



*MINToring-Fortbildung
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY,
Standort Zeuthen, 6. November 2009*



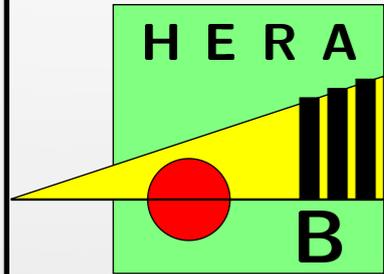
Aktuelle Teilchenphysik: Kleinste Teilchen und höchste Energien

*Ulrich Husemann
Universität Heidelberg &
Deutsches Elektronen-Synchrotron*

Wer bin ich?



tu technische universität
dortmund



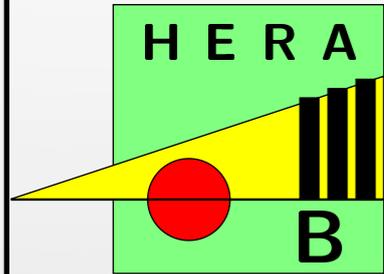
 UNIVERSITÄT
SIEGEN

- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)

Wer bin ich?



tu technische universität
dortmund



- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)

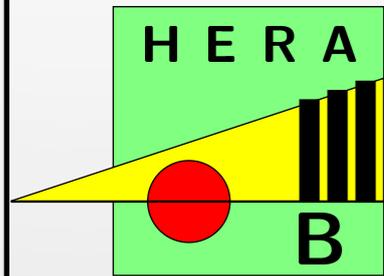
- Postdoc (Rochester und Yale, 2005–2008)
- Forschung am CDF-Experiment (Fermilab, bei Chicago)



Wer bin ich?

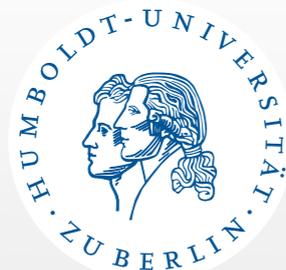


tu technische universität
dortmund



- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)

- Postdoc (Rochester und Yale, 2005–2008)
- Forschung am CDF-Experiment (Fermilab, bei Chicago)



- Nachwuchsgruppenleiter bei DESY/HU Berlin (seit 2008), derzeit auf Vertretungsprofessur in Heidelberg
- Forschung am ATLAS-Experiment

Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



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

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



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.

Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



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?

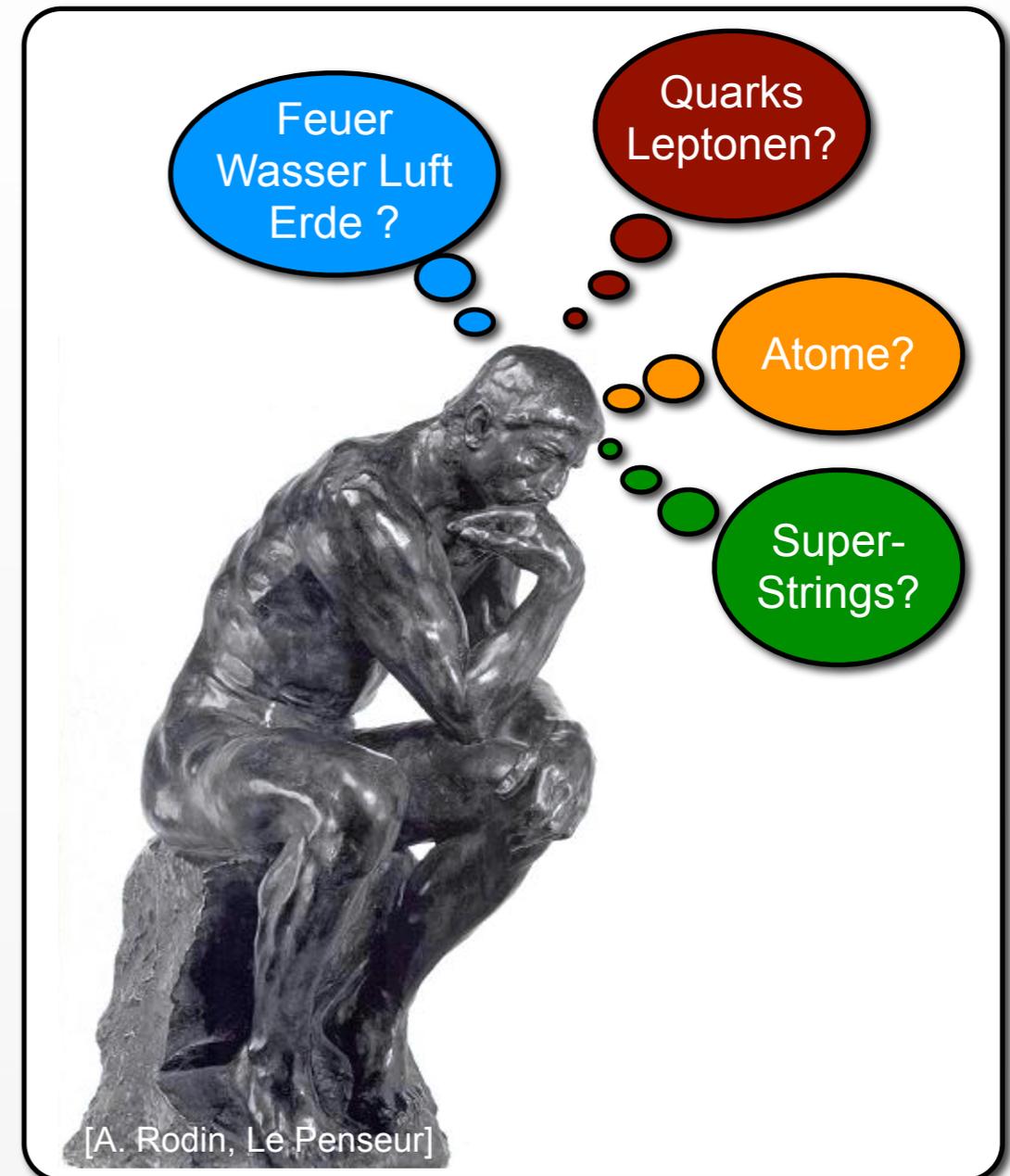
Weil du eine Masse hast und Massen sich anziehen.

Warum habe ich eine Masse?

???

- Wir 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
- MINT-Unterricht: **Neugier auf die Natur** wecken und wachhalten
- 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:**
 - Experimente betrieben zusammen mit Instituten aus ca. 40 Nationen
 - Tausende Kolleginnen und Kollegen aus aller Welt





Was ist der Ursprung der Masse?

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Fragen an den Large Hadron Collider am CERN

In wie vielen Dimensionen leben wir?

Wie unterscheiden sich Materie und Antimaterie

WELT MASCHINE

AUSSTELLUNG DER UNIVERSITÄT HEIDELBERG
28.11. - 20.12.2009 • MO – SO 10 – 18 UHR • KIRCHHOFF-INSTITUT,
IM NEUENHEIMER FELD 227 • WWW.WELTMASCHINE-HEIDELBERG.DE

Bundesministerium für Bildung und Forschung

CERN

- **Large Hadron Collider (LHC)** – die „Weltmaschine“
- Protonen werden auf die **höchsten Energien** beschleunigt
- **Kollision** der Protonen inmitten empfindlicher Detektoren
- LHC-Experimente sollen Erkenntnisse bringen über **fundamentale Bausteine und Kräfte** in der Natur
- DESY-Physikerinnen und Physiker: aktive Teilnahme an LHC-Experimenten

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 Δp → Auflösung **kleinerer Strukturen**



A. Einstein

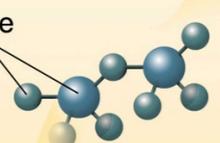
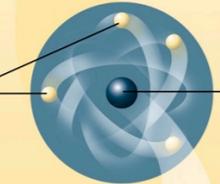
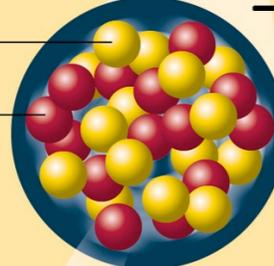
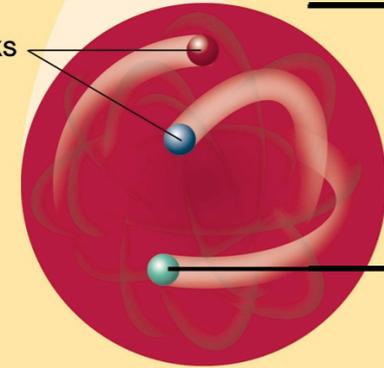


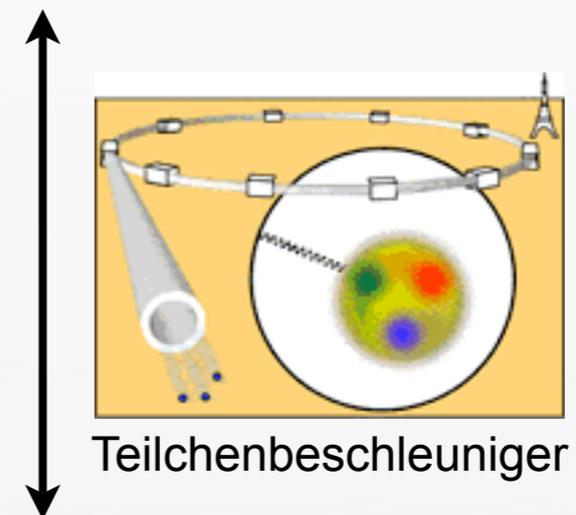
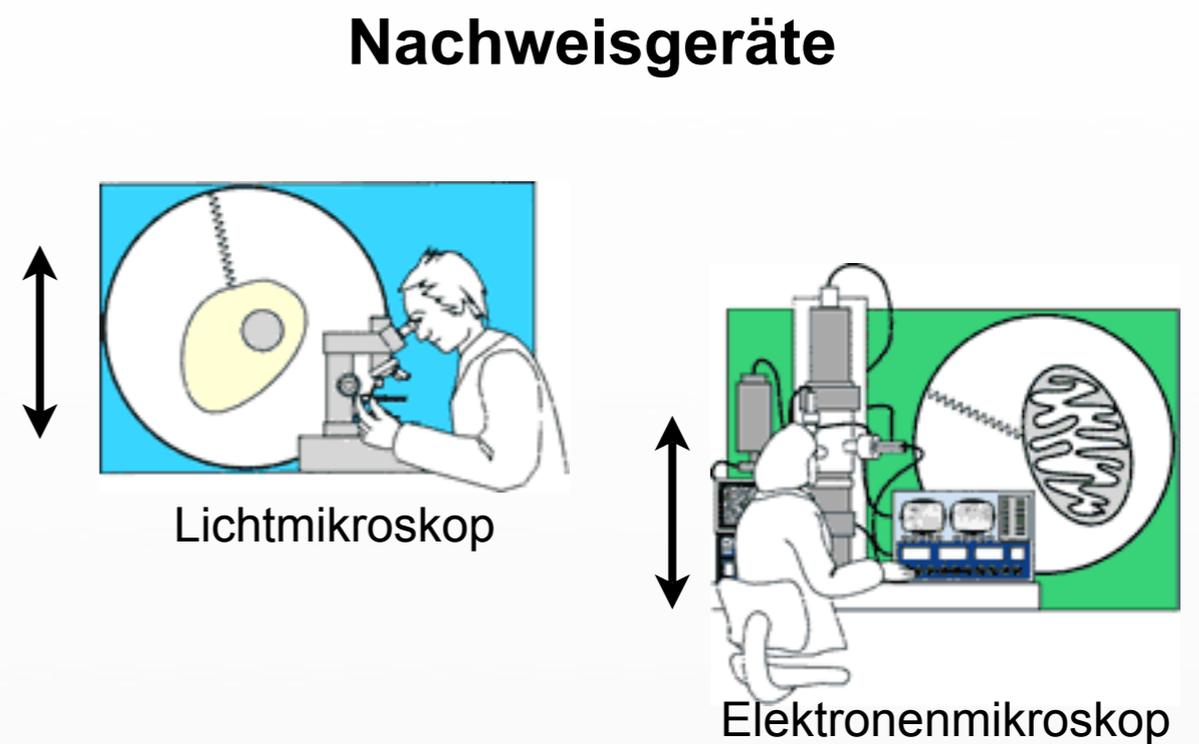
W. Heisenberg



Größenordnungen



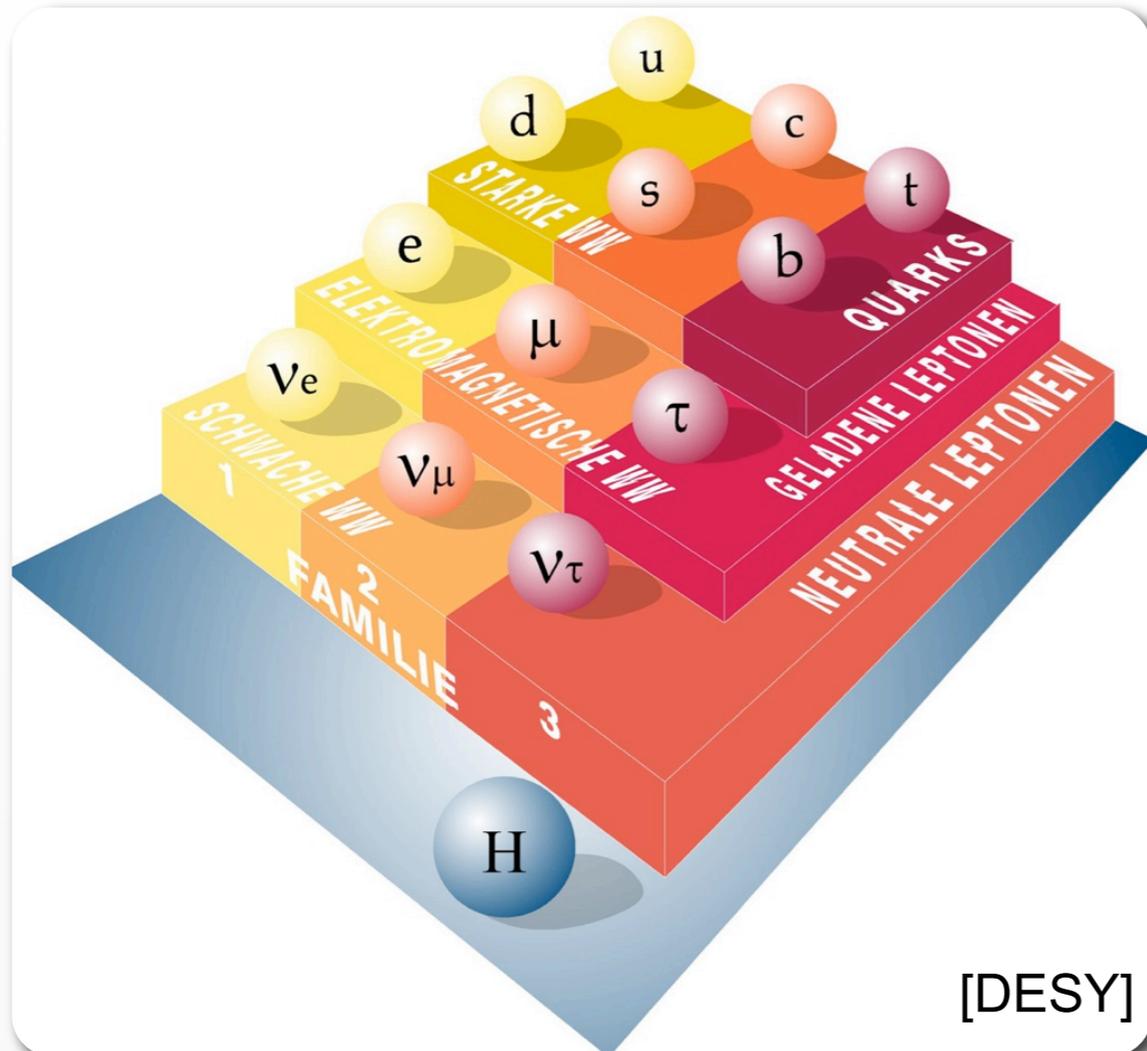
	Länge	Energie
 Materie	1 m	200 neV
 Molekül	10^{-9} m	200 eV
 Atom	10^{-10} m	2 keV
 Kern	10^{-14} m	20 MeV
 Proton	10^{-15} m (1 Femtometer)	200 MeV
	$<10^{-18}$ m (1 Attometer)	>200 GeV



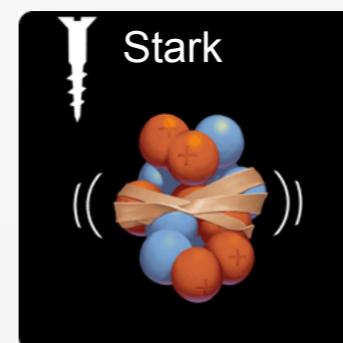
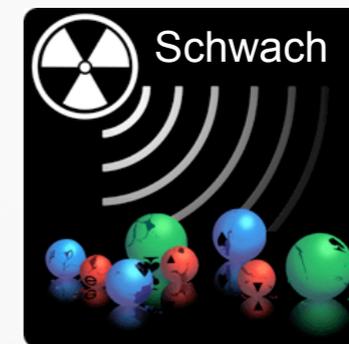
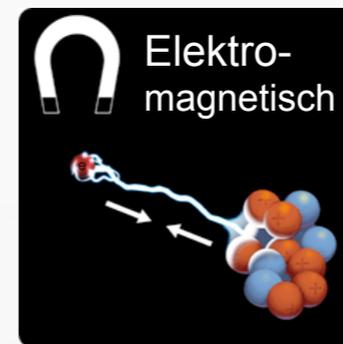
[DESY]



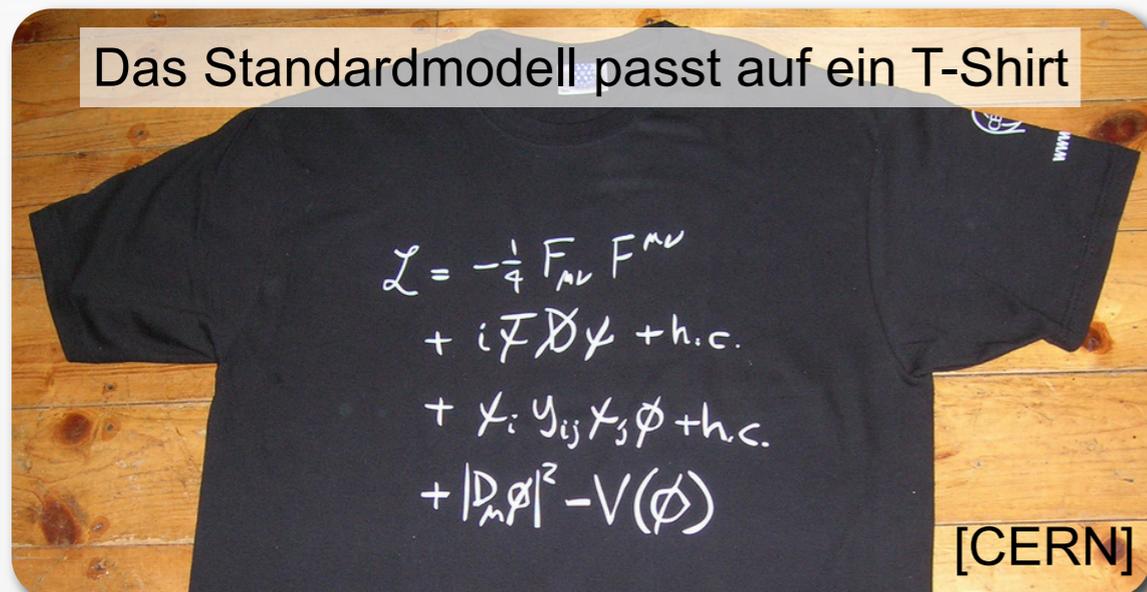
Teilchenphysik: Was wir wissen und was wir nicht wissen

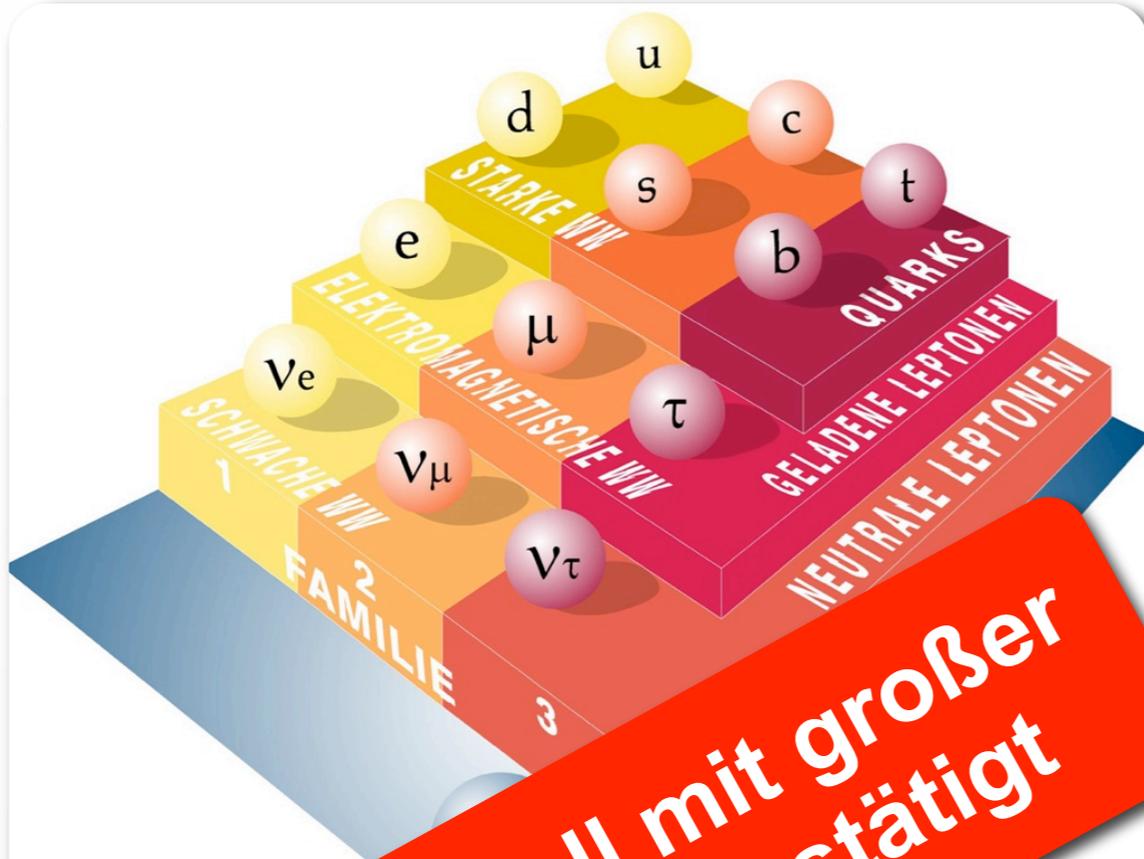


- **Teilchen** im „Standardmodell der Teilchenphysik“
- **12 Elementarteilchen**, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in **3 Familien** mit unterschiedlichen Massen
- **Kräfte** im Standardmodell



