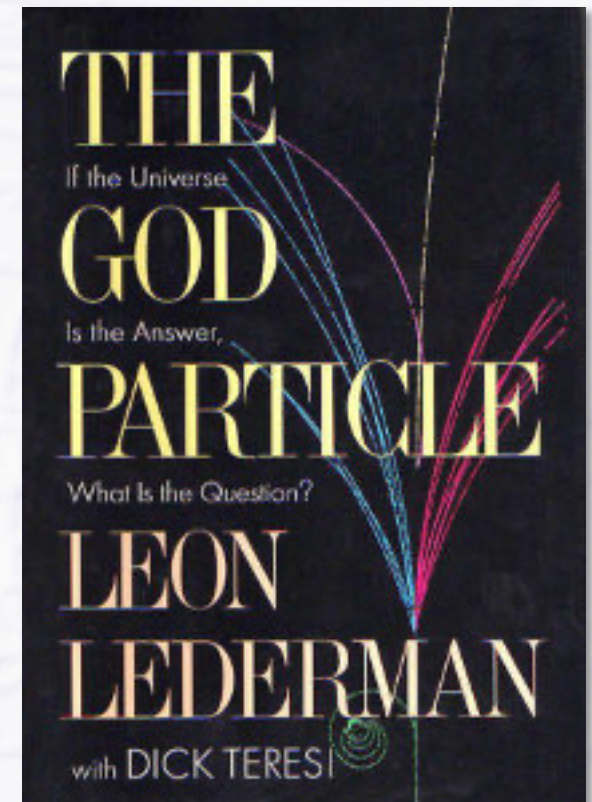
- geboren 1922, früherer Fermilab Direktor
- Nobelpreis 1988 (mit Melvin Schwartz und Jack Steinberger) für die Entdeckung des Myon Neutrinos 1962



- 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



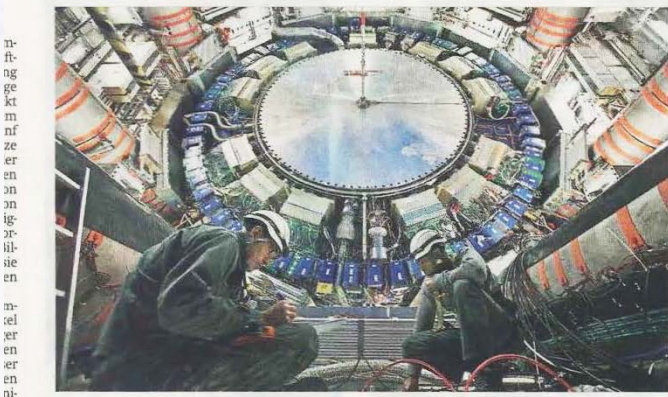
CERN Control Centre (LHC Kontrollraum)



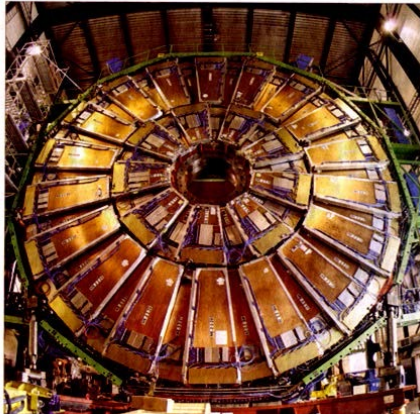
LHC Start in deutschen Medien



...gab es die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“, dem Teilchenbeschleuniger am Forschungszentrum Cern bei Genf in bislang unbeobachtete Region...

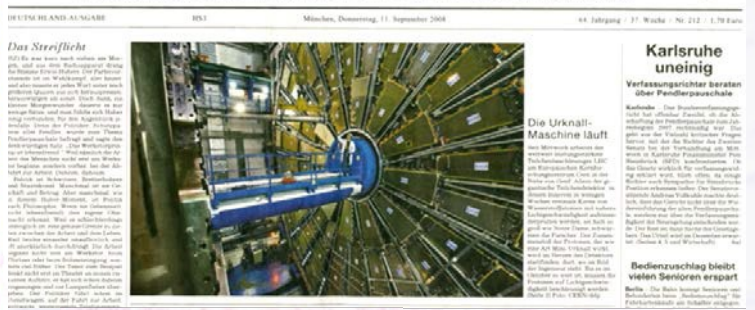


Jetzt geht es rund
...Forschungszentrum Cern nimmt heute der größte Teilchenbeschleuniger der Welt in Betrieb.



...Durch den direkten Kontakt mit den Wissenschaftlern wollen wir jungen Leuten die Art und Weise näherbringen, wie moderne Forschung – gerade Grundlagenforschung – stattfindet“, sagt Michael Kobel. Entdeckergeist sollte geweckt werden, die Begeisterung dafür, tiefergehende Fragen an die Natur zu stellen...

„Ich muss gar nichts“: Warum Nicolas Hayek Aktionäre ignoriert / Wirtschaft
Süddeutsche Zeitung
NEUESTE NACHRICHTEN AUS POLITIK, KULTUR, WIRTSCHAFT UND SPORT



Der LHC Unfall – 19. September 2008

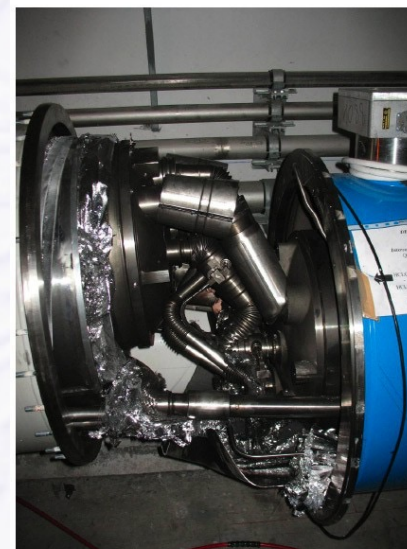
● Aufschmelzen einer schlechten Stromverbindung (13'000 A)

- 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

● (Fast) volle Energie ab 2015



Erste LHC Kollisionen bei hoher Energie

ATLAS Kontrollraum



Higgs-Teilchen Produktion und Zerfall

Higgs-Feld Nachweis durch Higgs-Teilchen

- **Higgs-Teilchen = kurzzeitige Anregung des Higgs-Felds**
- Teilchen müssen mit hoher Energie kollidieren, das Higgs-Feld anzuregen und ein Higgs-Teilchen zu erzeugen

Higgs-Teilchen Zerfälle sind berechenbar

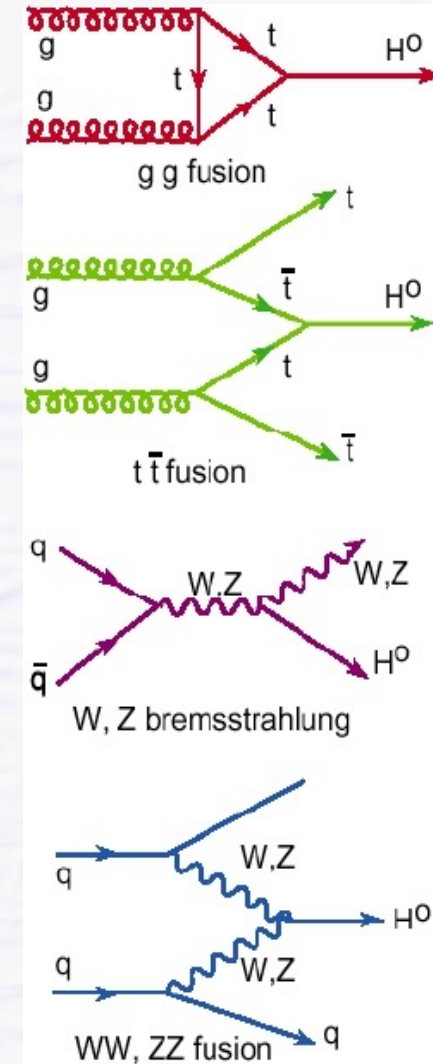
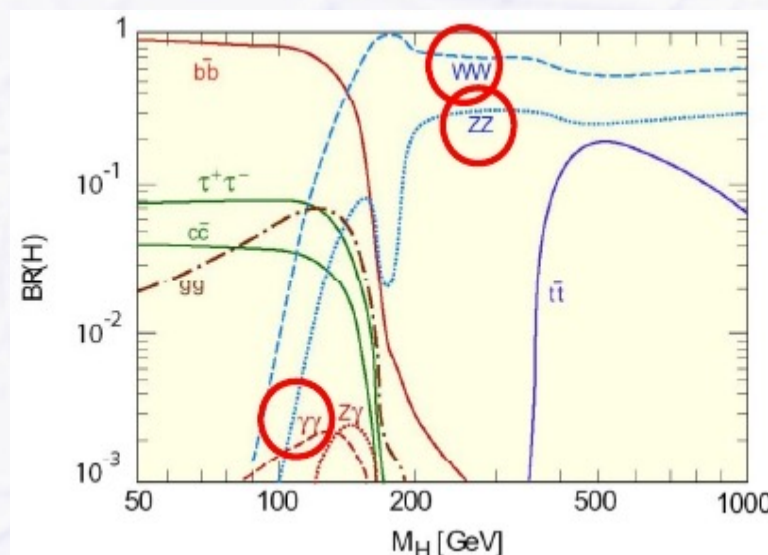
- nur abhängig von der (zunächst unbekannt) Masse

Vektor Boson Zerfälle

- $H \rightarrow ZZ$ (wenn M_H groß)
- $H \rightarrow WW$ (wenn M_H groß)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ (wenn M_H klein)

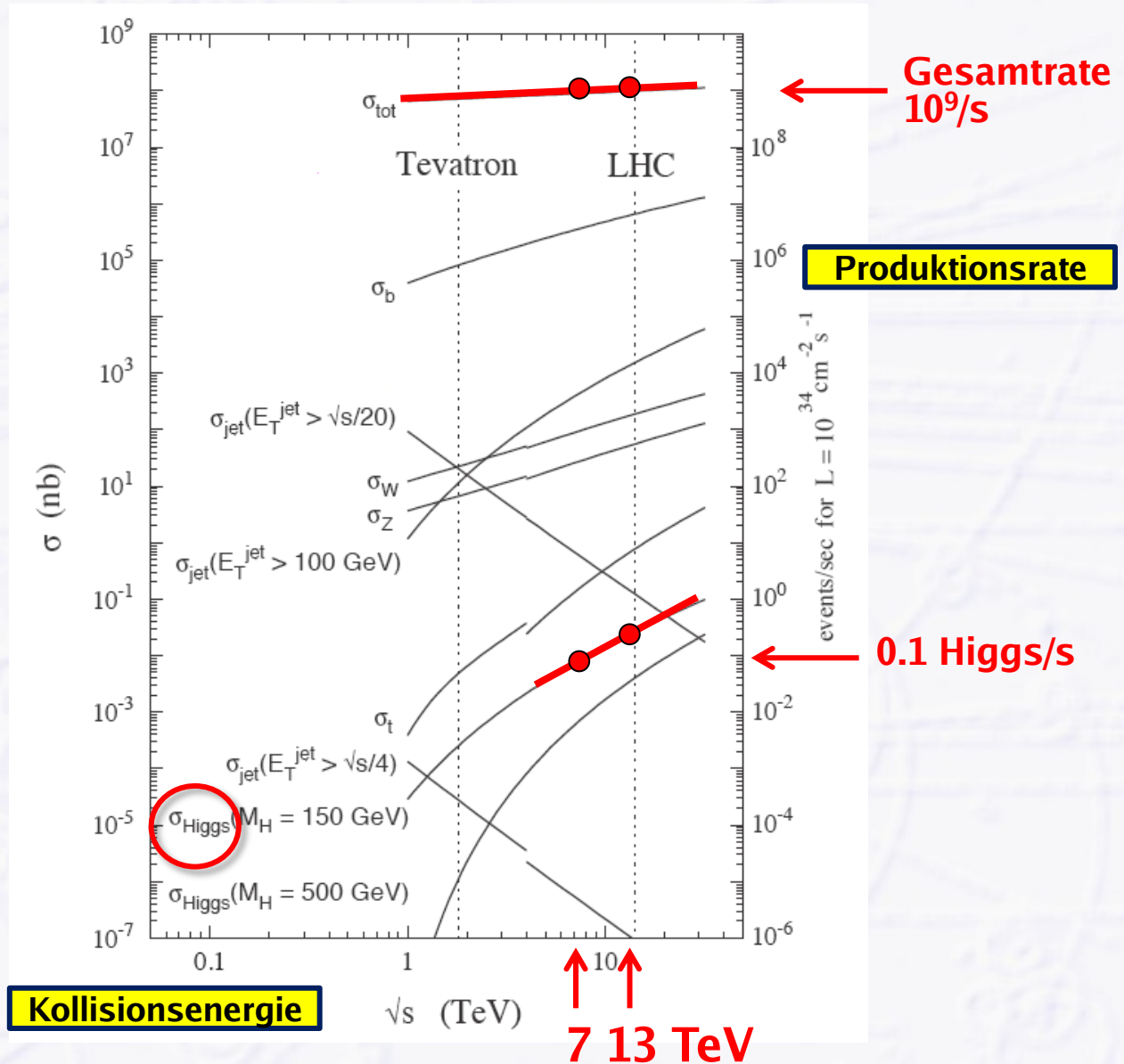
Zerfälle in Fermionen

- $H \rightarrow \tau\tau$ (wenn M_H klein)
- $H \rightarrow bb$ (wenn M_H klein)



