

*Steenbeck-Tage
Max-Steenbeck-Gymnasium Cottbus
28. Januar 2009*



Urknall im Labor

Teilchenphysik

am Large Hadron Collider

*Ulrich Husemann
Deutsches Elektronen-Synchrotron*

Fragen über Fragen...



Fragen über Fragen...



Warum falle ich
nach unten, wenn ich
von der Mauer
springe?

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Fragen über Fragen...



Warum falle ich
nach unten, wenn ich
von der Mauer
springe?

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Warum werde
ich von der Erde
angezogen?

Weil du eine
Masse hast und Massen
sich anziehen.

Fragen über Fragen...



Warum falle ich
nach unten, wenn ich
von der Mauer
springe?

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Warum werde
ich von der Erde
angezogen?

Weil du eine
Masse hast und Massen
sich anziehen.

Warum habe ich
eine Masse?

???

Warum falle ich
nach unten, wenn ich
von der Mauer
springe?

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Warum werde
ich von der Erde
angezogen?

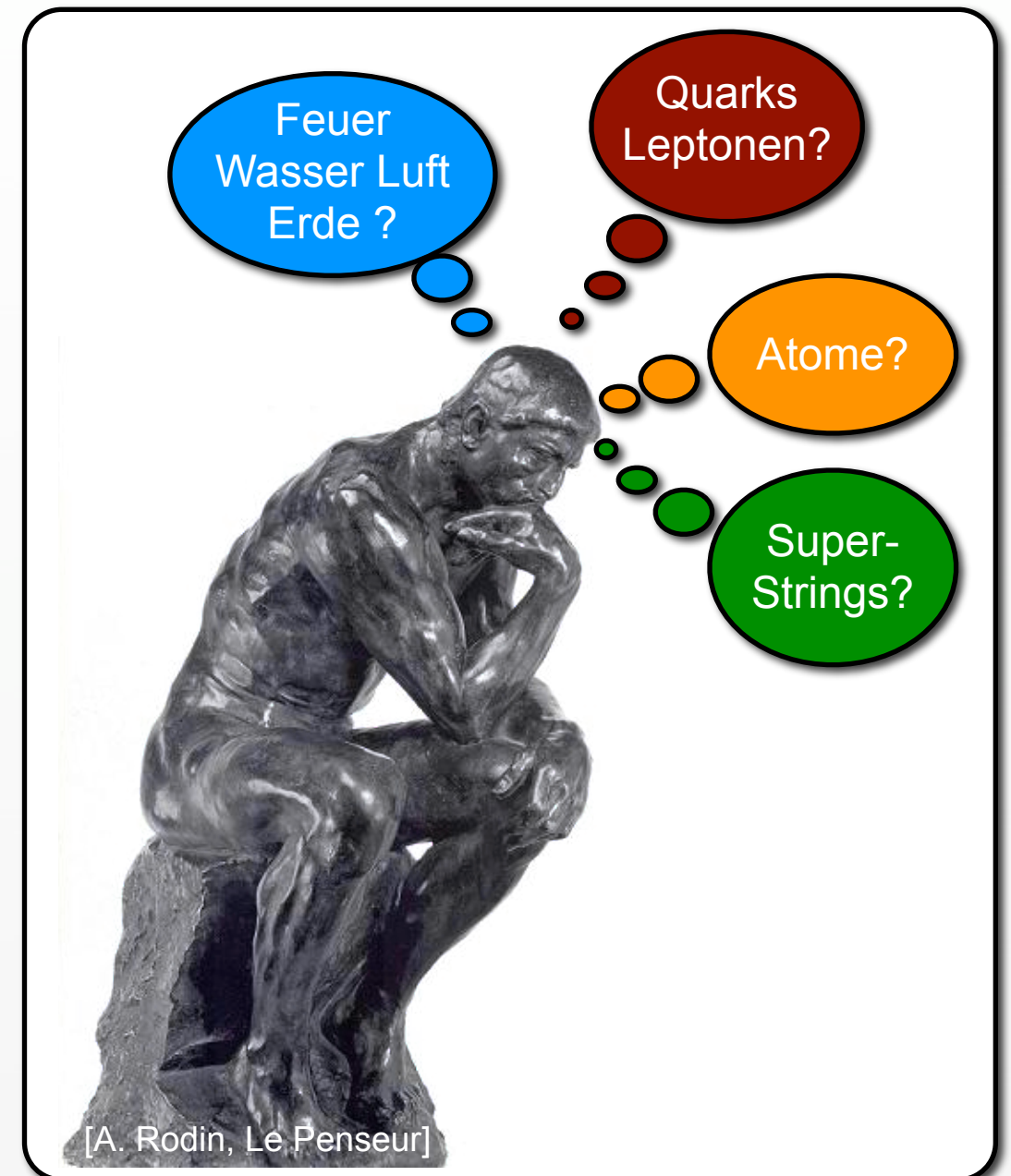
Weil du eine
Masse hast und Massen
sich anziehen.

Warum habe ich
eine Masse?

???

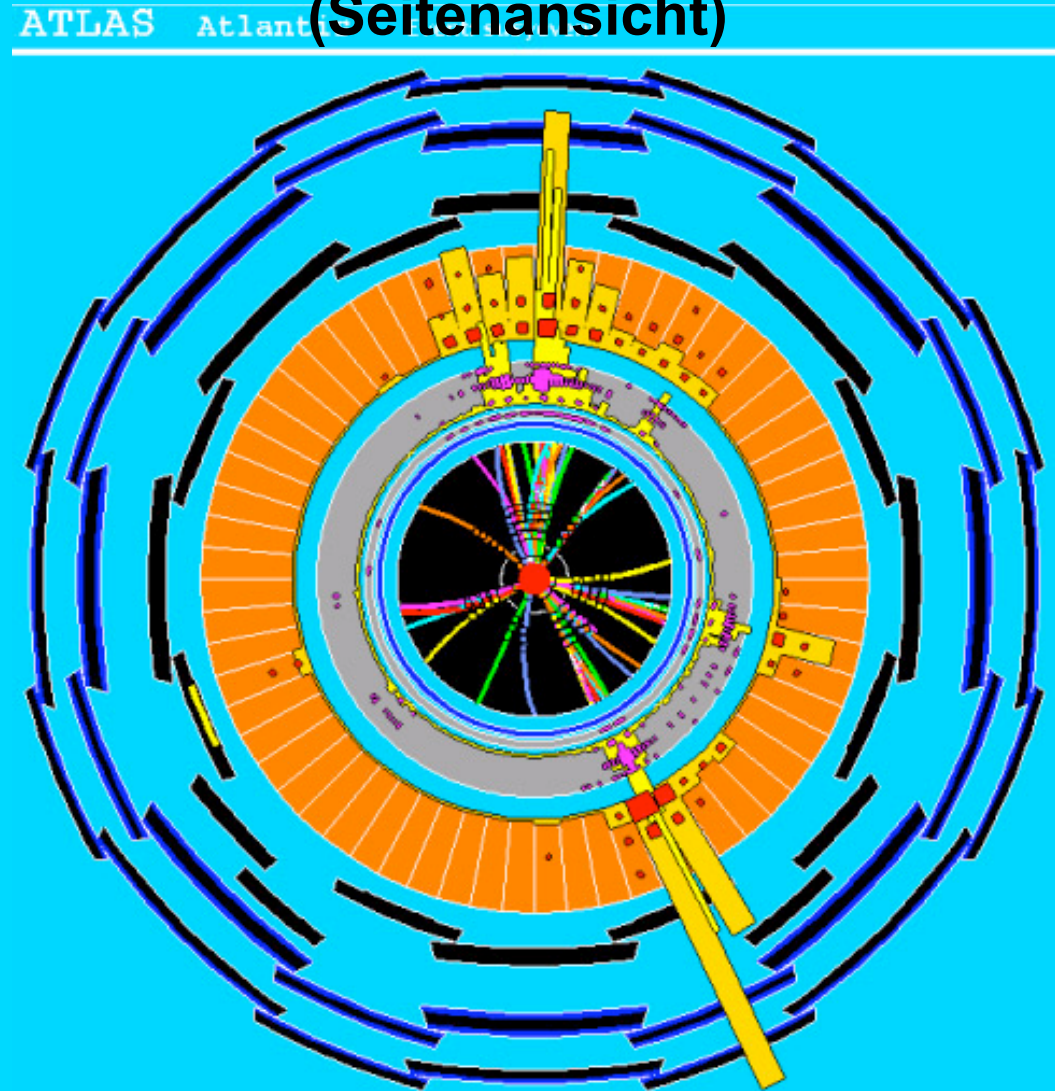
- Menschen sind von Natur aus **neugierig**:
 - Was macht mein Nachbar da...?
 - Kinder fragen: Warum?
 - Forscher fragen: wie funktioniert die Natur?
- Jede beantwortete Frage wirft **neue Fragen** auf
- Haben Sie Fragen zum Vortrag? Jederzeit gerne!

- Elementarteilchenphysik –
grundlegende Fragen an die Natur:
 - Was sind die fundamentalen **Bausteine** der Materie?
 - Welche **Kräfte** wirken zwischen den fundamentalen Bausteinen?
- **Technische Herausforderungen:**
 - Nachweis der fundamentalen Bausteine mit „**Teilchendetektoren**“ – riesige Maschinen mit Mikrometer-Präzision
 - Verarbeitung der **Datenflut**
- **Internationale Zusammenarbeit:**
 - Institute aus ca. 40 Nationen
 - Tausende Kolleginnen und Kollegen aus aller Welt



- „Urknall im Labor“ heißt:
- LHC soll Erkenntnisse bringen über **Entwicklung des frühen Universums**
→ enger Zusammenhang
Teilchenphysik – Kosmologie
- LHC: Energien (=Temperaturen) wie **weniger als 10^{-10} Sekunden** nach dem Urknall
- **Kontrollierte** Bedingungen:
Teilchenkollisionen inmitten
empfindlicher Detektoren
- „Urknall im Labor“ heißt nicht:
- Künstliche Erzeugung eines neuen Urknalls usw.

Simuliertes Ereignis im ATLAS-Detektor (Seitenansicht)



Warum immer höhere Energien?



- Grundpfeiler der Teilchenphysik:
 - Spezielle **Relativitätstheorie** (A. Einstein)
 - **Quantenmechanik** (E. Schrödinger, W. Heisenberg, ...)
- Relativitätstheorie: $E = mc^2$
 - Masse ist eine Form von Energie
 - Mehr Energie → Produktion **schwererer Teilchen**
- Quantenmechanik: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
 - Heisenberg'sche Unschärferelation: Ort (Δx) und Impuls (Δp) nicht gleichzeitig beliebig genau bekannt
 - Größerer Impulsübertrag → Auflösung **kleinerer Strukturen**



A. Einstein



W. Heisenberg



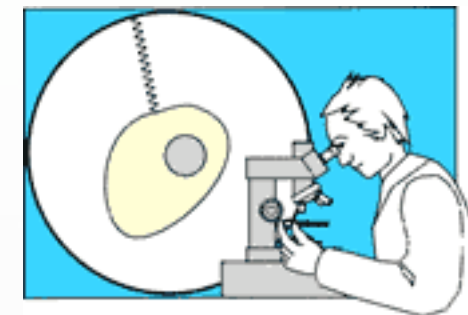
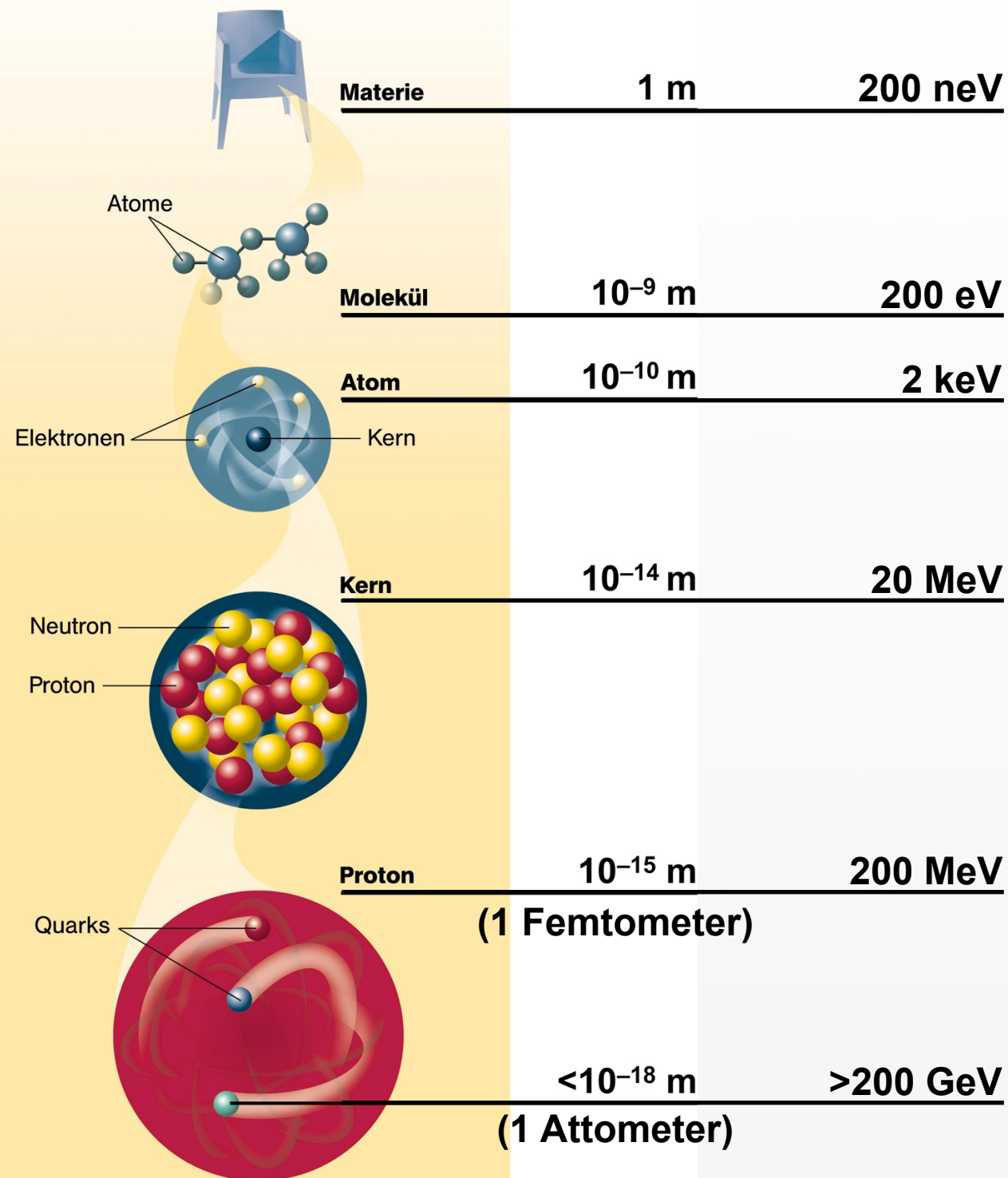
Größenordnungen



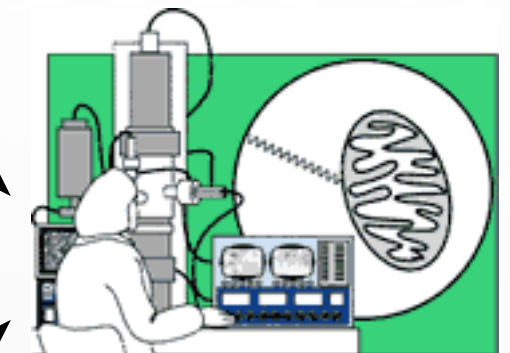
Länge

Energie

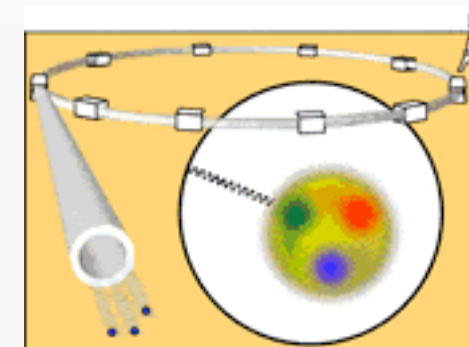
Nachweisgeräte



Lichtmikroskop



Elektronenmikroskop

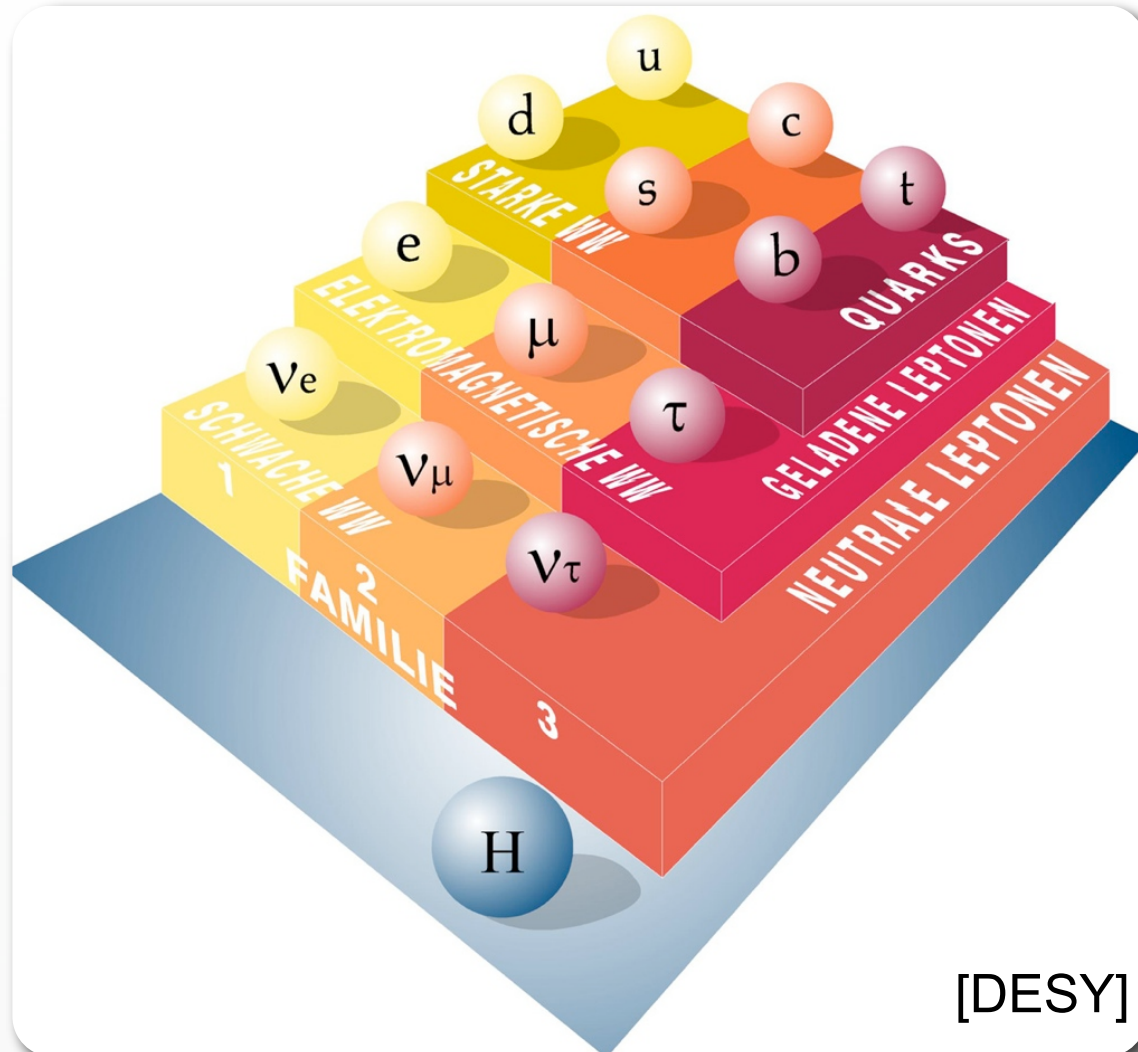


Teilchenbeschleuniger

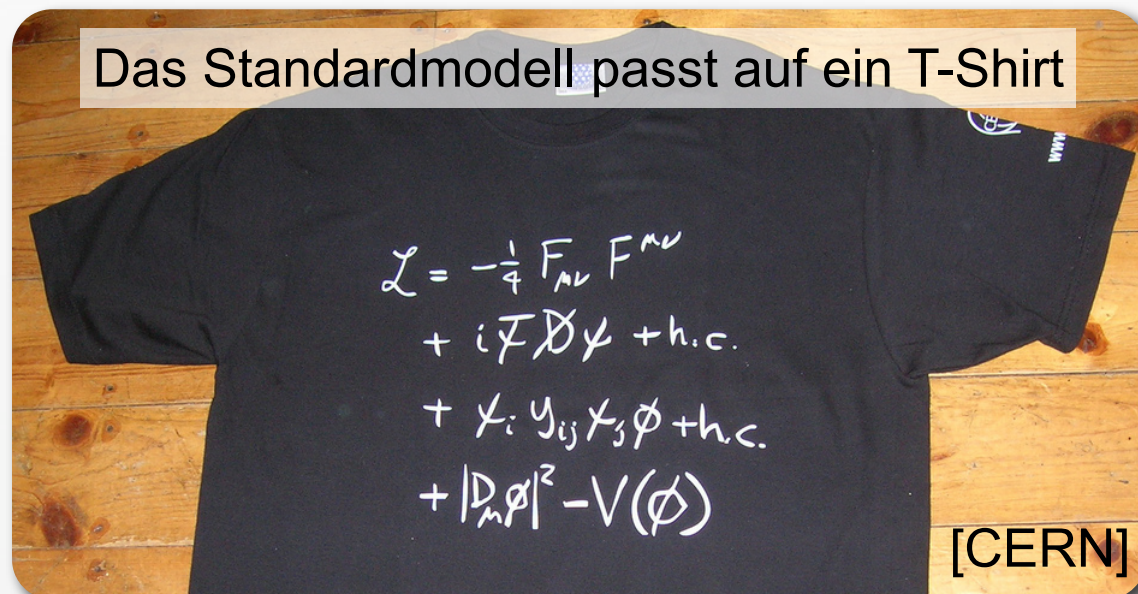
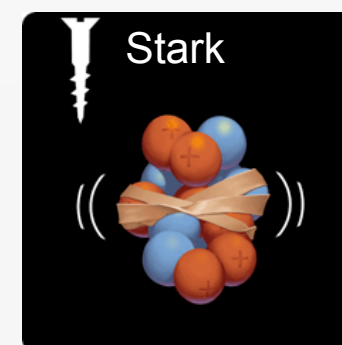
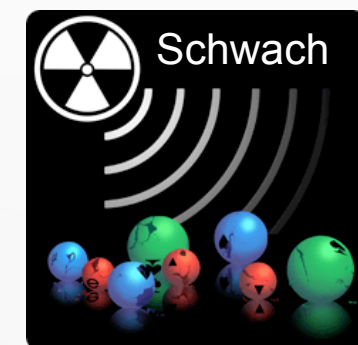
[DESY]