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

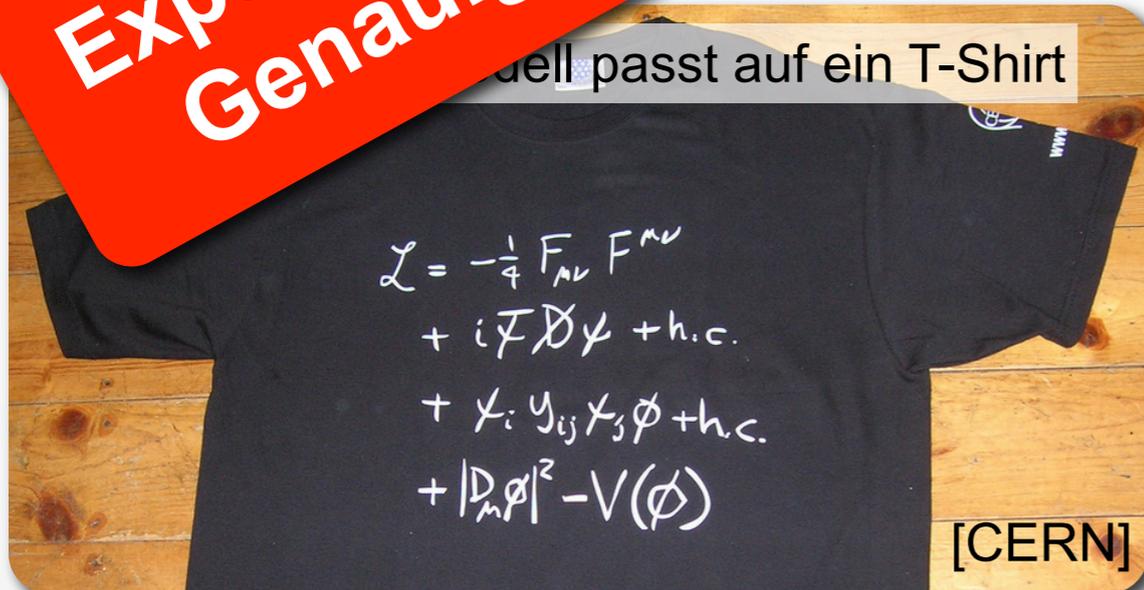




Experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt

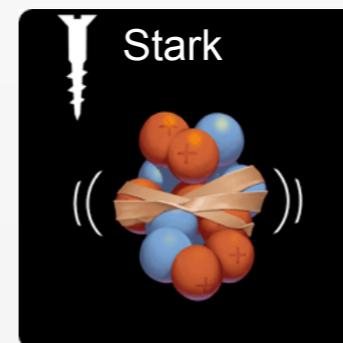
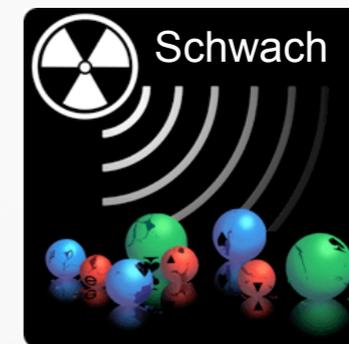
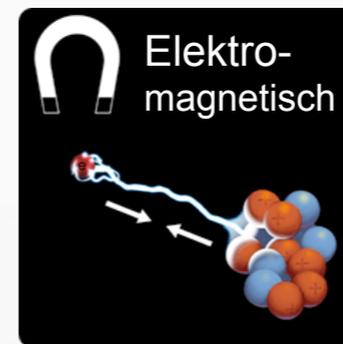
[DESY]

...modell passt auf ein T-Shirt



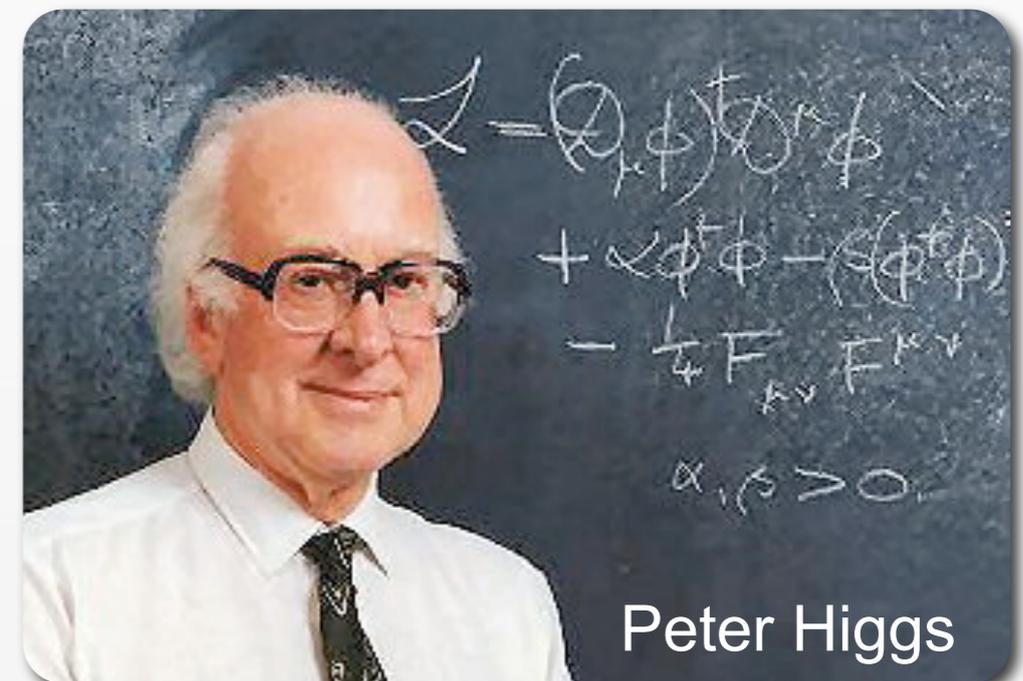
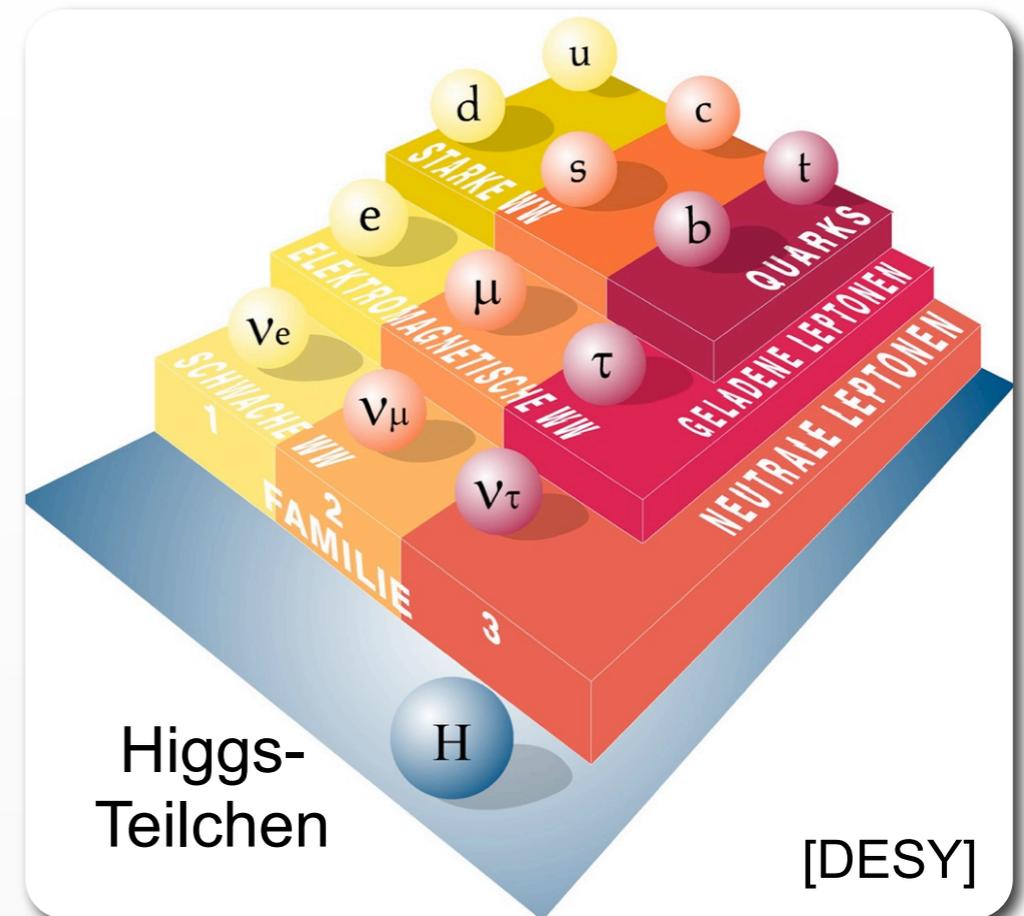
[CERN]

- **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/>]

- 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 Elementarteilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party(= Higgs-Feld)

[D. Miller]

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:



Prominenter betritt den Raum (= Teilchen)

[D. Miller]

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:



Prominenter kommt schwer voran (Trägheit = Masse)

[D. Miller]

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:



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

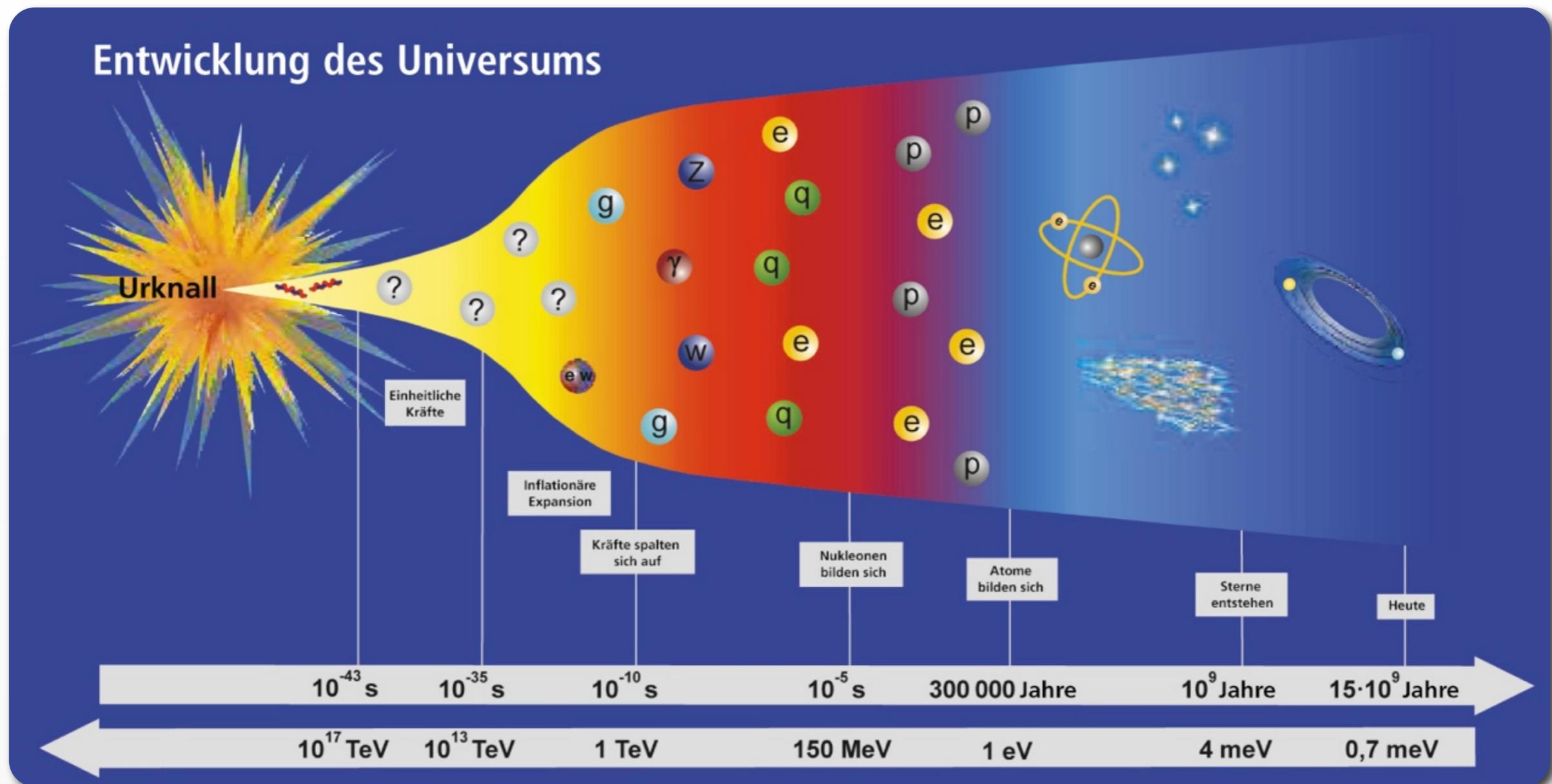
[D. Miller]

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

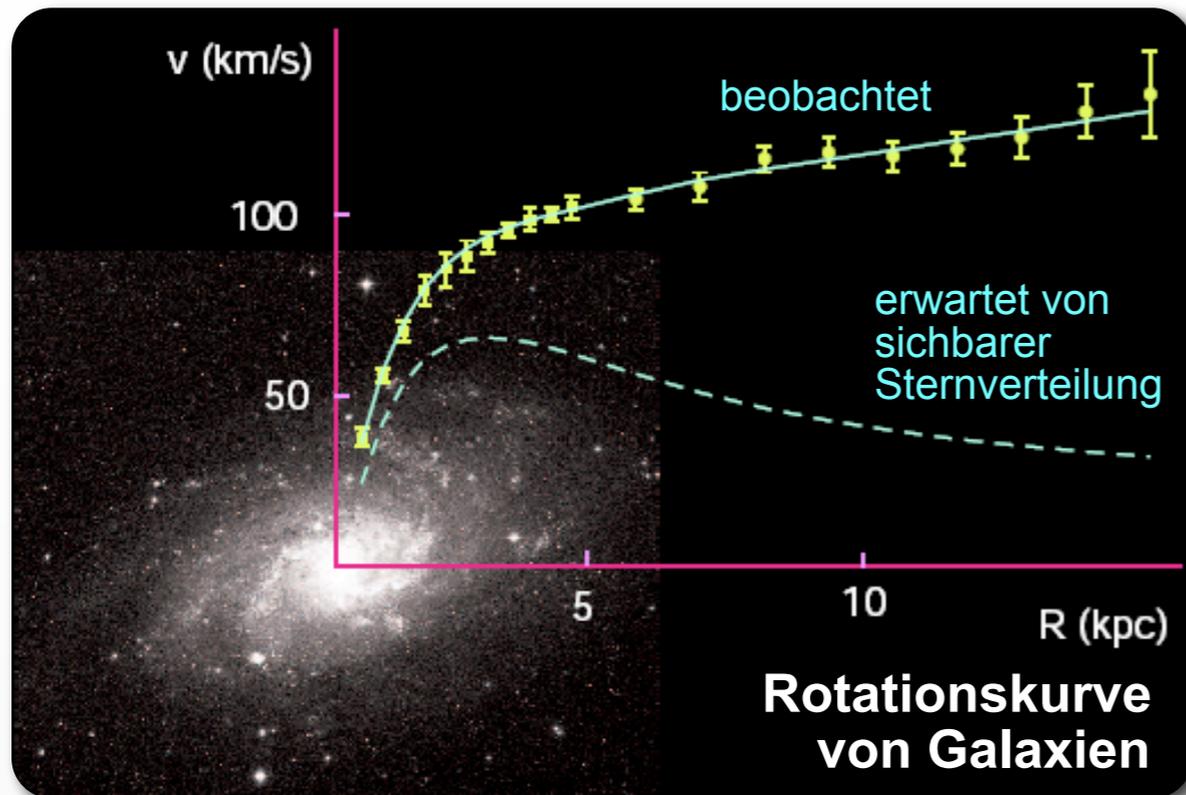


Gerücht verbreitet sich (= massives Higgs-Teilchen)

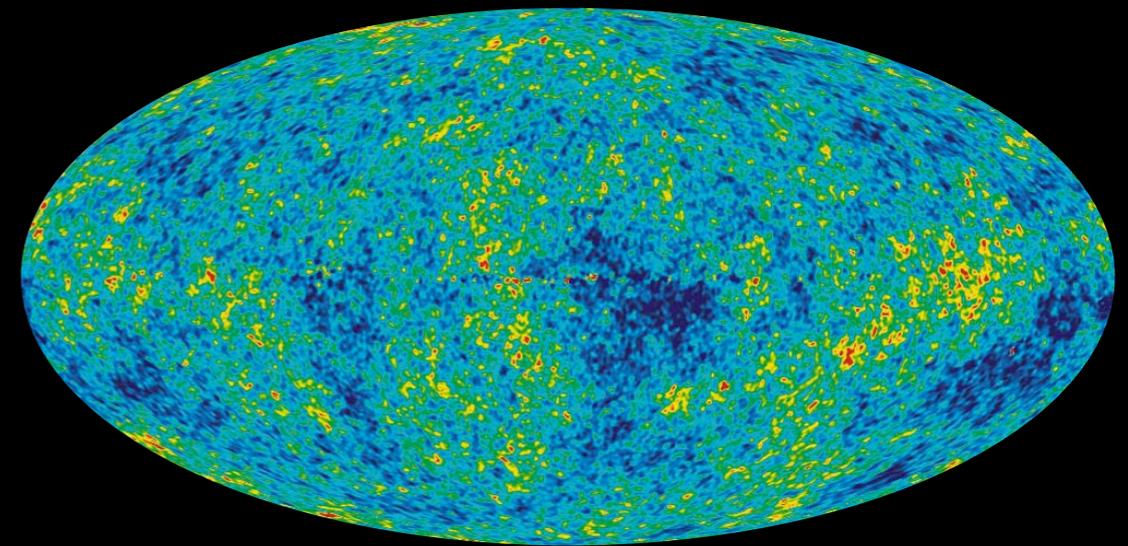
[D. Miller]



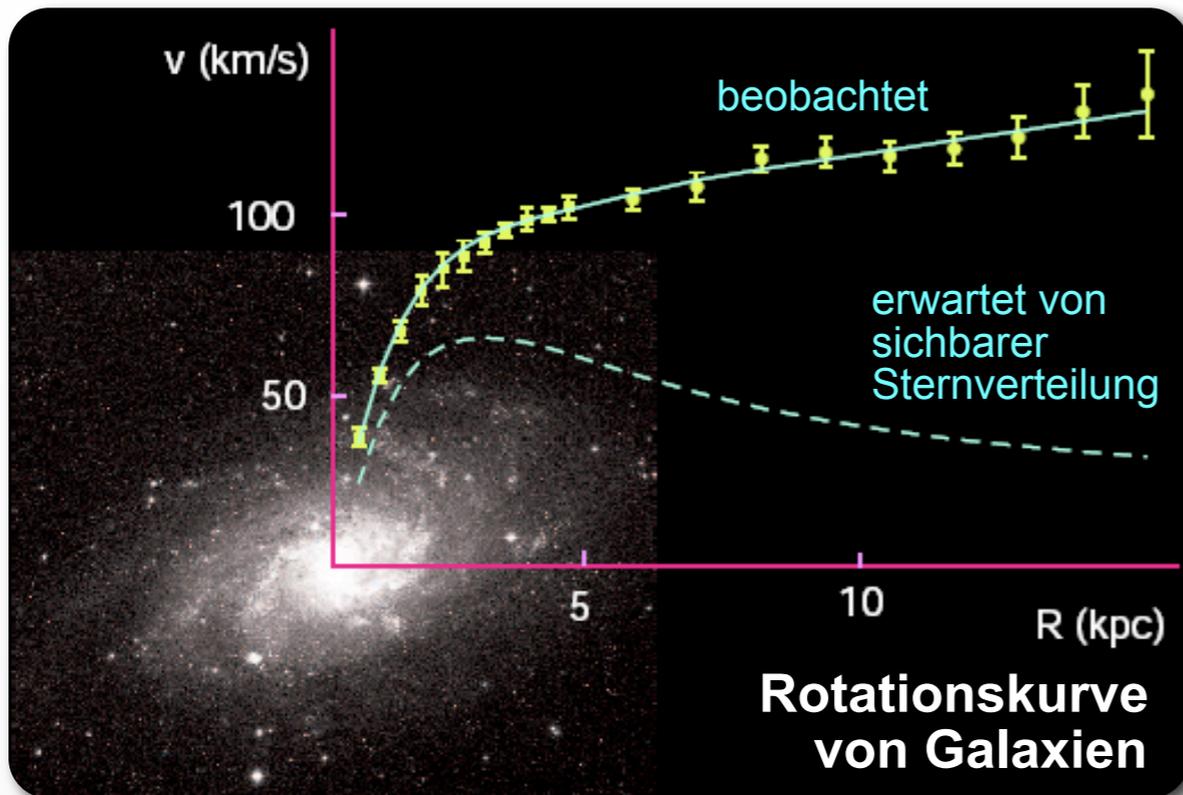
- Seit ca. 10 Jahren: konsistentes Modell von der Entwicklung des Universums seit dem Urknall → „Standardmodell der Kosmologie“
- Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?