Higgs Produktionsrate am LHC

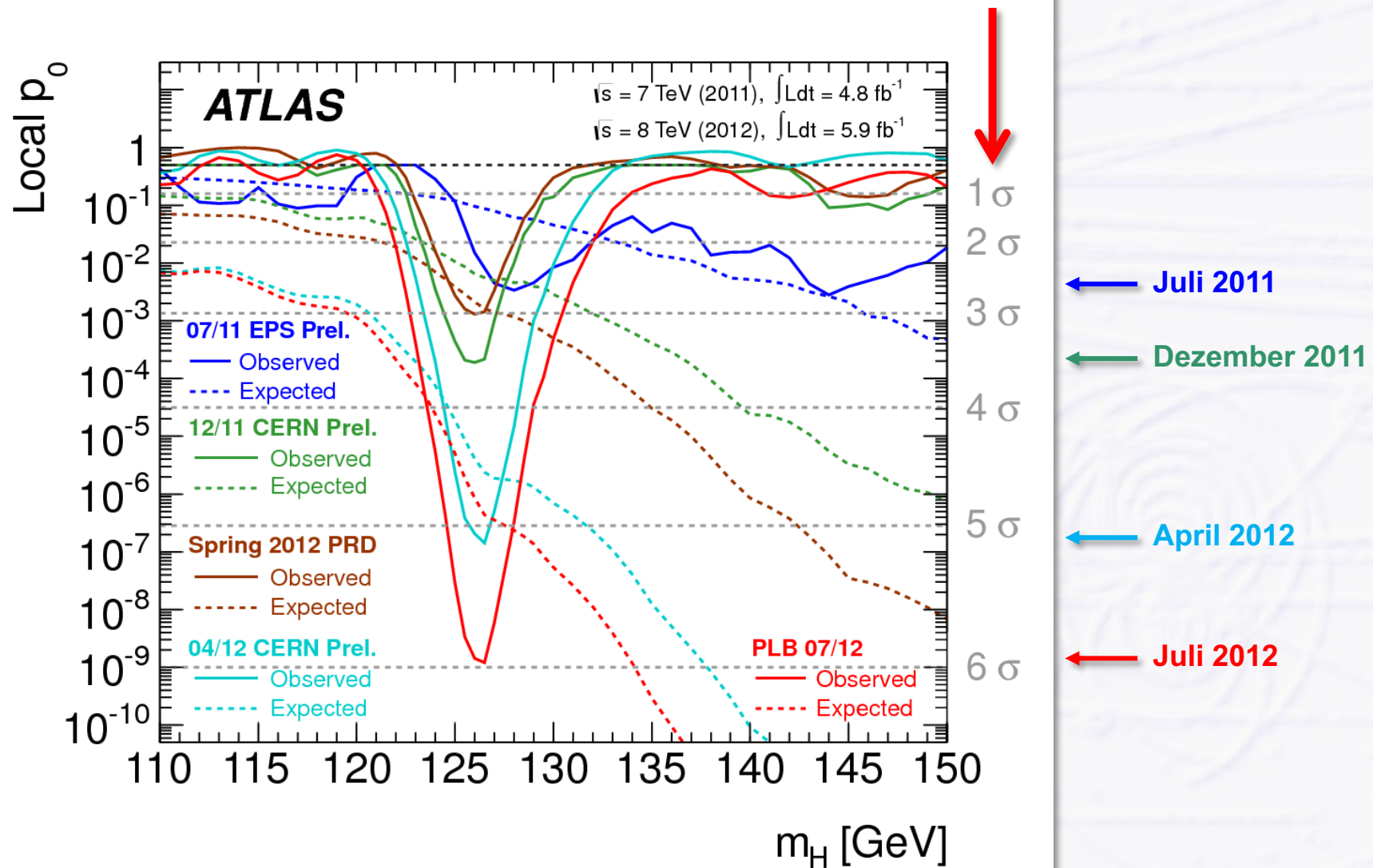
- **Produktionsrate:**
~100 Higgs-Teilchen pro Stunde
- 2010 - 2012 wurden ca. **300'000 Higgs-Teilchen bei ATLAS produziert**
- **ABER: Higgs-Teilchen zerfallen sofort nach der Erzeugung**
 - nur wenige (seltene) Zerfallskanäle eignen sich zum Nachweis
- **nur ~1'000 Higgs-Teilchen wurden nachgewiesen**



Der Weg zur Entdeckung

● Erste Hinweise auf "etwas" bei ~125 GeV Masse im Juli 2011

→ statistische Signifikanz wächst über >ein Jahr stetig an



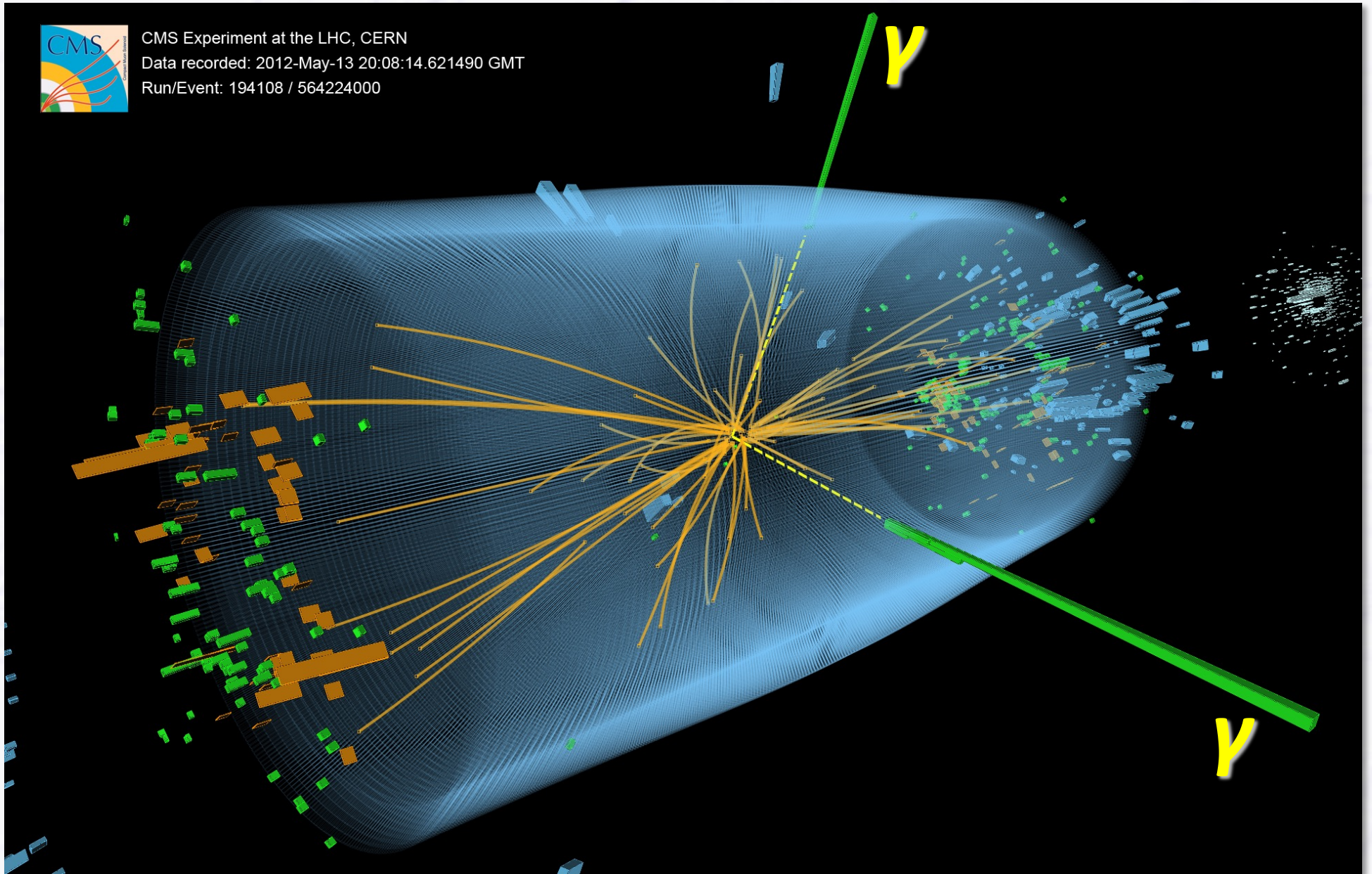
Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012



Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



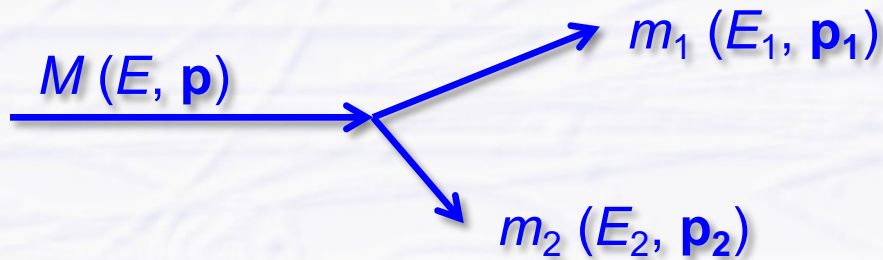
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



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: $H \rightarrow \gamma \gamma$

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

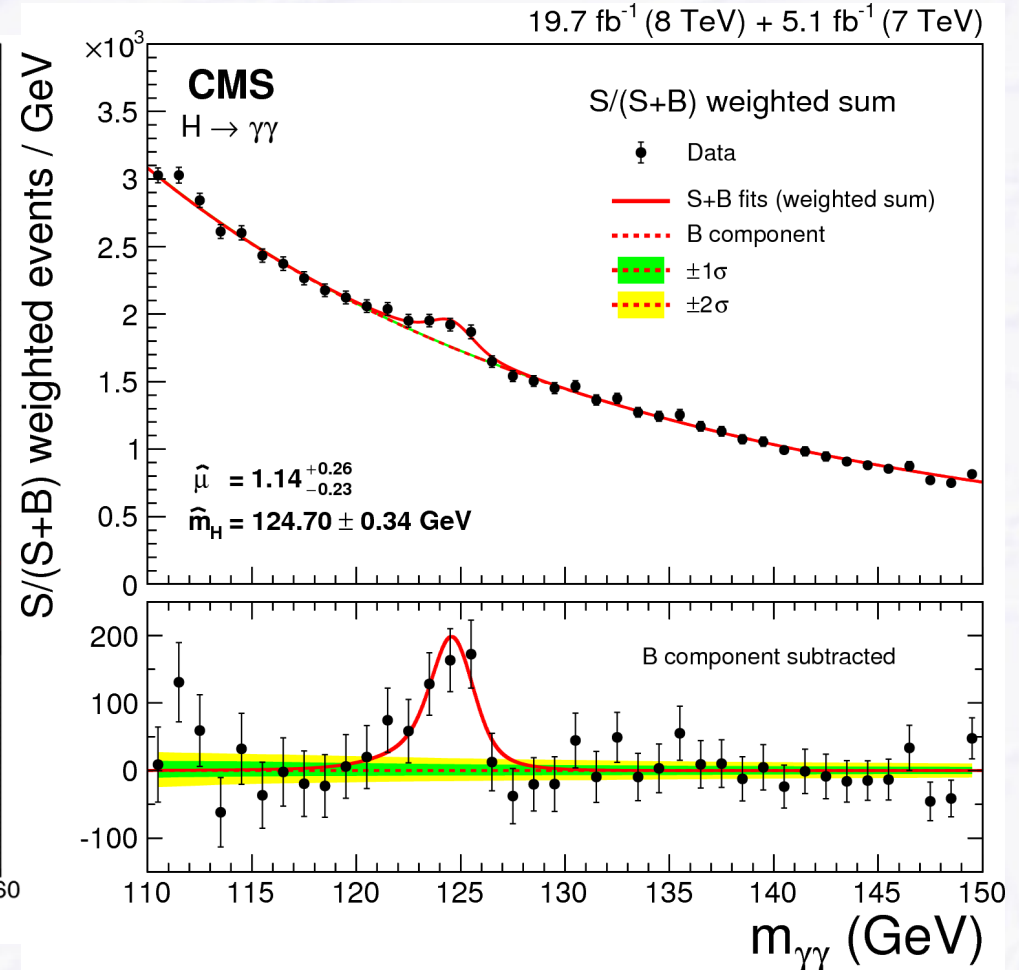
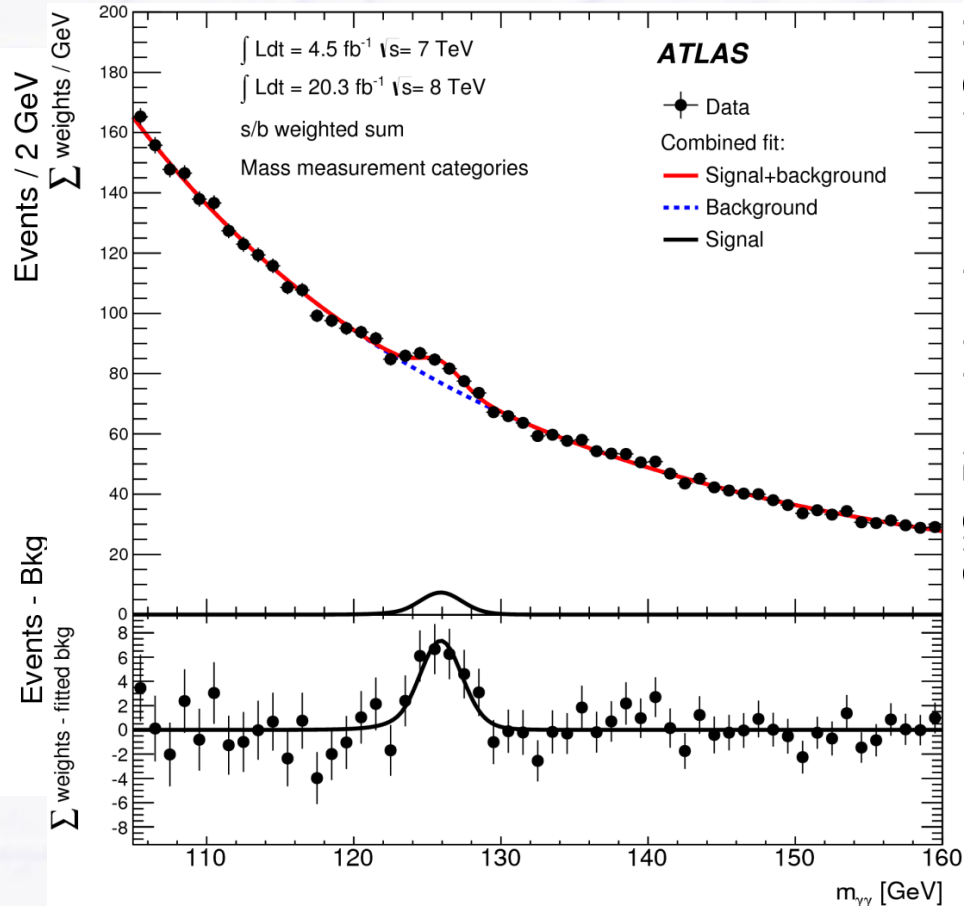
- **Messung der Higgsmasse aus Photonimpulsen + Winkel**