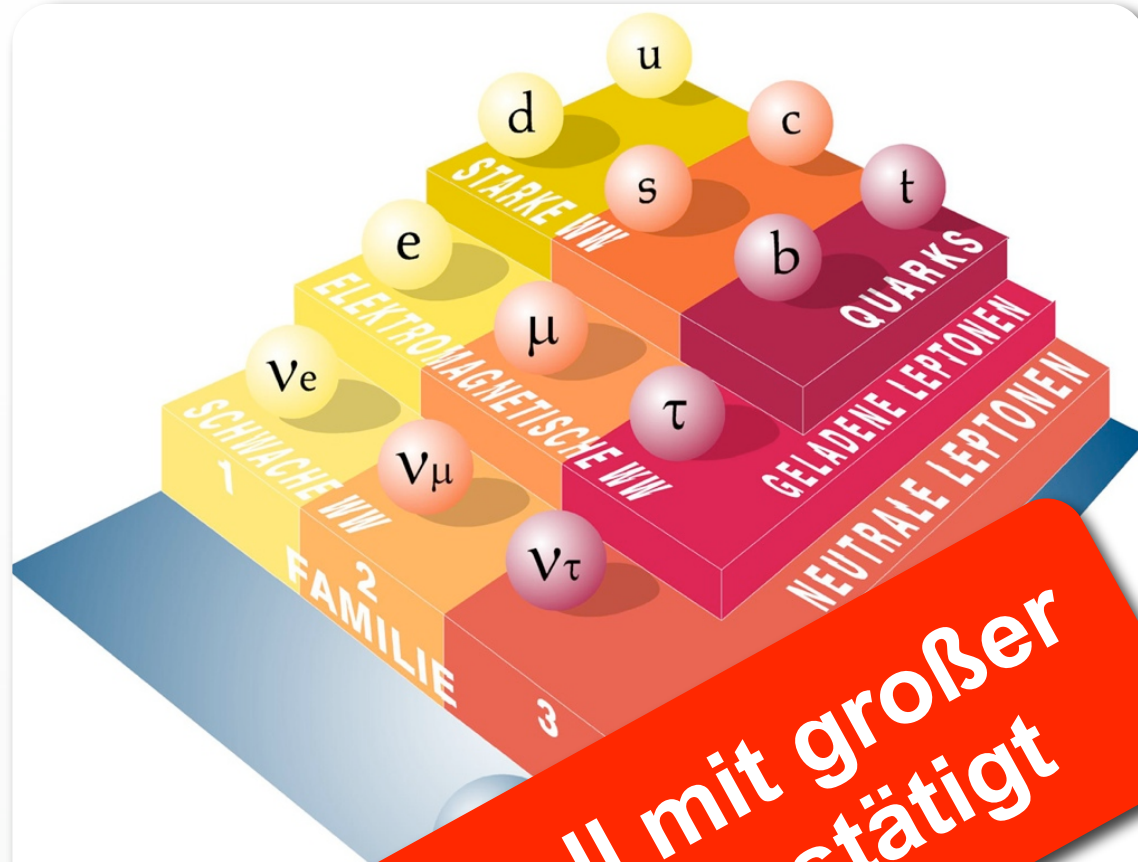
Teilchenphysik: was wir wissen und was wir nicht wissen



- **Teilchen** im „Standardmodell der Teilchenphysik“
- **12 Elementarteilchen**, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in **3 Familien** mit unterschiedlichen Massen
- **Kräfte** im Standardmodell

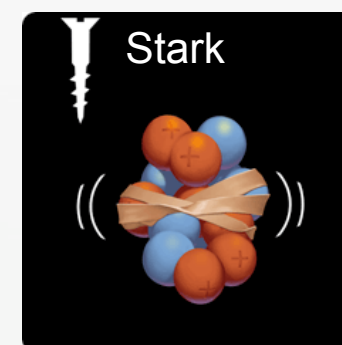
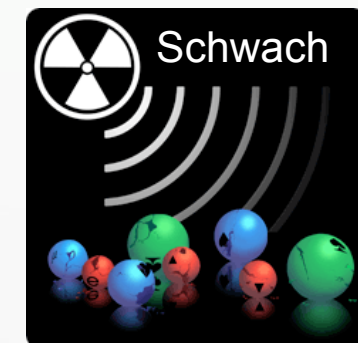


[<http://www.particlephysics.ac.uk/>]



[DESY]

- **Teilchen** im „Standardmodell der Teilchenphysik“
- **12 Elementarteilchen**, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in **3 Familien** mit unterschiedlichen Massen
- **Kräfte** im Standardmodell



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

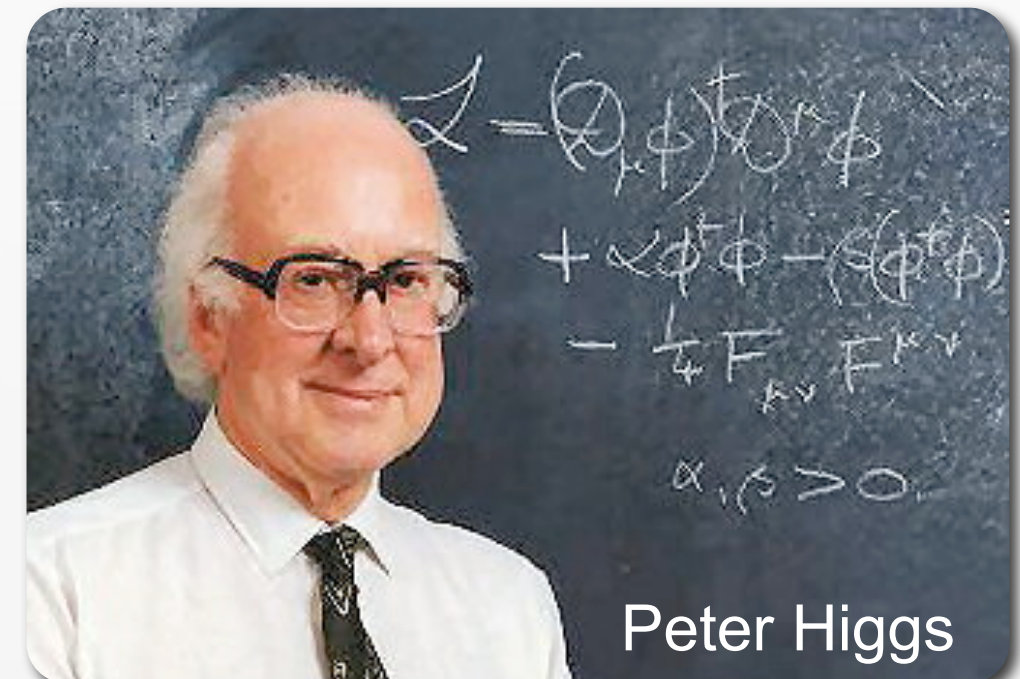
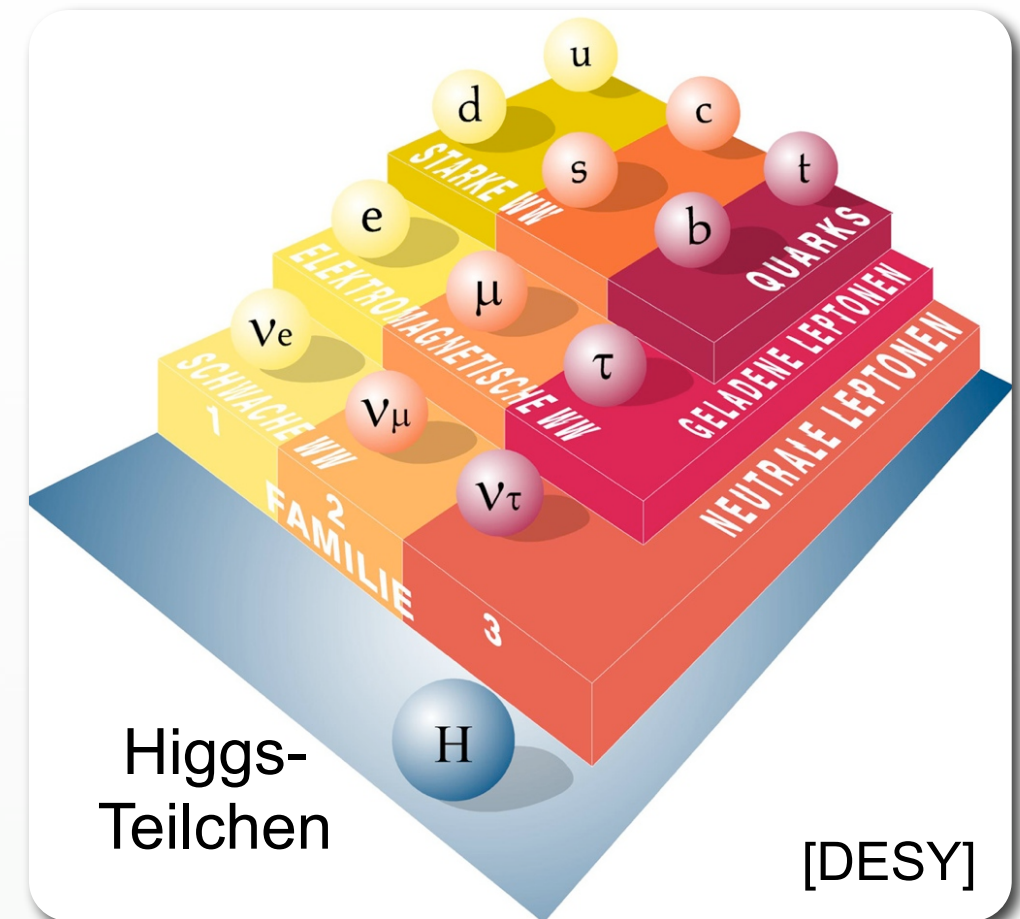
Experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt

Modell passt auf ein T-Shirt

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

[CERN]

- Die **Massenfrage**:
 - Warum unterscheiden sich die Massen der Elementarteilchen in den drei Familien?
 - Warum haben die Elementarteilchen überhaupt Masse?
- Lösung: das „**Higgs-Teilchen**“
 - Postuliert von britischem Physiker **Peter Higgs** (und anderen) im Jahr 1964
 - Funktion: Higgs-Teilchen „**gibt**“ **allen Elementarteilchen Masse** (die Masse zusammengesetzter Teilchen ist komplizierter!)
 - Fieberhafte Suche, aber noch **nicht experimentell nachgewiesen**

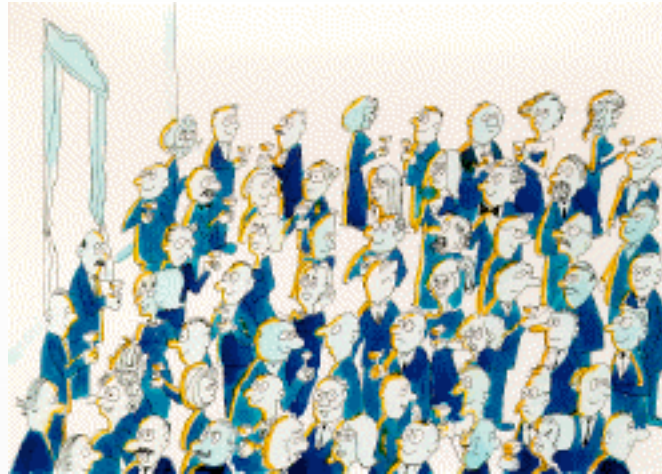


Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum
(= Teilchen)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum
(= Teilchen)



Prominenter kommt
schwer voran
(Trägheit = Masse)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum
(= Teilchen)



Prominenter kommt
schwer voran
(Trägheit = Masse)

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

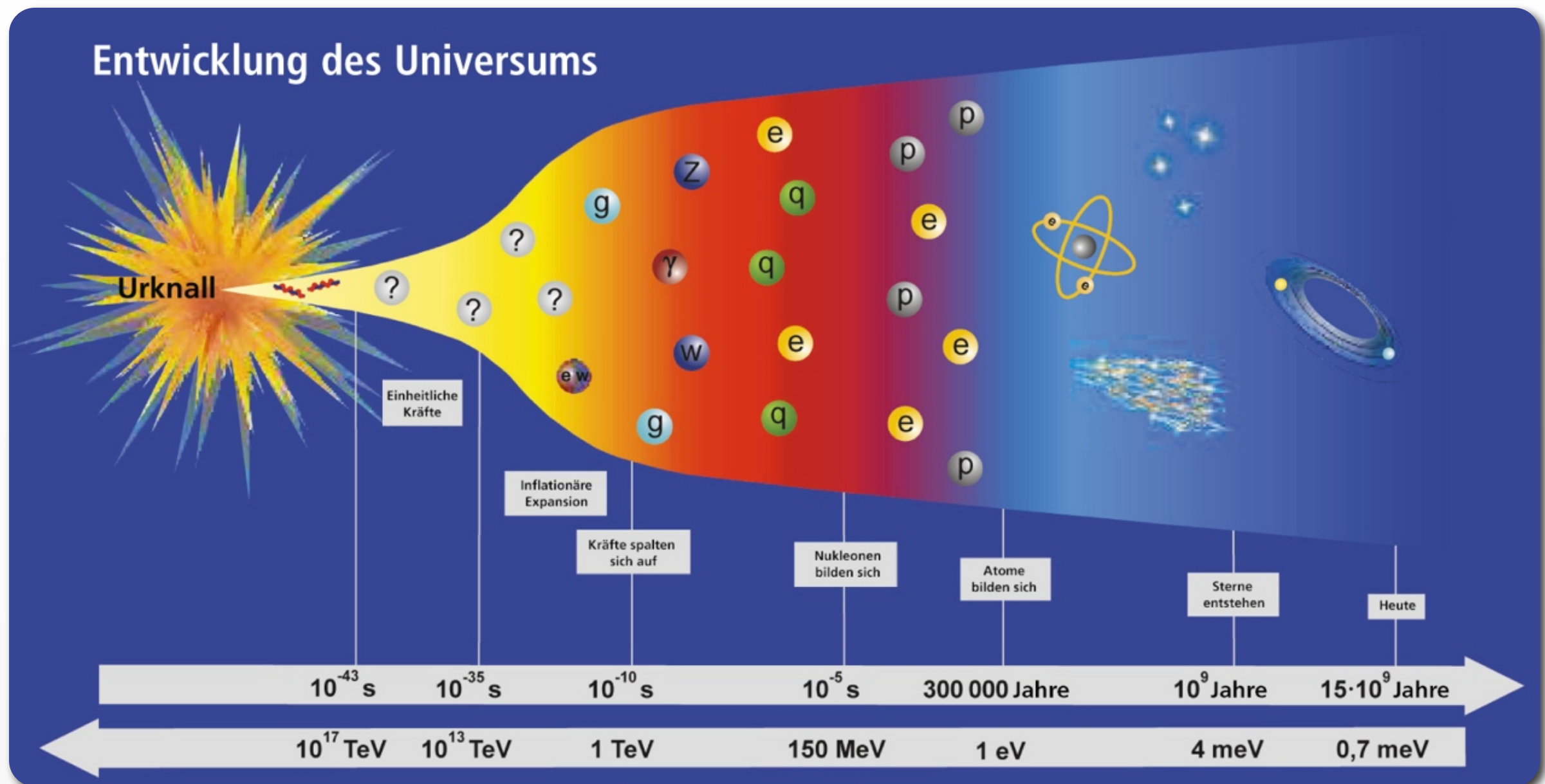


Jemand streut ein Gerücht
(= Anregung des Higgs-Felds)



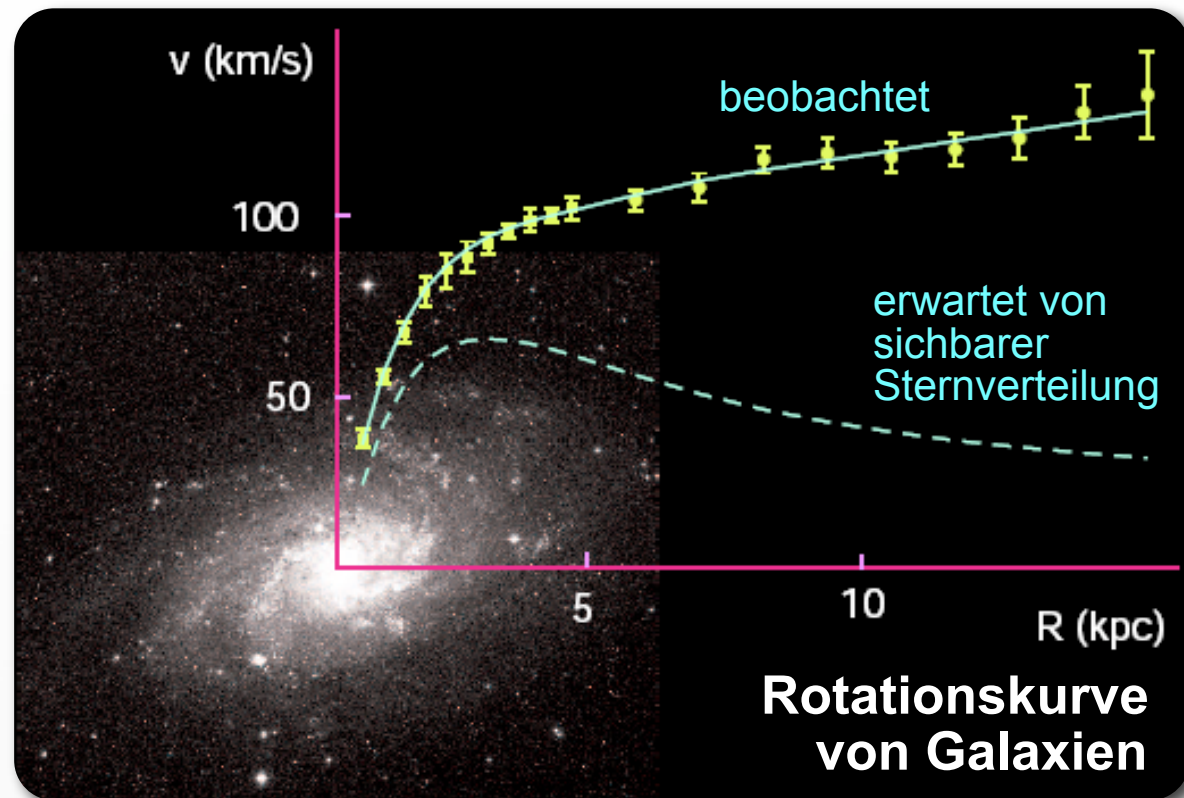
Gerücht verbreitet sich
(= massives Higgs-Teilchen)

[D. Miller]

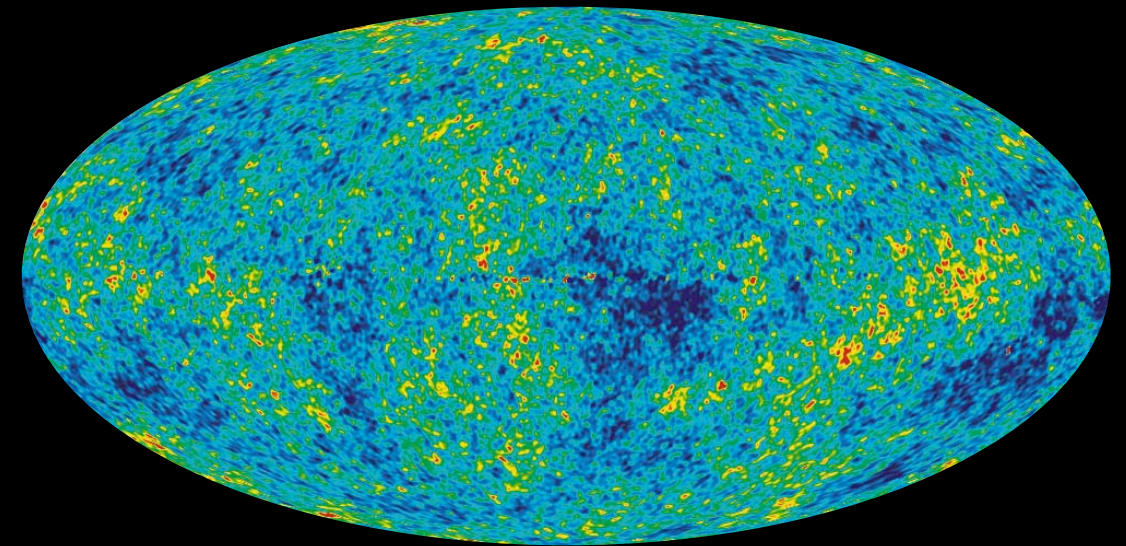


- Seit ca. 10 Jahren: konsistentes Modell von der Entwicklung des Universums seit dem Urknall → „Standardmodell der Kosmologie“
- Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?