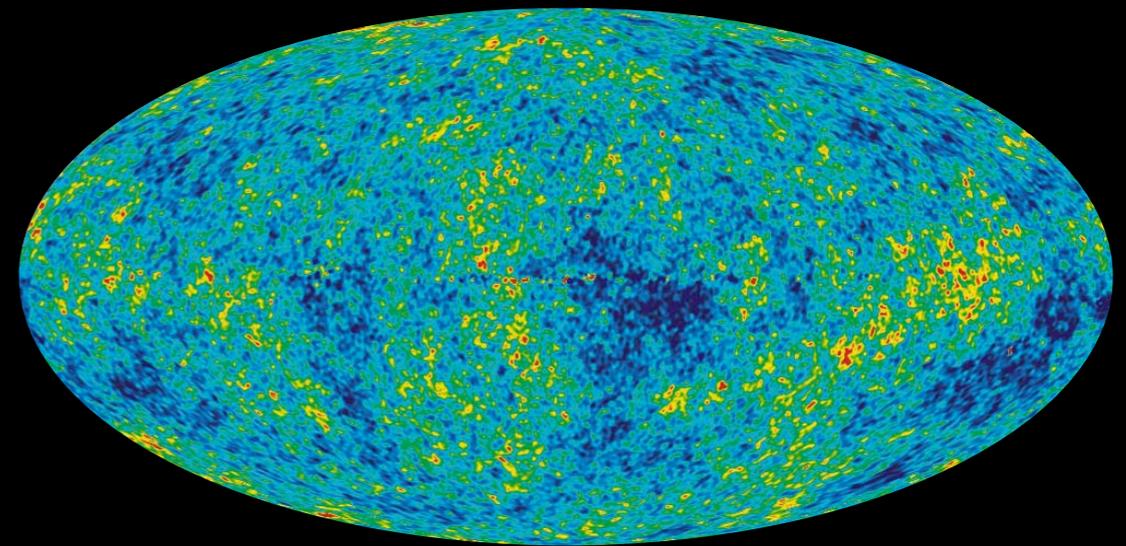
Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung



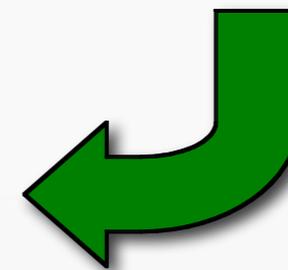
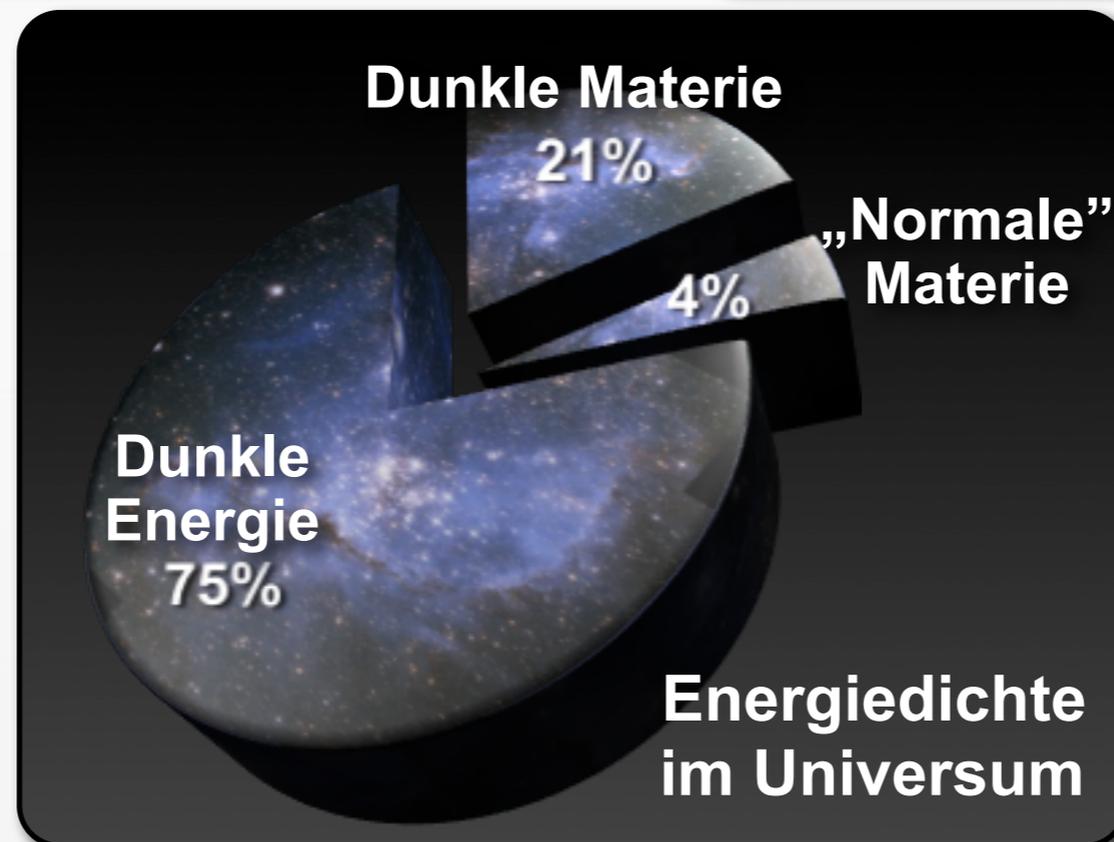
[WMAP-Satellit]



Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung



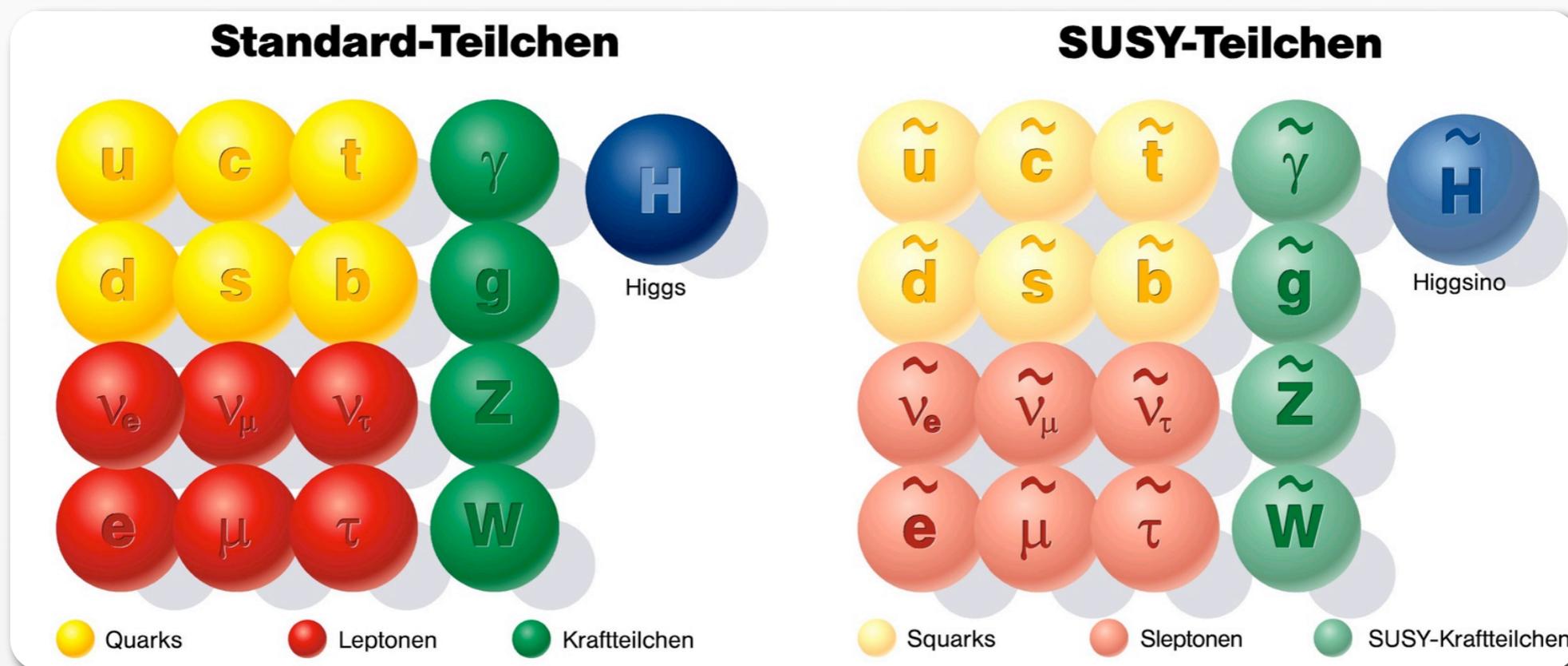
[WMAP-Satellit]



Supersymmetrie?



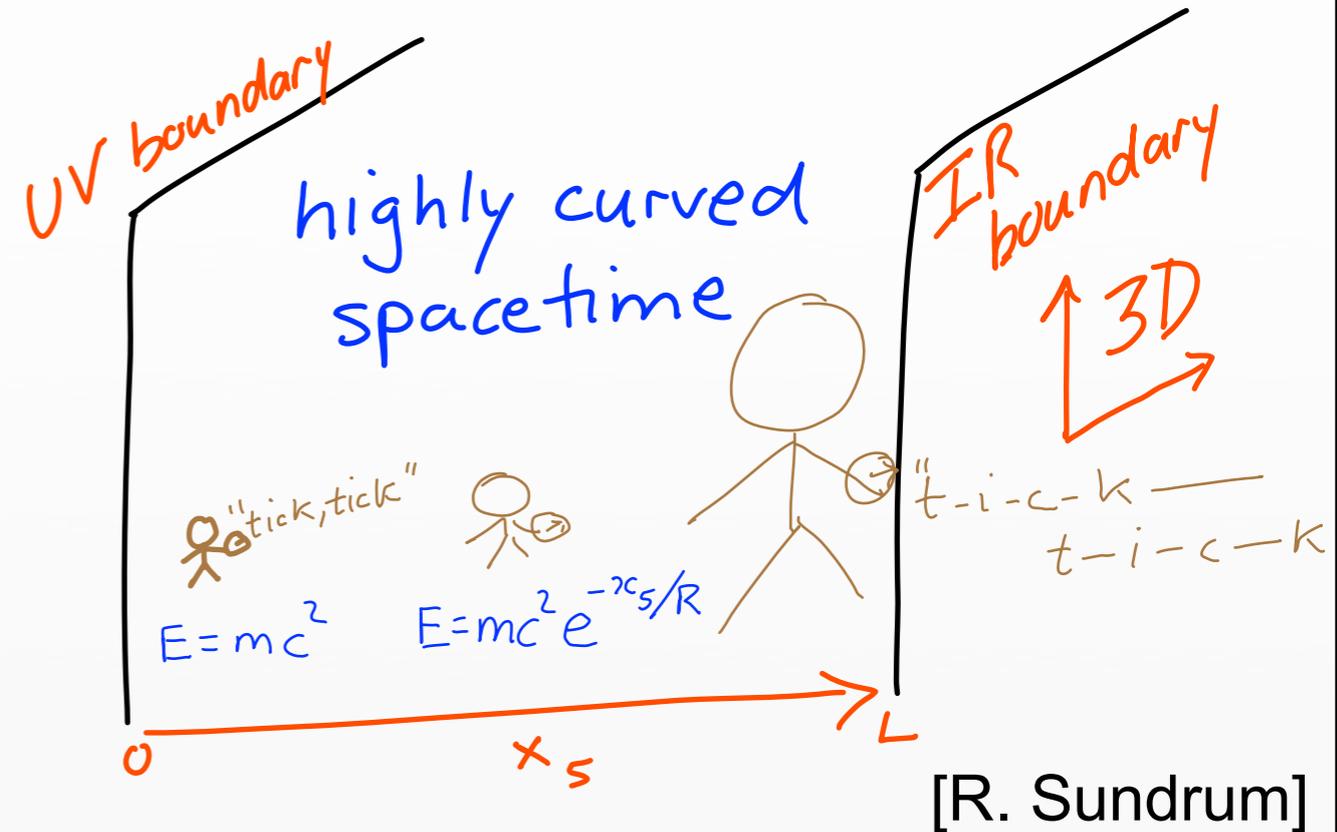
- Das Standardmodell der Teilchenphysik erklärt nicht alles:
 - Teilchen des Standardmodells: **nur 4%** der Energiedichte im Universum
 - Standardmodell **funktioniert nicht gut für sehr hohe Energien** (oberhalb von 1 TeV)
- Lösungsidee: **Supersymmetrie** („SUSY“)
 - Zu jedem Teilchen im Standardmodell 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
- Beispiel: Randall-Sundrum-Modell
 - Wir leben auf vierdimensionaler Membran
 - Gravitation kommt durch (gekrümmte) Extra-Dimension x_5 zu uns

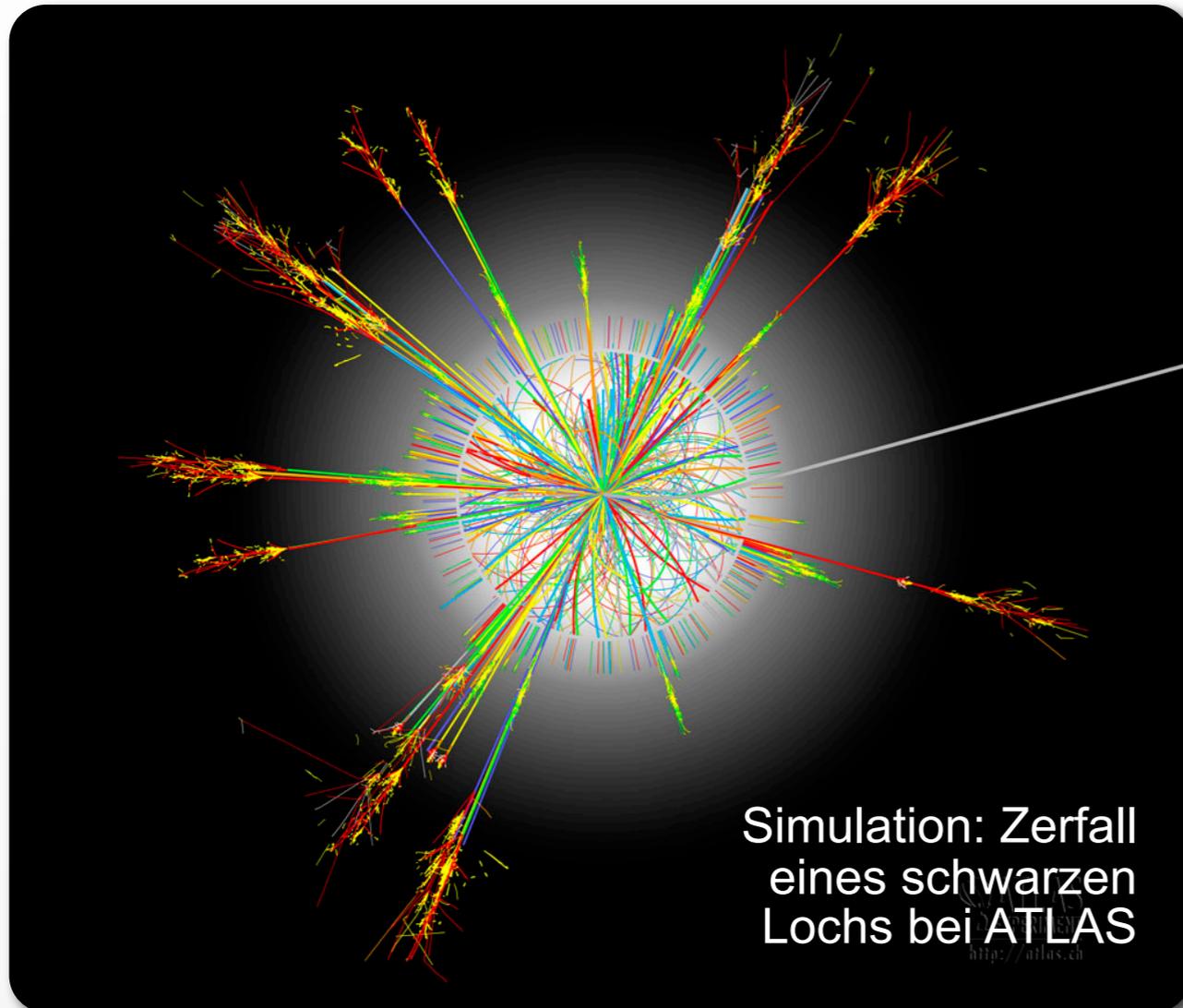
RANDALL-SUNDRUM I MODEL



L. Randall



R. Sundrum



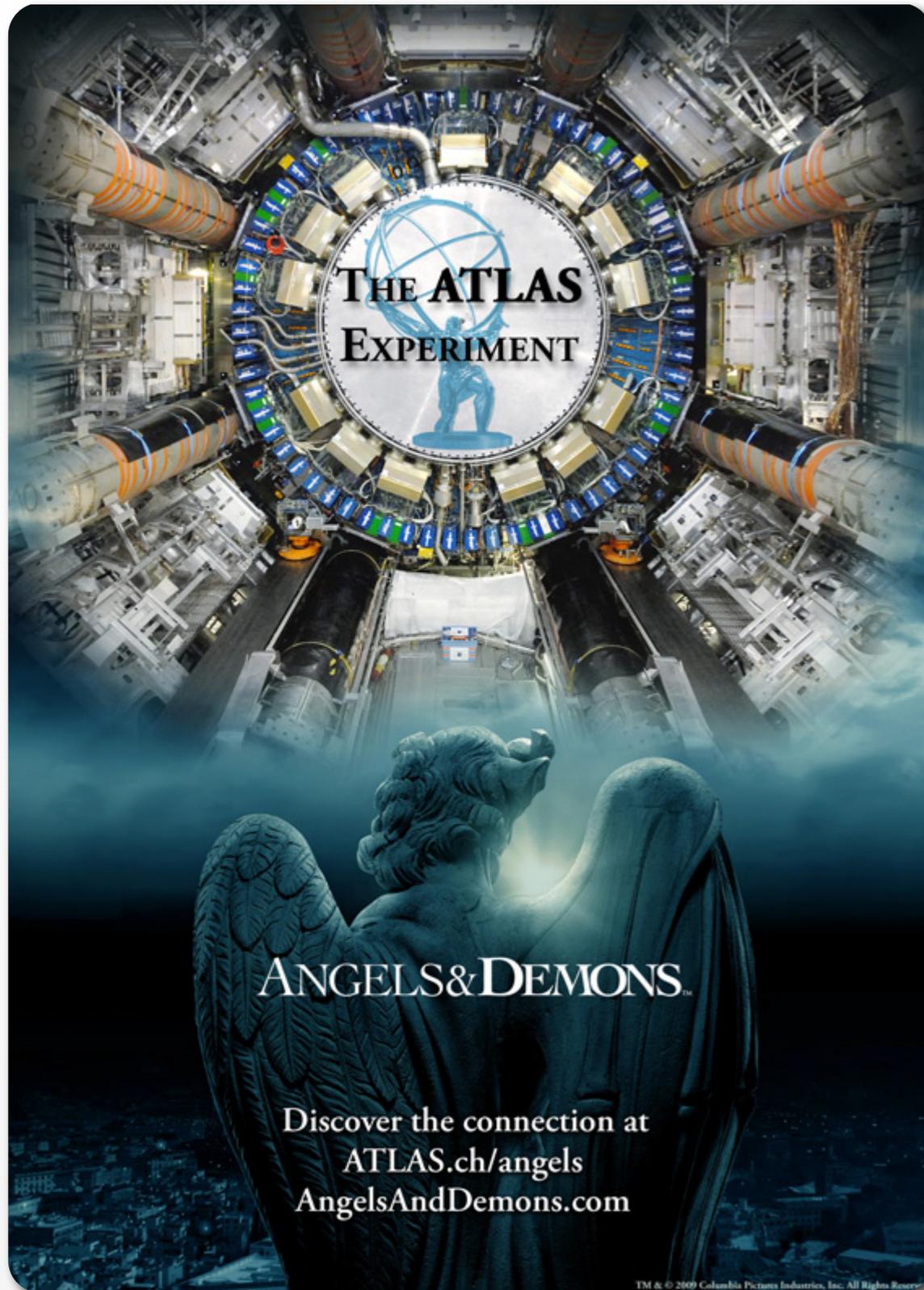
- Theorien mit Extra-Dimensionen:
 - Gravitation in Extra-Dimensionen stark genug zur Erzeugung **mikroskopischer schwarzer Löcher** am LHC (\neq Einstein'sches astronomisches schwarzes Loch)
 - Zerfall in $< 10^{-25}$ Sekunden durch **Hawking-Strahlung** \rightarrow spektakuläre Signatur im Detektor
 - (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

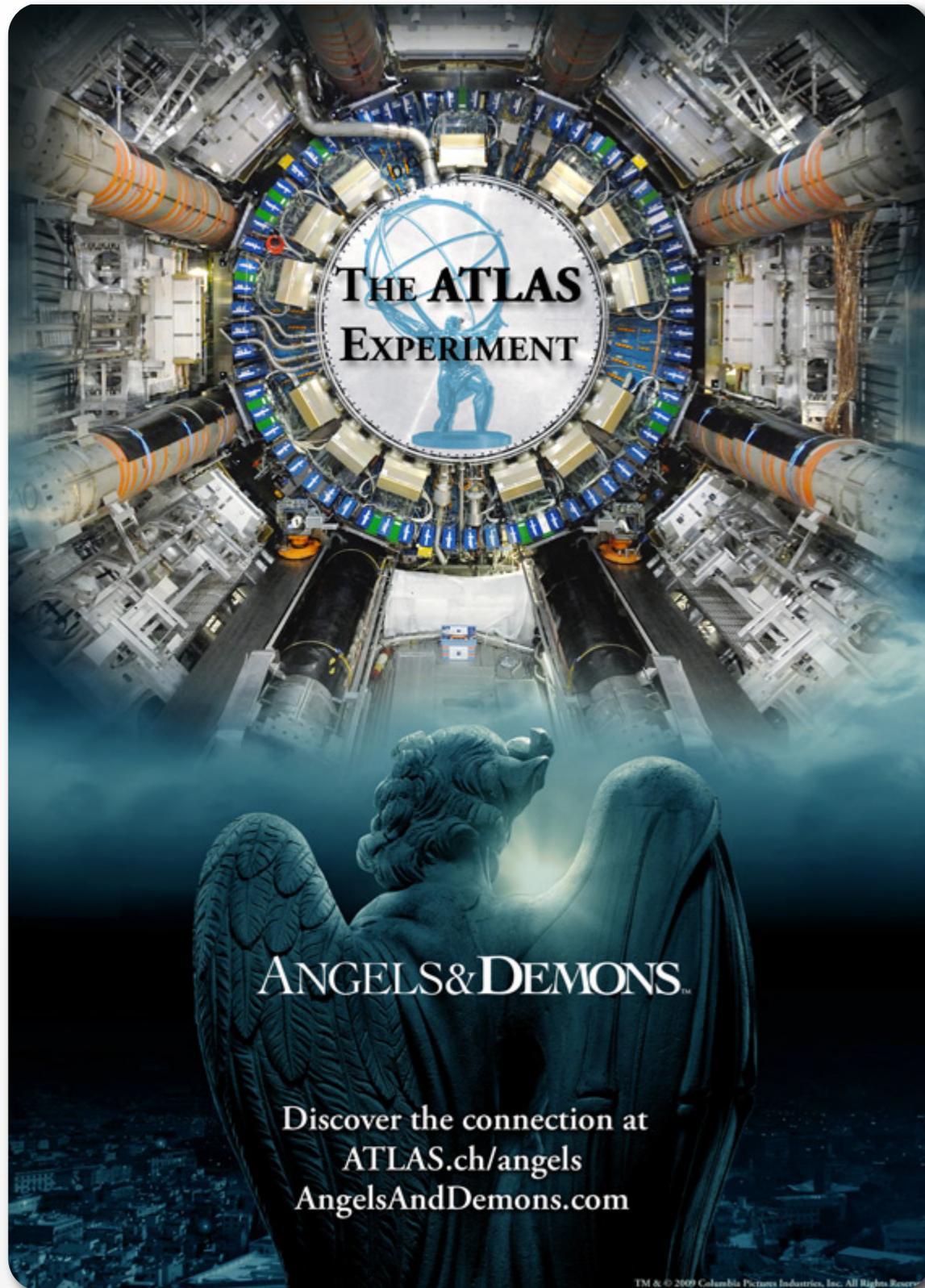


CERN und der Large Hadron Collider

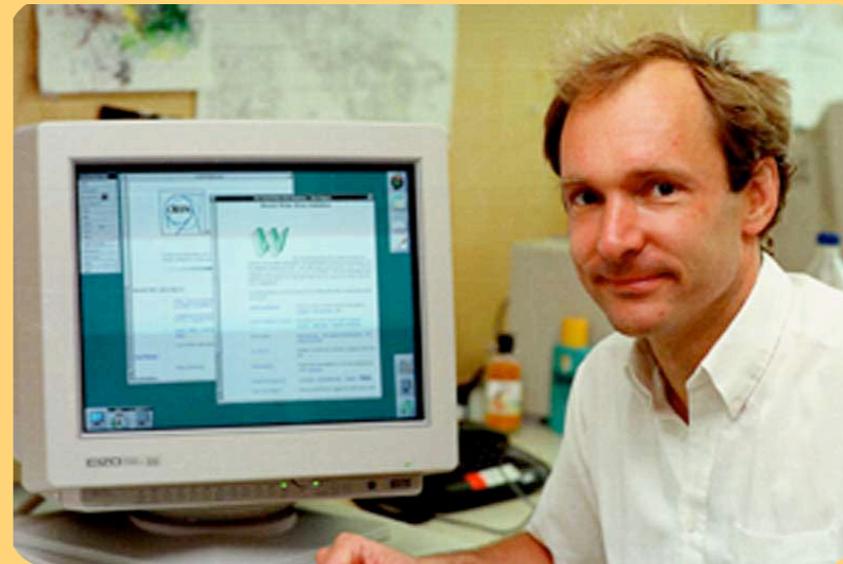
CERN – Habe ich schonmal gehört...