$H \rightarrow \gamma\gamma$

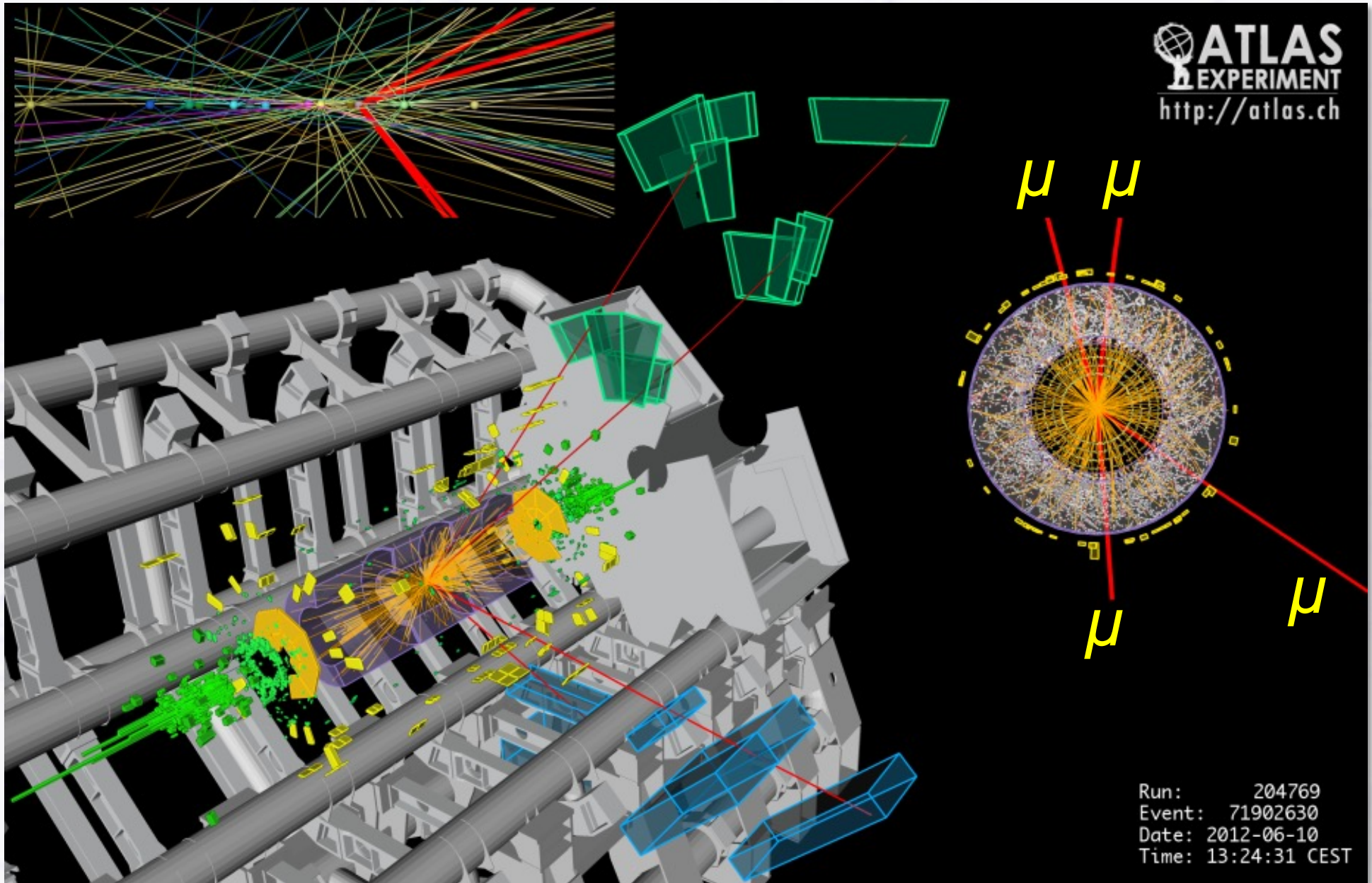
- **Bester Zerfallskanal für $M_H < 120$ GeV**
- ➔ **zweitbester Zerfallskanal für $120 < M_H < 130$ GeV**

Stand: 16. Juni 2014

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



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

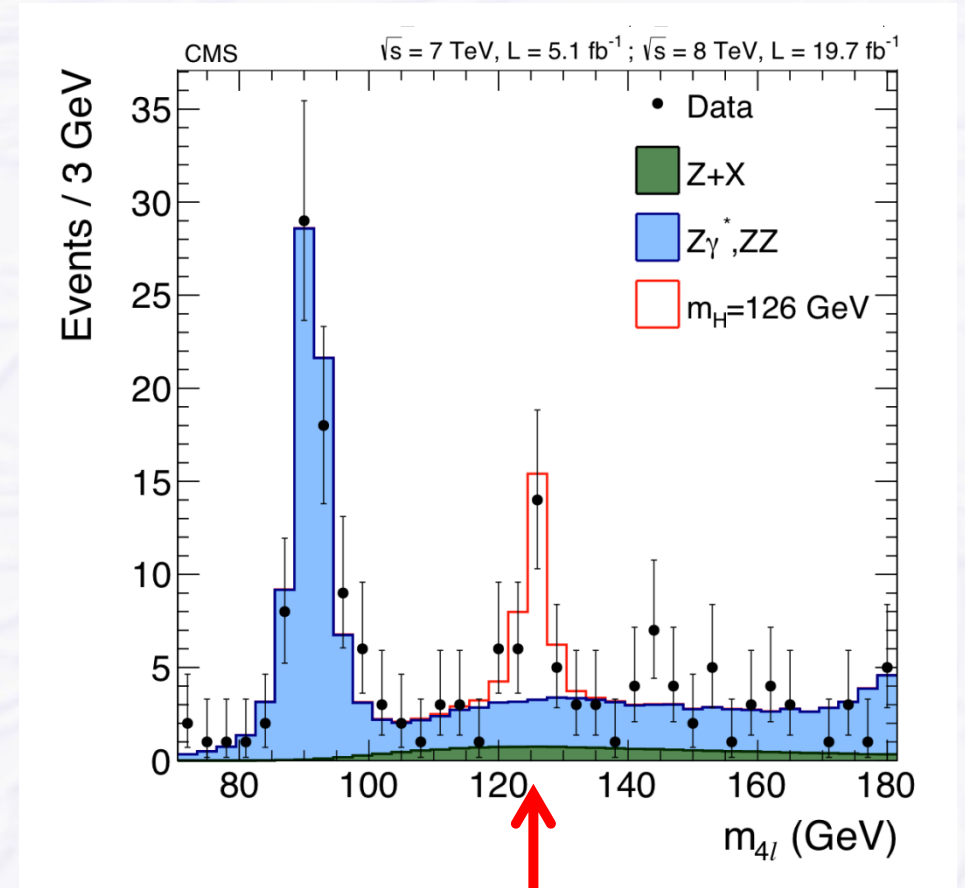
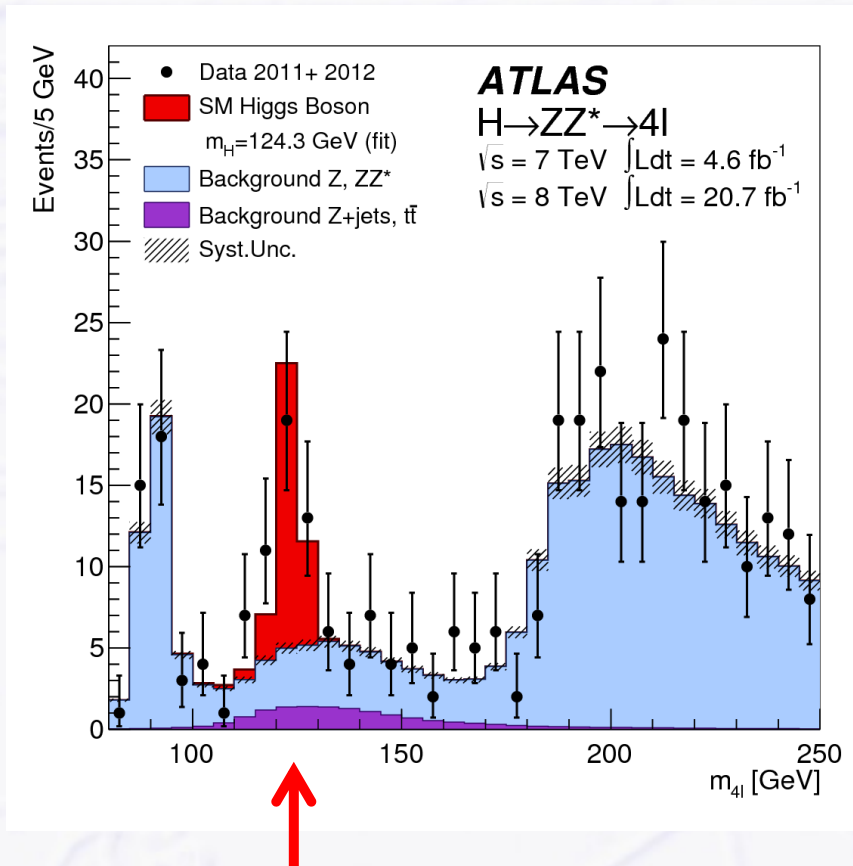