Dunkle Materie und Dunkle Energie

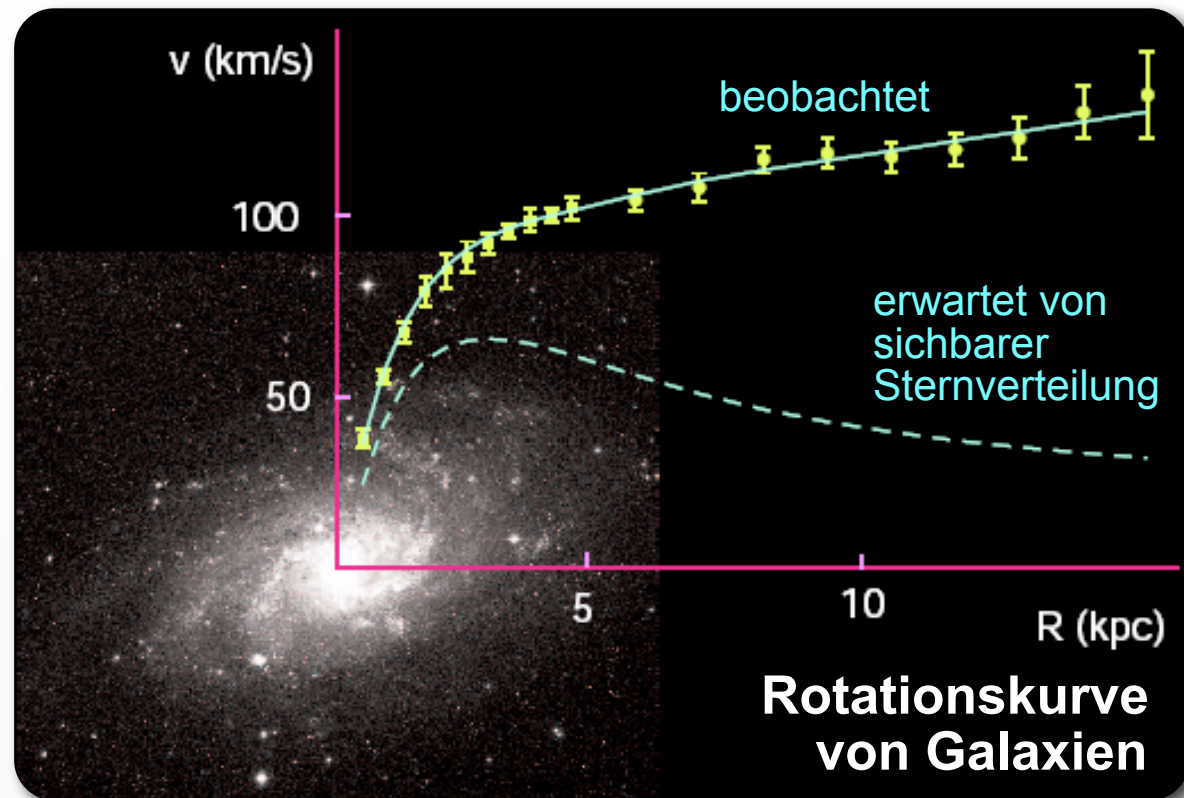


Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

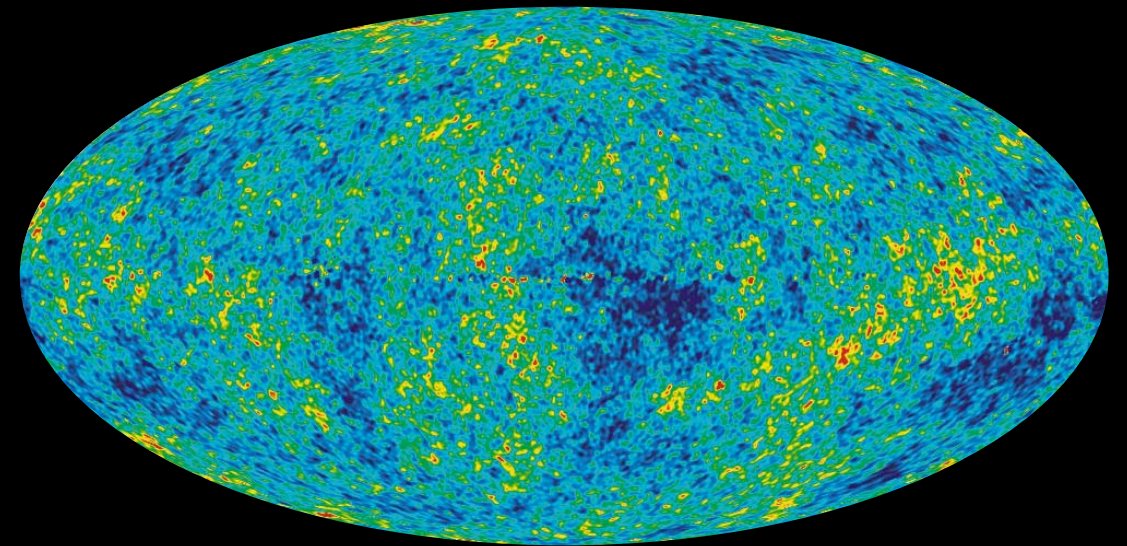


[WMAP-Satellit]

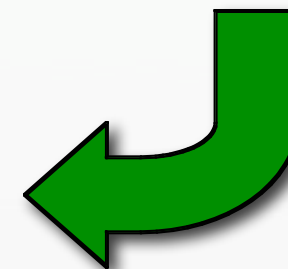
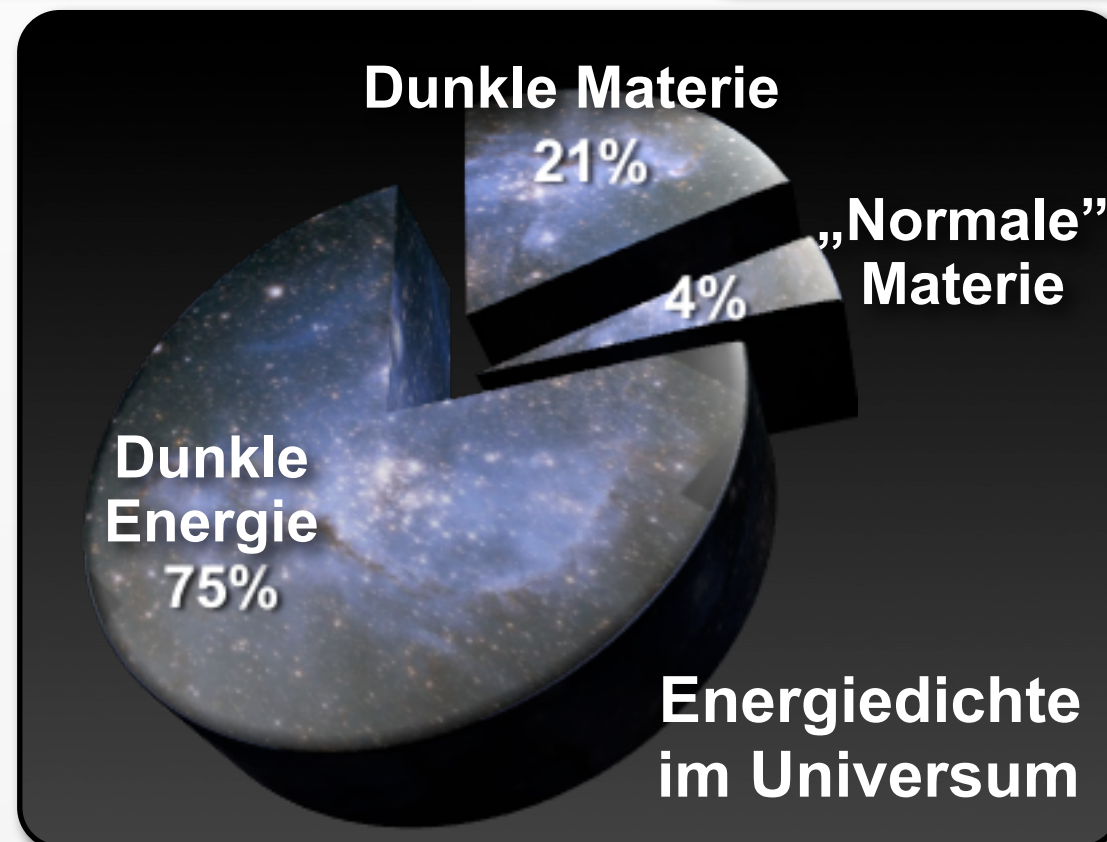
Dunkle Materie und Dunkle Energie



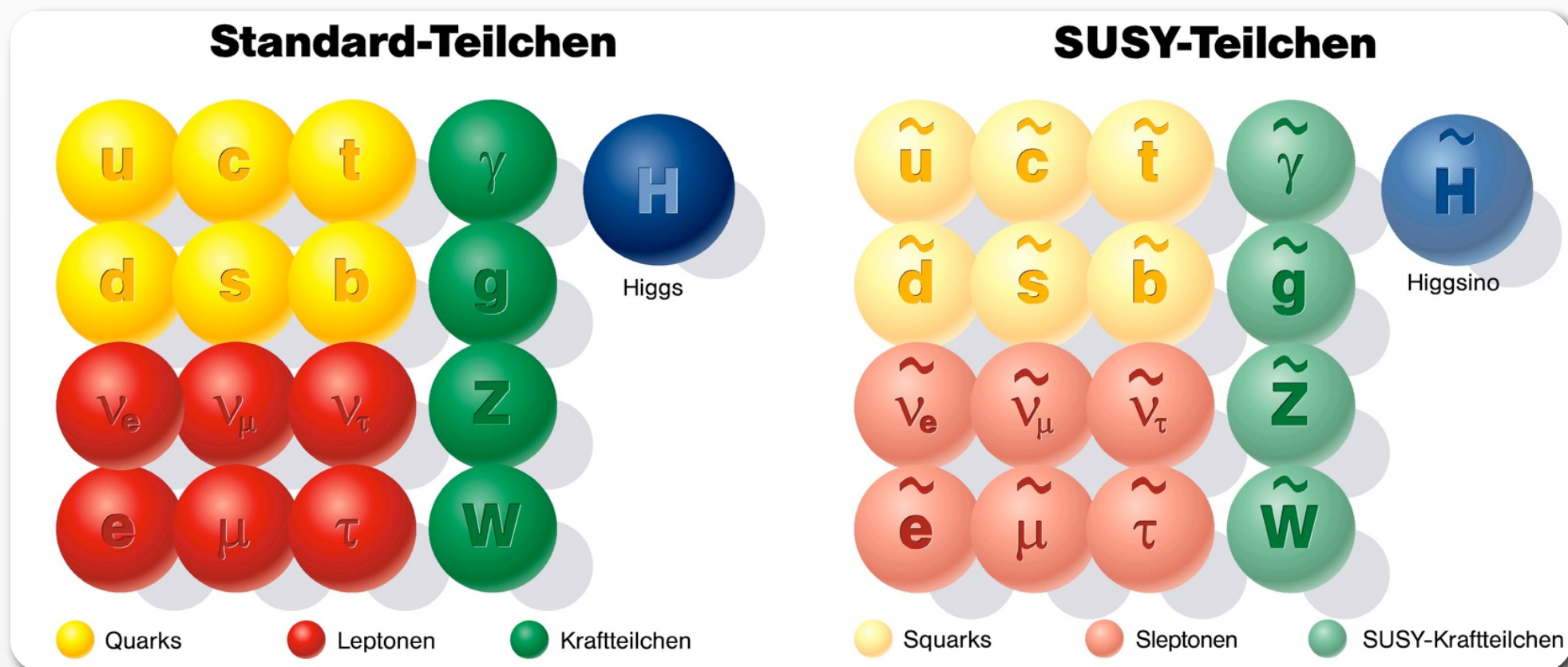
Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung



[WMAP-Satellit]

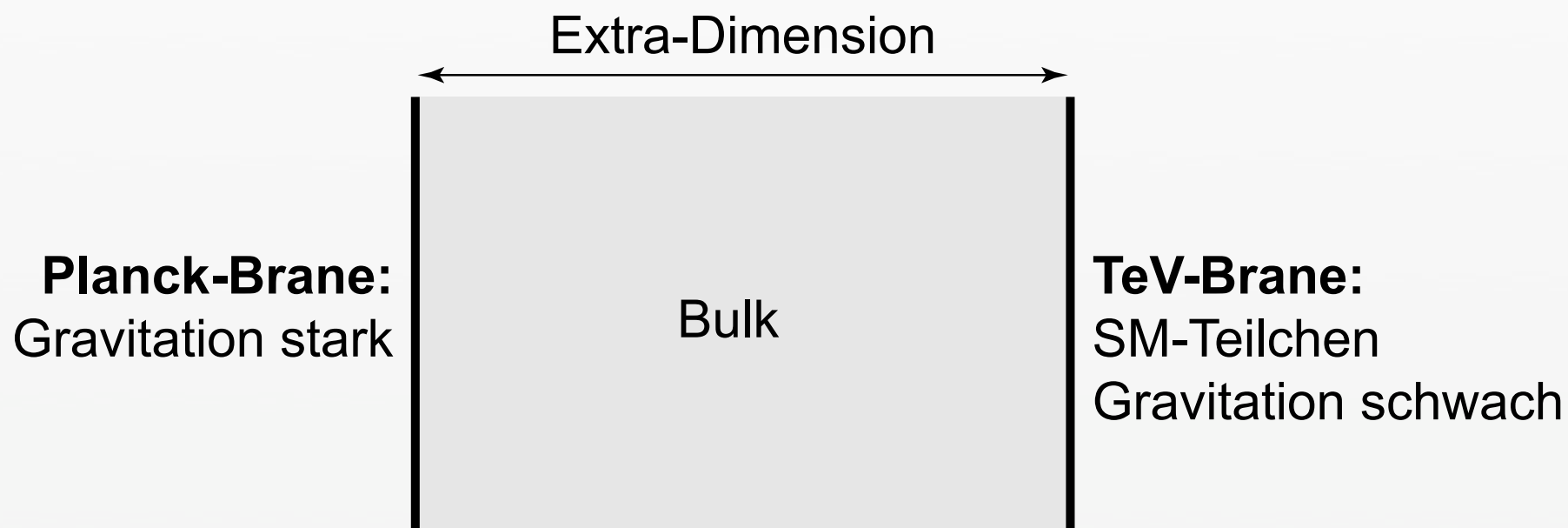


- Das Standardmodells der Teilchenphysik erklärt nicht alles:
 - Teilchen des Standardmodells: nur 4% der Energiedichte im Universum
 - Standardmodell funktioniert nicht gut für Energien oberhalb 1 TeV
- Lösungsidee: **Supersymmetrie** („SUSY“)
 - Zu jedem Teilchen im Standardmodell gibt es ein (schwereres) **Spiegelteilchen**
 - Dunkle Materie = leichteste Spiegelteilchen (häufig: „Neutralino“)



[DESY]

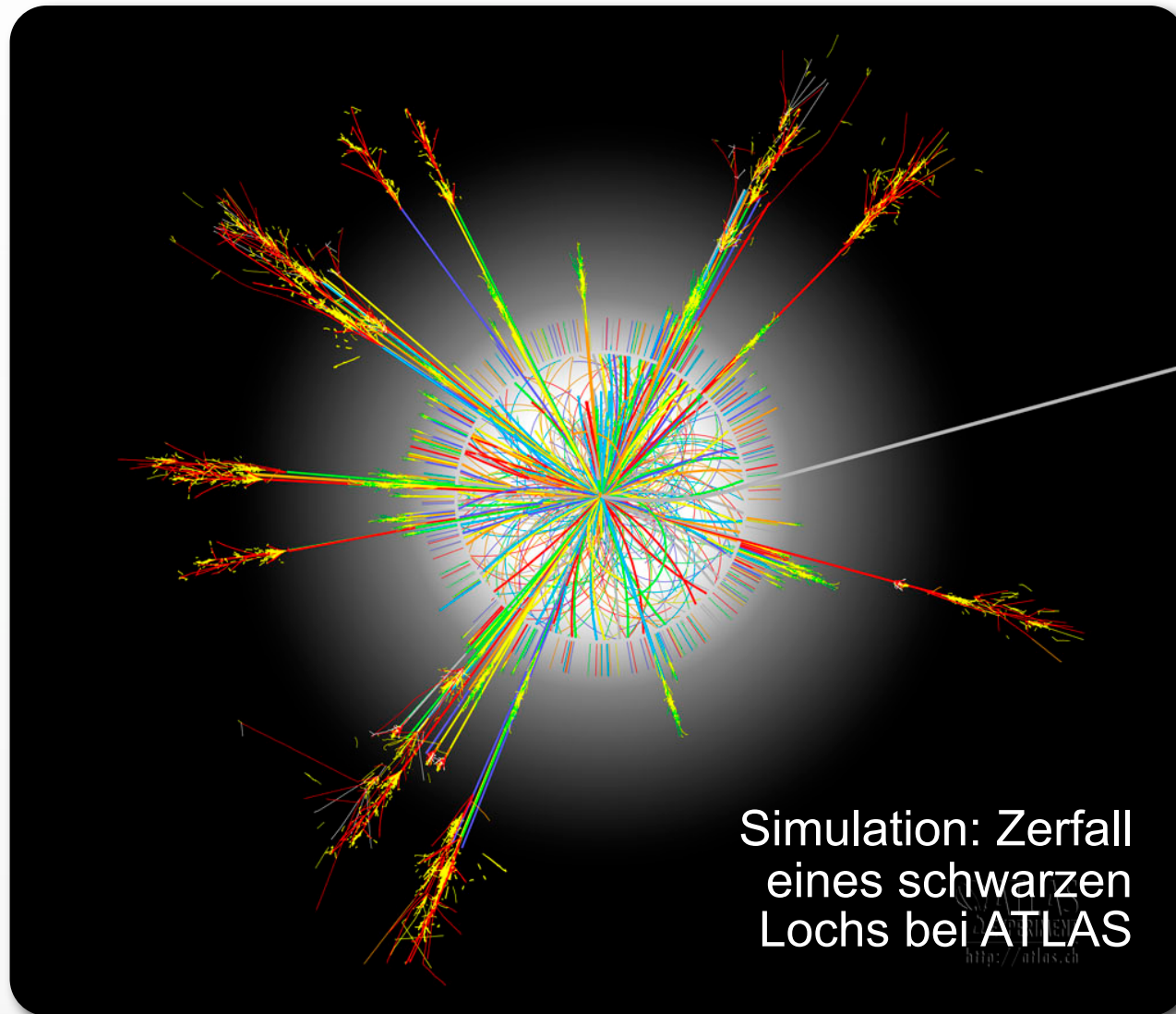
- Noch ein Problem: **keine Gravitation** im Standardmodell
 - Gravitation funktioniert nicht „einfach so“ als Quantentheorie
 - Wasserstoffatom: Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron 10^{42} mal **schwächer** als elektromagnetische Kraft → „**Hierarchieproblem**“
- Spekulative Lösungsidee: **zusätzliche Raumdimensionen**
 - Gravitation breitet sich in mehr als 3 Raumdimensionen aus
 - Z.B. Randall-Sundrum-Modell
 - wir leben auf vierdimensionaler Membran (“TeV-Brane”)
 - Gravitation kommt durch (gekrümmte) Extra-Dimension zu uns