CERN – where the web was born...

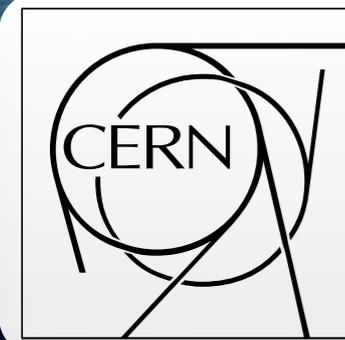


Tim Berners-Lee
(1990)

Der erste
Webserver
(1990)



Was ist CERN?



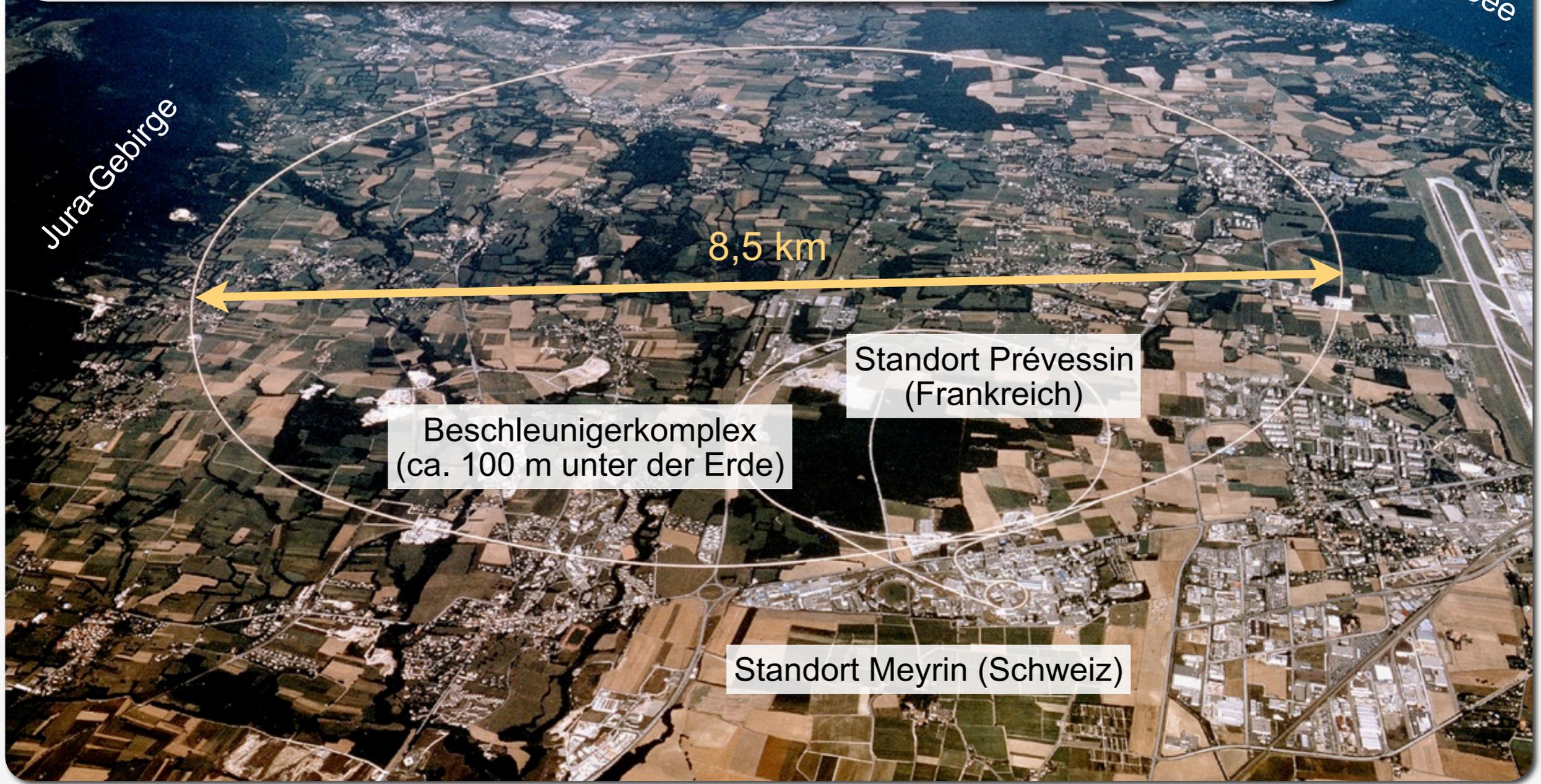
CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor

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

Beschleunigerkomplex
(ca. 100 m unter der Erde)

Standort Prévessin
(Frankreich)

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



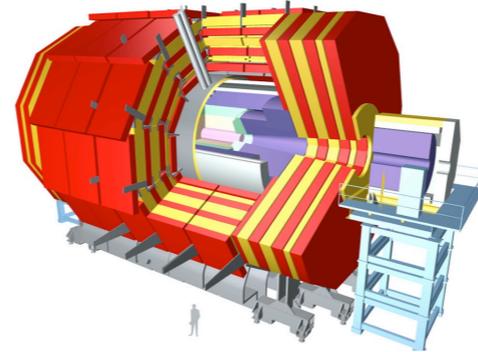
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



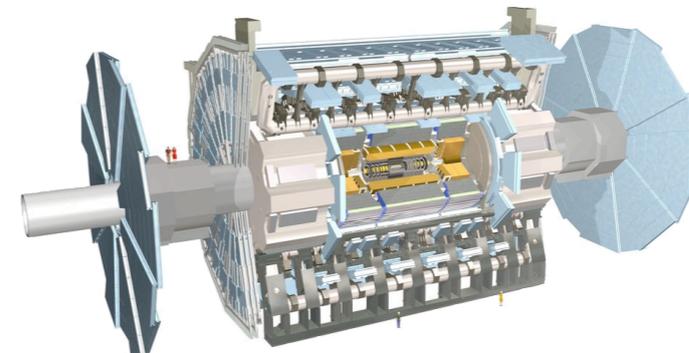
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



LHC – der Large Hadron Collider



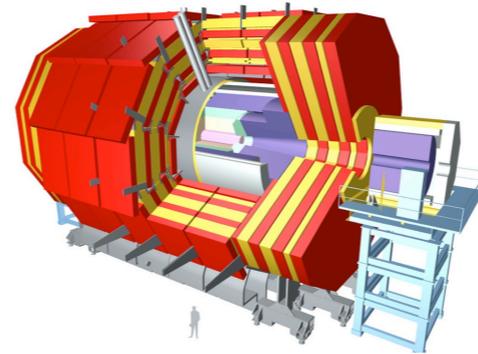
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



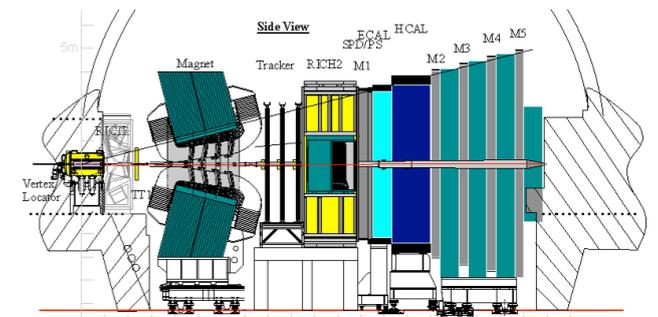
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



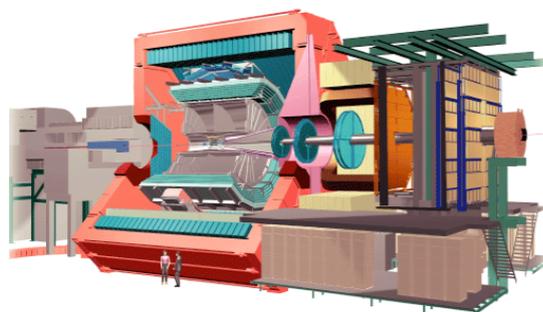
LHCb-Experiment:

B-Physik und CP-Verletzung



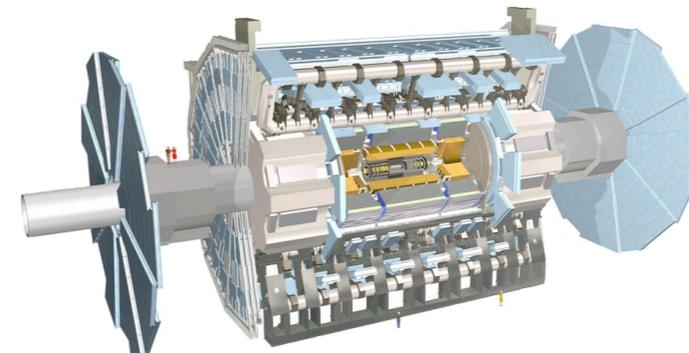
ALICE-Experiment:

Schwerionenphysik

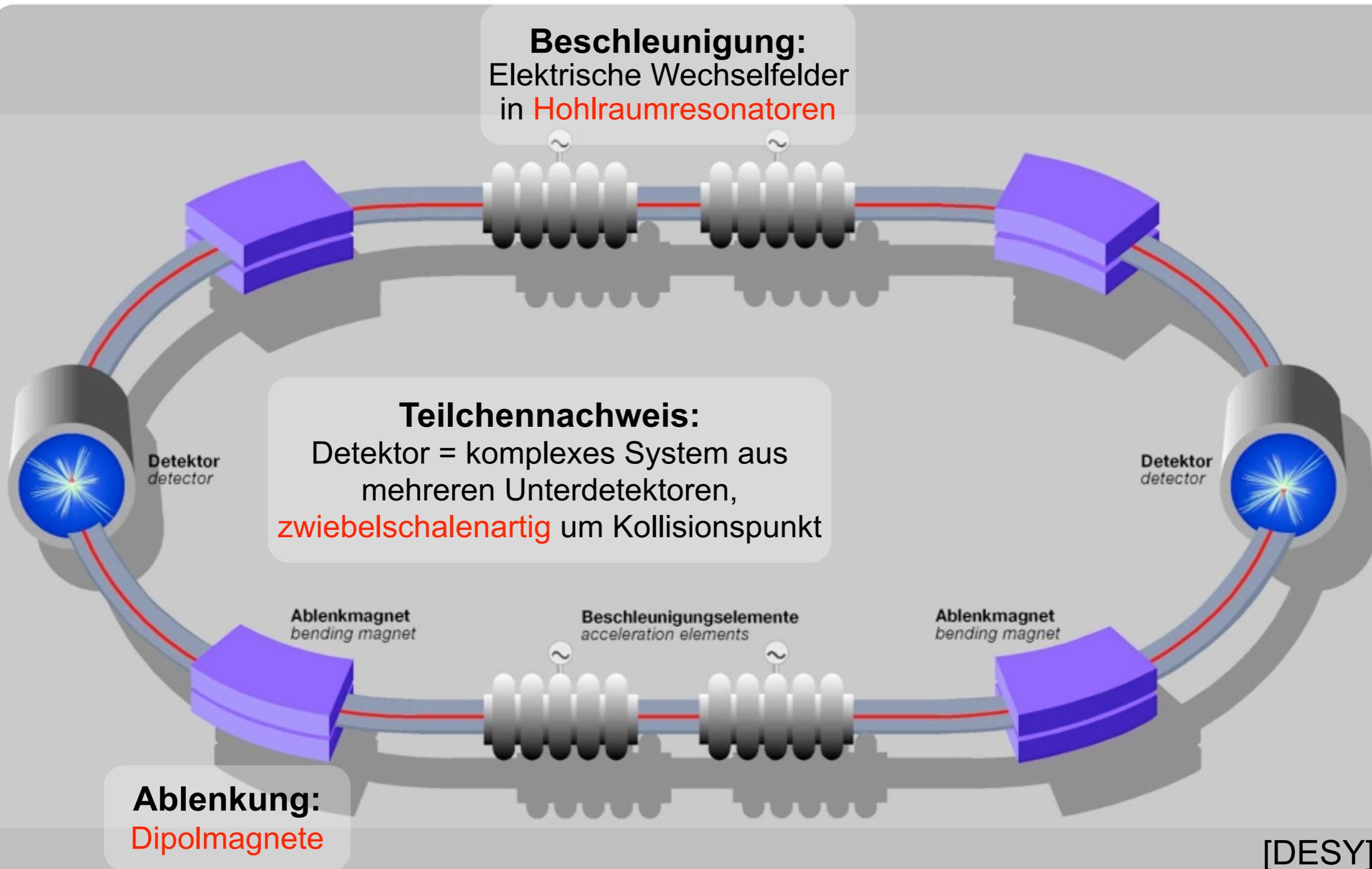


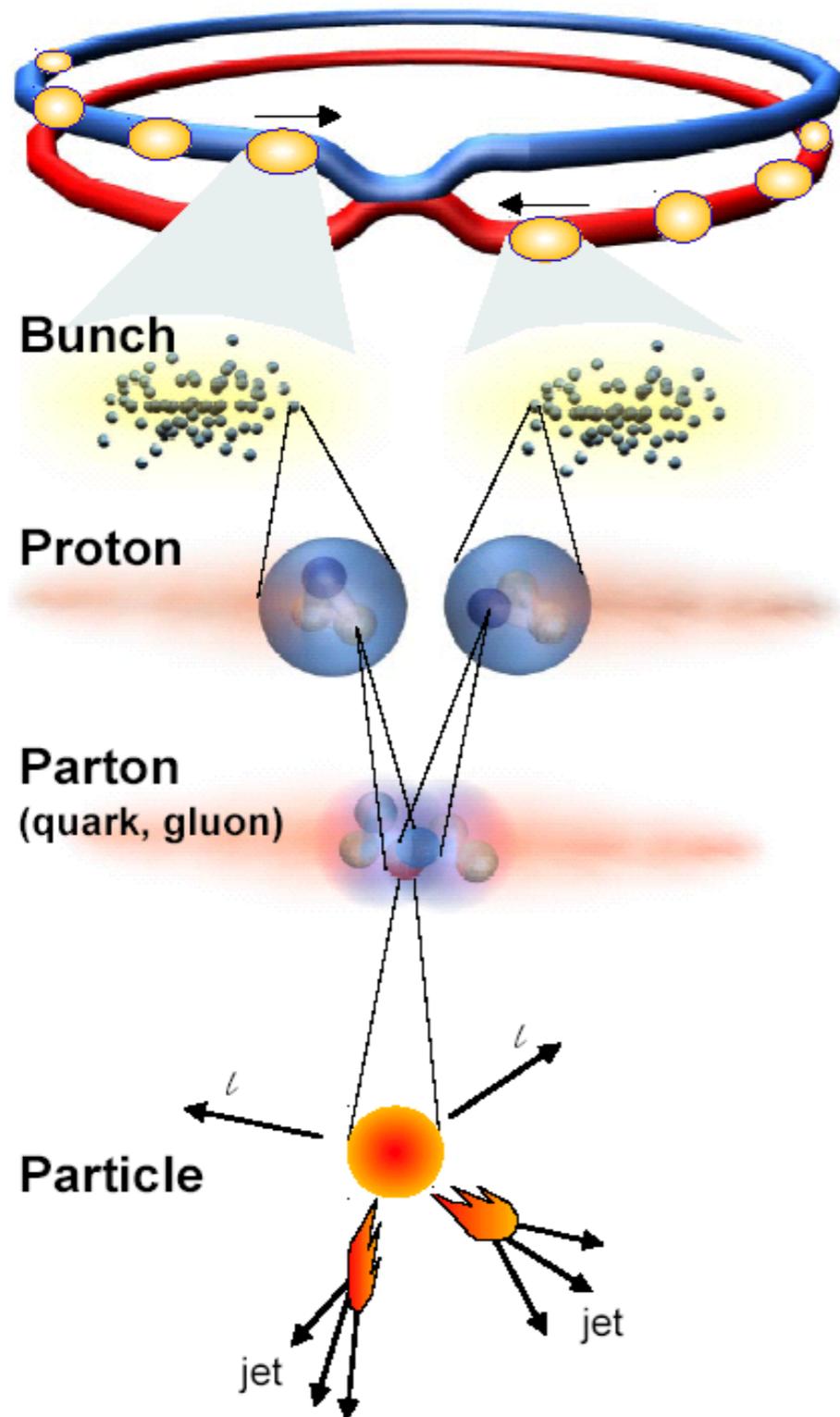
ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



Prinzip des Teilchenbeschleunigers





- **Starke Magnete** (8,3 Tesla) halten Strahl auf Kreisbahn
- Protonstrahl:
 - Bestehend aus etwa **2800 Paketen** mit jeweils etwa 100 Milliarden Protonen
 - Gespeicherte Strahlenergie: **360 MJ** (kinetische Energie \approx ICE3 mit 150 km/h)
- Kollisionen im ATLAS-Detektor:
 - 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 33.333.333.333 Ereignis (produziert, nicht gemessen!)