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Leptons}$

● "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 Massenaufösung als WW

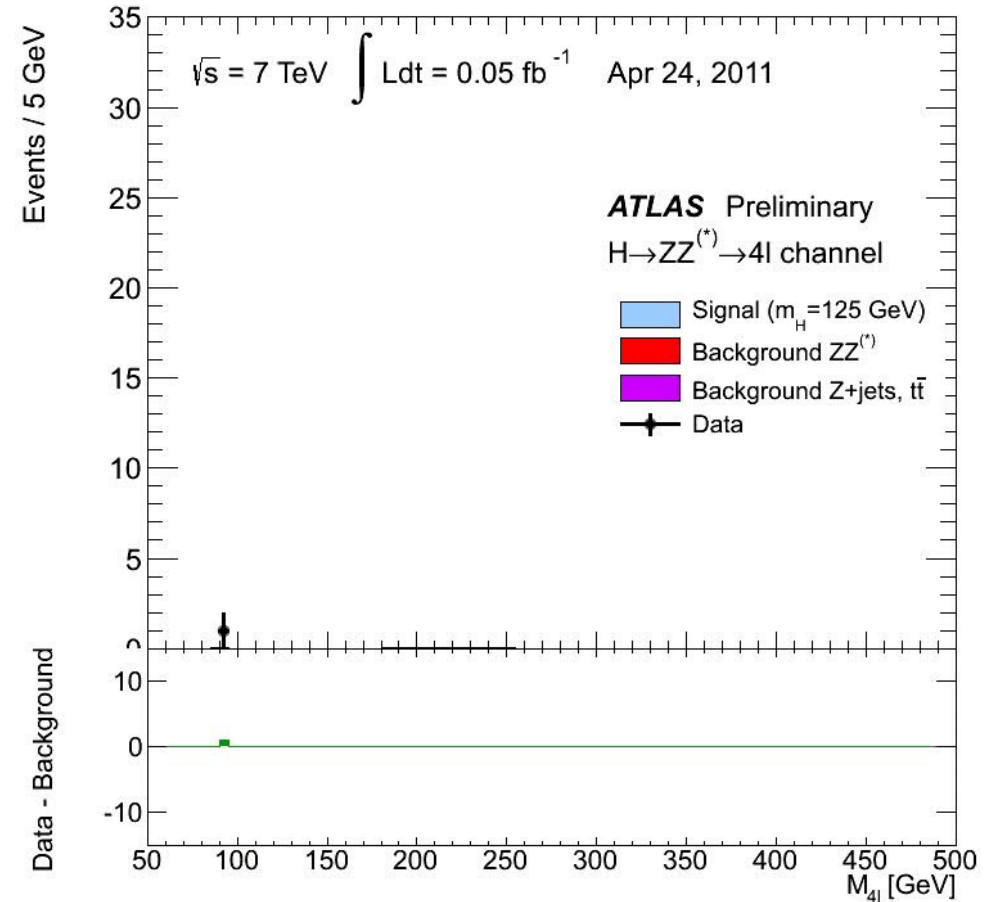
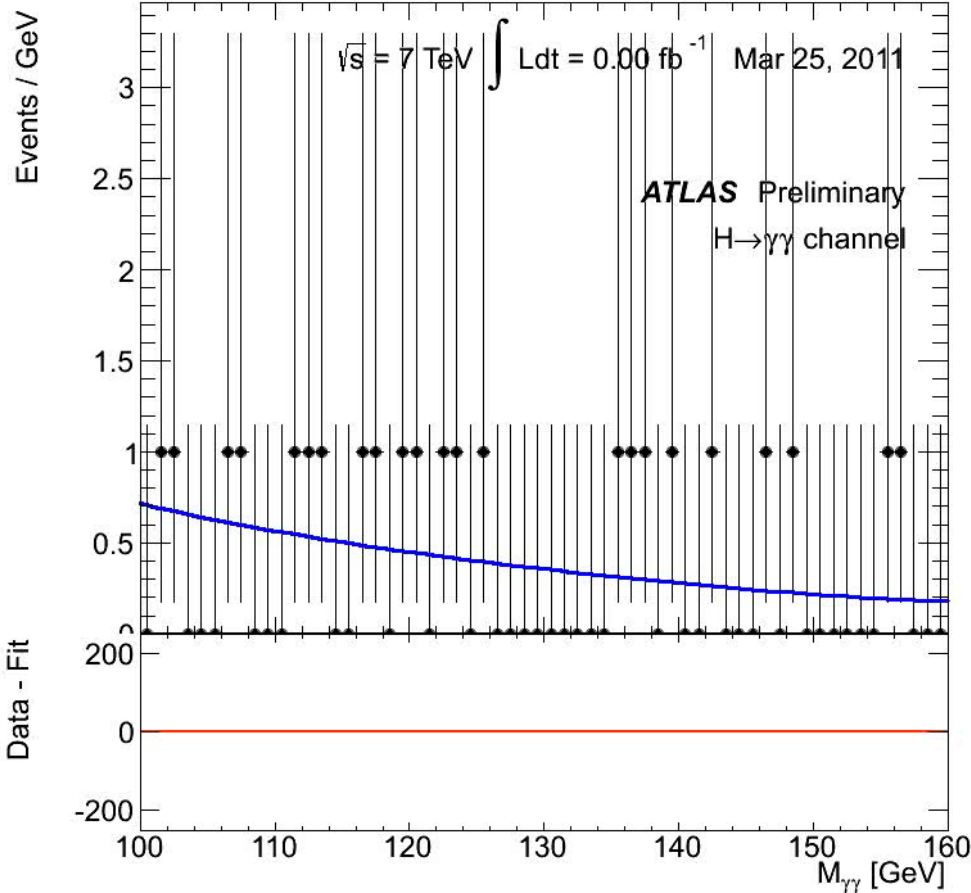
Stand: 16. Juni 2014



Higgs Signifikanz wächst mit der Zeit...

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow 4l$

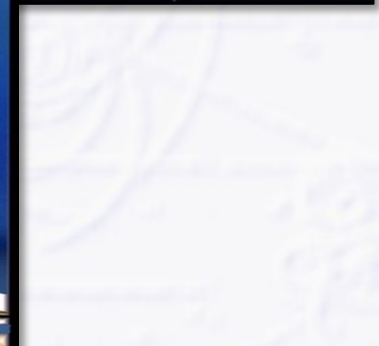
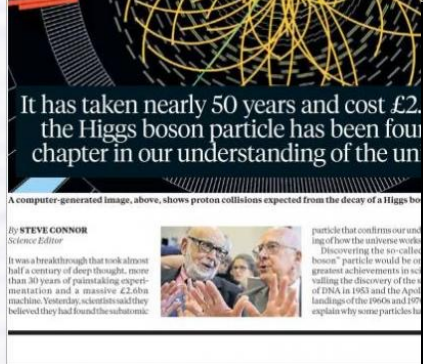
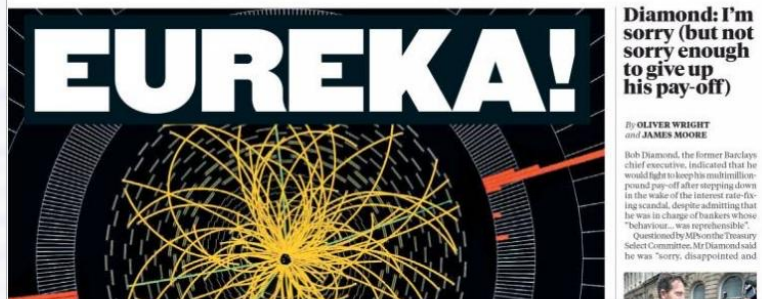


Higgs hier

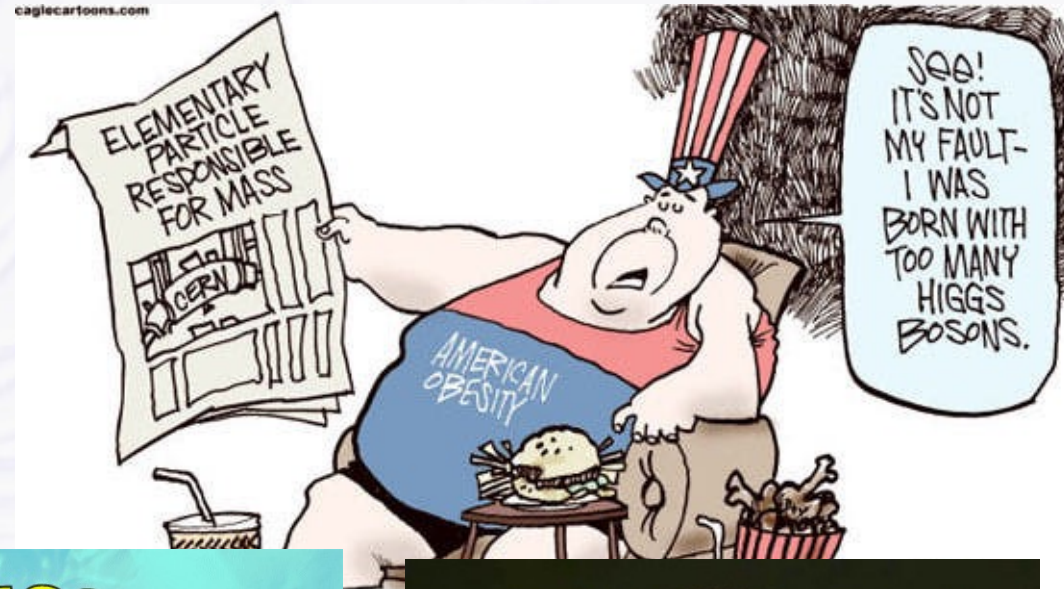
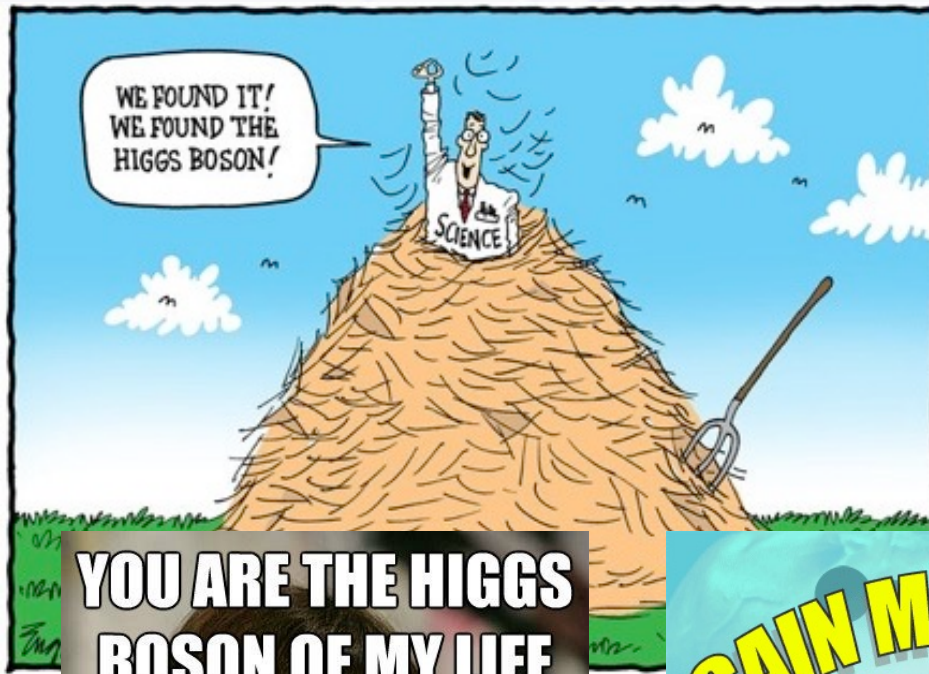
Alle Daten von 2011 + 2012

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

An advertisement for "Higgs Boson Pills". It features a cartoon of a muscular man with a determined expression, surrounded by lightning bolts. The text "GAIN MASS FAST!" is written in large, yellow, outlined letters. Below the man is a white and yellow pill. The text "HIGGS BOSON PILLS" is in large, bold, black letters. Below that is a yellow button that says "CLICK HERE!!1!". At the bottom, there is a small warning: "WARNING: TAKING TOO MUCH OF THESE PILLS MAY TURN YOU INTO A BLACK HOLE" and the website "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)

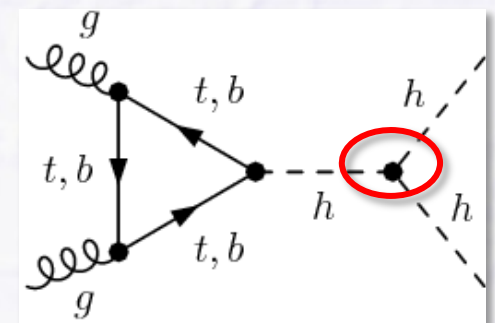
- **Kopplungskonstanten** an Vektorbosonen und Fermionen

- sind die Kopplungen proportional zu den Teilchenmassen?

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

- in ferner Zukunft...

- braucht seeeehr veeeele Daten (~2040?)