L. Randall



R. Sundrum



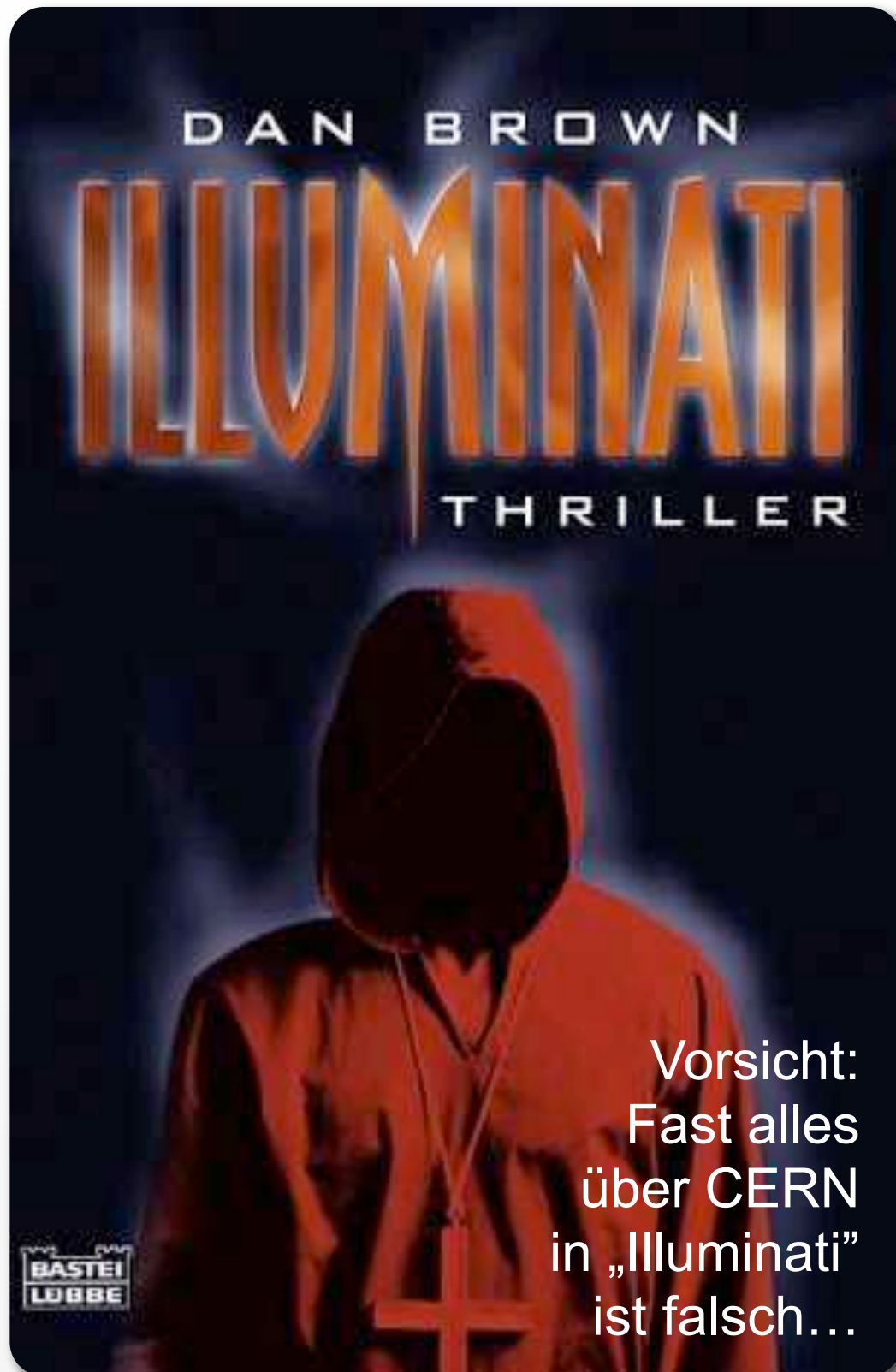
- Theorien mit Extra-Dimensionen:
 - Gravitation in Extra-Dimensionen stark genug zur Erzeugung **mikroskopischer schwarzer Löcher** am LHC ($\neq$ Einstein'sches astronomisches schwarzes Loch)
 - Zerfall in $< 10^{-25}$ Sekunden durch **Hawking-Strahlung** $\rightarrow$ spektakuläre Signatur im Detektor
 - (Wilde) Spekulation: schwarzes Loch zerfällt nicht, sondern frisst Erde auf
- Der LHC ist **sicher**:
 - Kosmischer Strahlung: jede Sekunde Kollisionen äquivalent zu $>10^{14}$ Jahren LHC-Betrieb
 - Keine Zerstörung von Sonnen oder Neutronensternen durch schwarze Löcher beobachtet



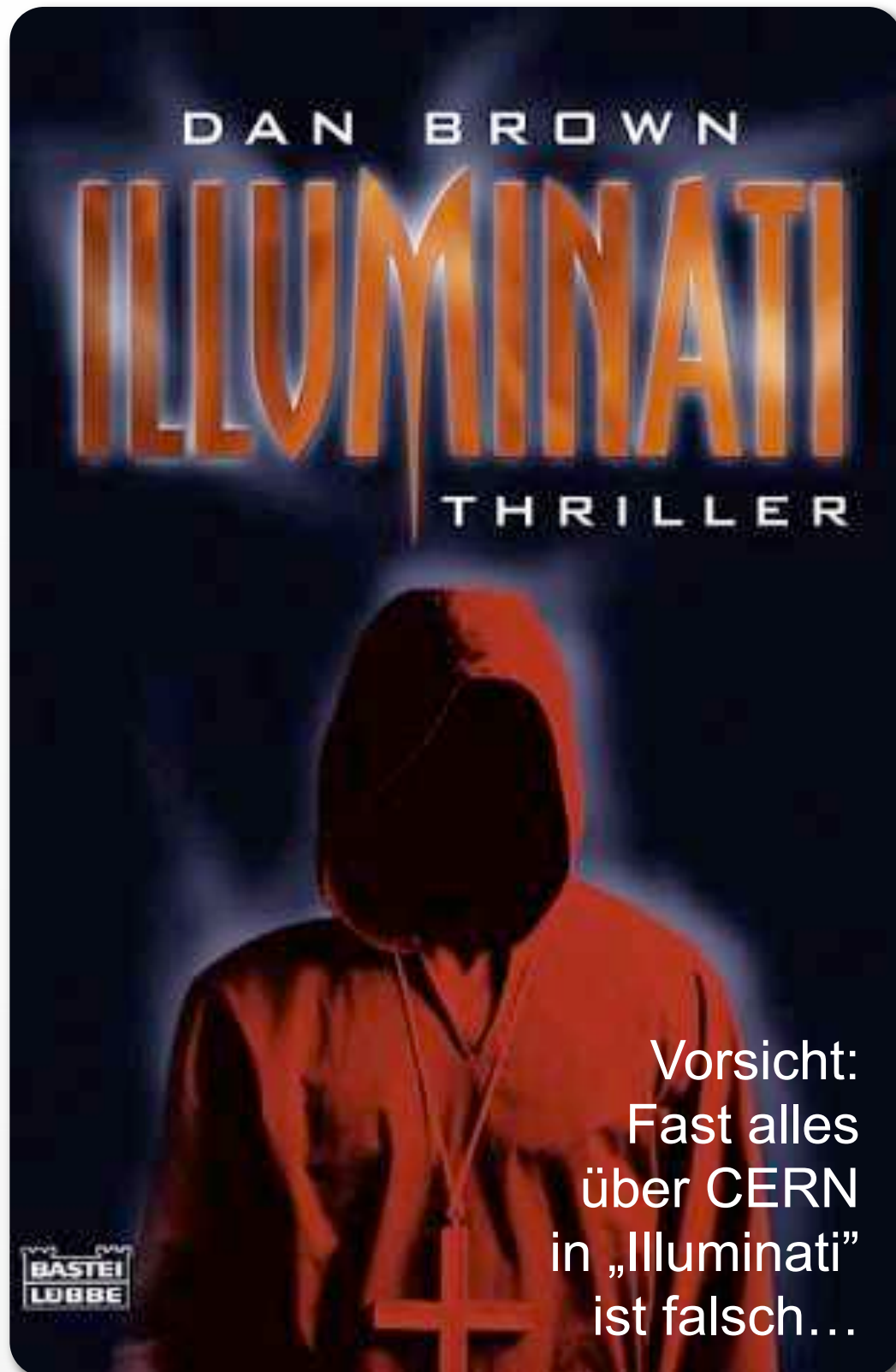
CERN und der Large Hadron Collider

CERN – Habe ich schonmal gehört...





Vorsicht:
Fast alles
über CERN
in „Illuminati“
ist falsch...



CERN – where the web was born...

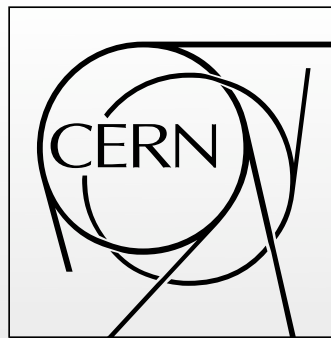


Tim Berners-Lee
(1990)

Der erste
Webserver
(1990)



Was ist CERN?



CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor

Weltweit **größtes Labor für Teilchenphysik**, gegründet 1954

Historischer Name: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“

2500 Angestellte, fast 10000 Gäste (85 Nationalitäten)

Genfer See

Jura-Gebirge

8,5 km

Standort Prévessin
(Frankreich)

Beschleunigerkomplex
(ca. 100 m unter der Erde)

Standort Meyrin (Schweiz)

LHC – der Large Hadron Collider



LHC – der Large Hadron Collider



LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



LHC – der Large Hadron Collider



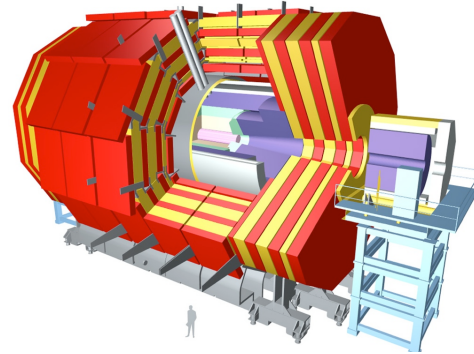
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



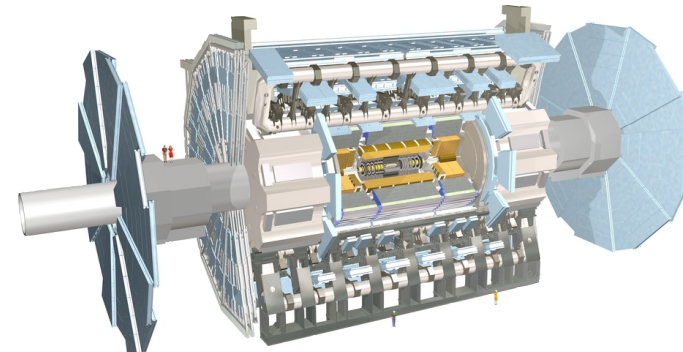
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



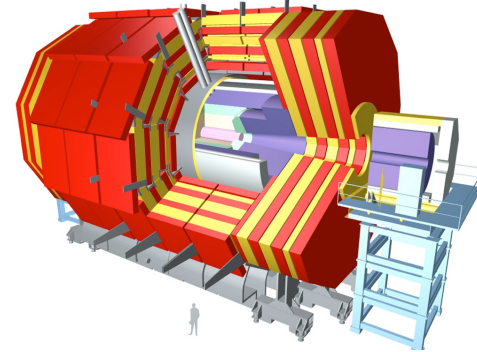
LHC – der Large Hadron Collider



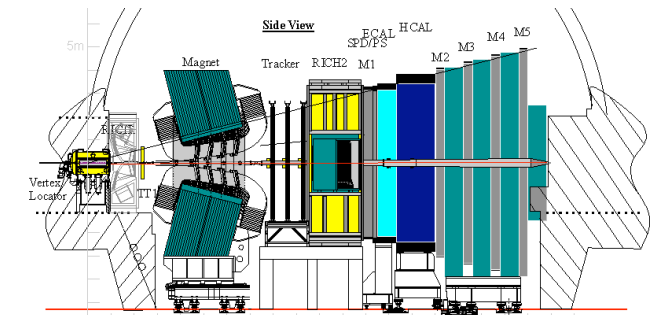
LHC-Beschleuniger:
Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



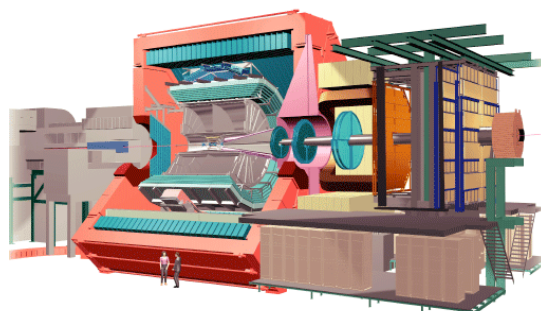
CMS-Experiment:
Vielzweckexperiment



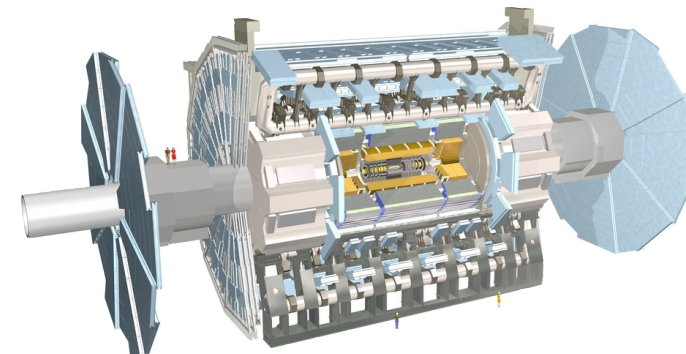
LHCb-Experiment:
B-Physik und CP-Verletzung



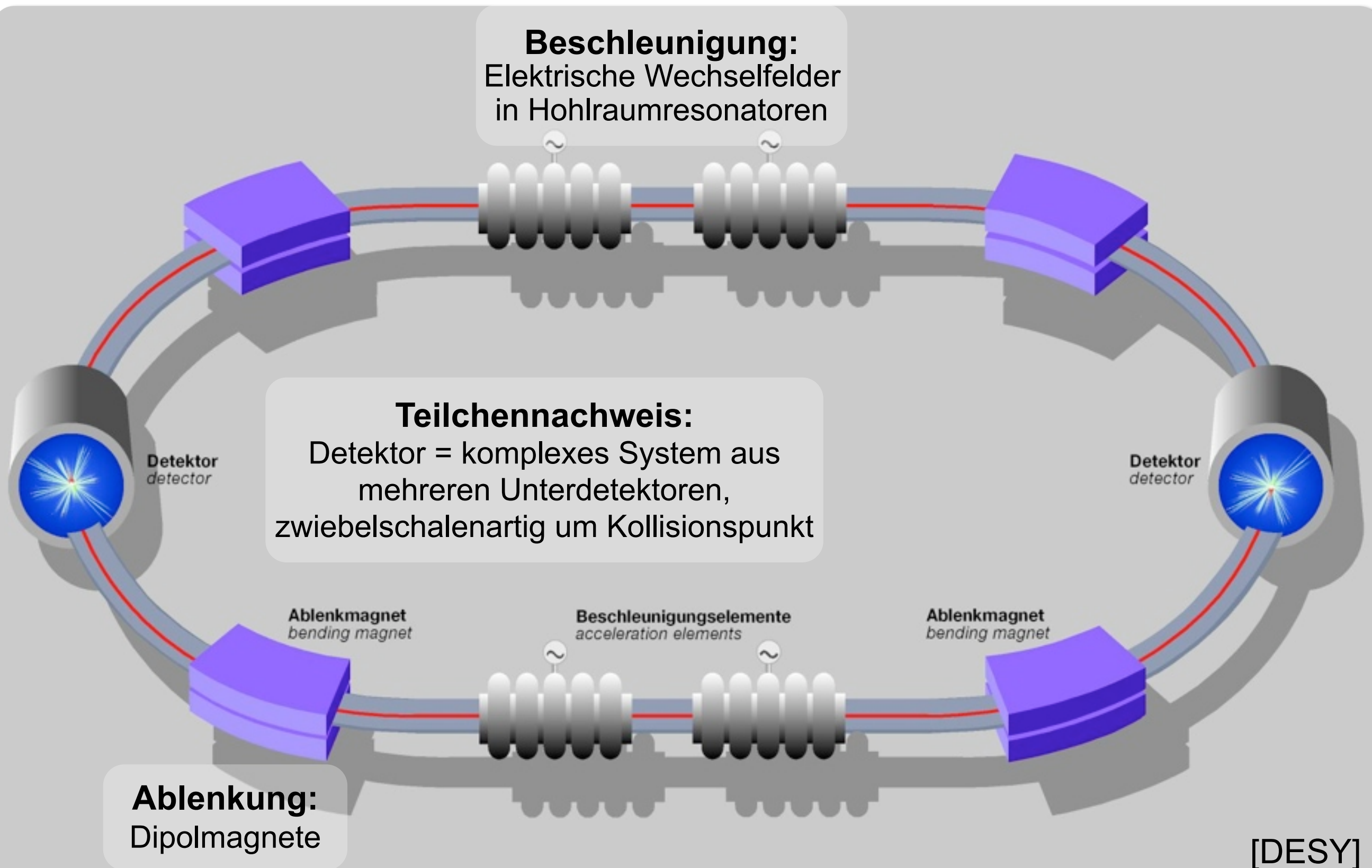
ALICE-Experiment:
Schwerionenphysik

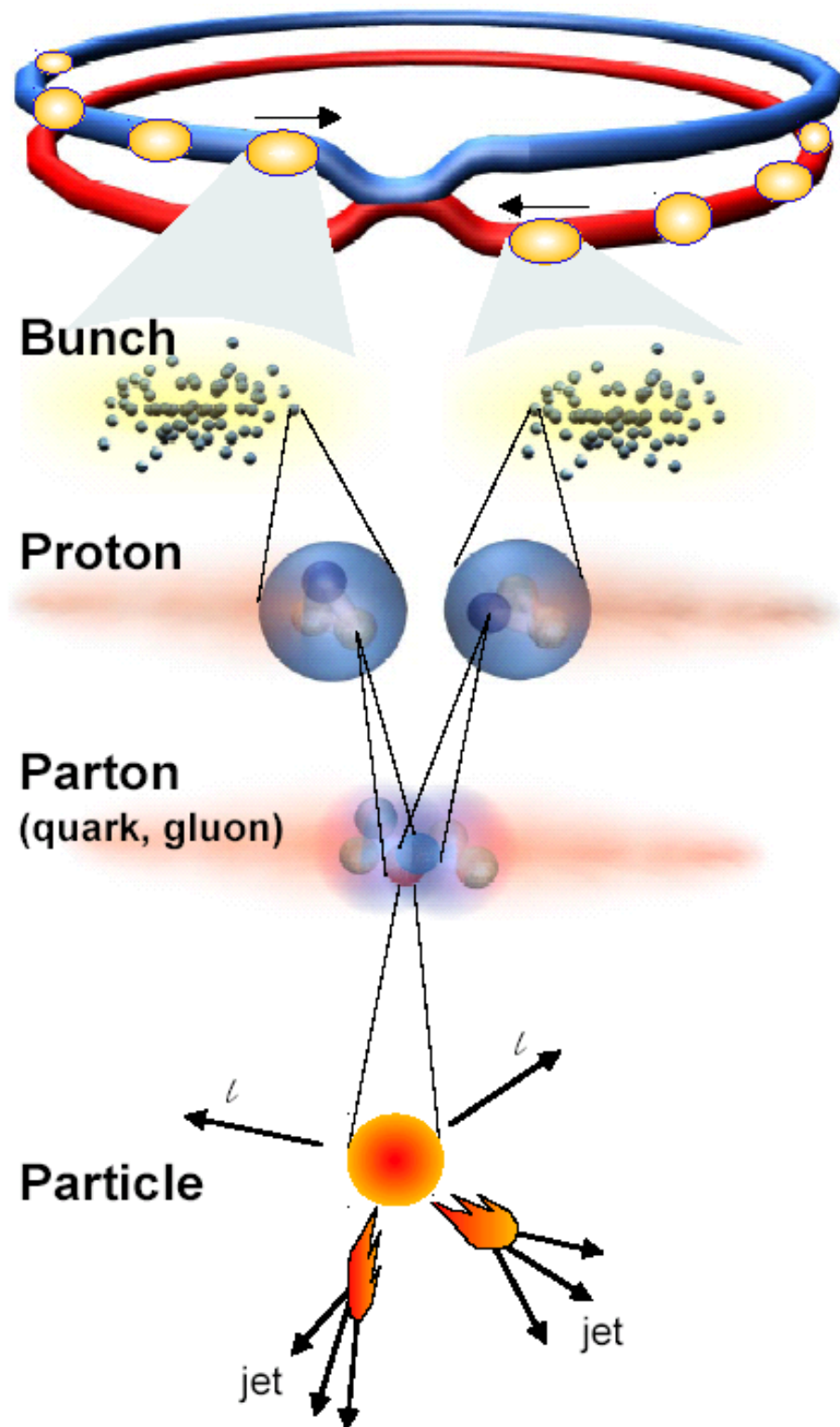


ATLAS-Experiment:
Vielzweckexperiment



Prinzip des Teilchenbeschleunigers





- **Magnete** halten Strahl auf Kreisbahn:
 - 1232 supraleitende Dipolmagnete (8.33 T)
 - Betriebstemperatur: 1.9 K
- Strahlparameter:
 - Ca. 2800 Pakete mit jeweils ca. 100 Milliarden Protonen
 - Gespeicherte Strahlenergie: 700 MJ (kinetische Energie $\approx$ TGV mit 200 km/h)
- Wechselwirkungsrate (ATLAS)
 - 40 Millionen mal 25 Proton-Proton-Kollisionen pro Sekunde
→ **1 Milliarde Ereignisse pro Sekunde**
 - $> 99.9999\%$ dieser Ereignisse sind „uninteressant“ (bekannte Teilchen)
 - Im Schnitt: ein Higgs-Boson in jedem 10.000.000.000sten Ereignis