Teilchennachweis



Impulsmessung

Energiemessung

Teilchenidentifikation

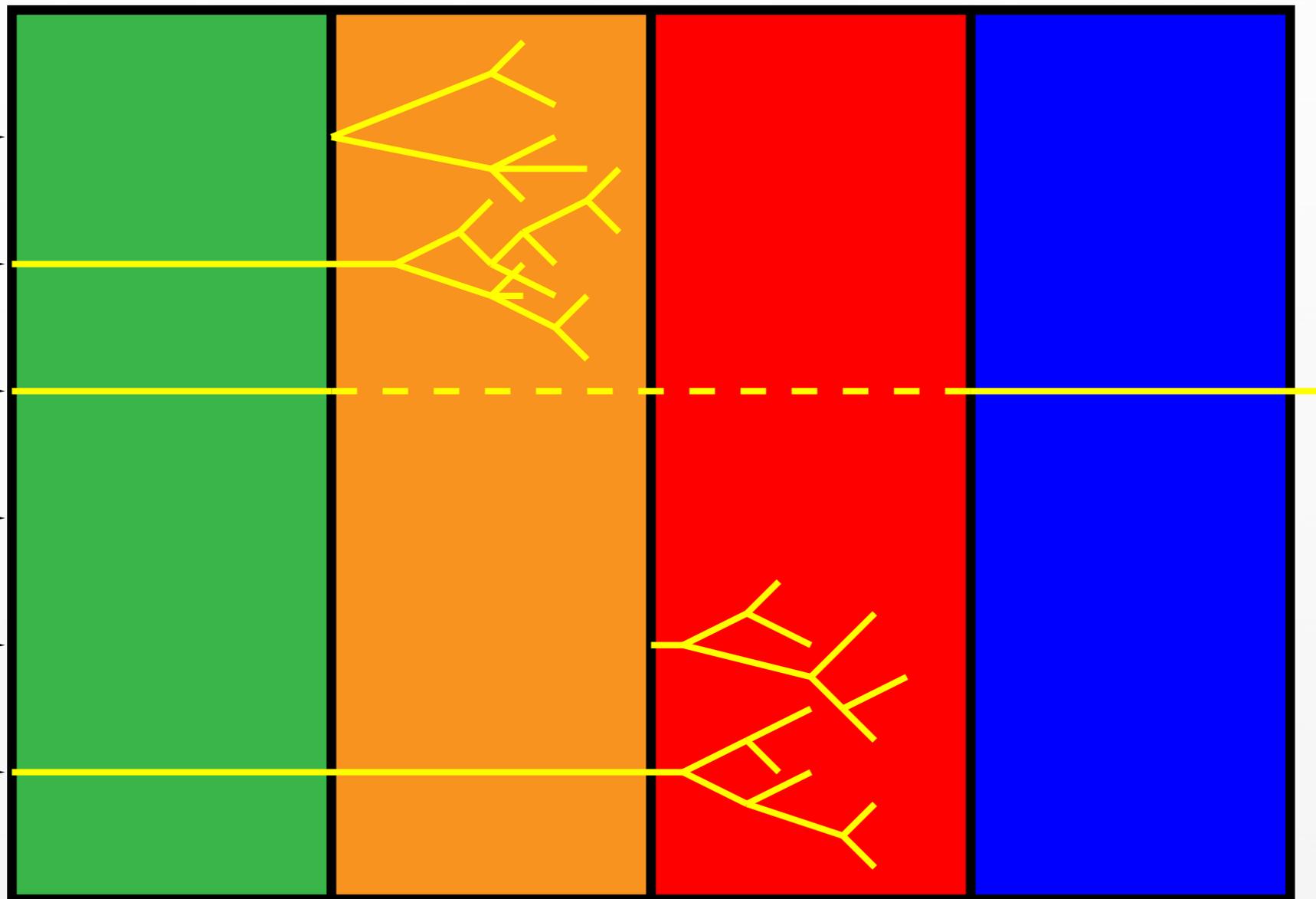
Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

Zerfallsprodukte der Kollision

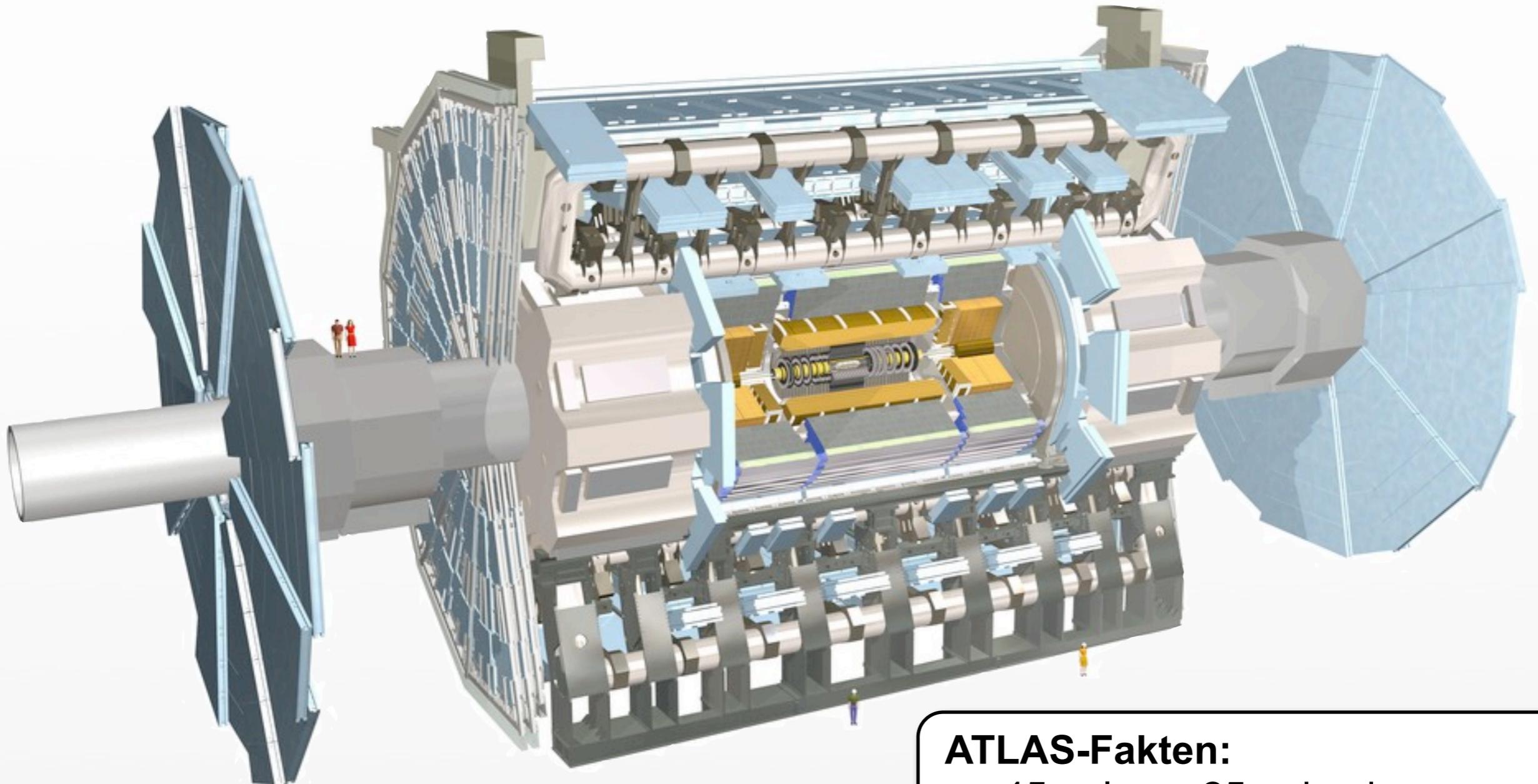
- Photon
- Elektron/Positron
- Myon
- Neutrino
- Neutron
- Pion, Proton



„Innen“

„Außen“

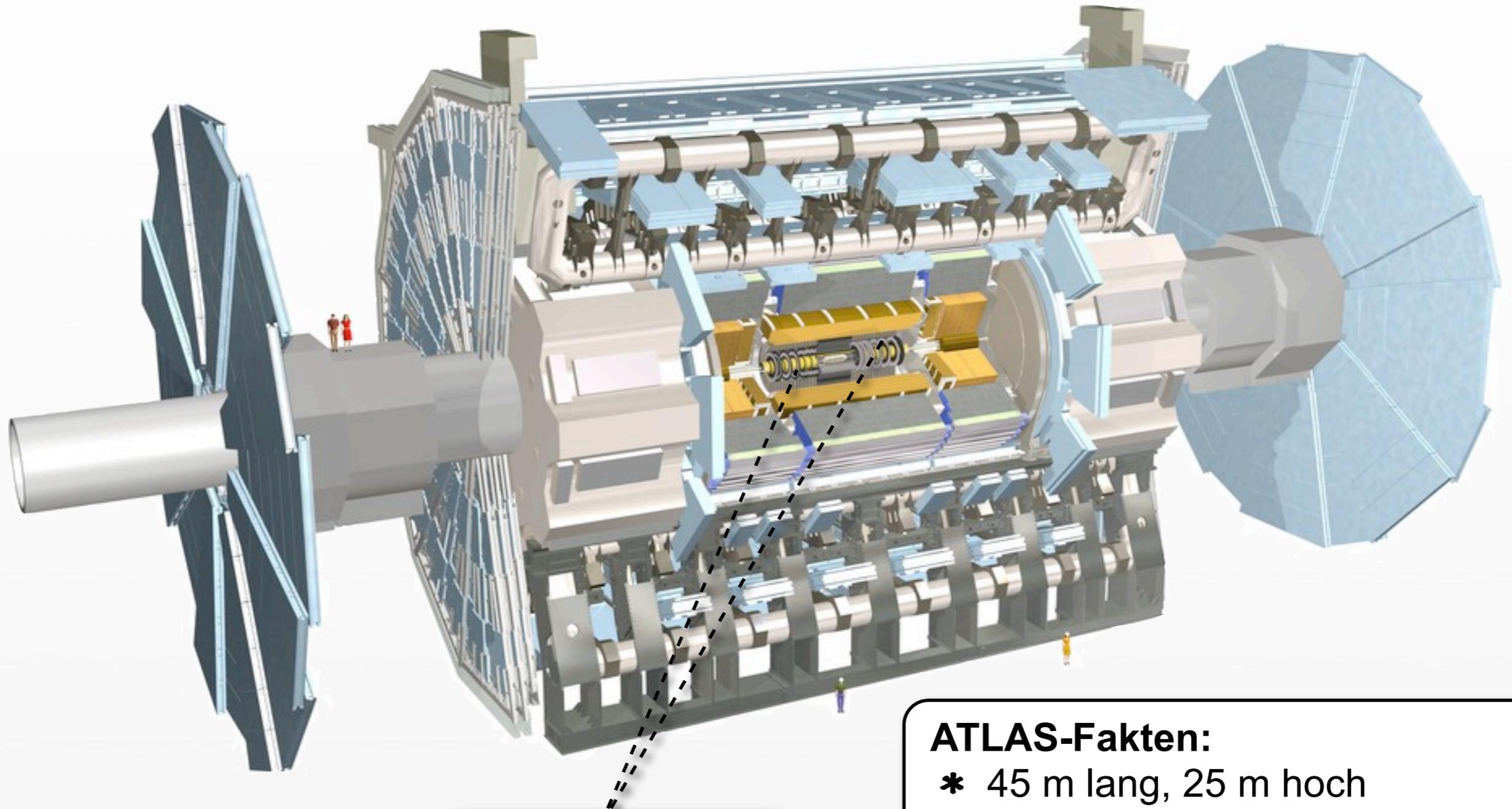
Beispiel: der ATLAS-Detektor



ATLAS-Fakten:

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

Beispiel: der ATLAS-Detektor



Spurdetektoren

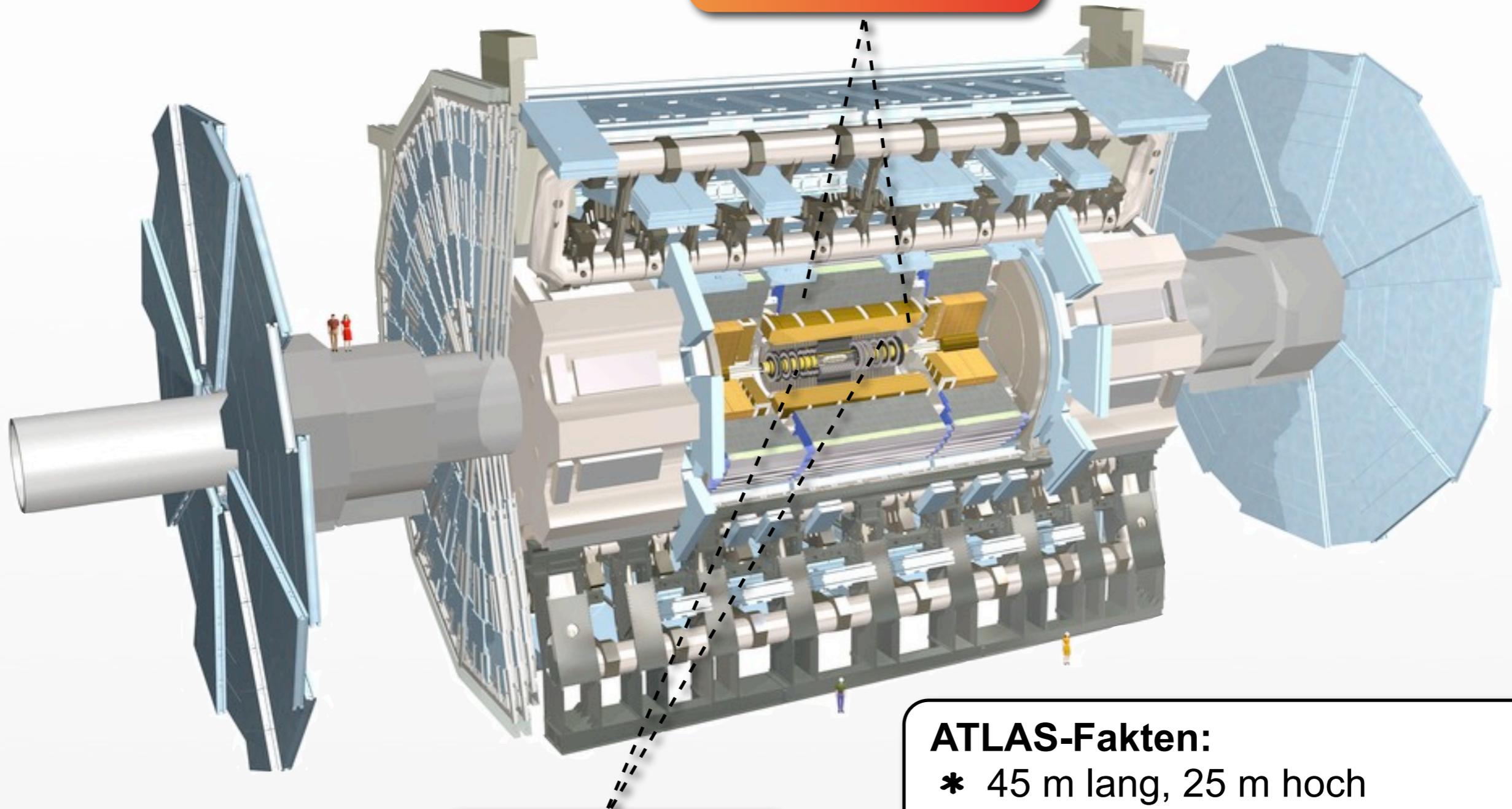
ATLAS-Fakten:

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

Beispiel: der ATLAS-Detektor



Kalorimeter



Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

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

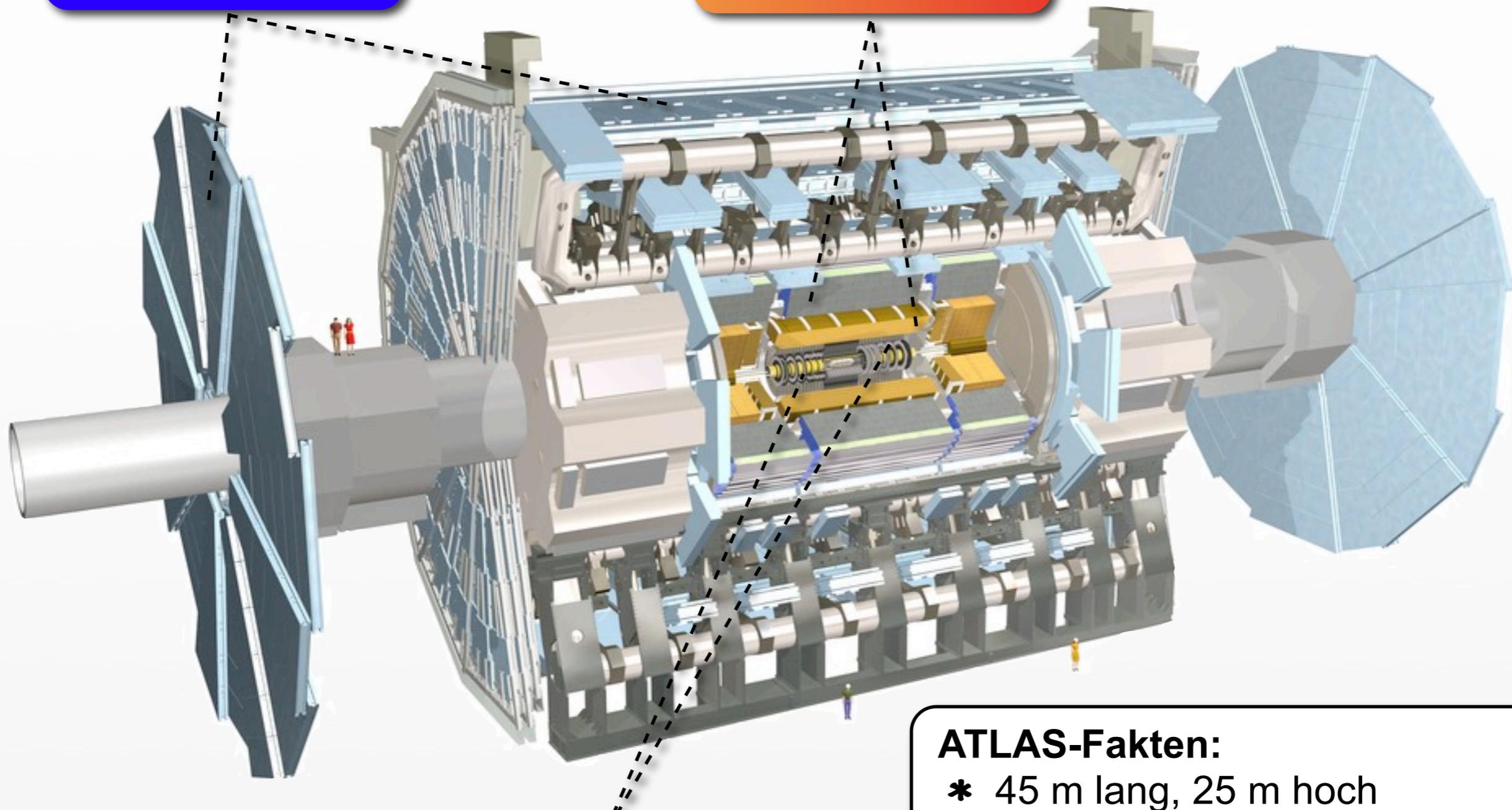
Beispiel: der ATLAS-Detektor



Myon-Detektor

Kalorimeter

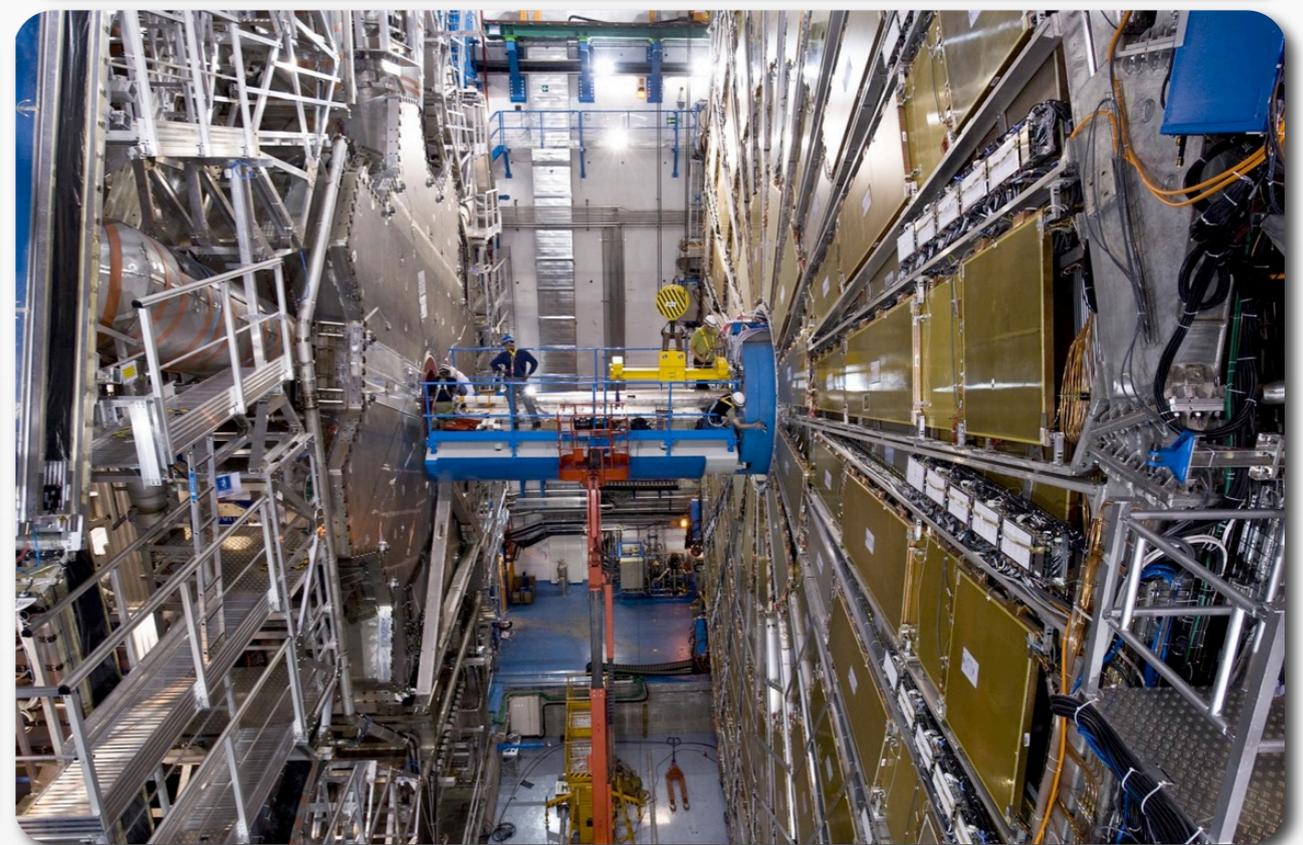
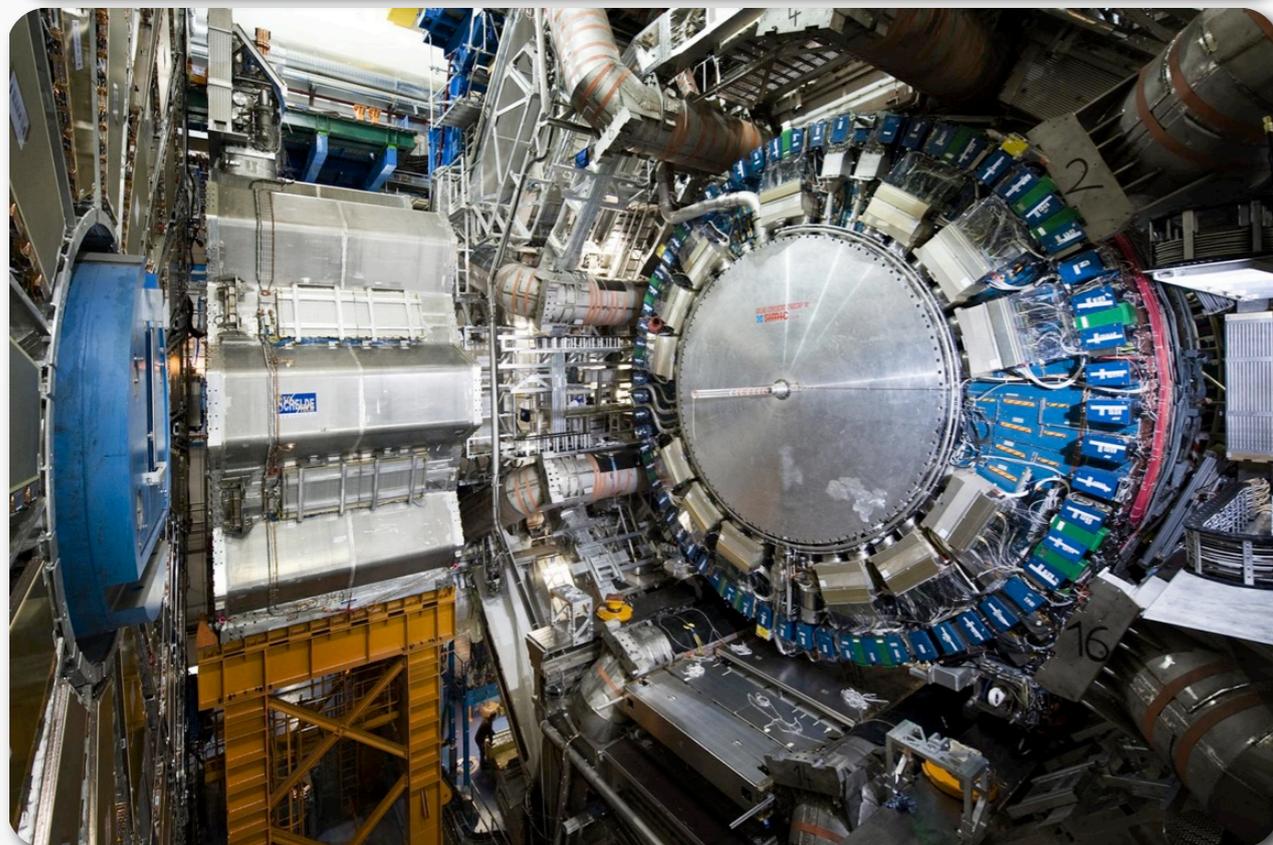
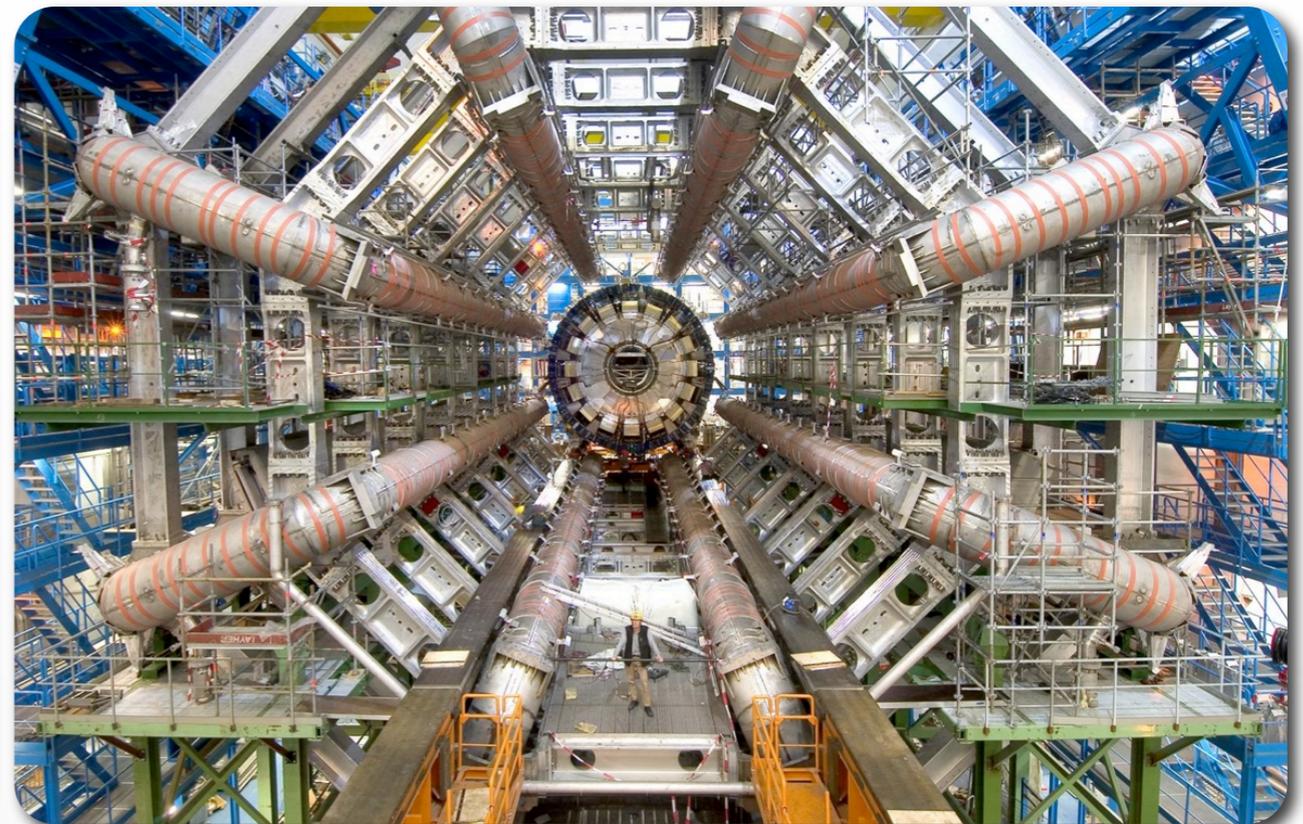
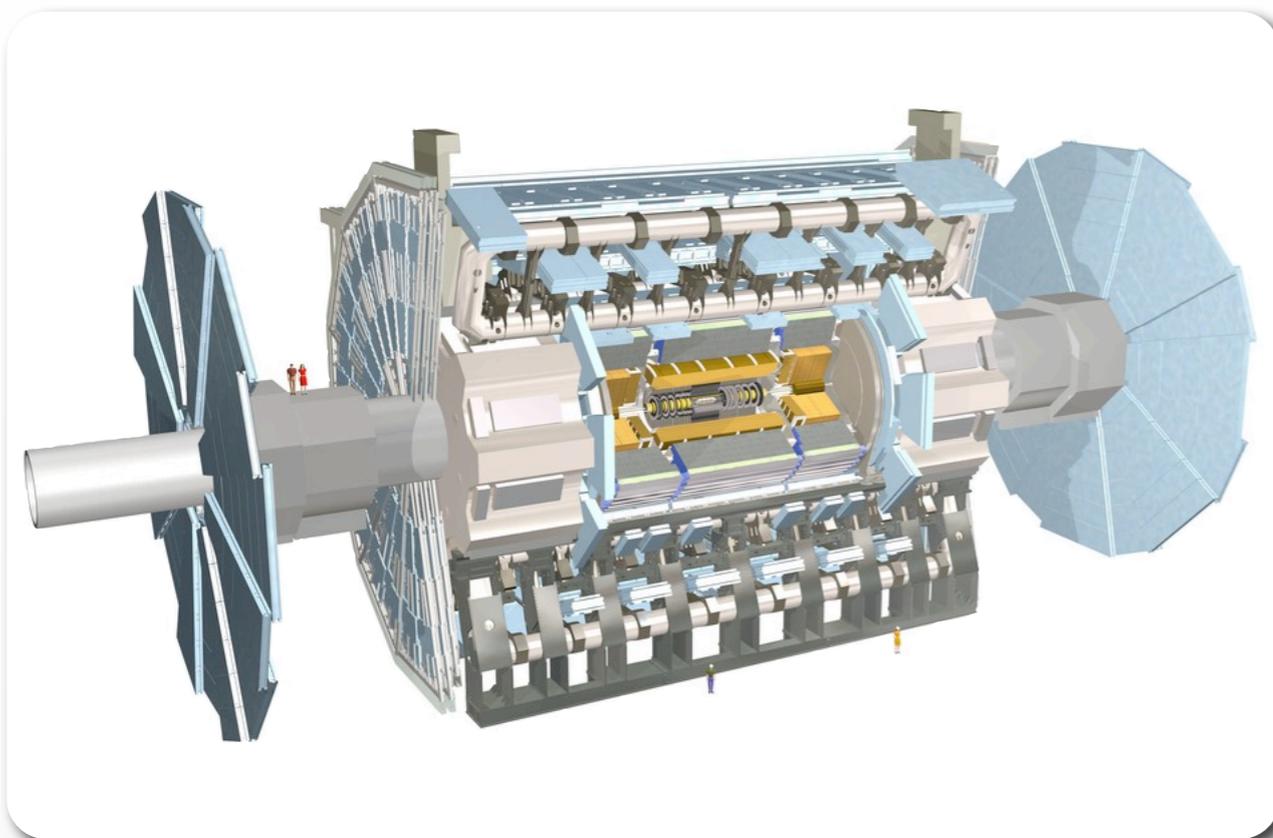
Spurdetektoren

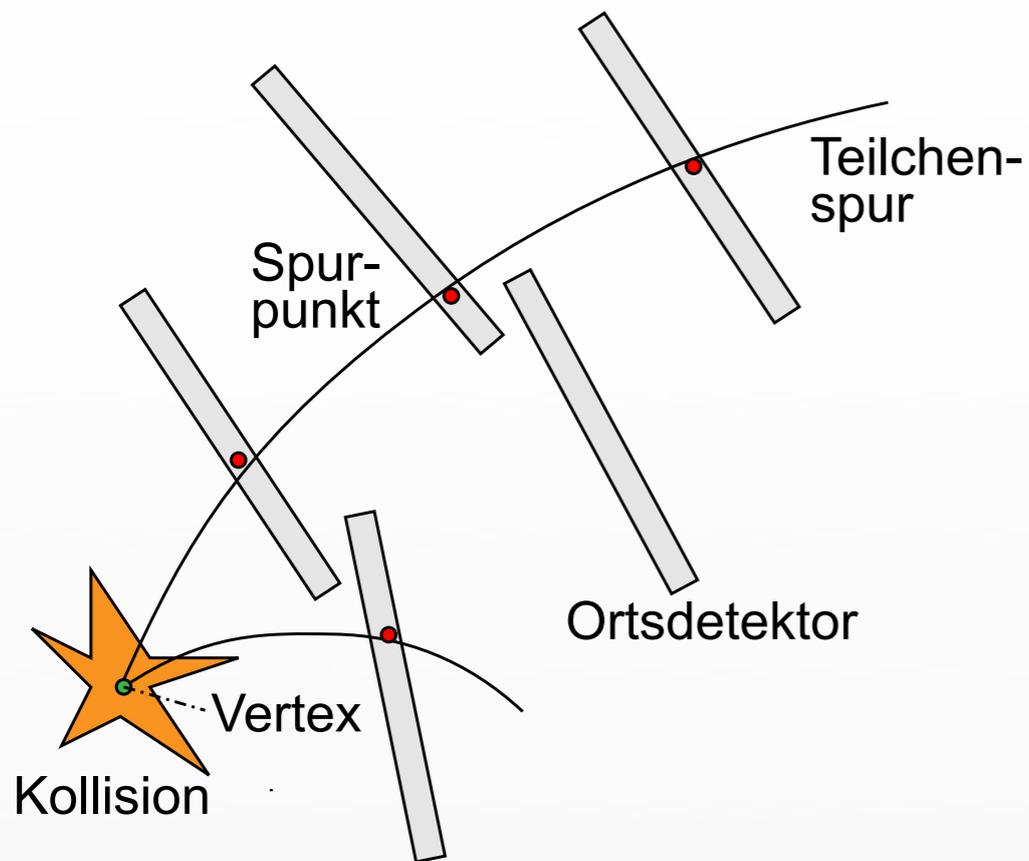


ATLAS-Fakten:

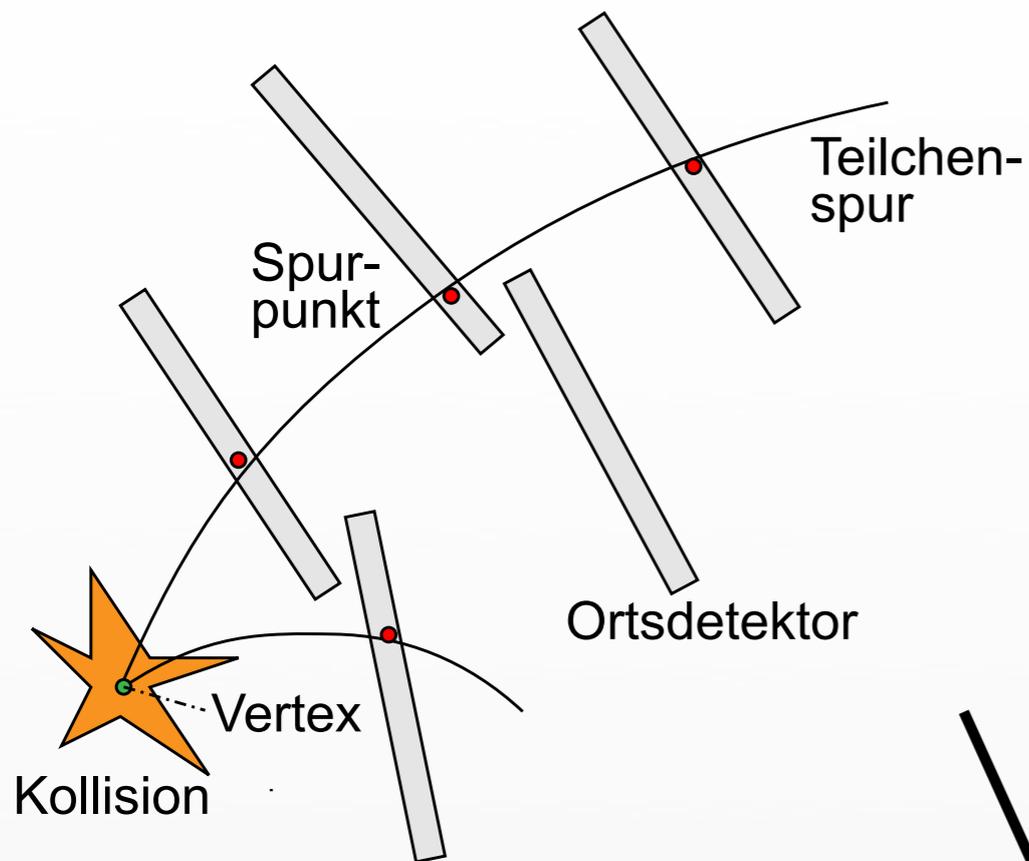
- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle

Zusammenbau des ATLAS-Detektors





- Idee der Impulsmessung:
- Bestimme Spuren geladener Teilchen aus **Spurpunkten**
- **Ablenkung in Magnetfeld** umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens
$$p_T [\text{GeV}] = 0.3 \cdot B [\text{T}] \cdot R [\text{m}]$$



- Idee der Impulsmessung:

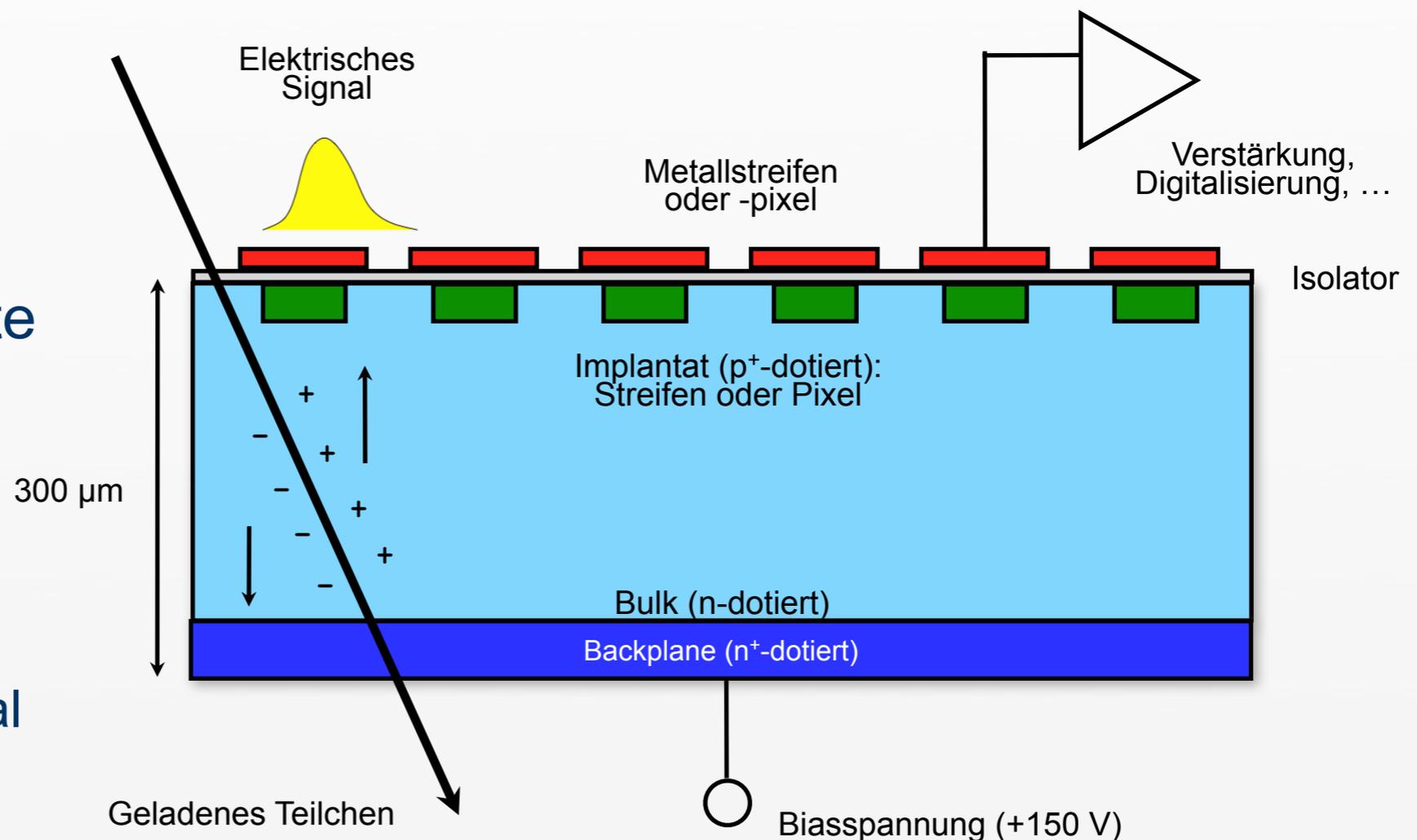
- Bestimme Spuren geladener Teilchen aus **Spurpunkten**

- Ablenkung in Magnetfeld** umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens

$$p_T [\text{GeV}] = 0.3 \cdot B [\text{T}] \cdot R [\text{m}]$$

- Messung der Spurpunkte z. B. **Siliziumdetektor**

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

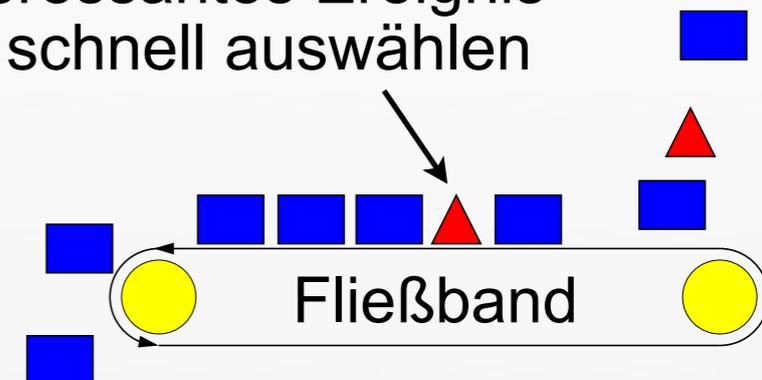


- Herausforderung **Datenrate**:
 - „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur einige 100 interessante Ereignisse
 - Überschlagsrechnung:
 10^9 Kollisionen/s \times 10^6 aktive Kanäle
= **1 TB/s** \rightarrow mit heutiger Technologie nicht speicherbar



Analogie: Fließband

Interessantes Ereignis
 \rightarrow schnell auswählen



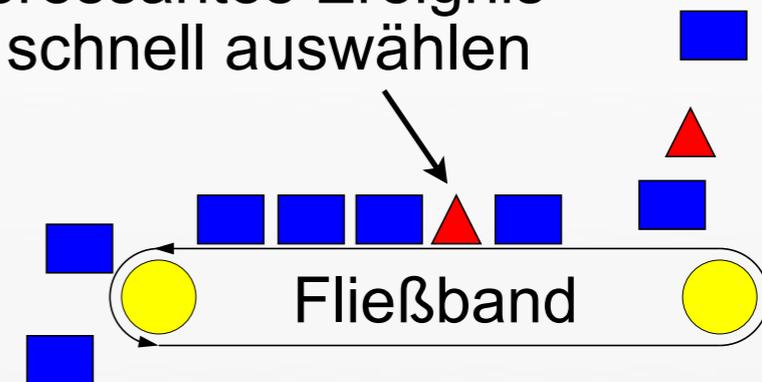
Uninteressante
Ereignisse
 \rightarrow verwerfen

- Herausforderung **Datenrate**:
 - „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur einige 100 interessante Ereignisse
 - Überschlagsrechnung:
 10^9 Kollisionen/s \times 10^6 aktive Kanäle
= **1 TB/s** \rightarrow mit heutiger Technologie nicht speicherbar
- Lösung: mehrstufige **Datenfilterung** („Trigger“):
 1. **Einfache** Signale, geringer Auflösung, z. B. ein hochenergetisches Myon \rightarrow spezielle Trigger-**Hardware**
 2. Größere Auflösung in **Teilen** des Detektors, z. B. Kegel um Myon \rightarrow Software, **Computerfarm**
 3. Information von **Gesamtdetektor** \rightarrow Software, Computerfarm