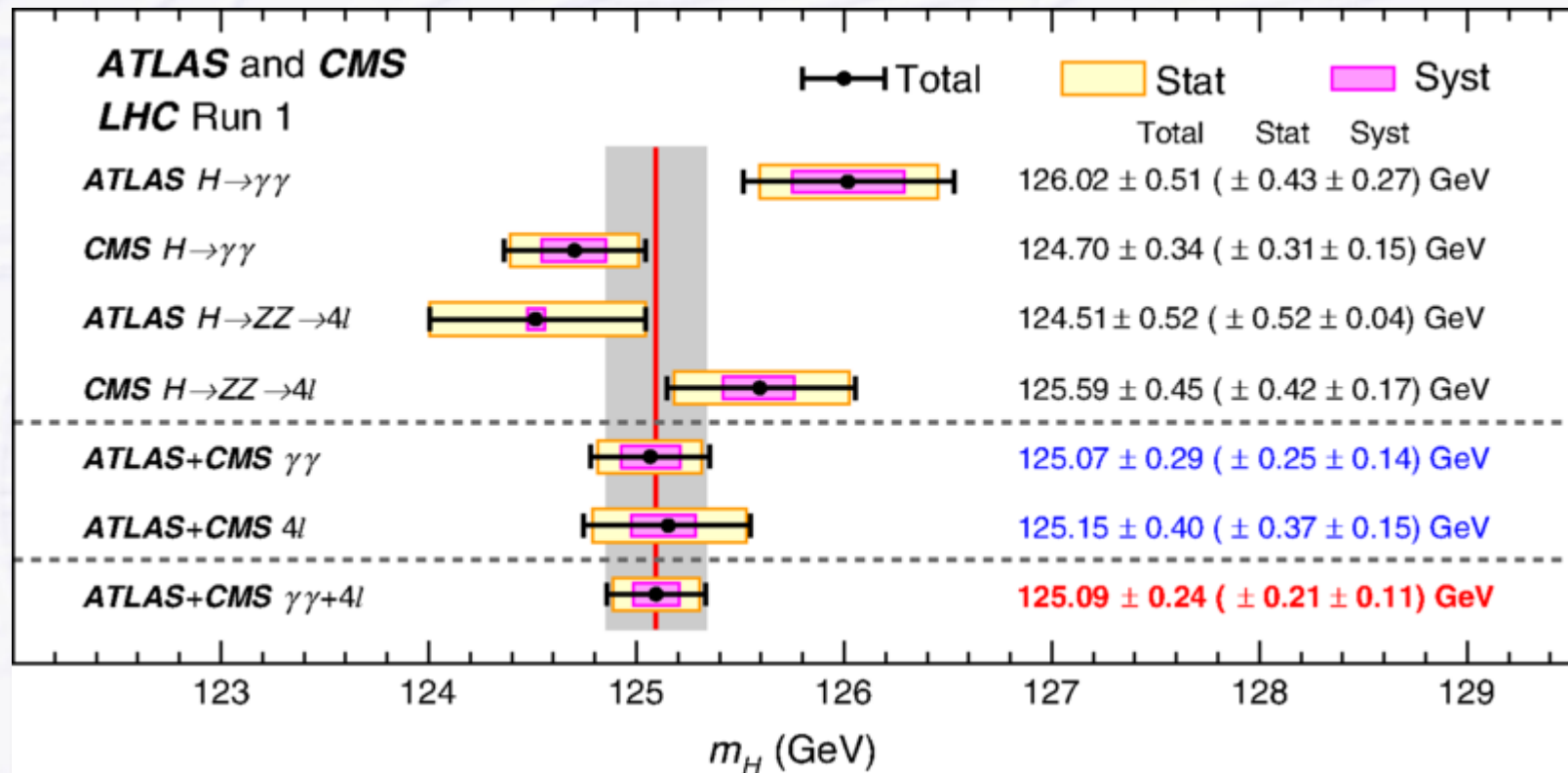
Higgs Masse

- **Higgs-Masse = freier Parameter im Standardmodell**

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

→ **Kombinierte Messung von ATLAS und CMS (Mai 2015)**

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



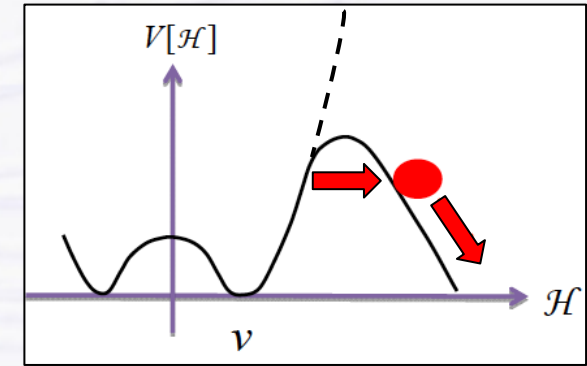
→ Messunsicherheit nur **0.19%(!)**



Stabilität des Vakuums

● Ist das Vakuum (= unser Universum) stabil?

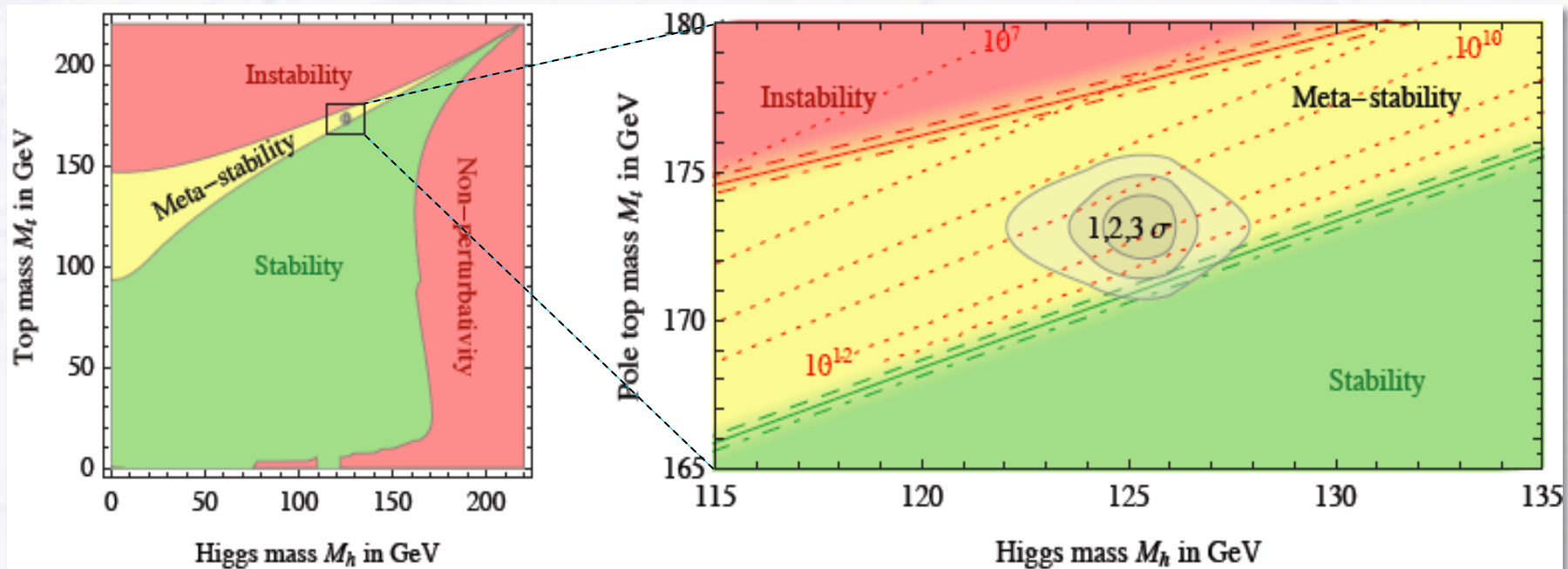
- entspricht die Vakuumenergie (durch das Higgs-Feld) nur einem lokalen Minimum des Higgs-Potentials?
- gibt es evtl. einen Zustand geringerer Energie?
- könnte das Vakuum zu diesem Zustand durchtunneln?



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

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

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

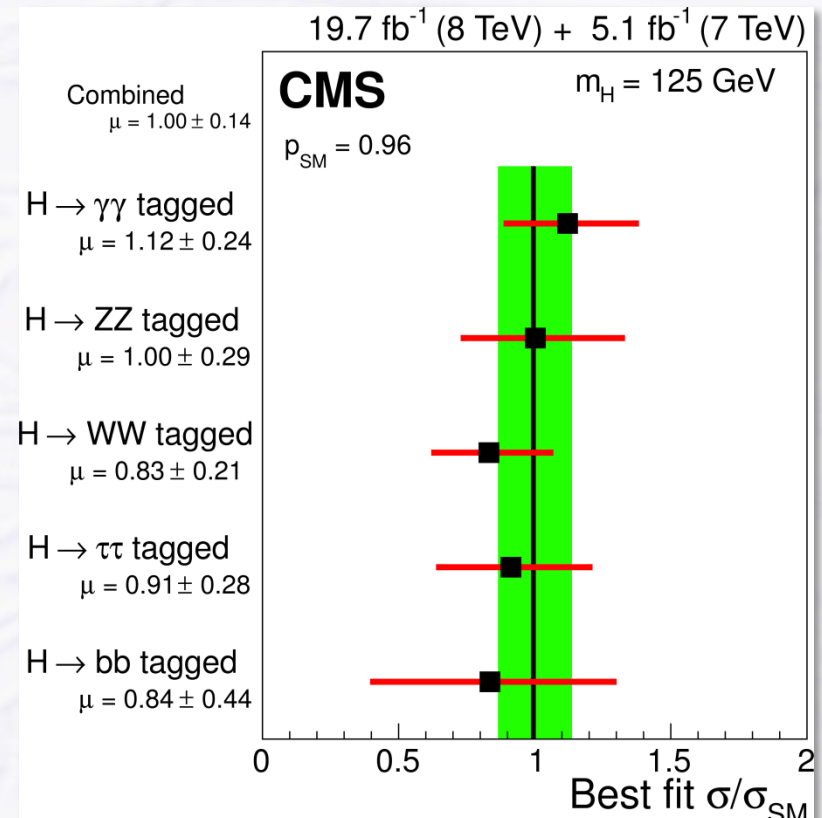
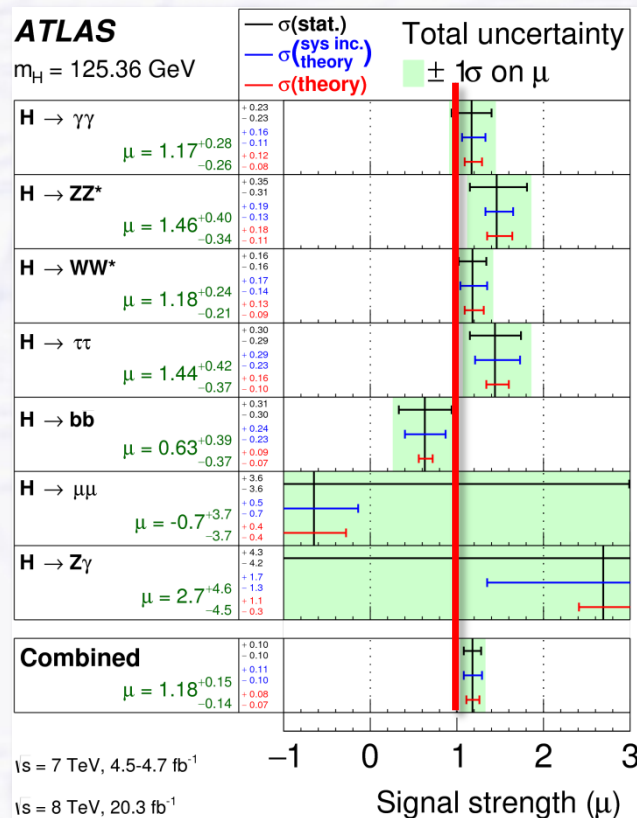


Standardmodell Higgs?

- 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.)

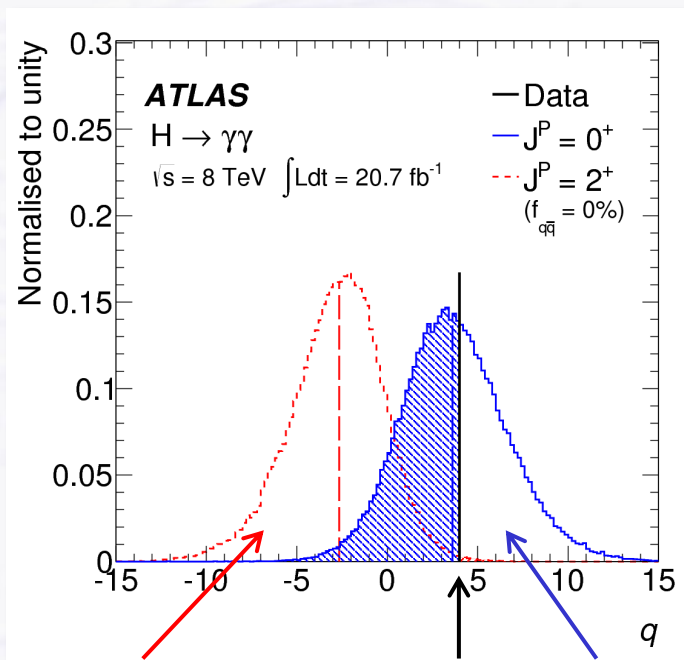
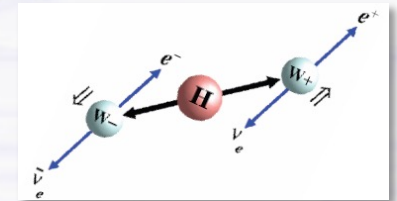


Spin und Parität?

- **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

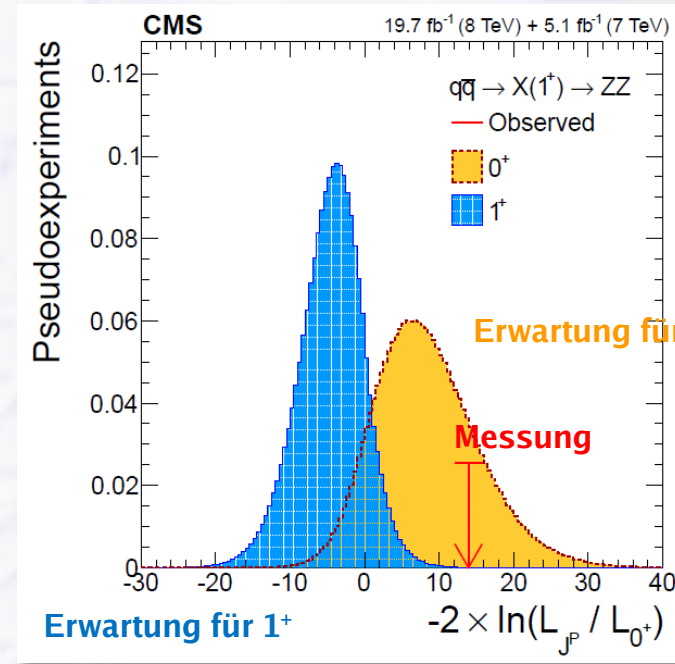
- möglich: $0^-, 0^+, 2^-, 2^+$ (+ oder - entspricht Parität)
- Messung aus Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte



Erwartung für 2^+

Messung

Erwartung für 0^+



Erwartung für 1^+

Erwartung für 0^+

Messung

$-2 \times \ln(L_{J^P} / L_{0^+})$

Higgs und Massenerzeugung?