Impulsmessung

Energiemessung

Teilchenidentifikation

Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

Zerfallsprodukte der Kollision

Photon

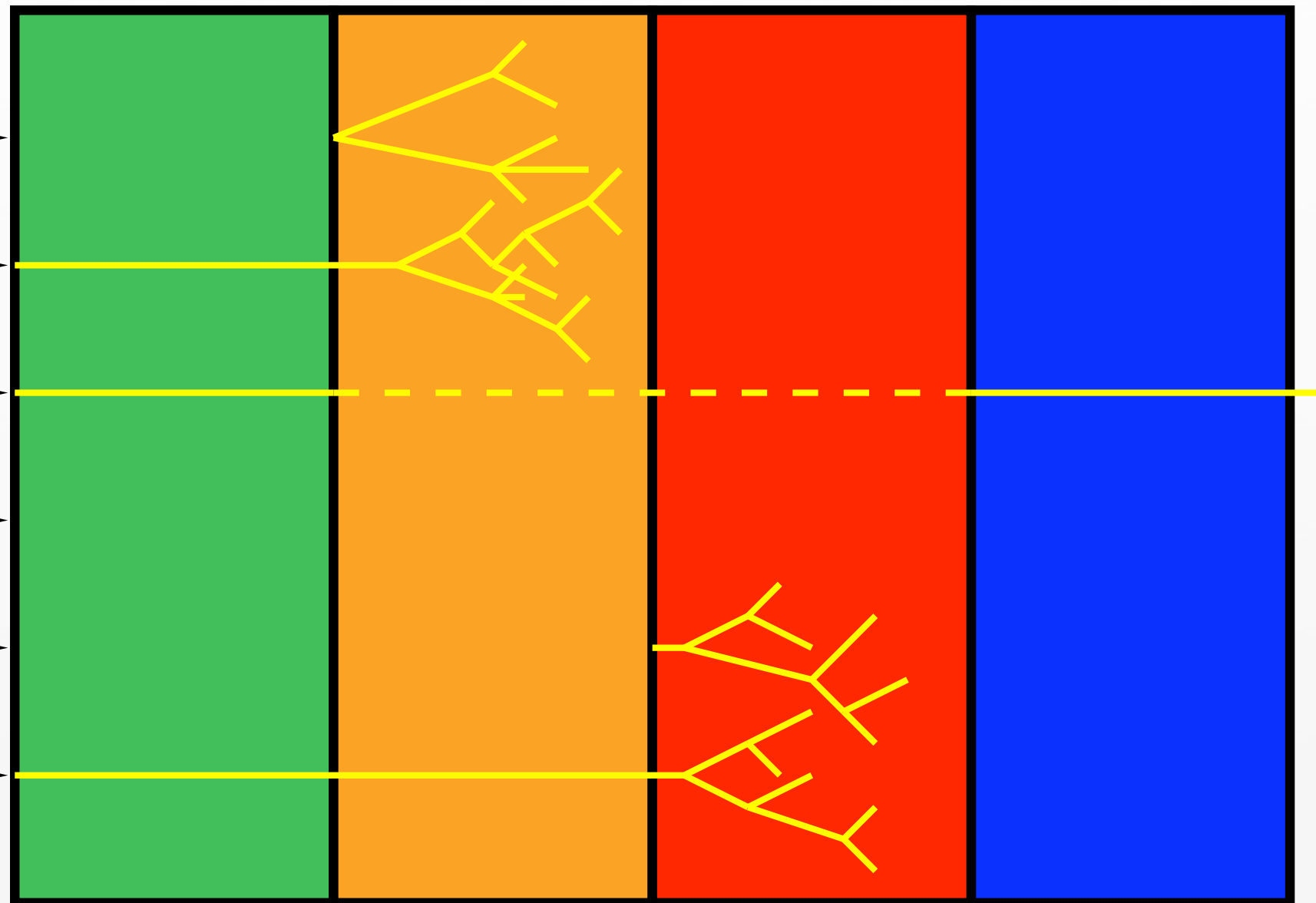
Elektron/Positron

Myon

Neutrino

Neutron

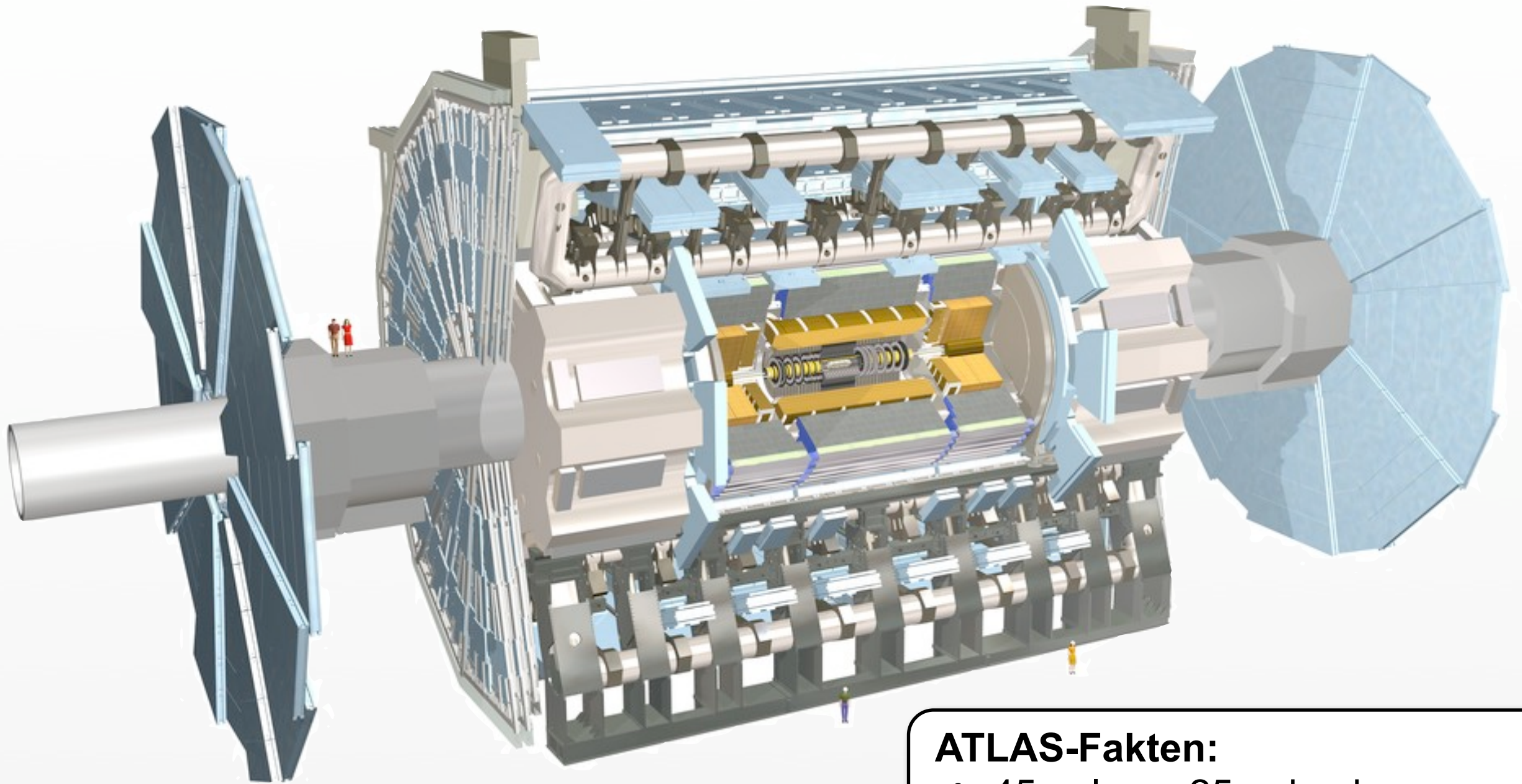
Pion, Proton



„Innen“

„Außen“

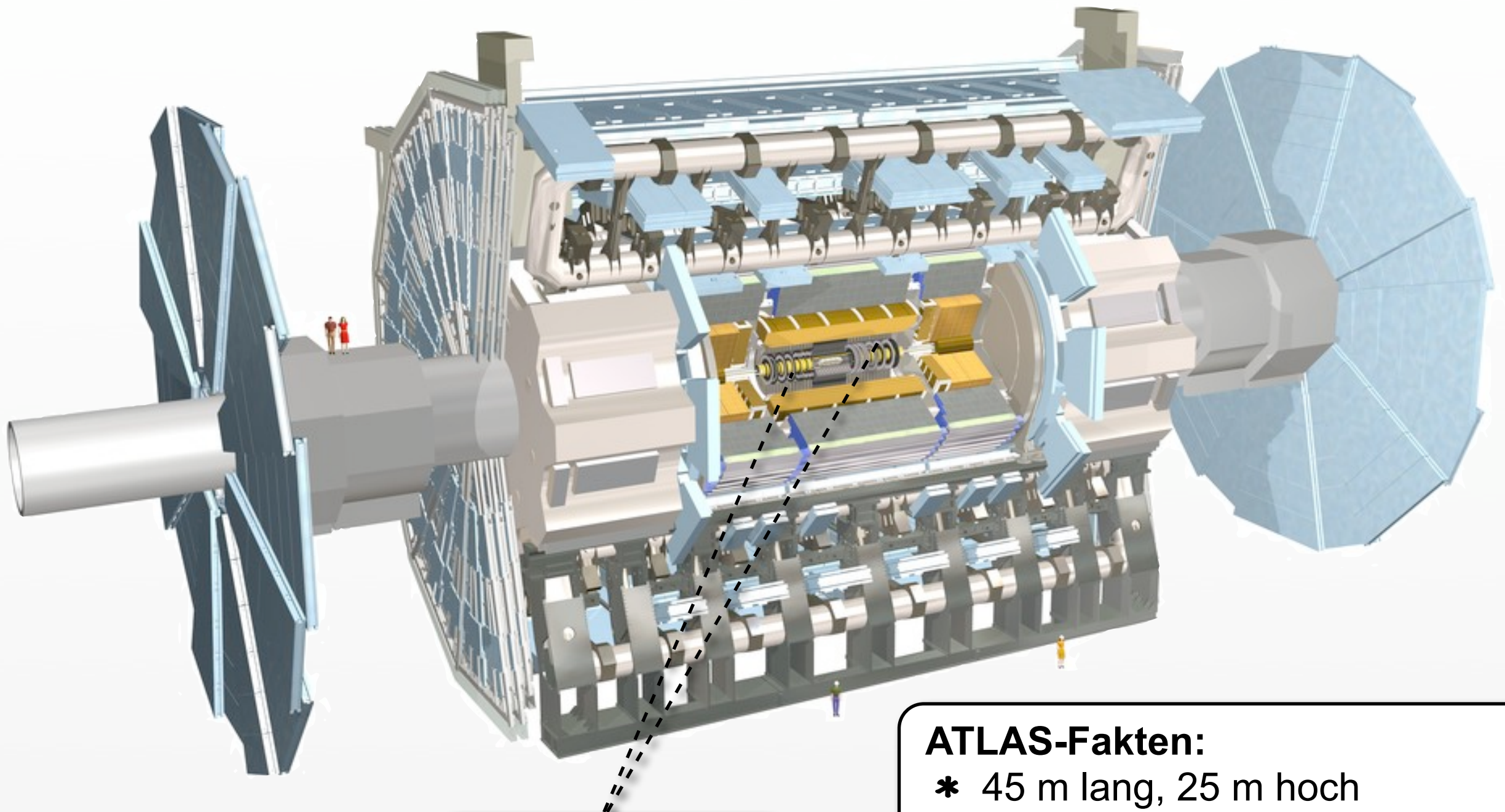
Beispiel: der ATLAS-Detektor



ATLAS-Fakten:

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

Beispiel: der ATLAS-Detektor

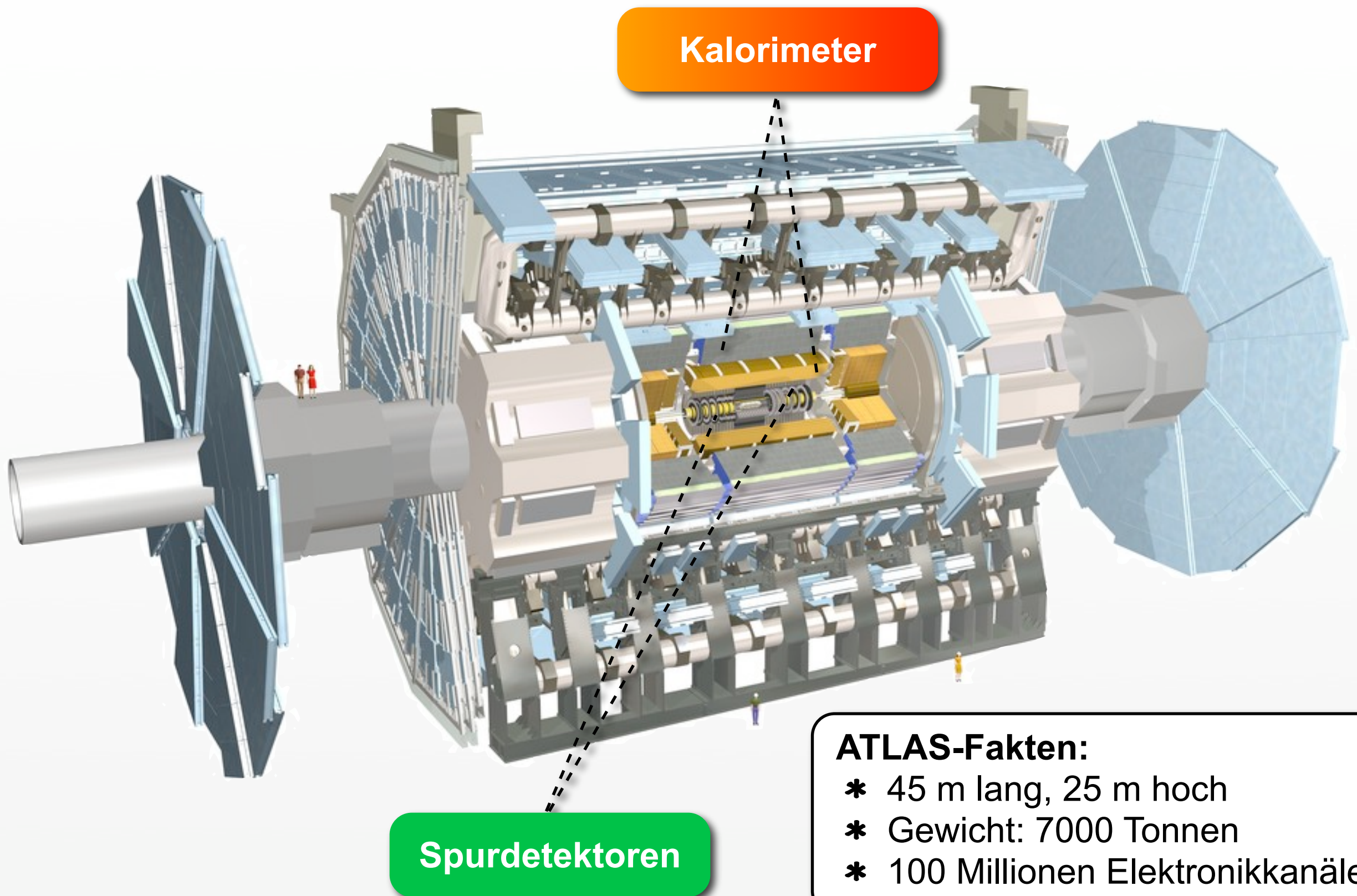


Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

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

Beispiel: der ATLAS-Detektor



ATLAS-Fakten:

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

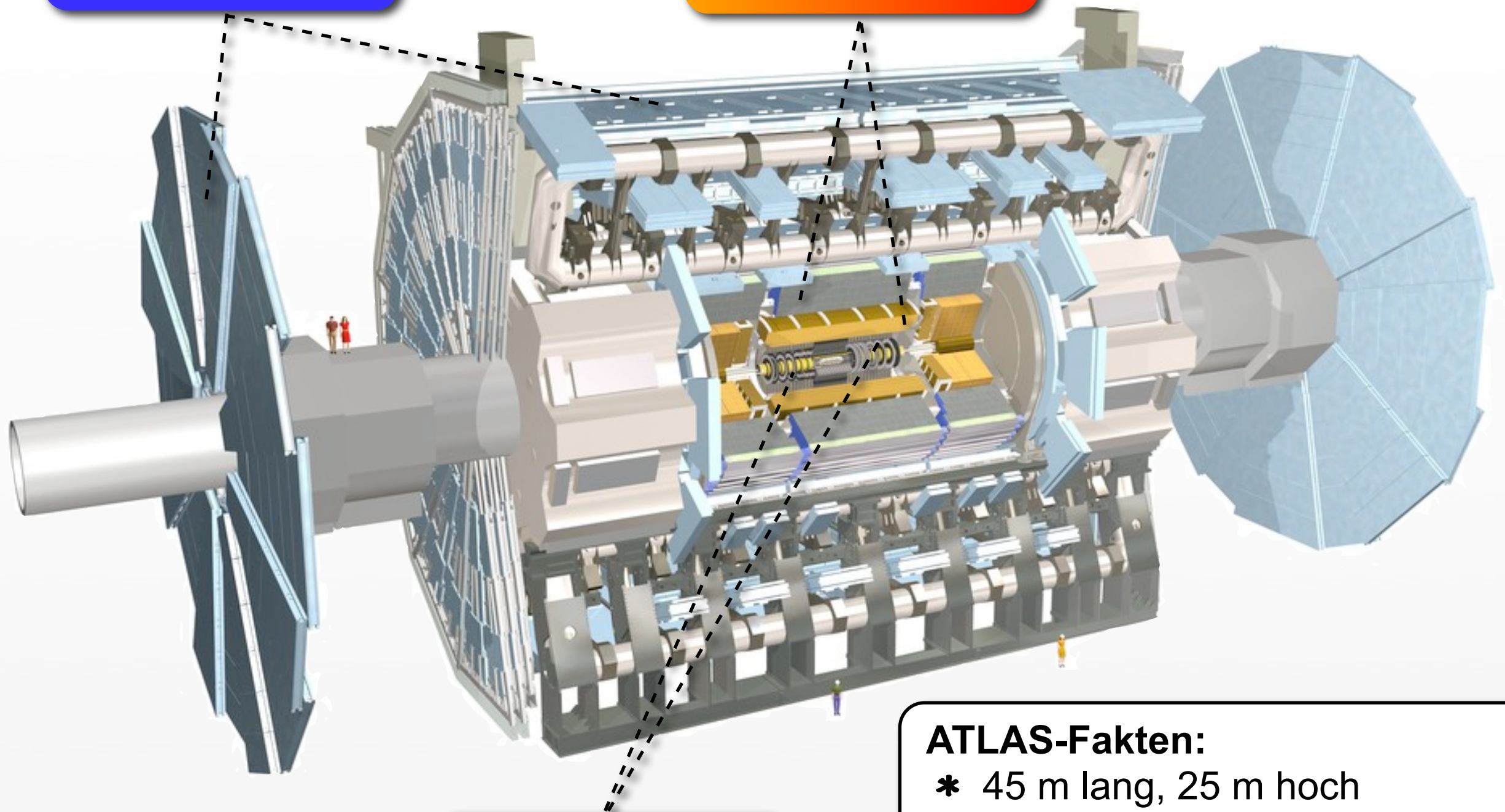
Beispiel: der ATLAS-Detektor



Myon-Detektor

Kalorimeter

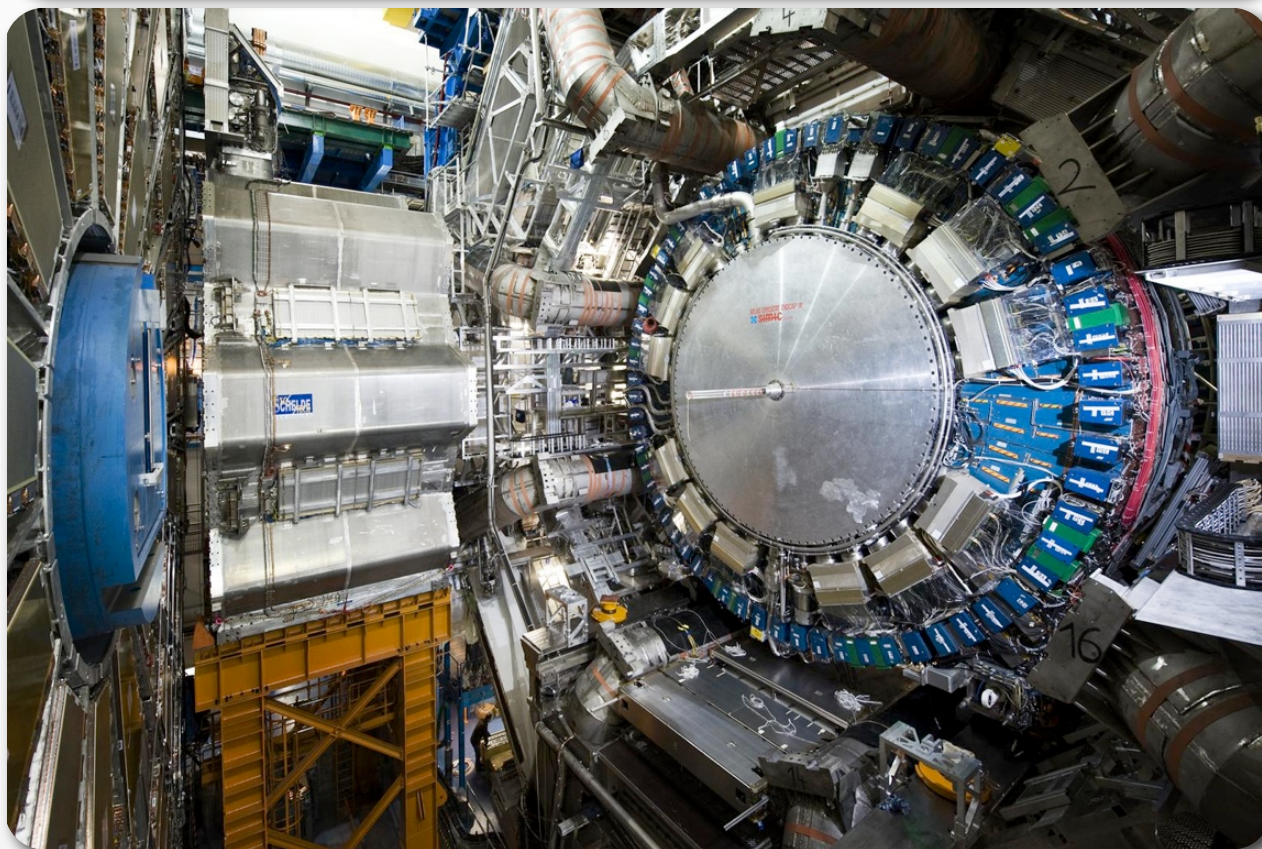
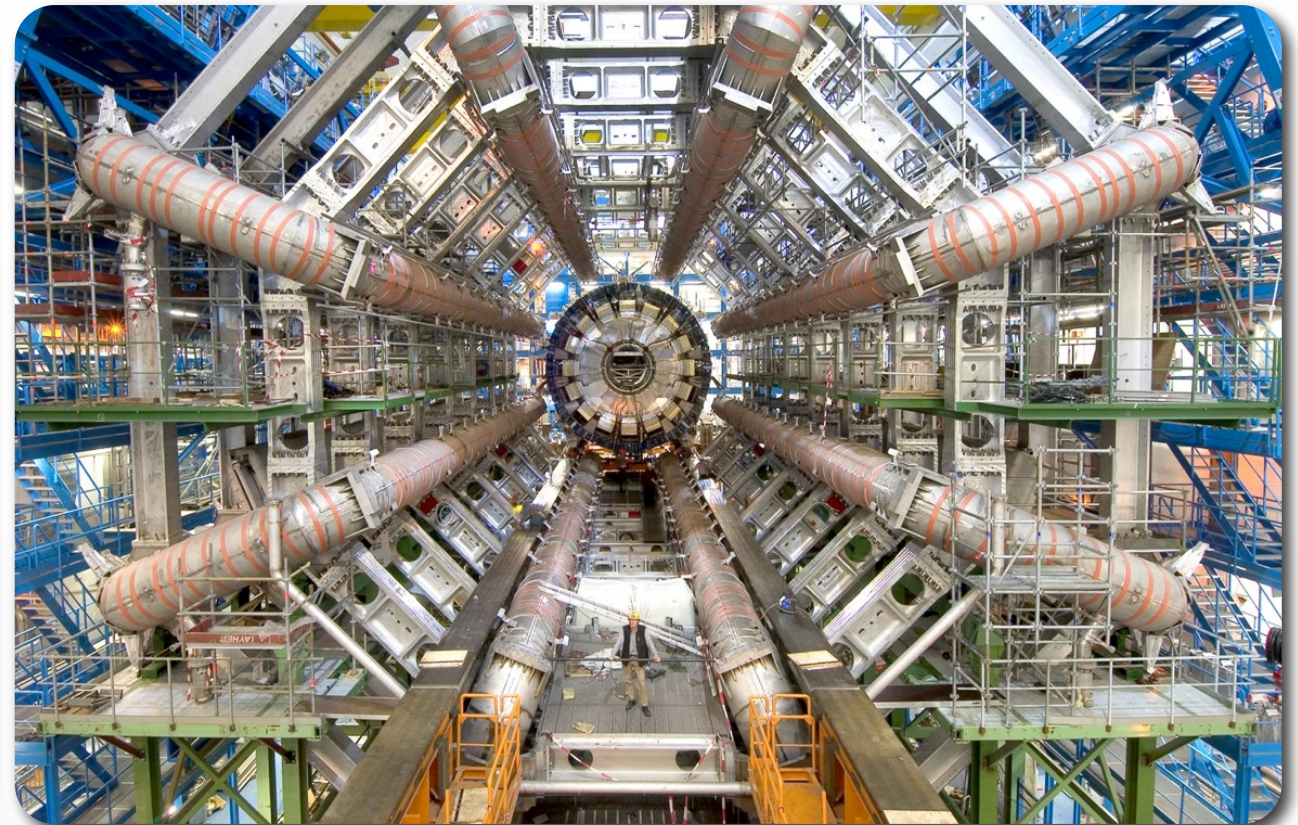
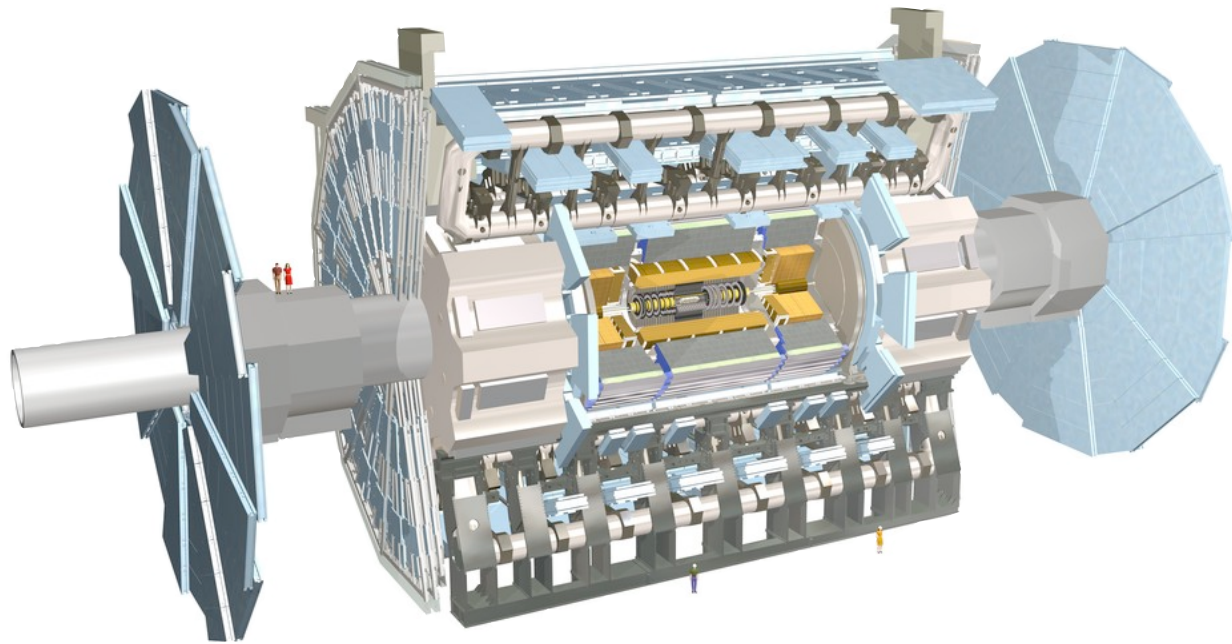
Spurdetektoren

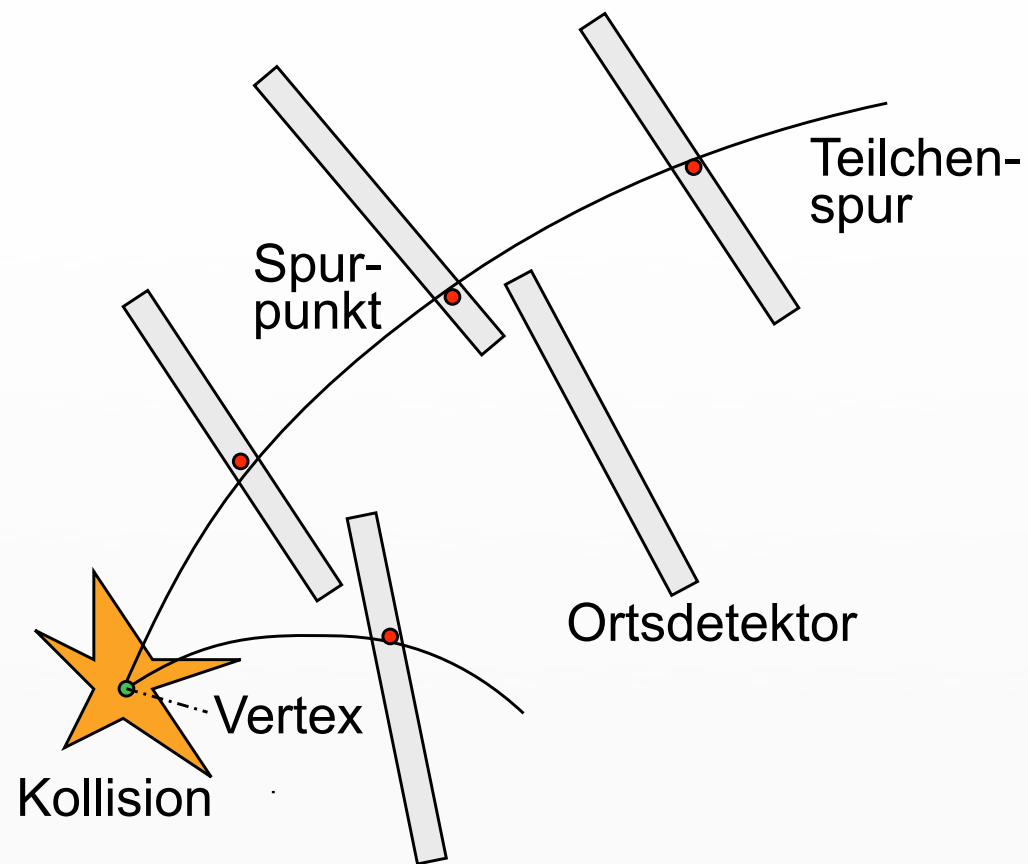


ATLAS-Fakten:

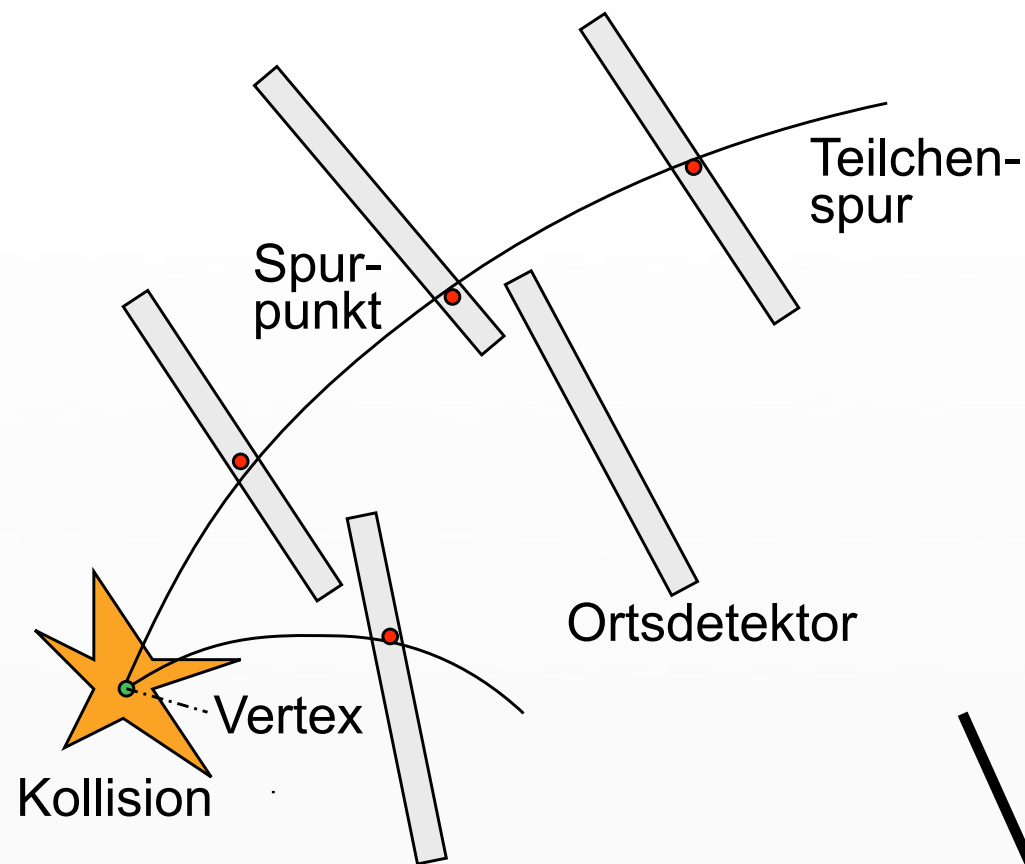
- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle

Zusammenbau des ATLAS-Detektors





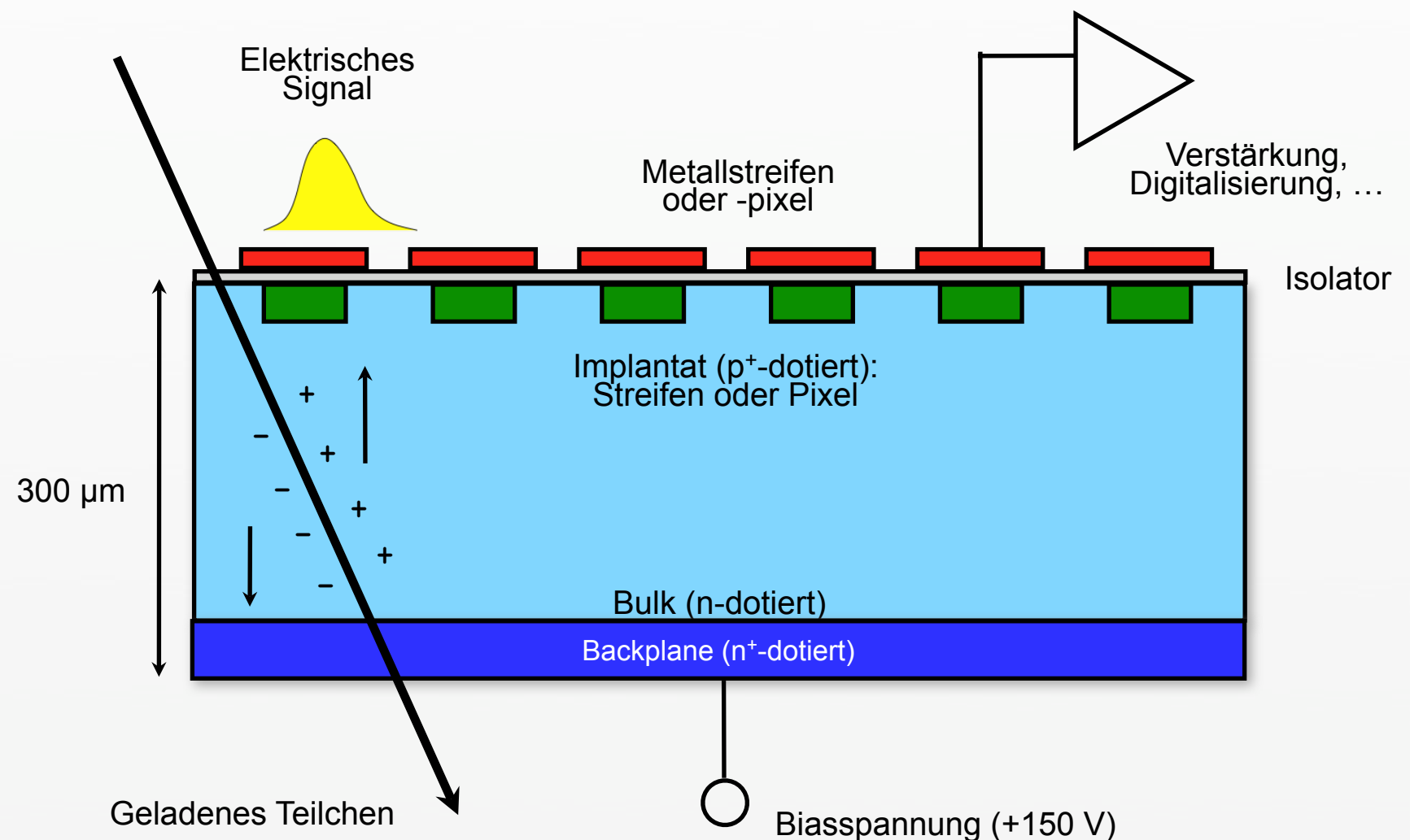
- Idee der Impulsmessung:
- Bestimme Spuren geladener Teilchen aus **Spurpunkten**
- **Ablenkung in Magnetfeld** umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens ($\text{Masse} \times \text{Geschwindigkeit}$)



- Idee der Impulsmessung:
 - Bestimme Spuren geladener Teilchen aus **Spurpunkten**
 - Ablenkung in Magnetfeld** umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens ($\text{Masse} \times \text{Geschwindigkeit}$)

- Spurpunkte: z. B. **Siliziumdetektor**

- Detektor = Diode in Sperrrichtung
- Geladenes Teilchen ionisiert Detektor → elektrisches Signal



- Herausforderung **Datenrate**:
 - „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur ca. 100 interessante Ereignisse
 - Überschlagsrechnung:
 $10^9 \text{ Kollisionen/s} \times 10^6 \text{ aktive Kanäle}$
 $= \mathbf{1 \text{ TB/s}}$ → mit heutiger Technologie nicht speicherbar