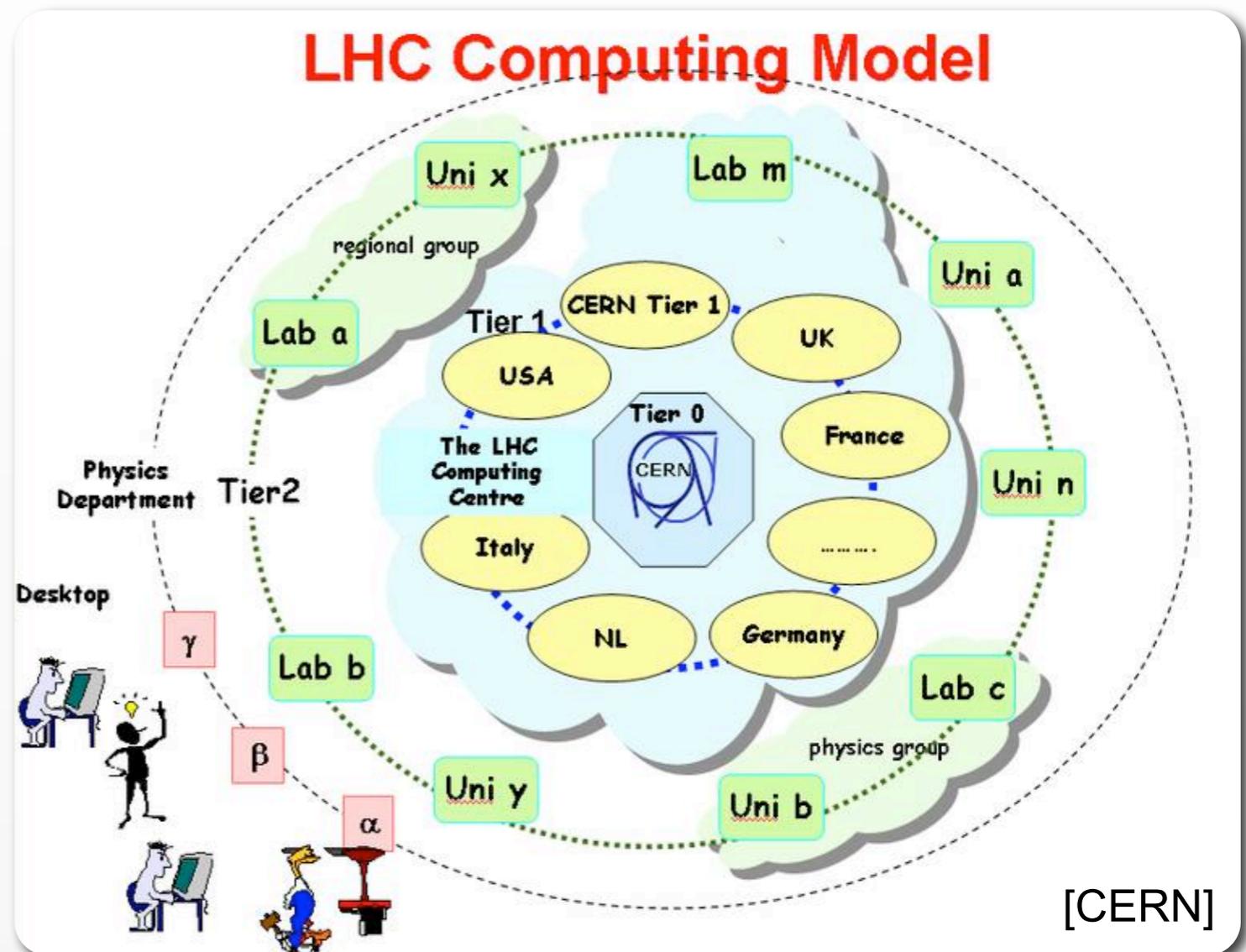
Analogie: Fließband

Interessantes Ereignis
 \rightarrow schnell auswählen

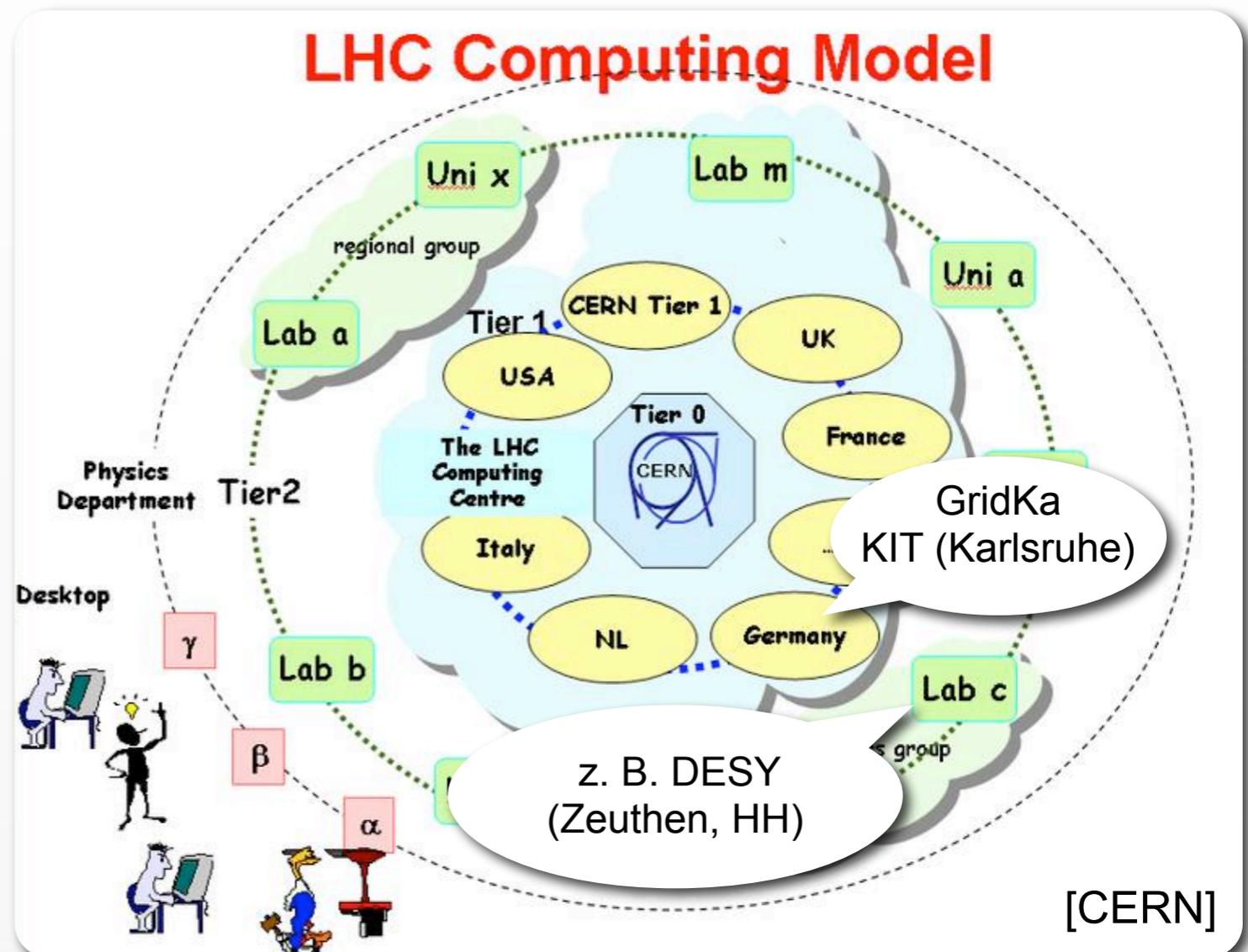


Uninteressante
Ereignisse
 \rightarrow verwerfen

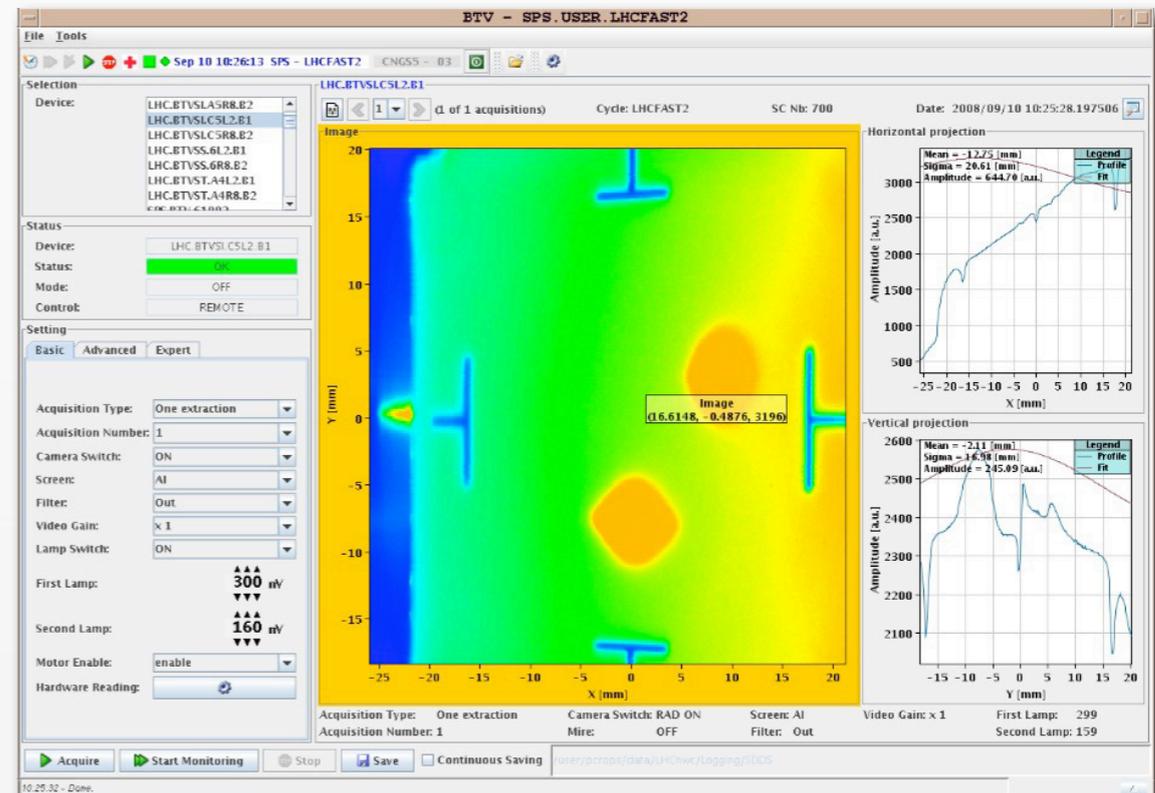
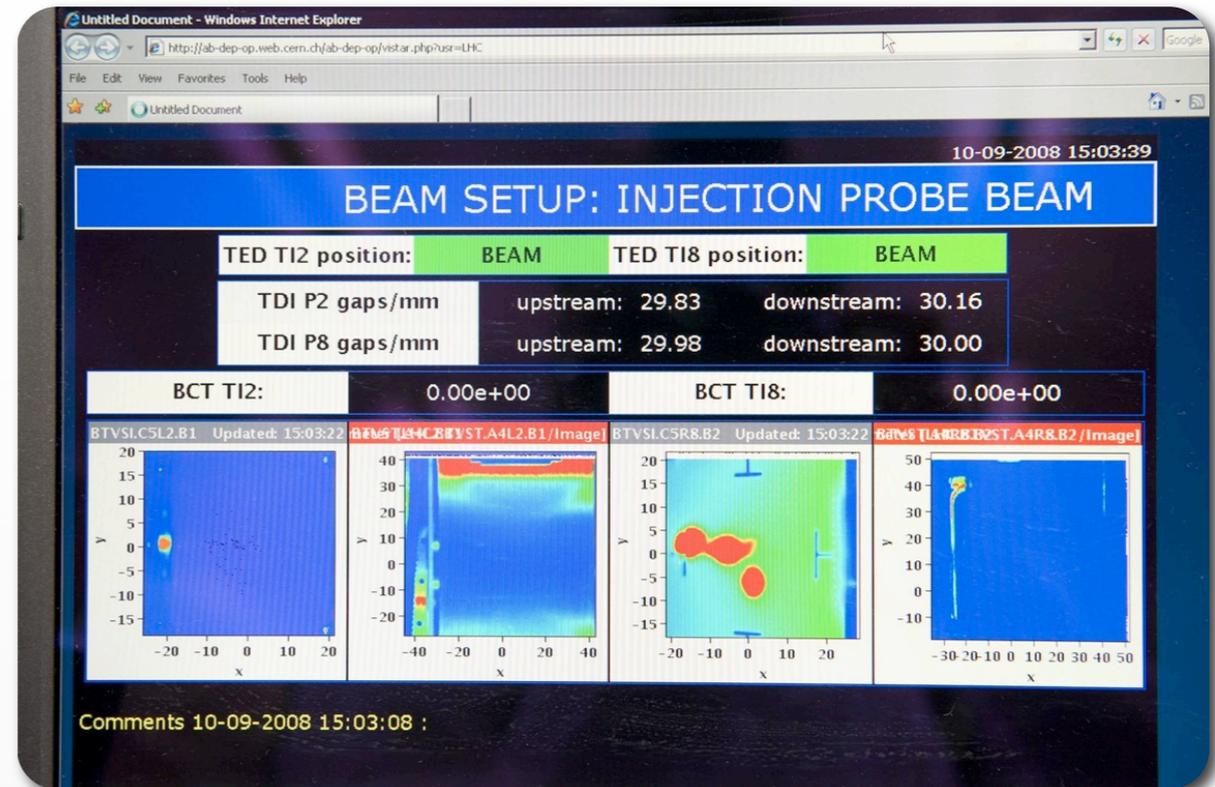
- Herausforderungen:
 - **Datenrate:** ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (3,3 Millionen DVDs!)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang

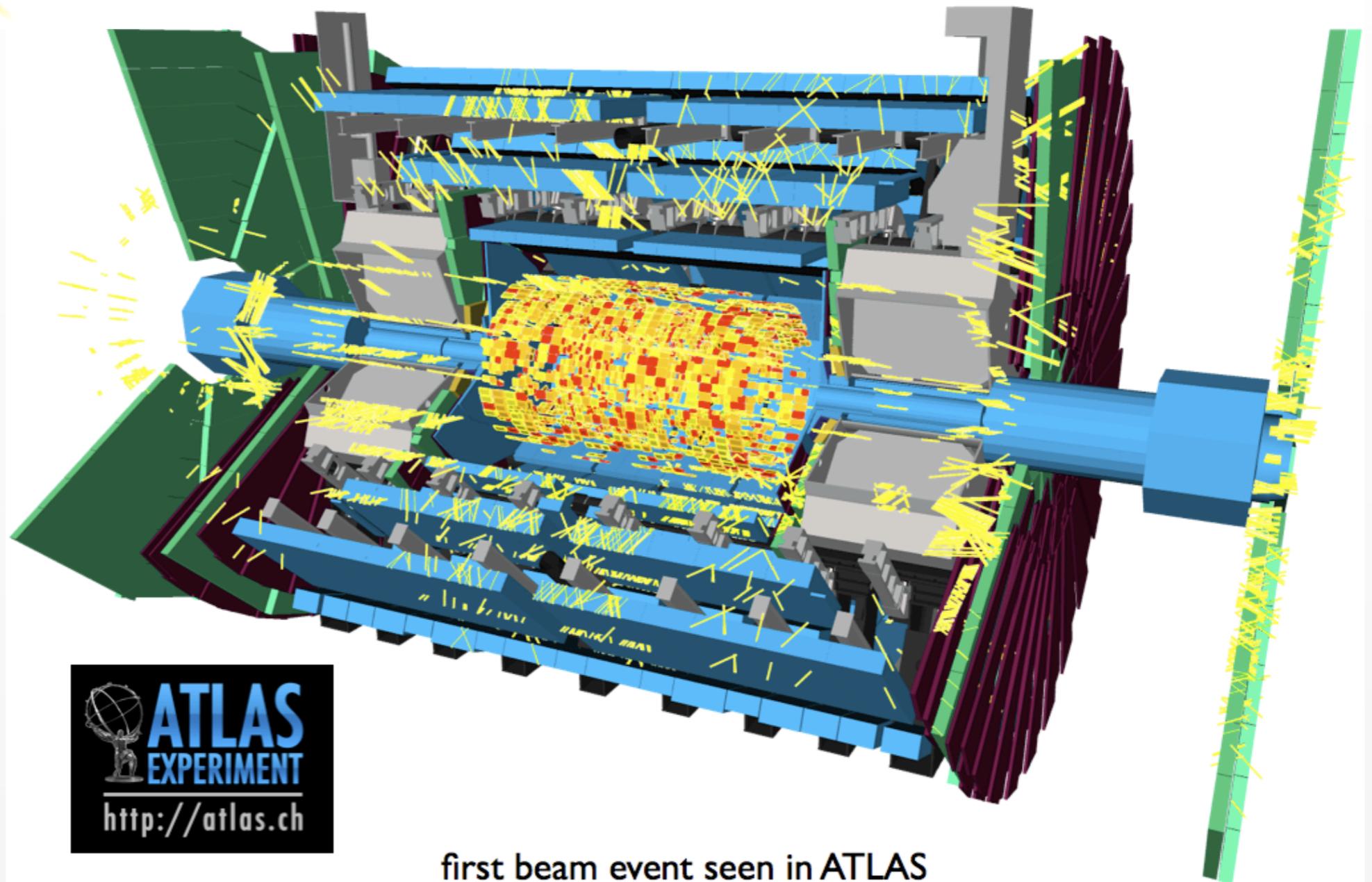


- Herausforderungen:
 - **Datenrate:** ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (3,3 Millionen DVDs!)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang



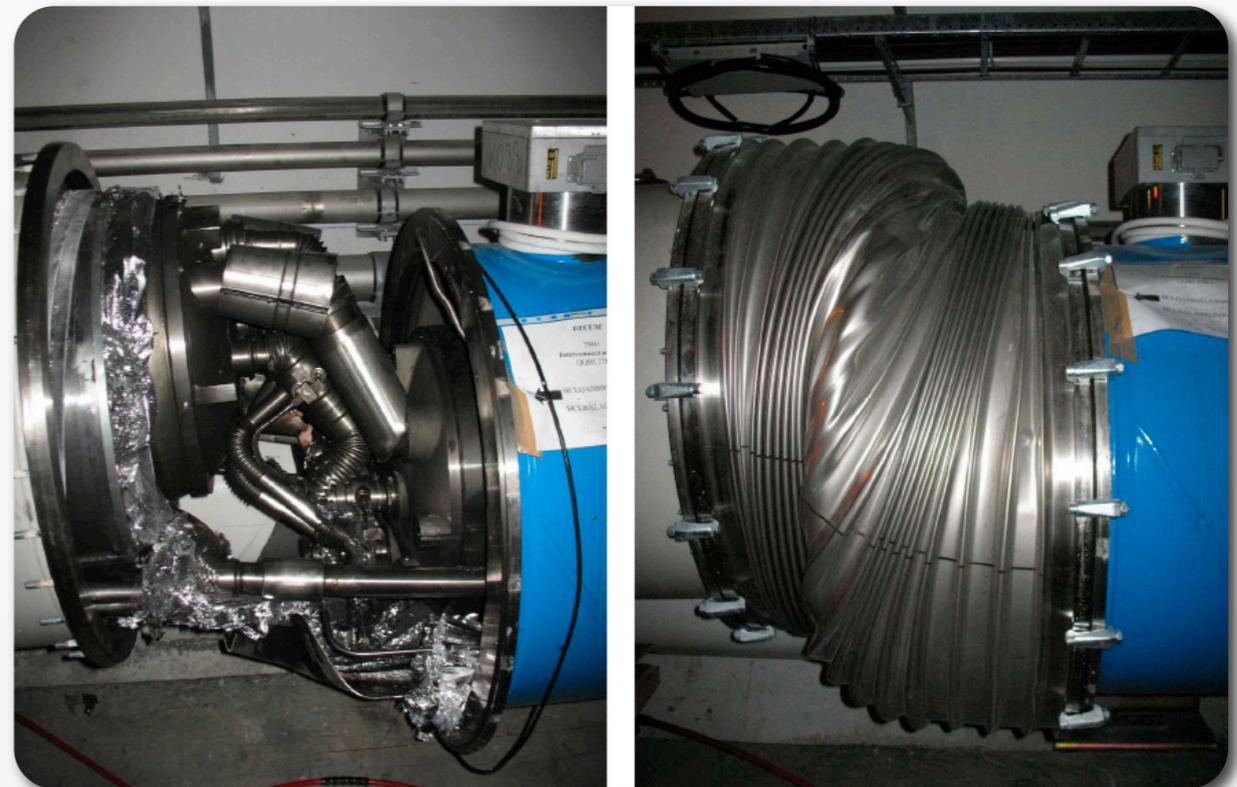
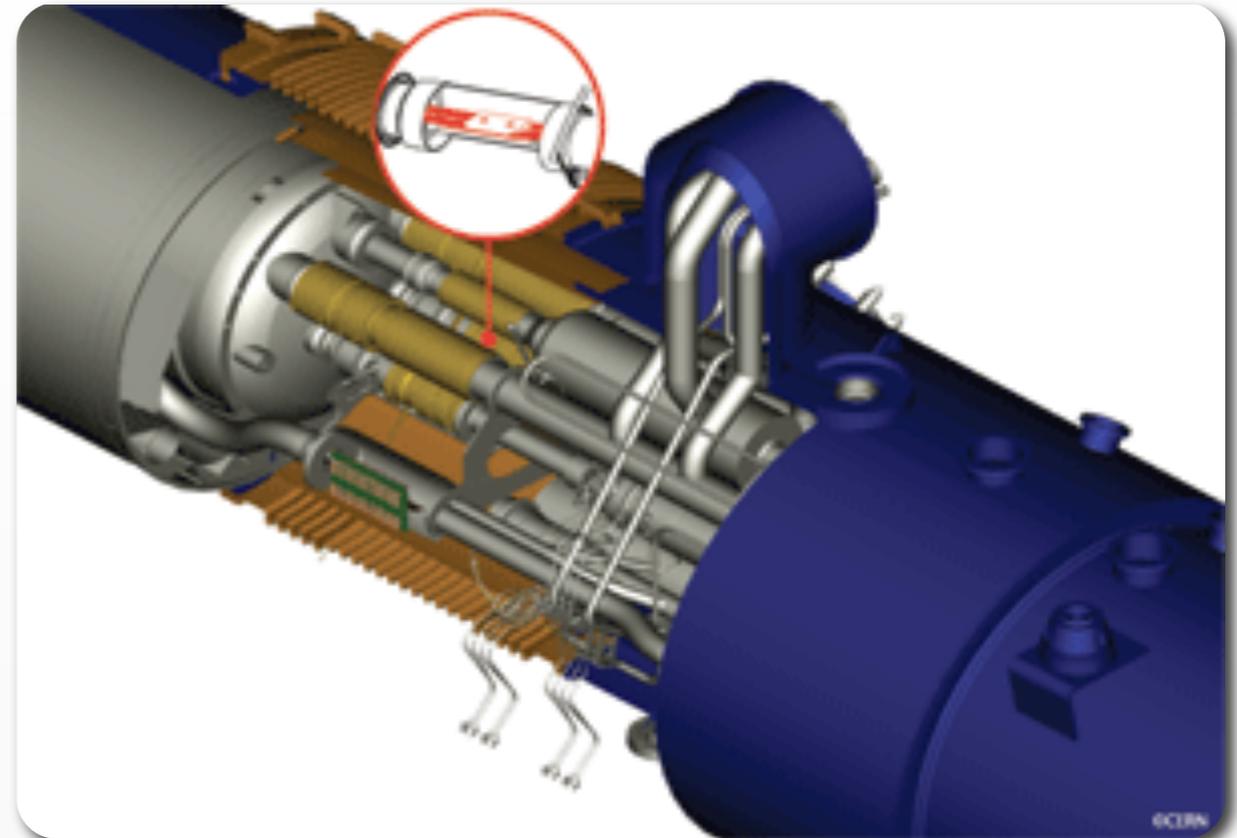
10.09.2008: Erster Strahl