Erwartung:

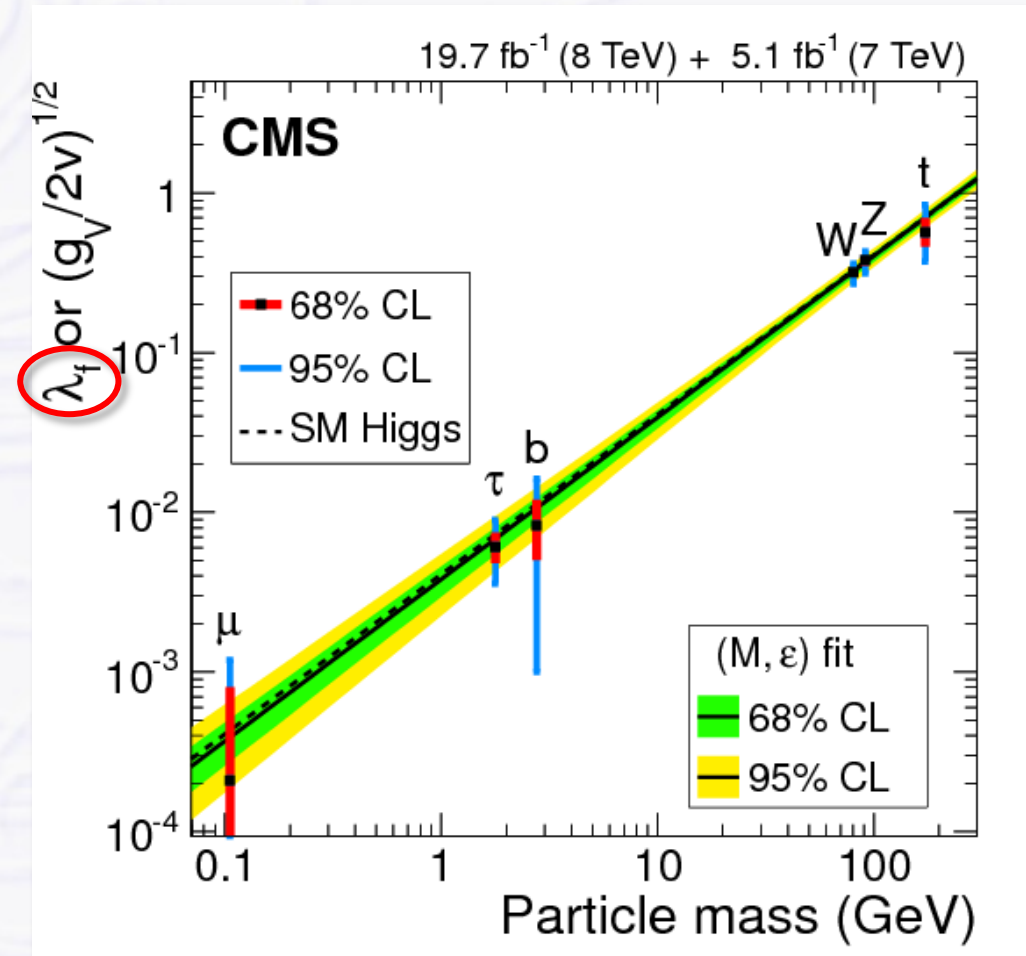
Wenn Higgs-Mechanismus verantwortlich für die Erzeugung der Masse

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

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

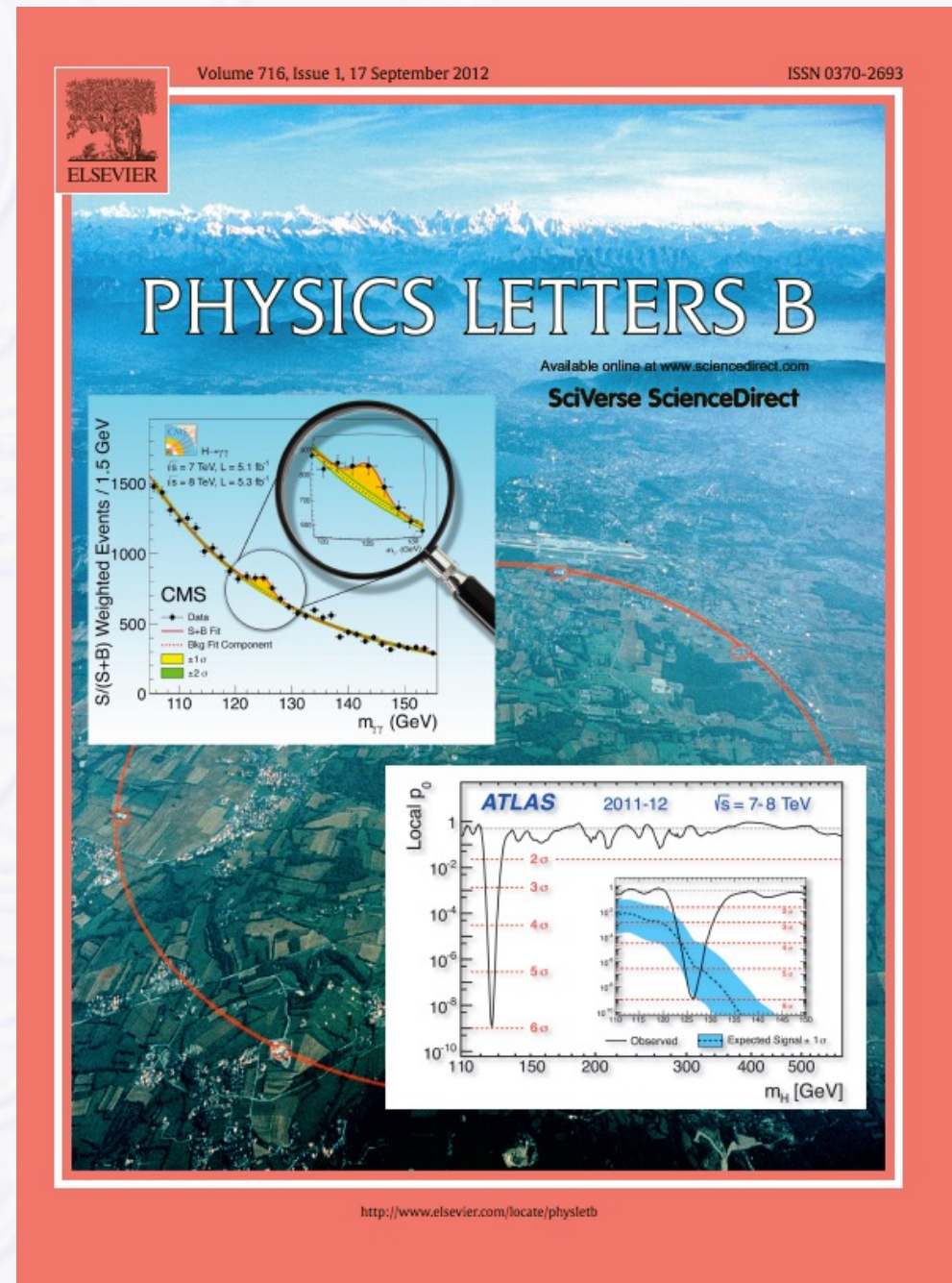
→ $\lambda \propto M$

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



Higgs: Stand der Erkenntnisse

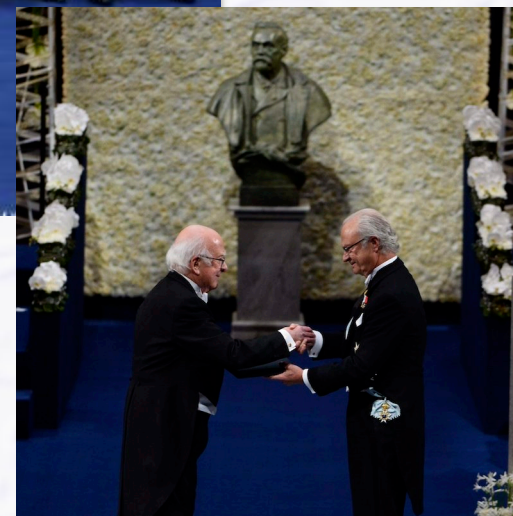
- Entdeckung eines **neuen Teilchens** im **Juli 2012**
 - Es ist **ein Boson** (Spin 0 oder 2)
 - Damals nicht klar: ein Higgs?
 - Klar seit **März 2013**
 - Ja, es ist **ein Higgs Boson**
 - Spin 0 (konsistent mit Higgs)
 - **Noch nicht klar** (wird noch Jahre dauern...)
 - **Welche Art Higgs Boson?**
 - 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...



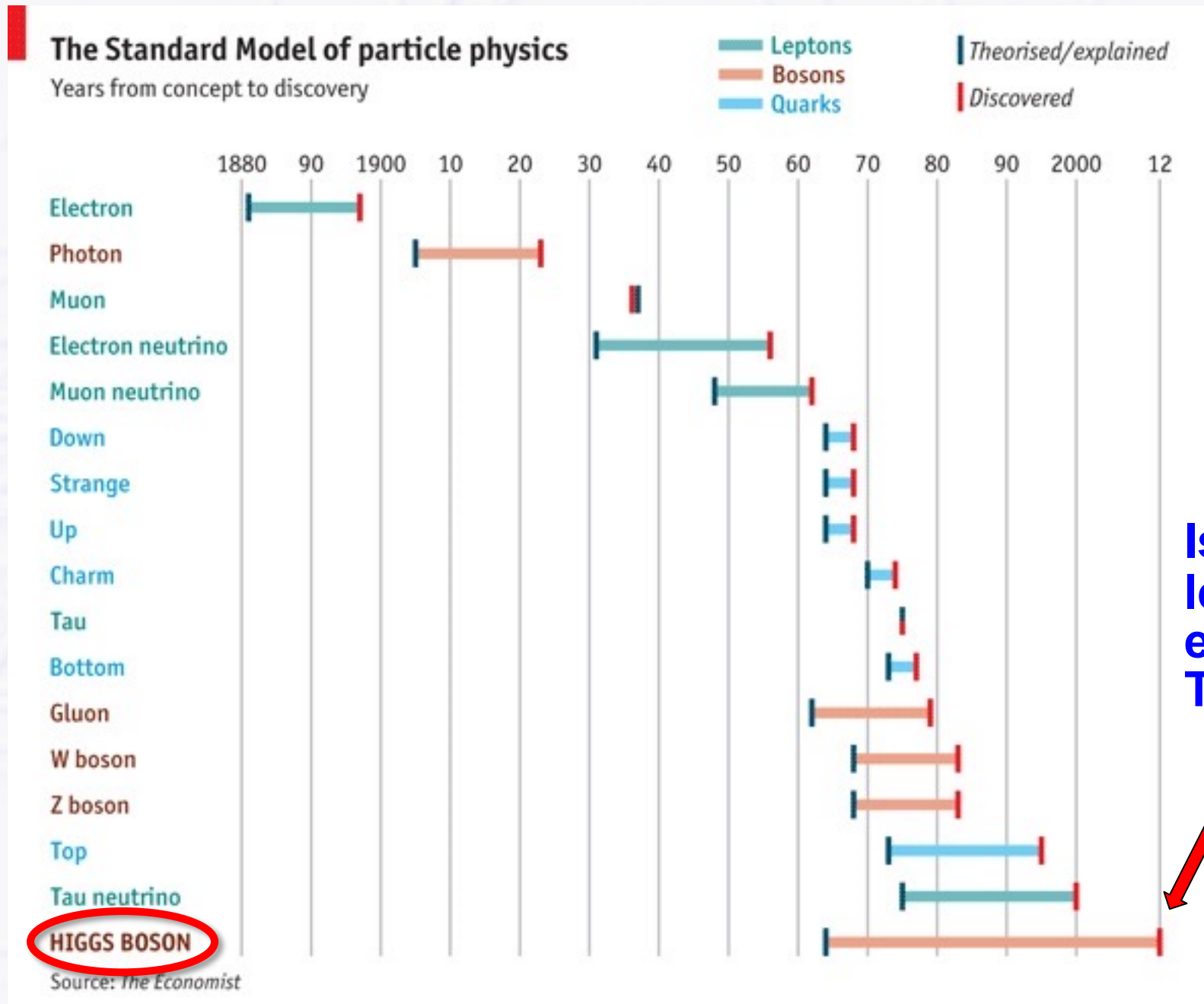
<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

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



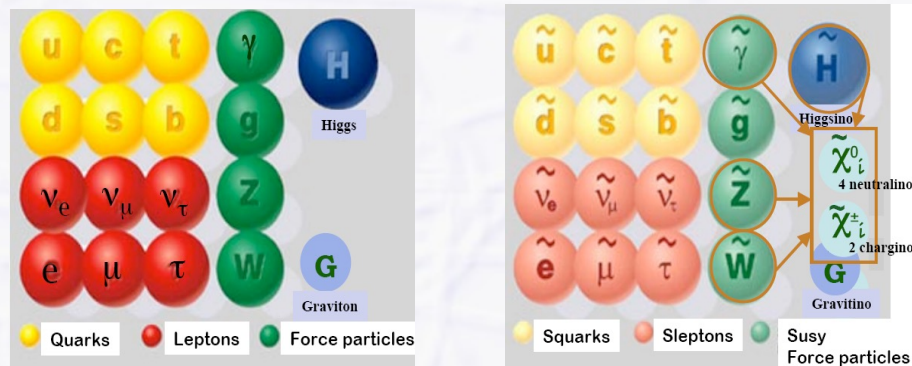
Jenseits des Standardmodells

● Im Standardmodell

- Materieteilchen = Fermionen (Spin 1/2), Kraftteilchen = Bosonen (Spin 1)
- Warum diese Asymmetrie (Fermionen – Bosonen)?