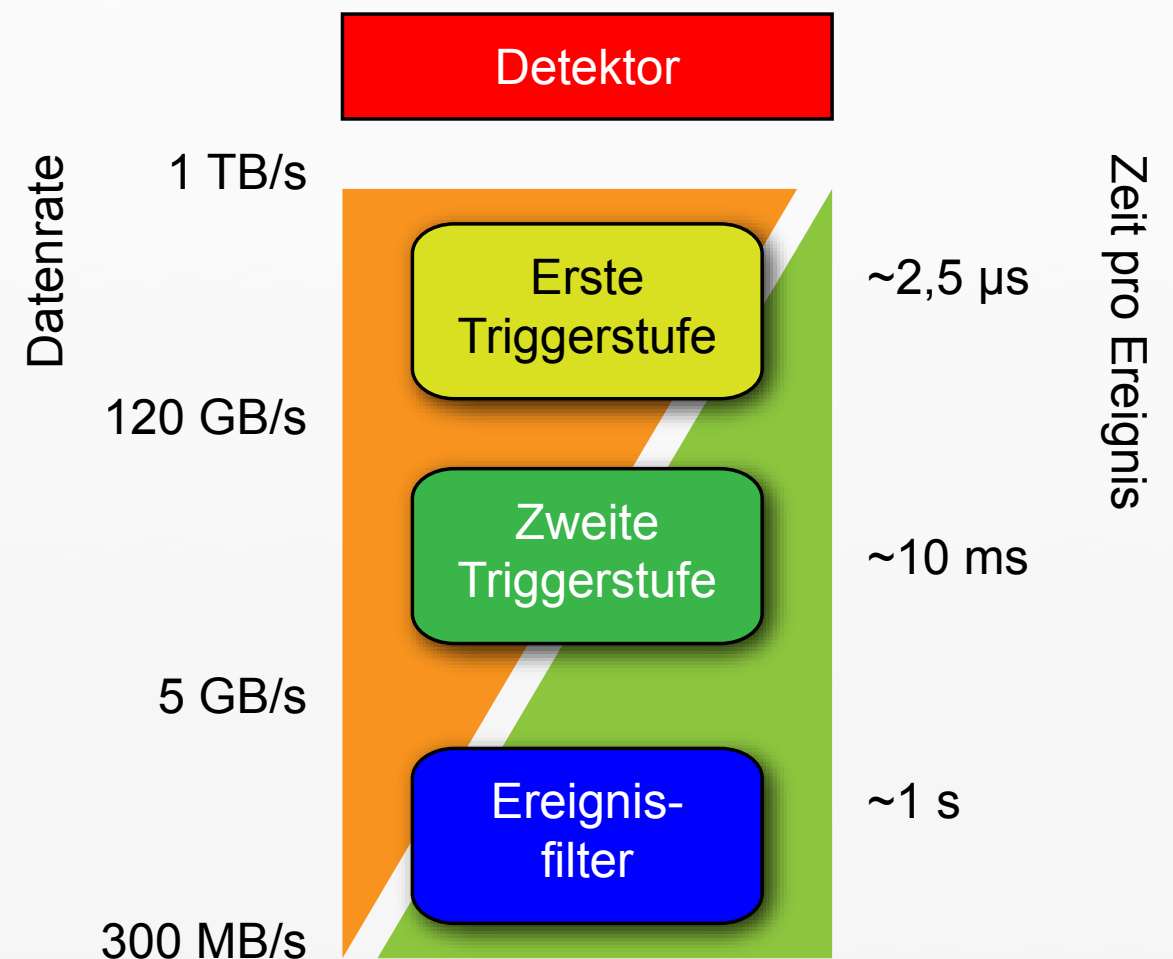
- Herausforderung **Datenrate**:

- „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur ca. 100 interessante Ereignisse
- Überschlagsrechnung:
 $10^9 \text{ Kollisionen/s} \times 10^6 \text{ aktive Kanäle}$
 $= \mathbf{1 \text{ TB/s}}$ → mit heutiger Technologie nicht speicherbar

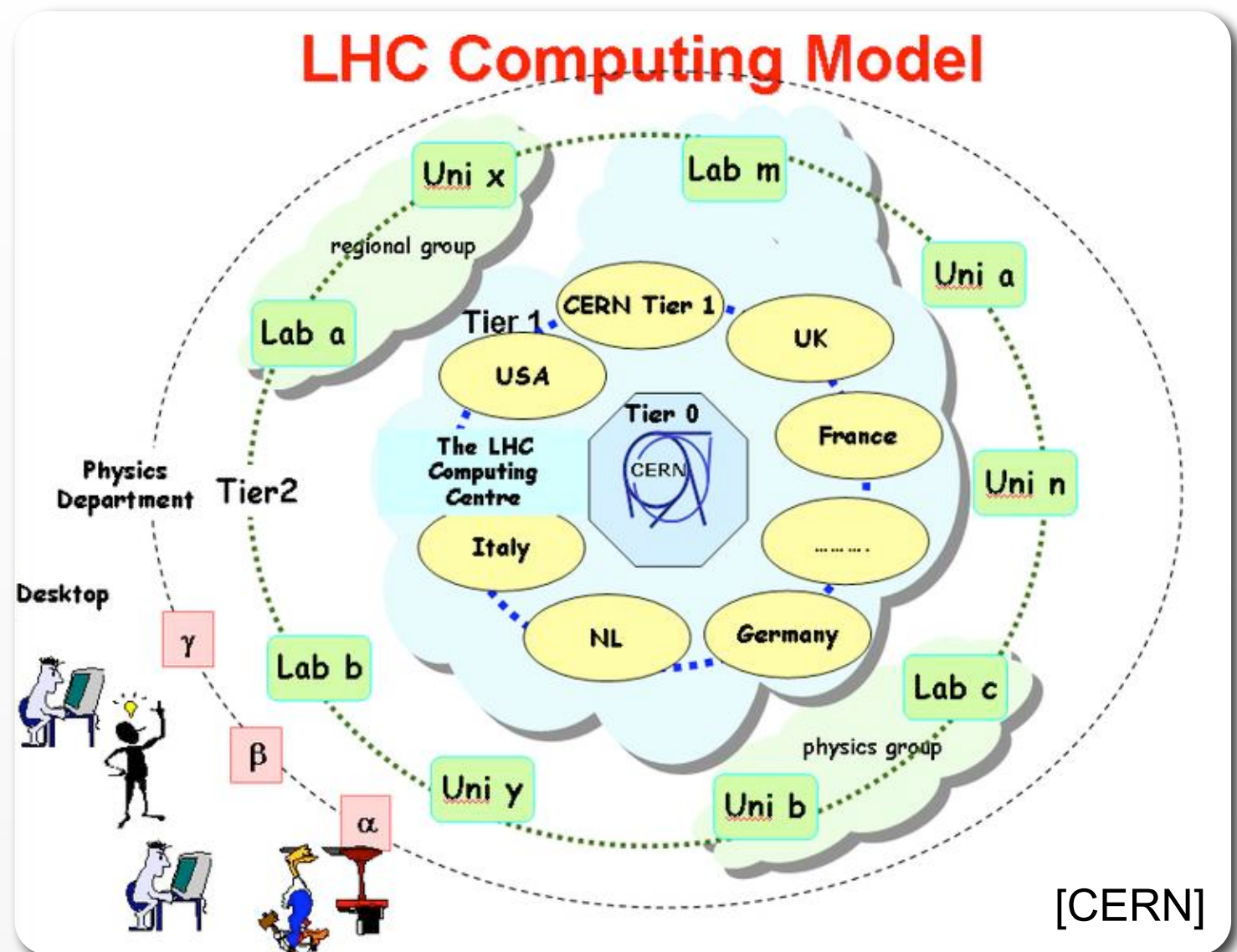


- Lösung: mehrstufige **Datenfilterung** („Trigger“):

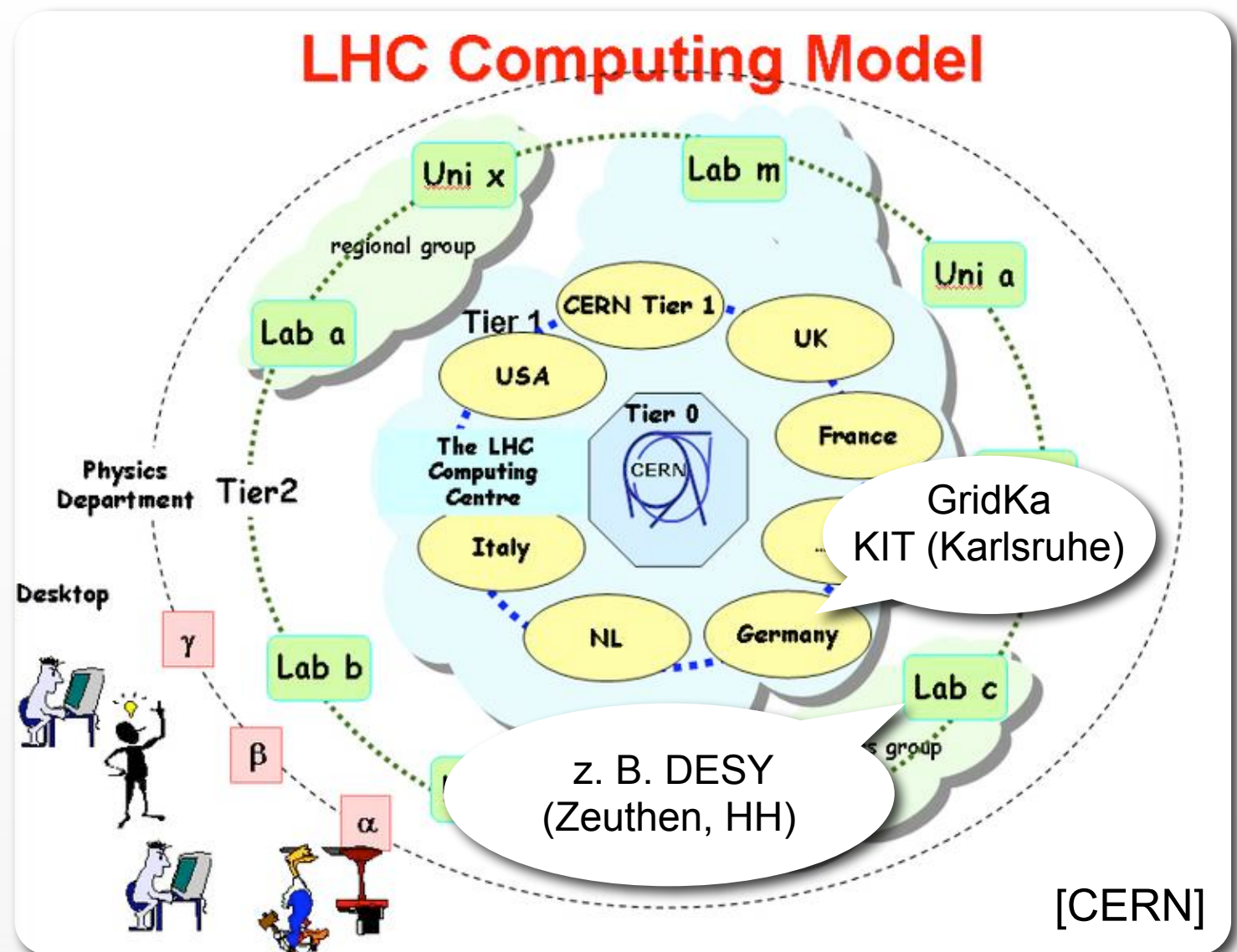
1. **Einfache** Signale, geringer Auflösung, z. B. ein hochenergetisches Myon → spezielle Trigger-**Hardware**
2. Größere Auflösung in **Teilen** des Detektors, z. B. Kegel um Myon → Software, **Computerfarm**
3. Information von **Gesamtdetektor** → Software, Computerfarm



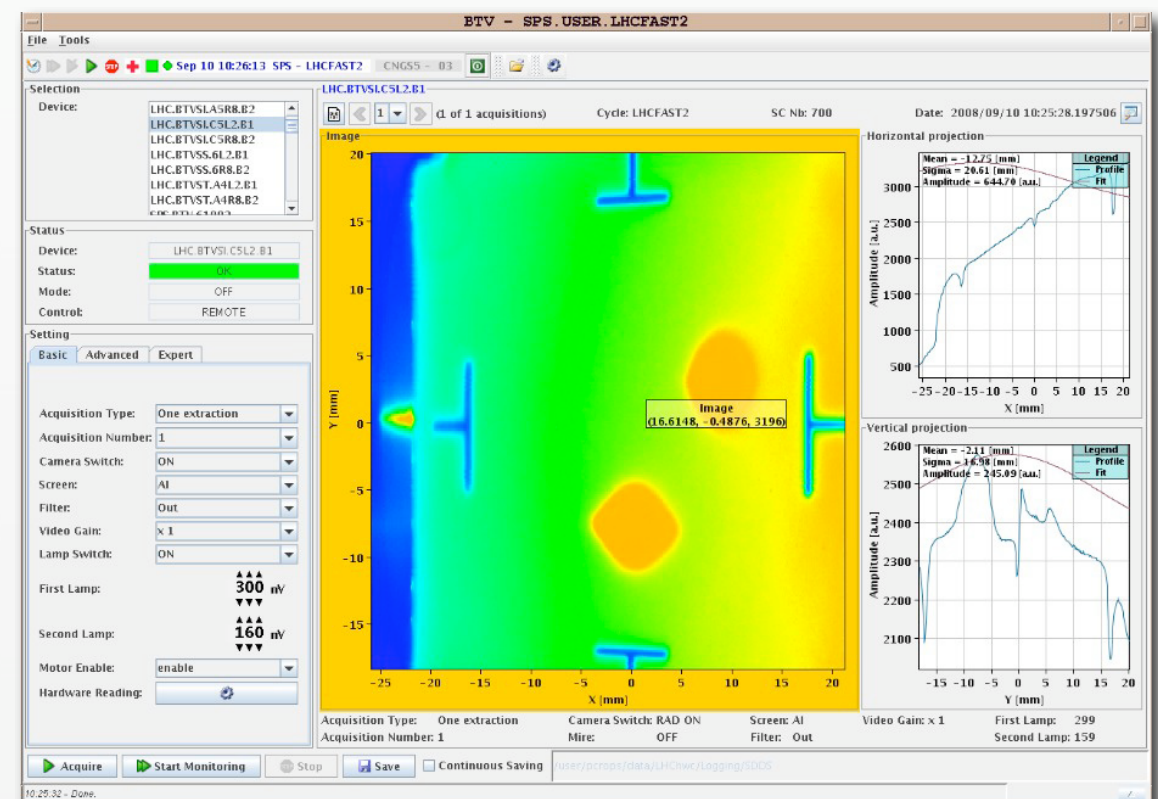
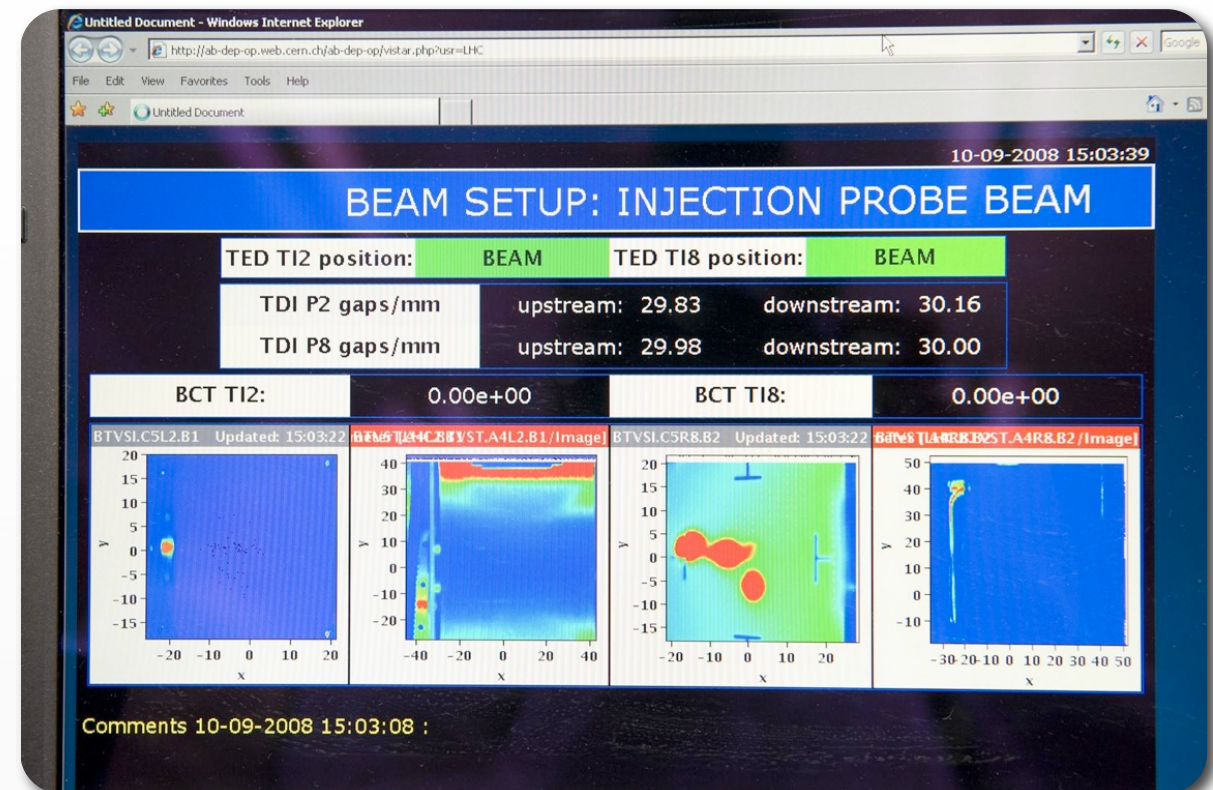
- Herausforderungen:
 - **Datenrate**: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang

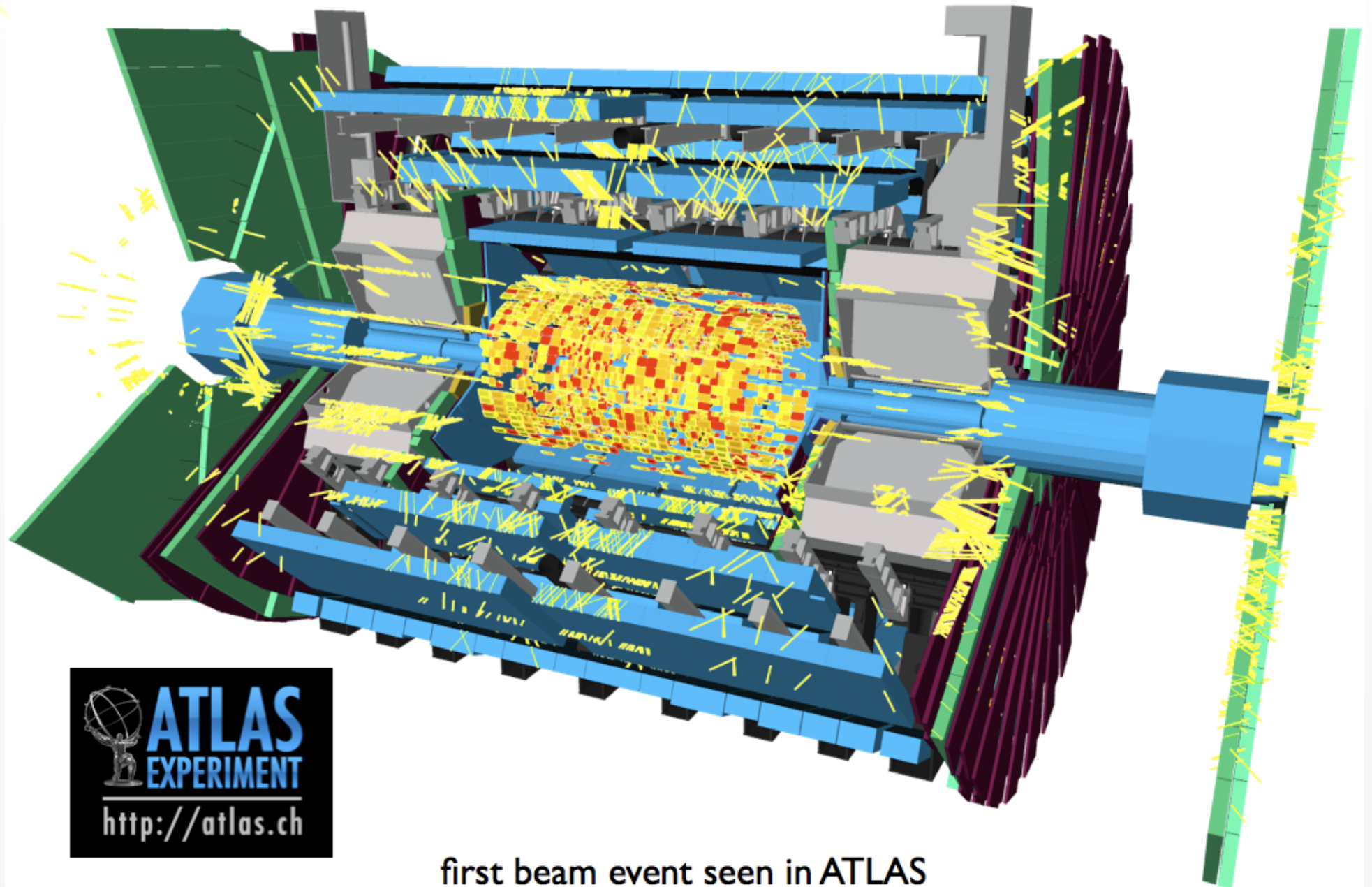


- Herausforderungen:
 - **Datenrate**: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang



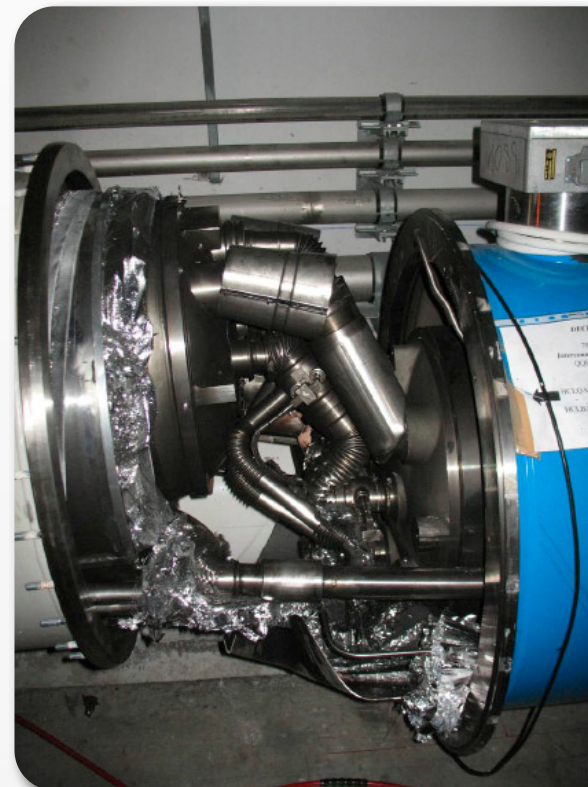
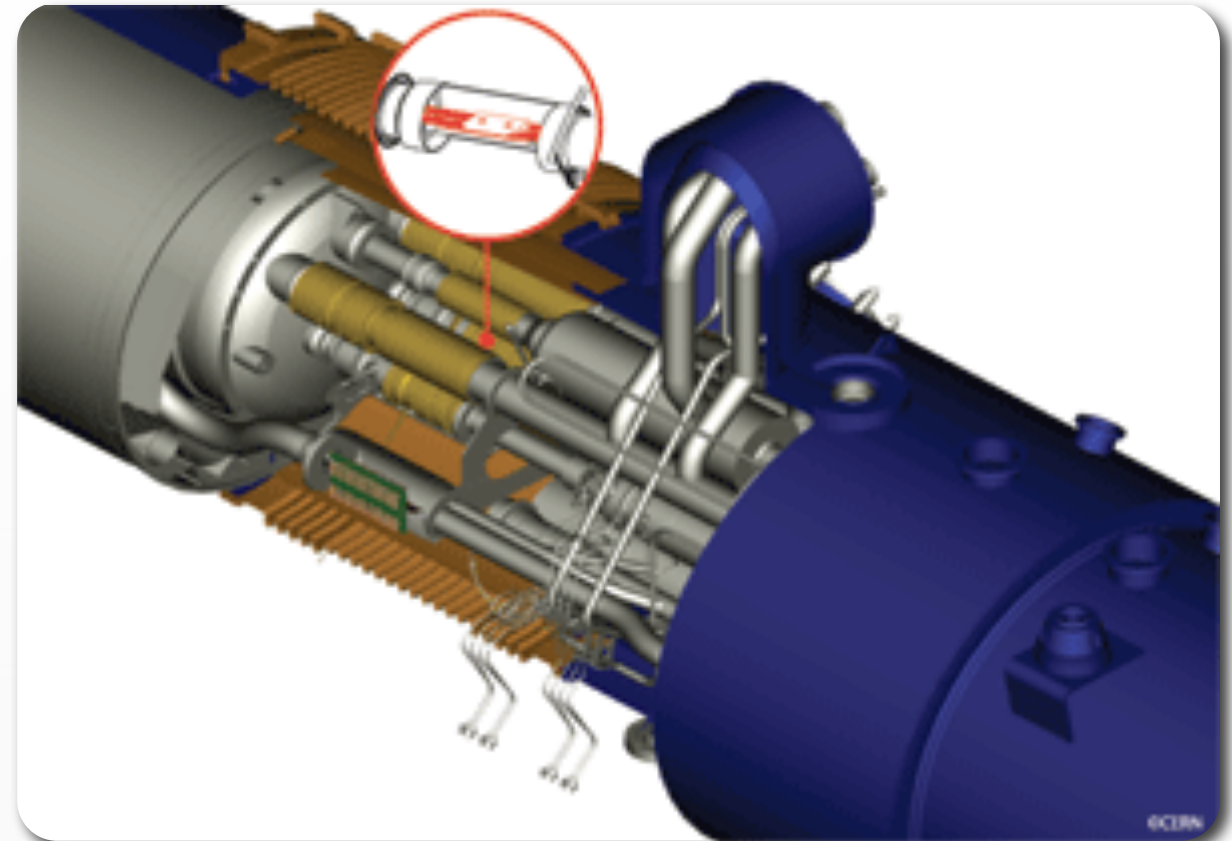
10.09.2008: Erster Strahl





first beam event seen in ATLAS

- Was ist passiert?
- LHC-Magnete sind mit Spleißen elektrisch verbunden (verschweißt)
- Eine Verbindung hatte winzigen elektrischen Widerstand ($n\Omega$): Lichtbogen $\rightarrow$ Loch in Heliumsystem
- Druckwelle im Heliumsystem beschädigt weitere Magnete
- Und was jetzt?
- Bessere Diagnostik und verbessertes Überdrucksystem
- Reparaturen von 53 Magnete an Oberfläche $\rightarrow$ im vollen Gange
- Erster Strahl: Sommer 2009



[CERN]



Menschen am LHC

ATLAS: Über **2500 Mitarbeiter** von 169 Instituten in 37 Ländern
(davon ca. 700 Studierende/Doktoranden)



ATLAS: Über **2500 Mitarbeiter** von 169 Instituten in 37 Ländern
(davon ca. 700 Studierende/Doktoranden)

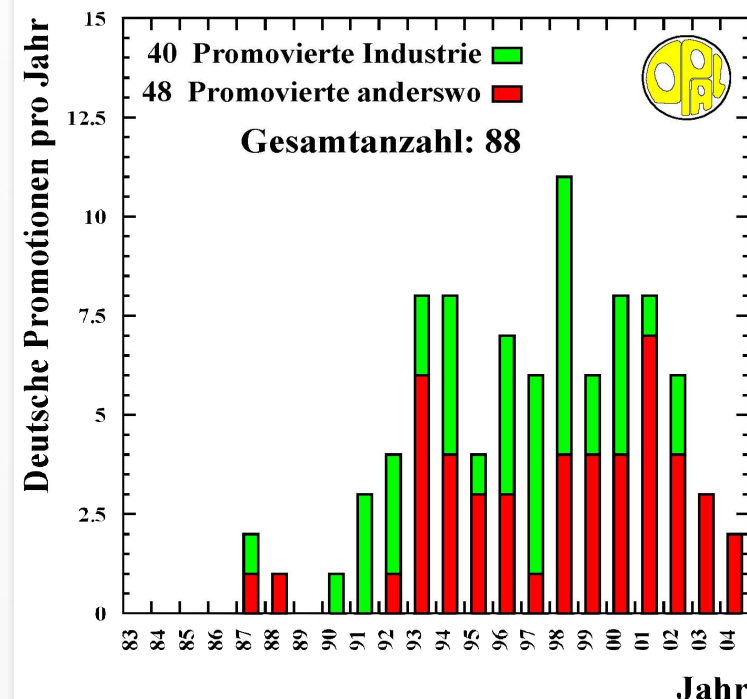
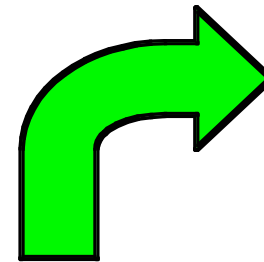




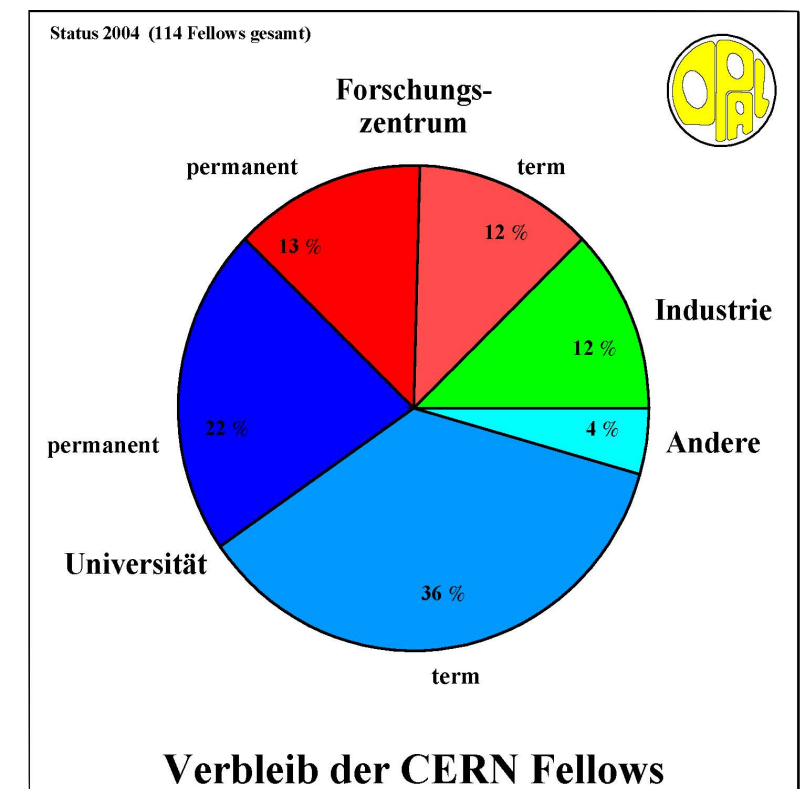
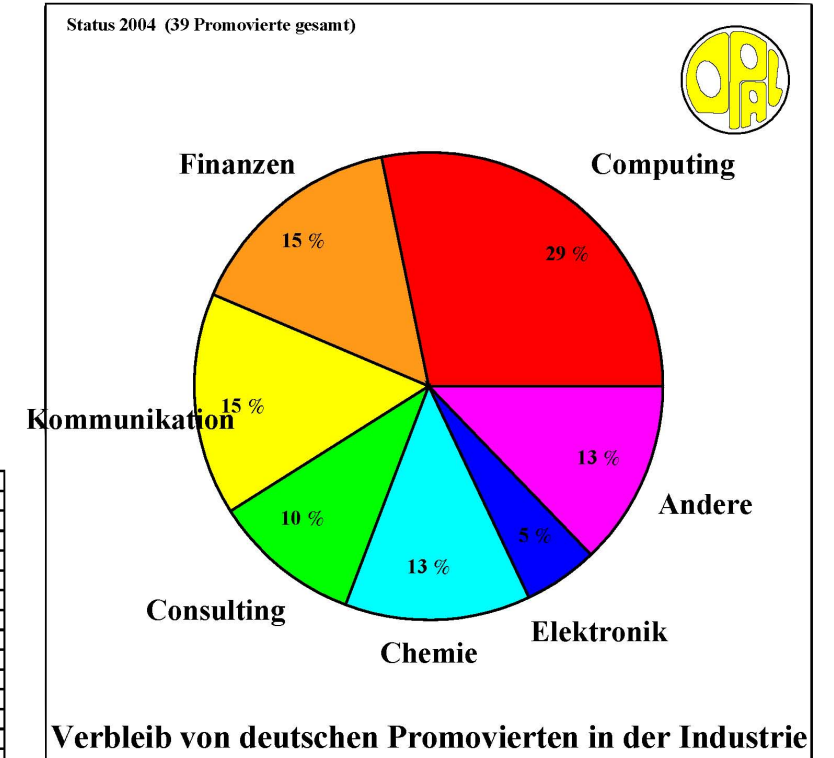
- Studierende bei ATLAS: nur eine/r unter 2500?
- Teil eines der **größten Forschungsprojekte** der Menschheit
- Komplexes System, Verantwortung für Teilgebiet → **Sichtbarkeit**
- Breite Ausbildung:
 - **Hardware**: Planung, Bau, Tests...
 - **Software**: Datenbanken, objektorientierte Programmierung, Simulationen, statistische Methoden...
 - **Schlüsselqualifikationen**: Teamarbeit, Zusammenarbeit mit Menschen aus unterschiedlichen Kulturkreisen, englischsprachige Kommunikation, konstruktive Konkurrenzsituation, ...

- **Hervorragende Berufsaussichten!**
- Absolventinnen und Absolventen begehrt in Industrie und Forschung
- Arbeitslosigkeit <2%, vgl. Durchschnitt 2007: 8.5%)
- **Schlüsselqualifikationen** auch in der Industrie begehrt:
 - Problemlösung
 - Team- und Kommunikationsfähigkeit
 - Internationalität/ Fremdsprachen
 - EDV-Kenntnisse

50% Industrie



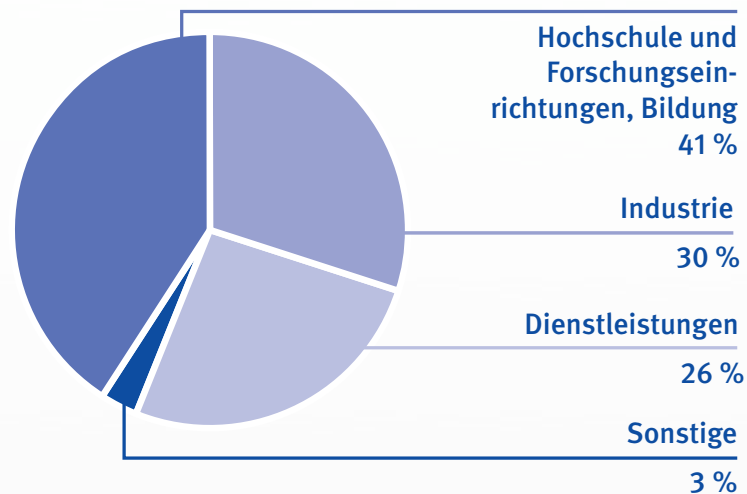
50% Unis oder Forschungszentren, z.B. CERN Fellows



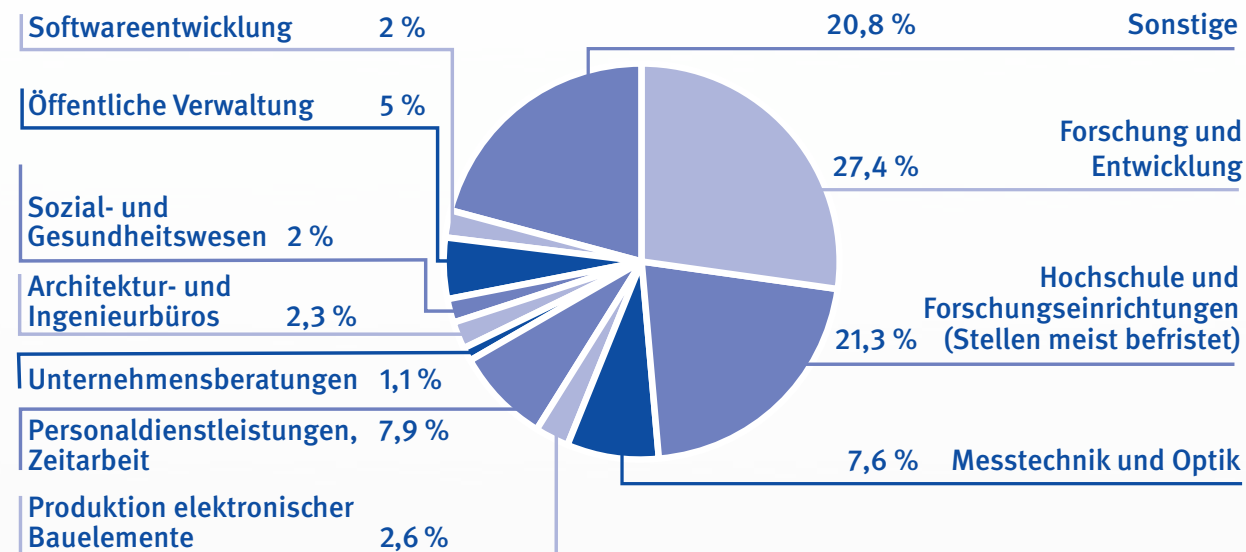
Arbeitsmarkt für Physiker/innen 2008



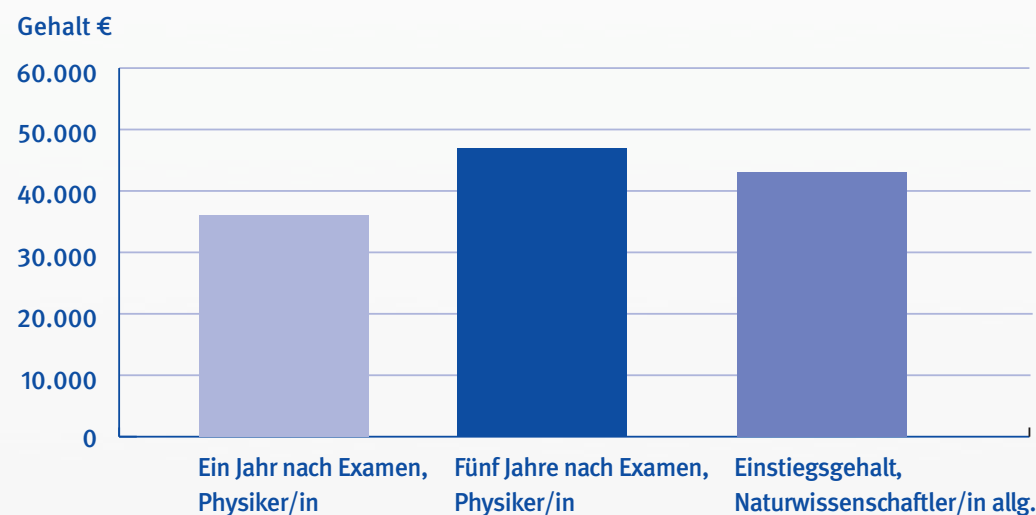
Tätigkeit: Hier arbeiten Physiker/innen ³



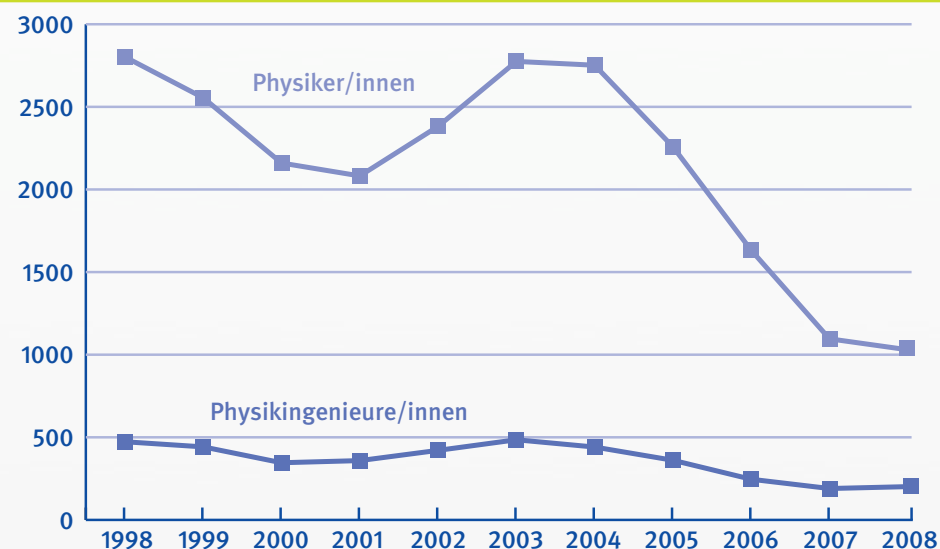
Bedarf: Hier werden Physiker/innen gesucht ⁴



Durchschnittliches Jahreseinkommen ^{3, 5, 6}



Arbeitslose ⁴



[DPG, PHYSIKonkret 12/08]

Quellen:

- 3) Hochschul-Informationssystem GmbH (HIS), „Der Absolventenjahrgang 2001/2002 fünf Jahre nach dem Hochschulabschluss“ (2008).
- 4) Bundesagentur für Arbeit.
- 5) Kienbaum Management Consultants GmbH, Gehaltsumfrage 2008.
- 6) HIS, „Zwischen Hochschule und Arbeitsmarkt: Eine Befragung der Hochschulabsolventinnen und Hochschulabsolventen des Prüfungsjahres 2001“ (2004).

WELT MASCHINE

DIE KLEINSTEN TEILCHEN UND GRÖSSTEN RÄTSEL
DES UNIVERSUMS

AUSSTELLUNG IM U-BAHNHOF BUNDESTAG, BERLIN

15.10. – 16.11.2008 • MO – SO 10 – 19 UHR • DO 10 – 22 UHR • WWW.DIEWELTMASCHINE.DE



- Teilchenphysik und Kosmologie: viele Antworten, aber noch mehr Fragen:
 - Warum ist die Gravitation so schwach?
 - Woraus besteht Dunkle Materie?
 - Warum gibt es im Universum Materie, aber fast keine Antimaterie?
- LHC: Anbruch einer neuen Ära der Teilchenphysik
 - Unerreichte Kollisionsenergien
 - Teilchendetektoren: präzise Vermessung der Kollisionen
 - Sommer 2009: erste Kollisionen