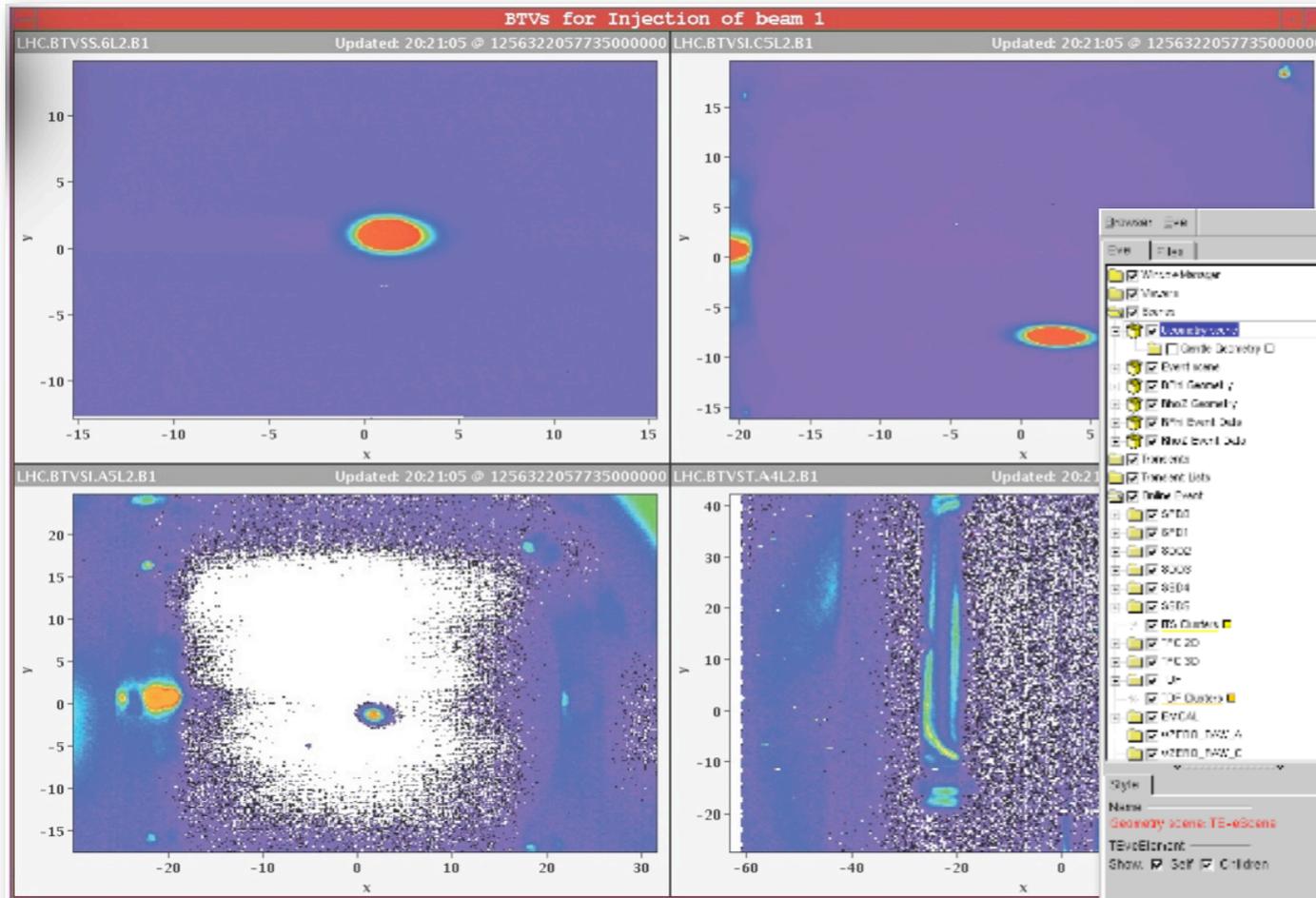


first beam event seen in ATLAS

- 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
- Alle beschädigten Magneten repariert, wieder installiert und auf Betriebstemperatur
- Inbetriebnahme im vollen Gange

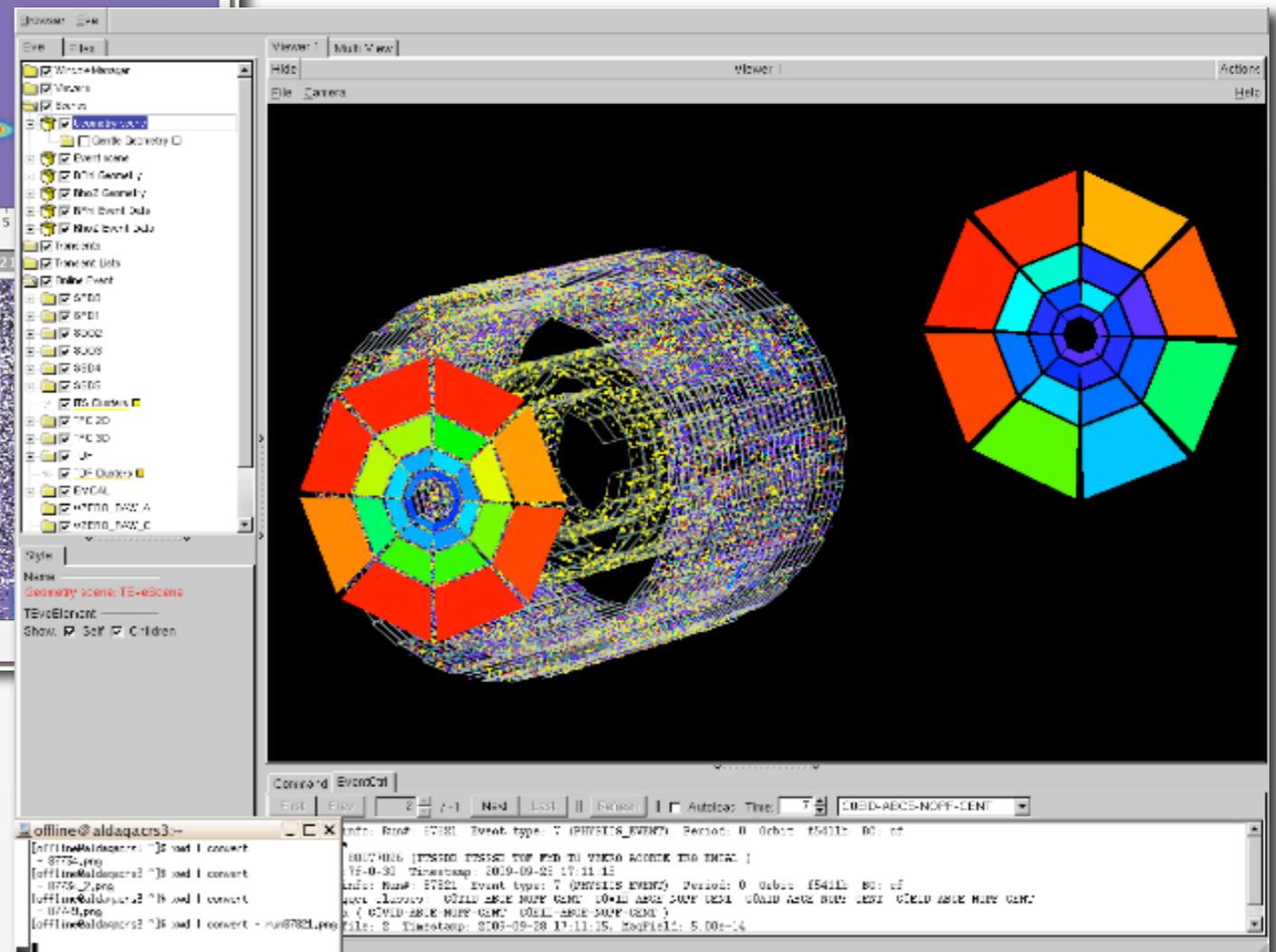


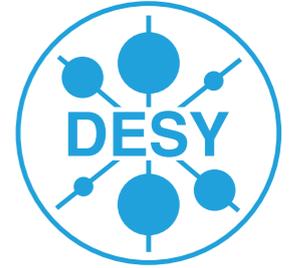
- Erste Achtelrunde für Protonen und Blei-Ionen im LHC (23.–25.10.2009)
- Erste zirkulierende Strahlen: 3. Novemberwoche
- Aktueller Plan: erste Kollisionen bei 7 TeV noch vor Weihnachten 2009



Strahlführungsmonitore

Sekundärteilchen im ALICE-Detektor





Menschen am LHC

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



Faszination Internationalität



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



Argentina	Morocco
Armenia	Netherlands
Australia	Norway
Austria	Poland
Azerbaijan	Portugal
Belarus	Romania
Brazil	Russia
Canada	Serbia
Chile	Slovakia
China	Slovenia
Colombia	Spain
Czech Republic	Sweden
Denmark	Switzerland
France	Taiwan
Georgia	Turkey
Germany	UK
Greece	USA
Israel	CERN
Italy	JINR
Japan	

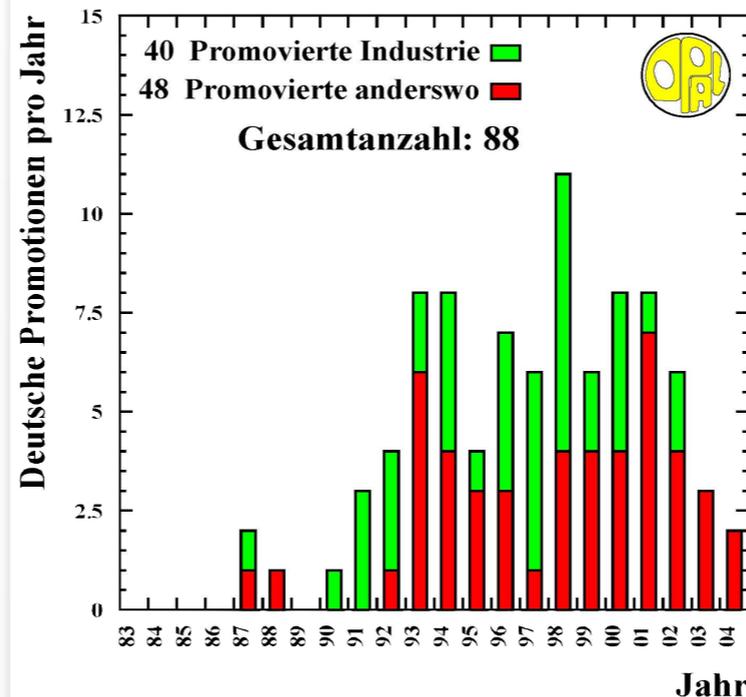
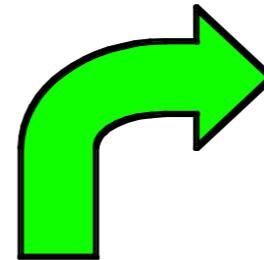




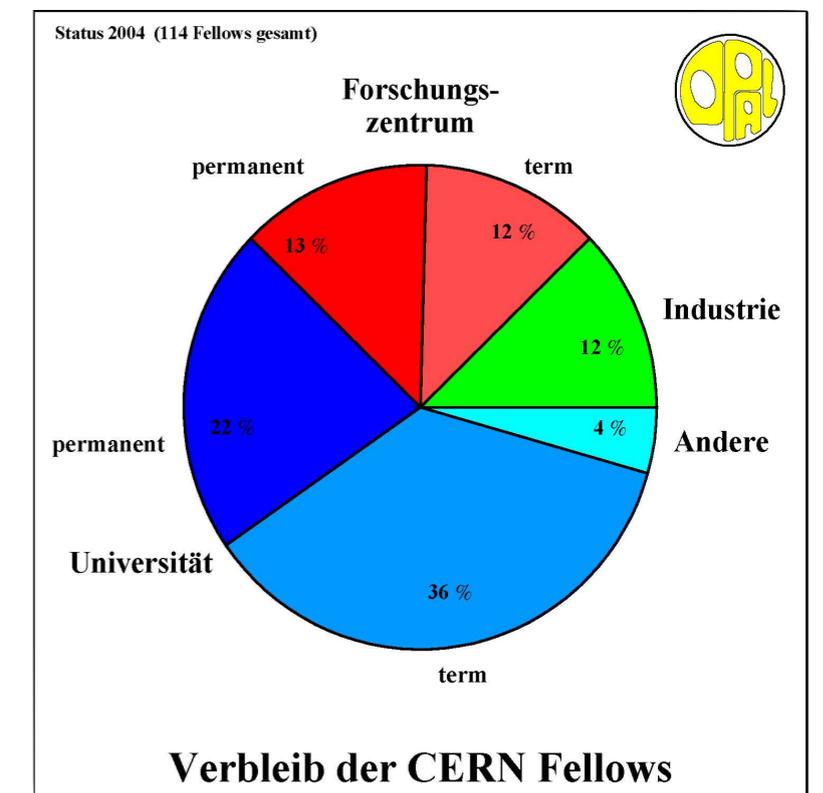
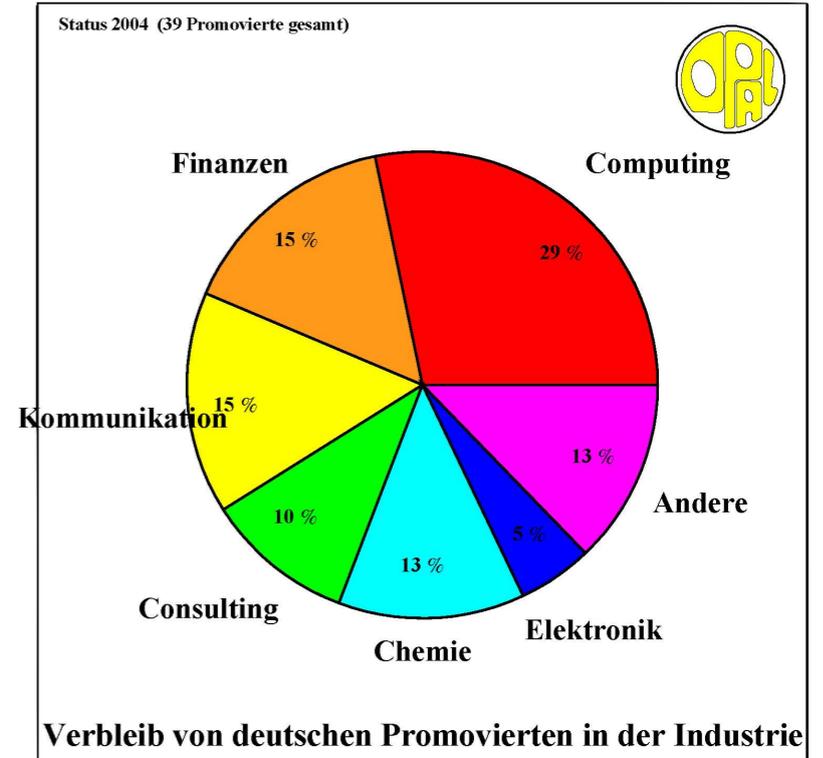
- Studierende bei ATLAS: nur eine/r unter 2500?
- Teil eines der **größten Forschungsprojekte** der Menschheit
- Komplexes System, Verantwortung für Teilgebiet → **Sichtbarkeit**
- Breite Ausbildung:
 - **Hardware**: Planung, Bau, Tests...
 - **Software**: Datenbanken, objektorientierte Programmierung, 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



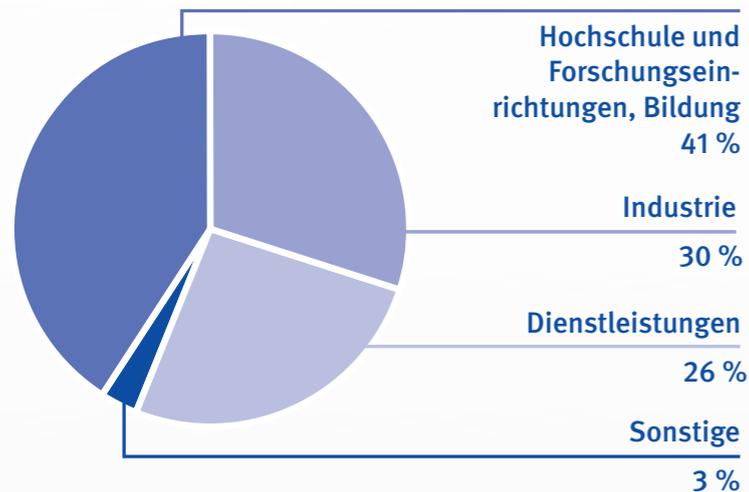
50% Unis oder Forschungszentren, z.B. CERN Fellows



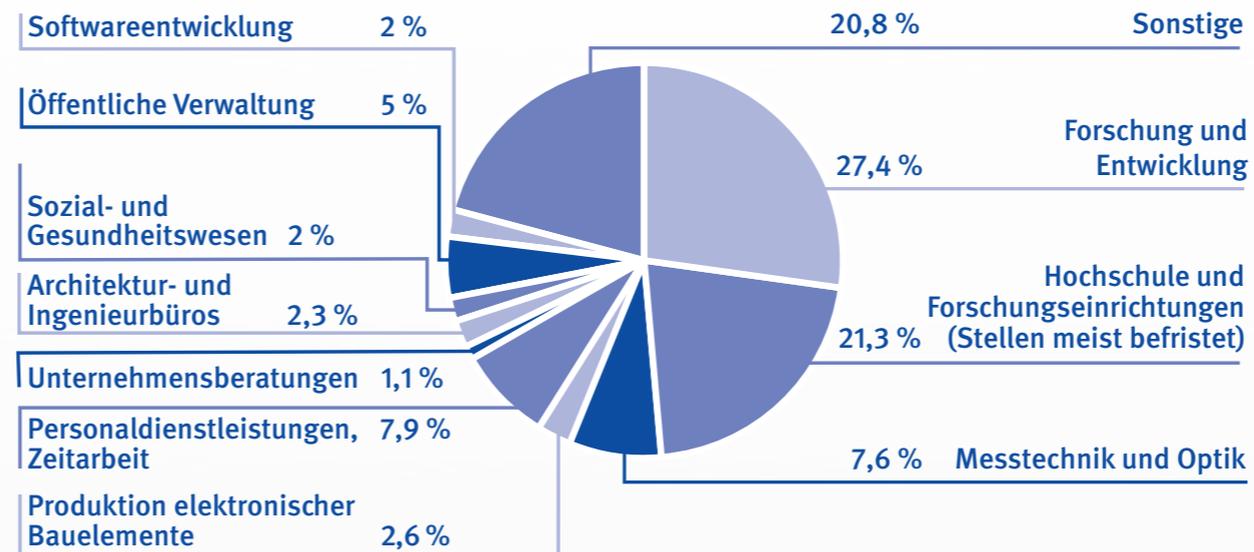
Arbeitsmarkt für Physiker/innen 2008



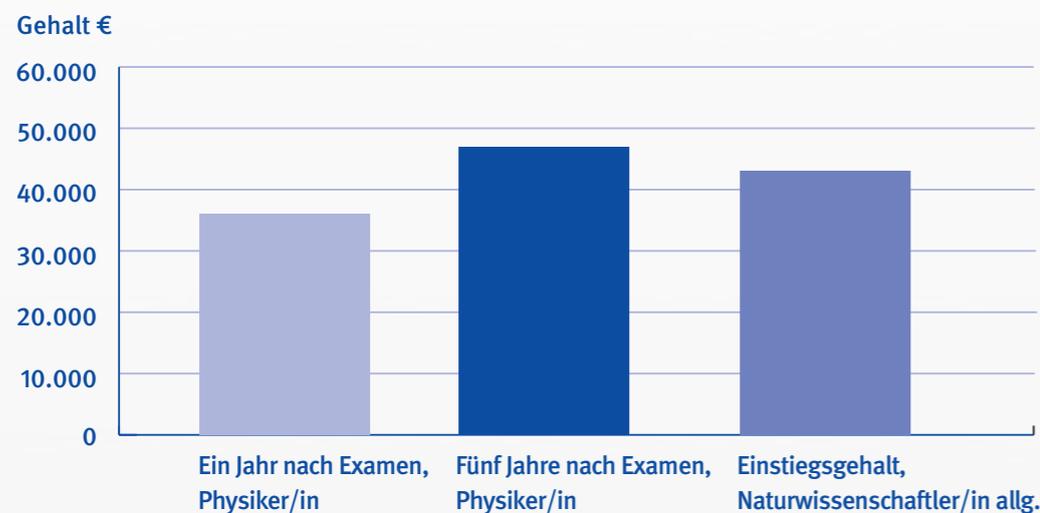
Tätigkeit: Hier arbeiten Physiker/innen ³



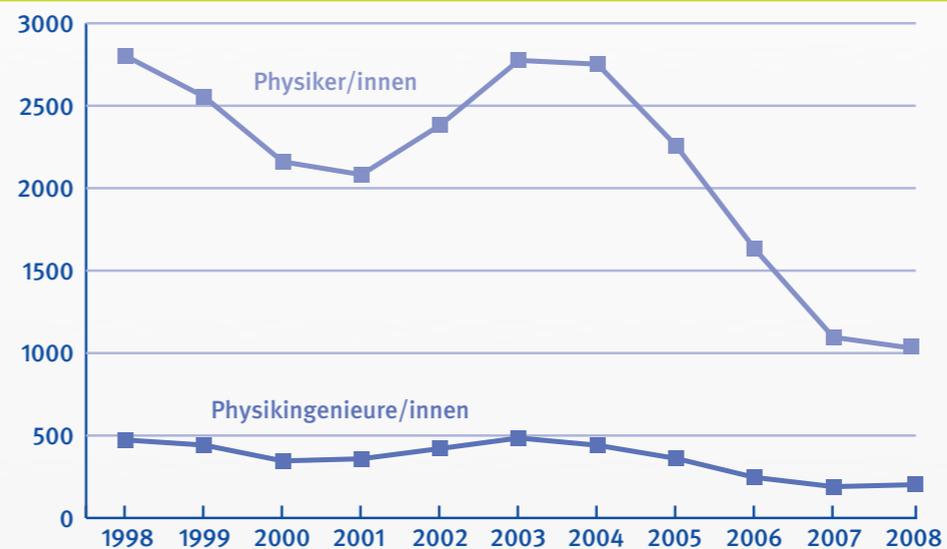
Bedarf: Hier werden Physiker/innen gesucht ⁴



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).



Was ist der Ursprung der Masse?

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Fragen an den Large Hadron Collider am CERN

In wie vielen Dimensionen leben wir?

Wie unterscheiden sich Materie und Antimaterie

WELT MASCHINE

AUSSTELLUNG DER UNIVERSITÄT HEIDELBERG
28.11. - 20.12.2009 • MO – SO 10 – 18 UHR • KIRCHHOFF-INSTITUT,
IM NEUENHEIMER FELD 227 • WWW.WELTMASCHINE-HEIDELBERG.DE

Bundesministerium für Bildung und Forschung

CERN

- Teilchenphysik und Kosmologie: viele Antworten, aber noch mehr Fragen:
 - Was ist der Ursprung der Masse?
 - 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
 - Es geht endlich los! Erste Kollisionen vor Weihnachten 2009