● Erweiterung des Standardmodells durch neue Symmetrie: Supersymmetrie (SUSY)

- SUSY Materieteilchen = Bosonen, SUSY Kraftteilchen = Fermionen
- Verdopplung aller bisherigen Elementarteilchen

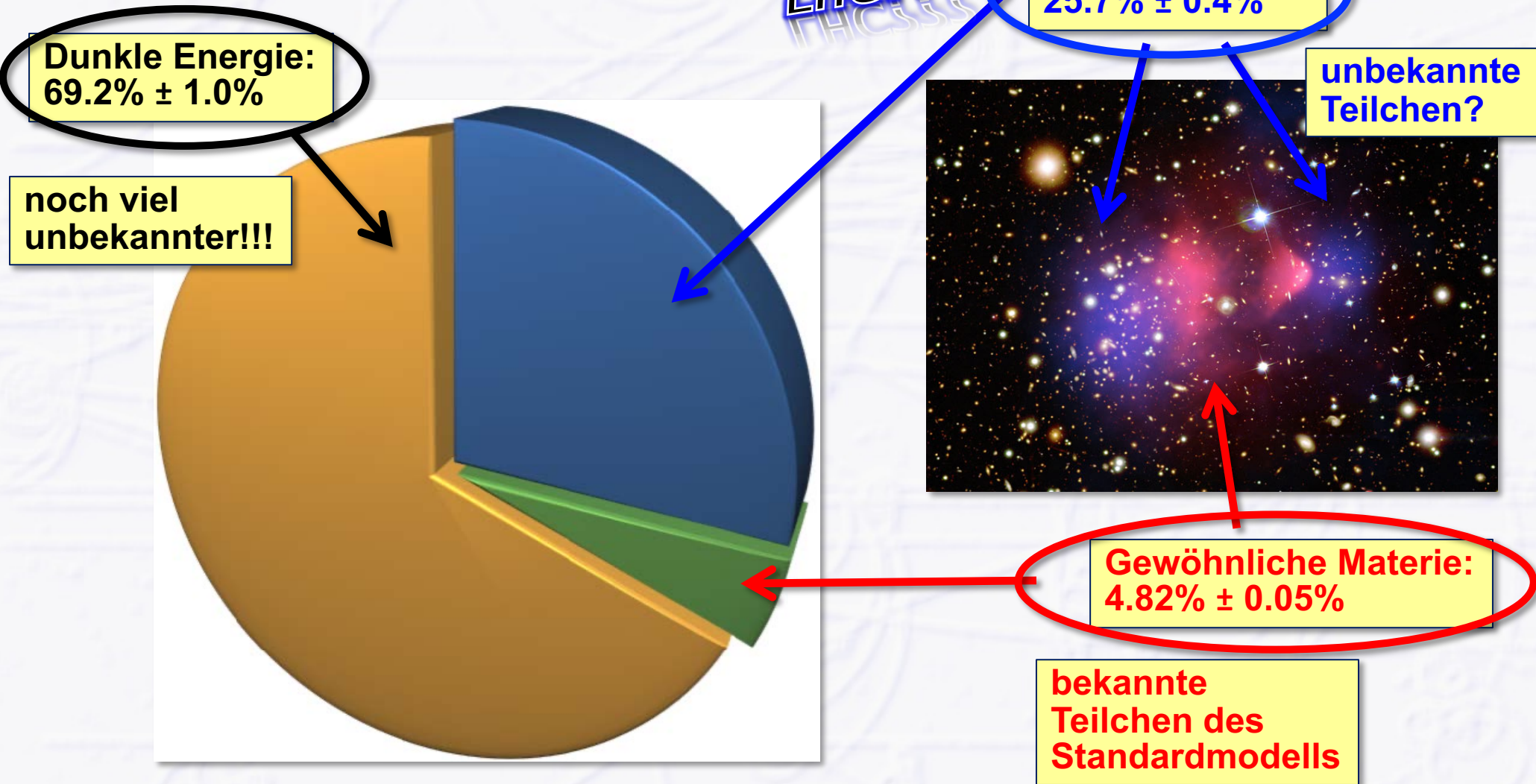


Neue Quantenzahl R-parity: $R_p = (-1)^{B+L+2s} = +1$ SM Teilchen
 -1 SUSY Teilchen

Wenn R-parity erhalten: Leichtestes SUSY Teilchen (LSP) STABIL(!!!)

Bestandteile des Universums

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



Konsequenzen für Higgs

- Minimal Supersymmetric Model (MSSM) hat 5 Higgs Teilchen

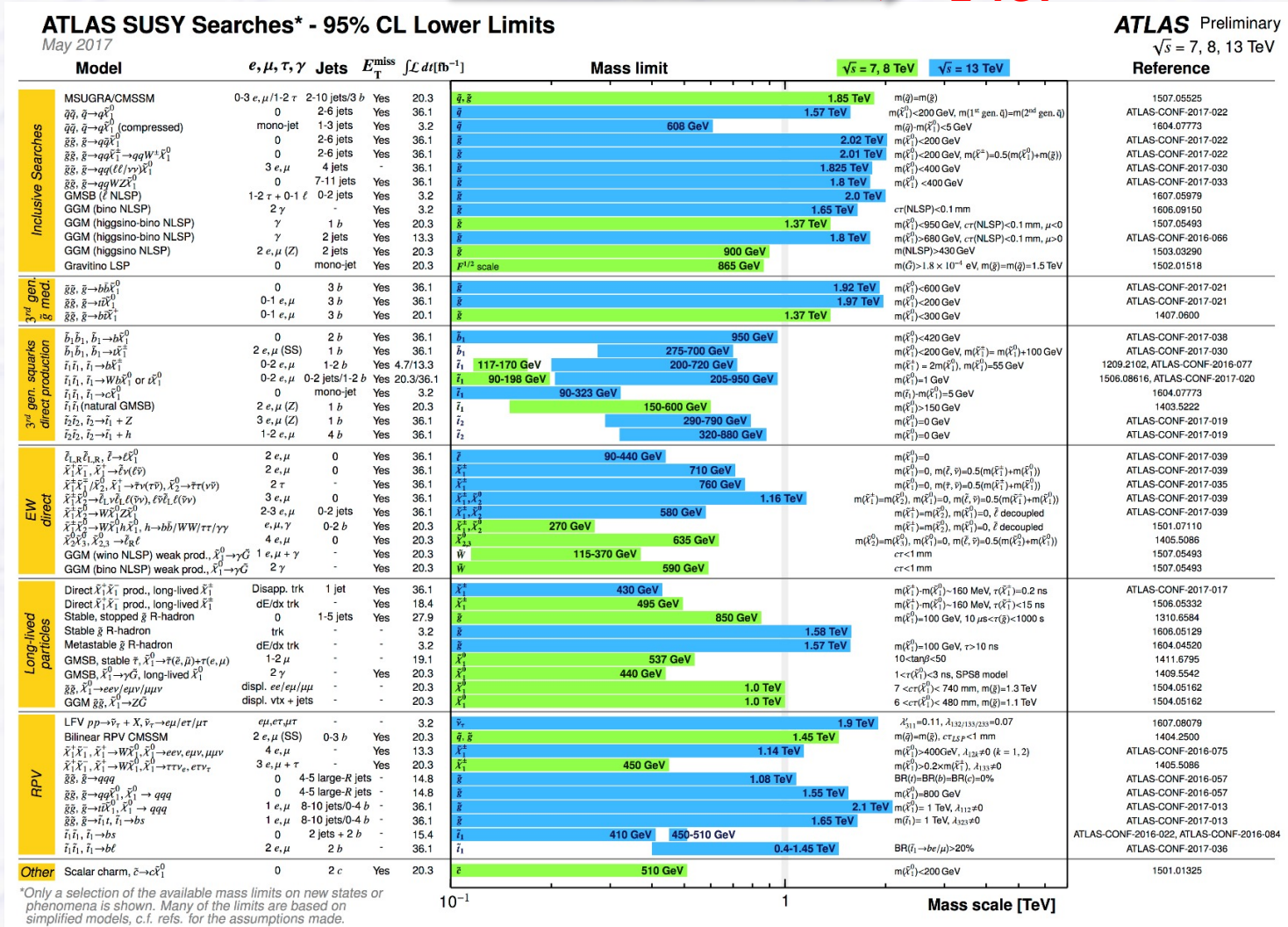
Teilchen	el. Ladung	Spin/Parität	Masse
h^0	0	0^+	leicht (< 133 GeV)
H^0	0	0^+	schwer
H^+	+1	0^+	schwer
H^-	-1	0^+	schwer
A^0	0	0^-	schwer

- 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

SUSY@LHC?

Bisher leider keine Hinweise... nur sehr viele Ausschlußgrenzen für SUSY-Teilchen mit geringer Masse (< ~1...2 TeV)

> 2 TeV



LHC: Wie geht es weiter?

Bisher 2 mehrjährige Run-Perioden am LHC

→ **Run 1: 2011 – 2012** (Higgs-Entdeckung am 4. Juli 2012, 7-8 TeV, 30 fb⁻¹)

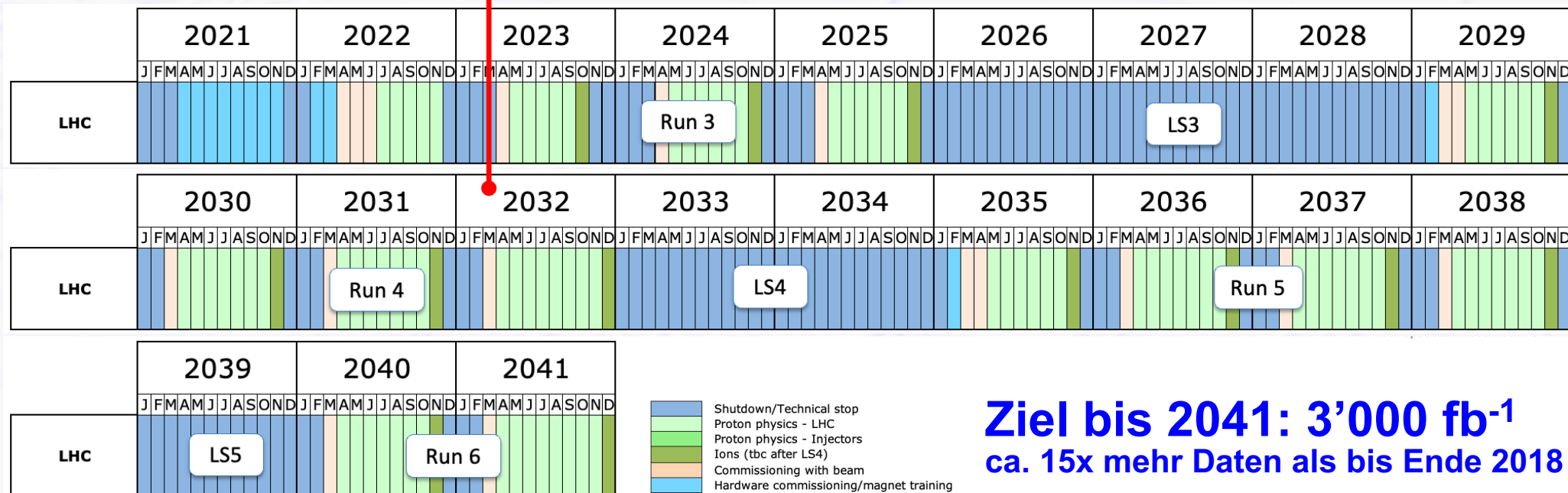
- Long Shutdown 1: 2013 + 2014, Wartungspause, Erweiterungen

→ **Run 2: 2015 – 2018** (Bestimmung vieler Higgs-Parameter, 13 TeV, 160 fb⁻¹)

- Long Shutdown 2: 2019 – 2021, verlängert wegen Covid-19, viele neue Detektorelemente

→ **Run 3: 2022 – 2025** (13.6 TeV, ~200 fb⁻¹ erwartet)

- Long Shutdown 3: 2026 – 2028, **Umbau zum High Lumi LHC, Detektor Upgrades**



Ziel bis 2041: 3'000 fb⁻¹
ca. 15x mehr Daten als bis Ende 2018

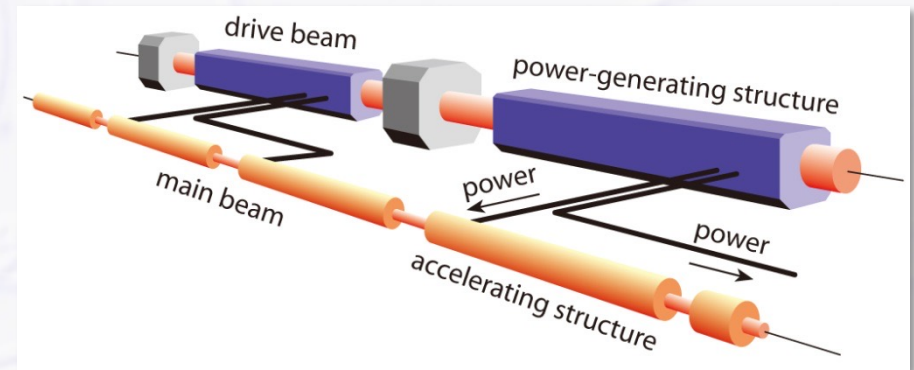
Mögliche Zukunft am CERN (1) → CLIC

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 Machbarkeit gezeigt



● “Higgs-Fabrik” + “SUSY-Fabrik”

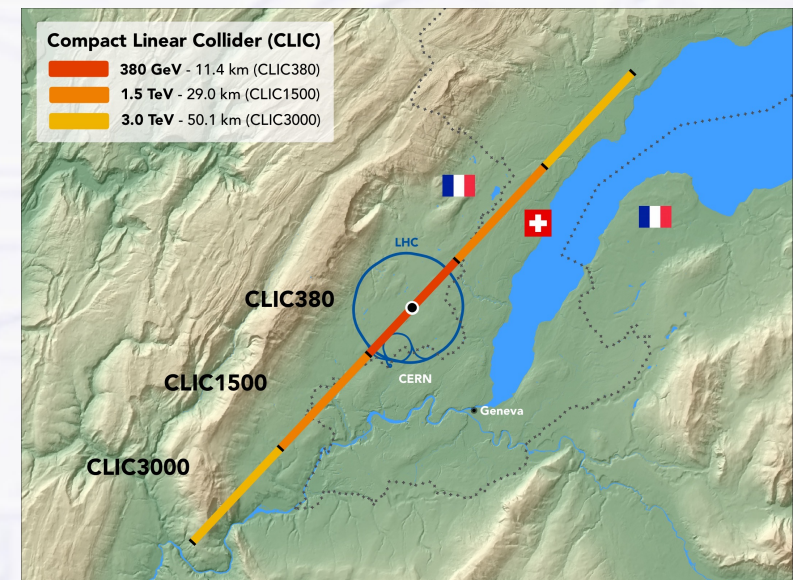
→ Präzisionsmessungen von SUSY Teilchen

- falls SUSY bei LHC gefunden
- komplementär zu LHC

→ entlang des Jura

→ Wechselwirkungspunkt am CERN

→ möglicher Start: 2048 (nach LHC)



Mögliche Zukunft am CERN (2) → FCC

FCC = Future Circular Collider

- Machbarkeitsstudie eines ~100 km Tunnels bis ~2025/26
- Erste Stufe könnte ein e^+e^- Collider mit 365 GeV bis 2048 sein
- **“Higgs-Fabrik”**
- Zweite Stufe: pp Collider mit 100 TeV (7x LHC) ab 2070/75...

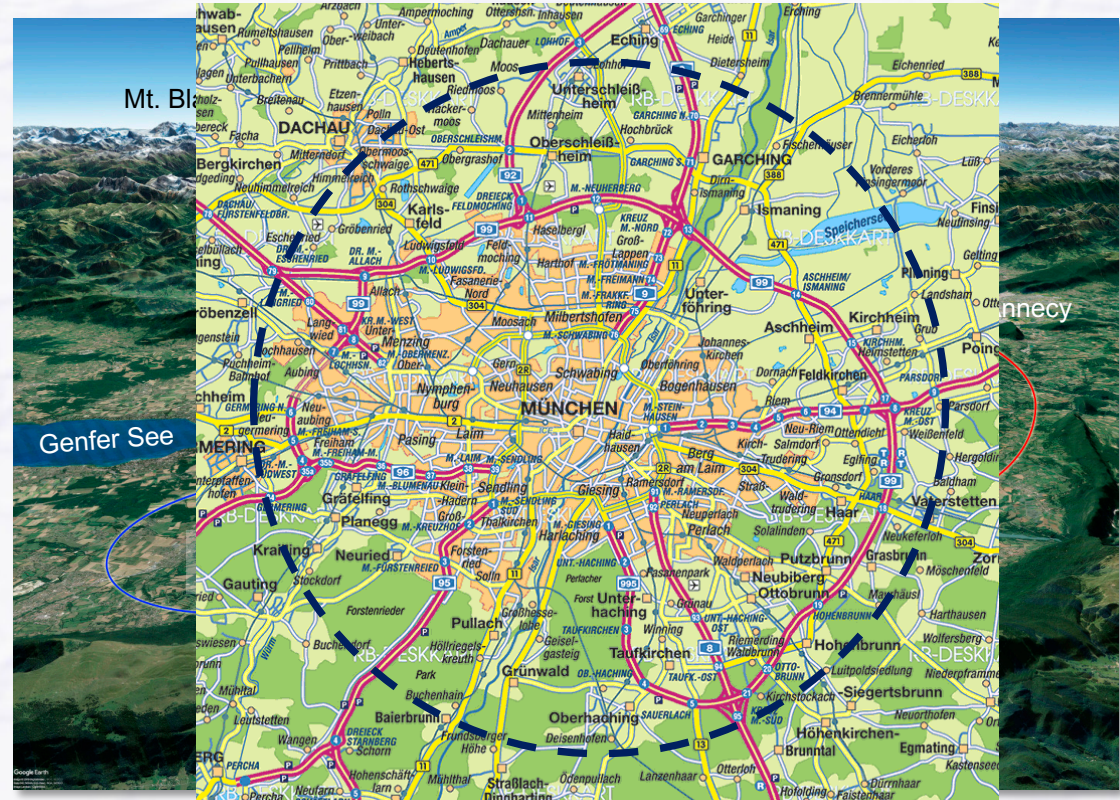
- Entwicklung neuer supraleitender Magnete mit >16 T nötig (Nb_3Sn statt NbTi oder Hochtemperatur-Supraleiter)

→ Physikzielsetzung?

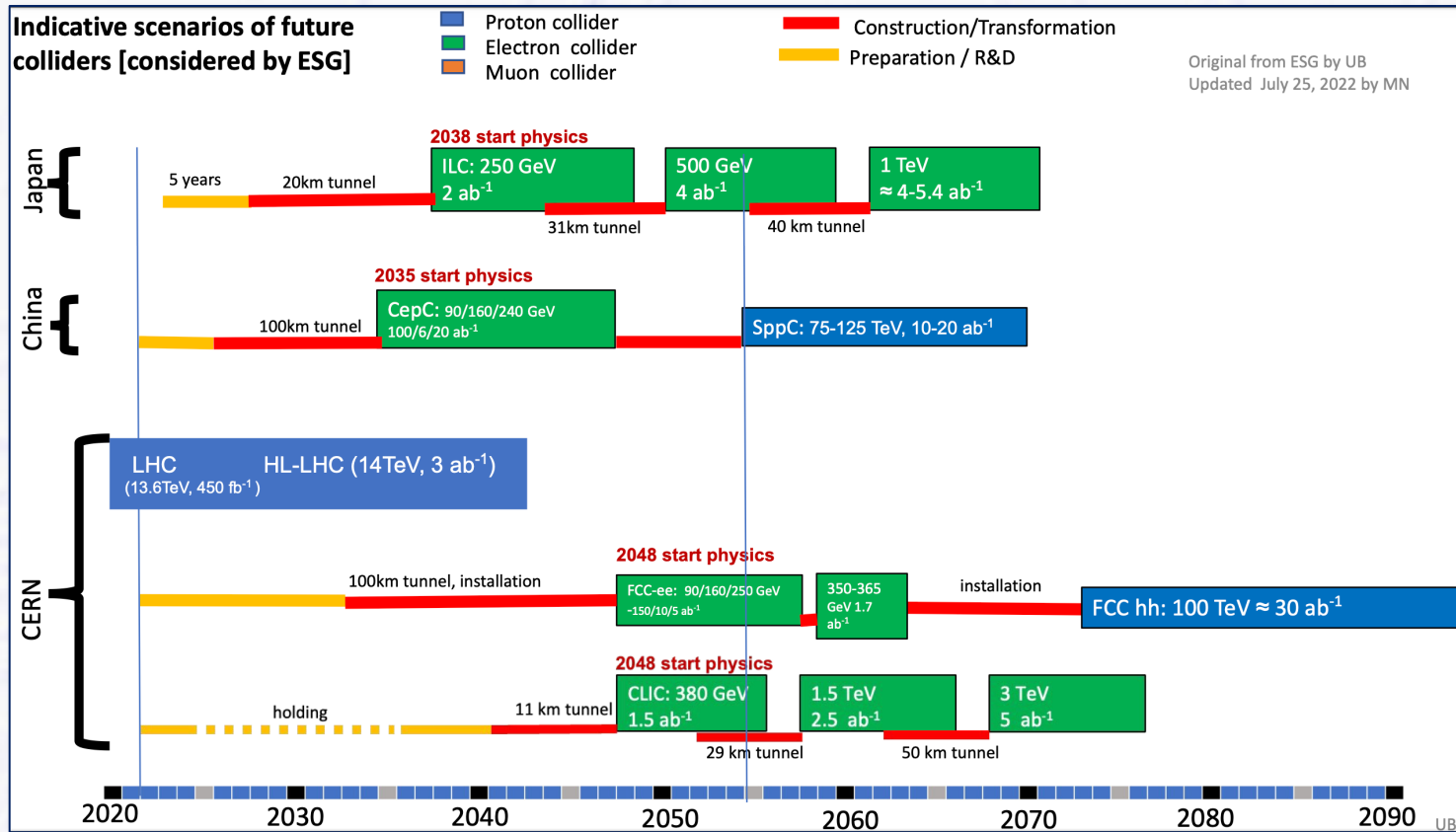
- bisher keine Hinweise oder Vorhersagen für “neue” Physik im Energiebereich des FCC

○ SUSY?

○ Dunkle Materie?



Mögliche Zeitskalen für Collider weltweit

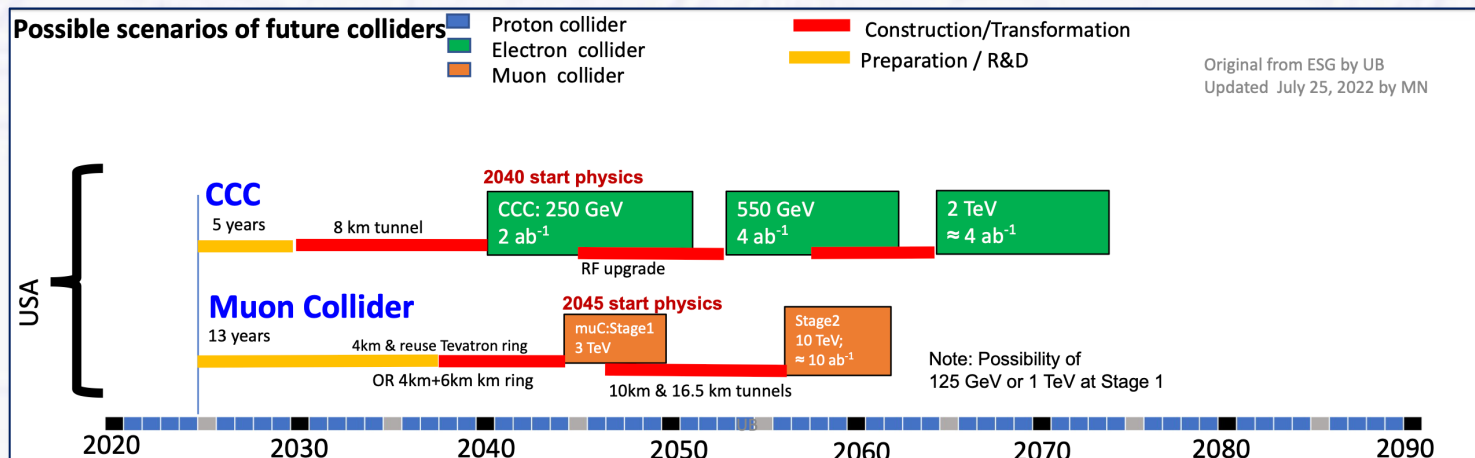


Asien:

- **e+e- collider**
linear, bis 1 TeV (Japan)
circular, bis 240 GeV (China)
- **pp collider**
circular, bis 125 TeV (China)

Europa (CERN):

- **e+e- collider**
linear, bis 3 TeV
circular, bis 365 GeV
- **pp collider**
circular, bis 100 TeV



USA:

- **e+e- collider**
linear, bis 2 TeV
- **$\mu+\mu-$ collider**
circular, bis 10 TeV

Aussichten

● LHC läuft bis 2038 oder länger(?)

- Run 3 mit 13.6 TeV bis 2025
- ab 2029 “high luminosity“ LHC

→ Ziel: **3000 fb⁻¹ = 15x** mehr Daten als Run 1+2

● Nächster Update der European Strategy for Particle Physics ~2026 (nach Ende von LHC Run 3)

→ Input (neben anderem):

- SUSY bei LHC? Oder andere neue Phänomene???
- ILC genehmigt in Japan?
- FCC-ee und FCC-pp Machbarkeit, Kosten, Physikzielsetzung für FCC-pp?

→ Output:

- Welche Richtung soll die (Hochenergie-)Teilchenphysik einschlagen?
- Was wird DAS Zukunftsprojekt nach LHC Ende ab 2038?

Die nächsten Jahrzehnte bleiben spannend...