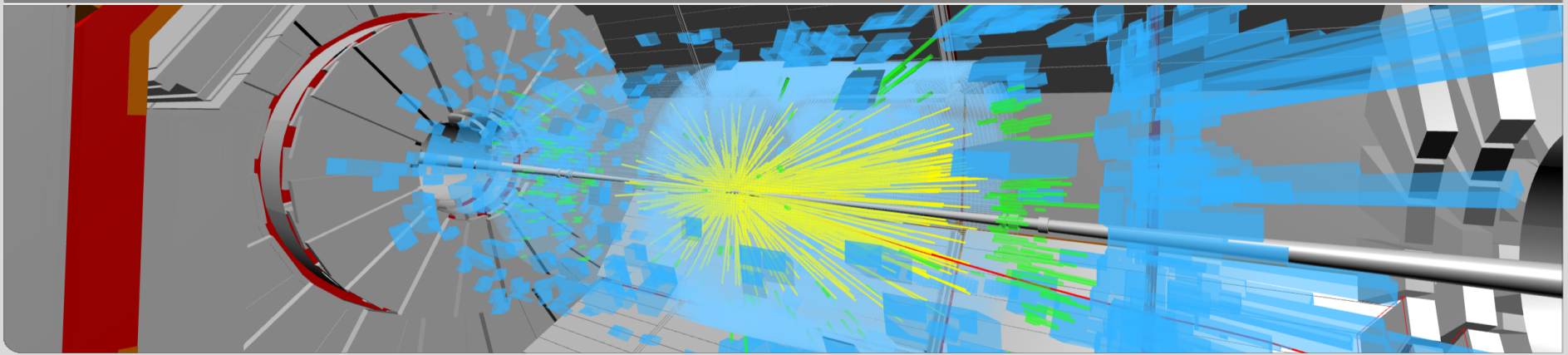
Karlsruher Institut für Technologie

THOMAS-MANN GYMNASIUM STUTENSEE

CERN: Auf der Suche nach den kleinsten Teilchen

Thomas-Mann-Gymnasium Stutensee, 9. Januar 2019

Ulrich Husemann, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Karlsruher Institut für Technologie



Wer bin ich?

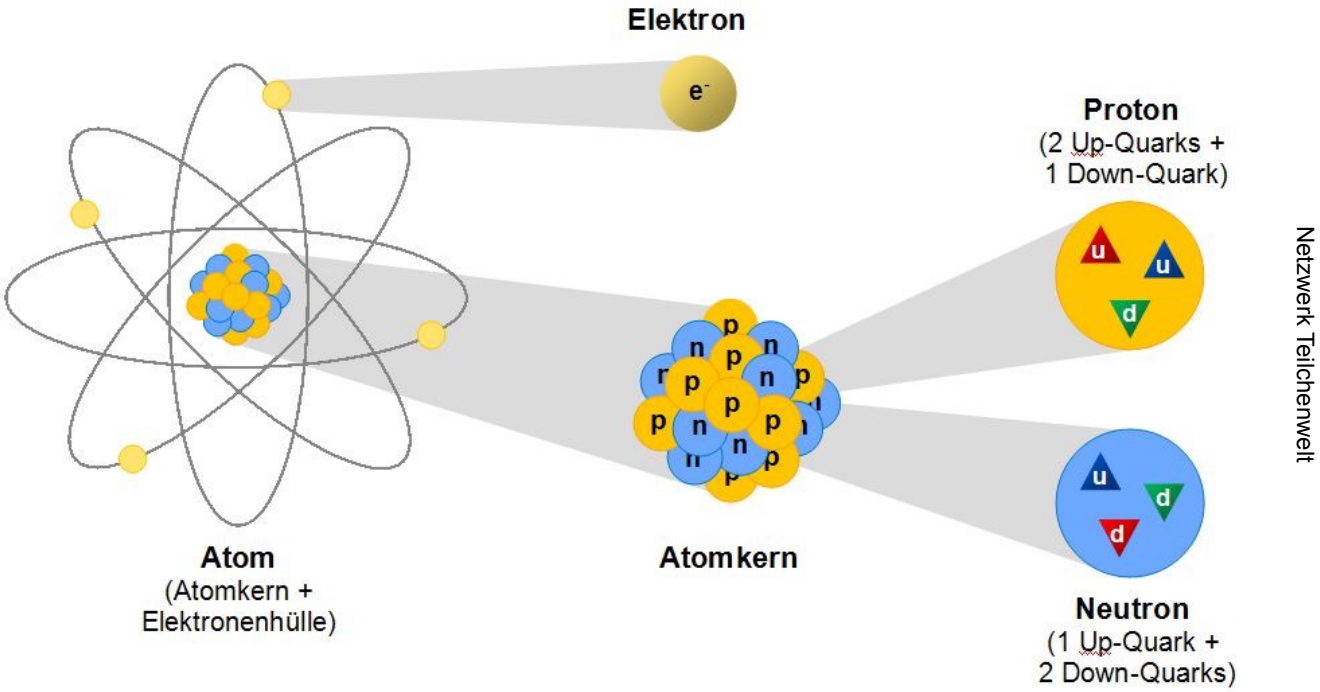
Promotion
Siegen 2005
HERA-B-Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY

Postdoc
Rochester, Yale (2005–2008)
CDF-Experiment am Fermi National Accelerator Laboratory, Chicago

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

Professor
KIT, Experimentelle Teilchenphysik (seit 2011)
CMS-Experiment am CERN, Genf

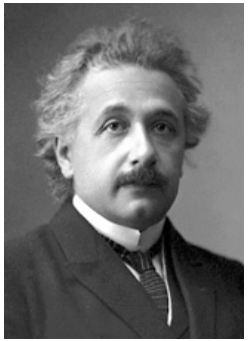
Erforschung des Atoms



1 Å = 10^{-10} m **10^{-14} m** **1 fm = 10^{-15} m**

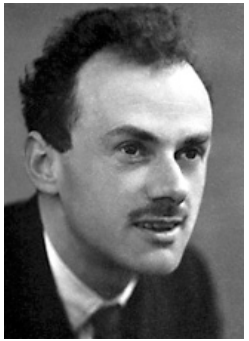
Physikalische Grundlagen

- Spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905):
  - **Relativitätsprinzip**: physikalische Gesetze sind in allen Inertialsystemen gleich
  - Universelle **Grenzgeschwindigkeit**: Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen gleich groß
- Quantenmechanik (Heisenberg, Schrödinger, Dirac, … 1920er Jahre):
  - **Quantenobjekt**: ununterscheidbar, Wellen- und Teilcheneigenschaften
  - Beschreibung mit **Wahrscheinlichkeiten**



Albert Einstein

Erwin Schrödinger



Paul A. M. Dirac

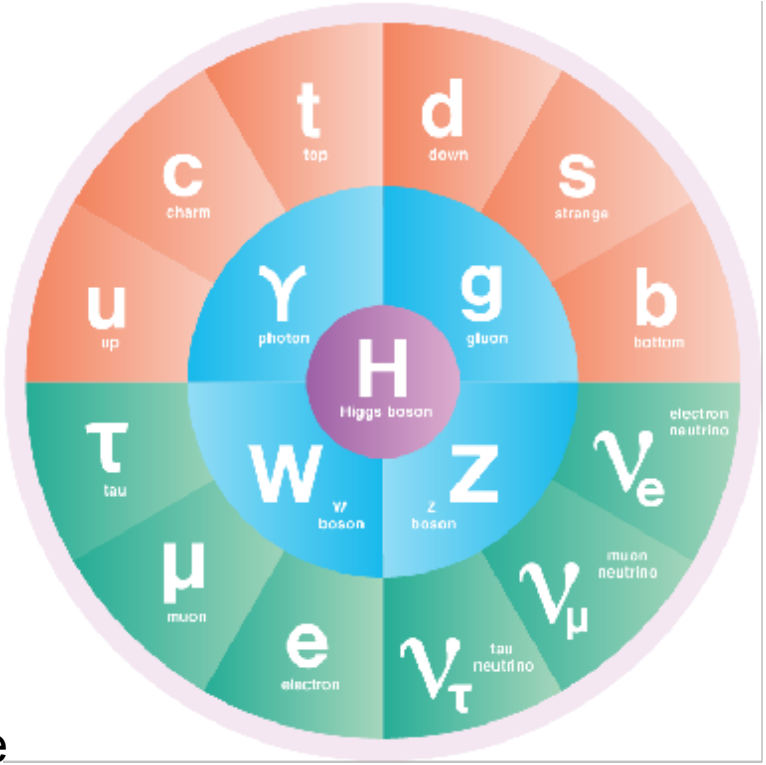
Werner Heisenberg

nobelprize.org

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

Teilchenzoo

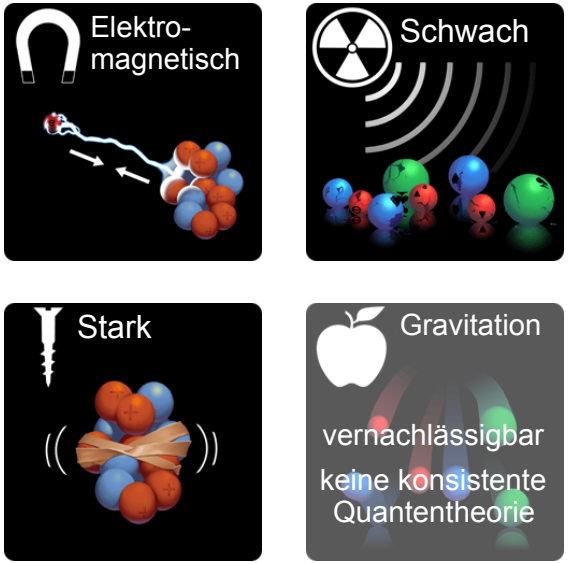
- Aktuelle Theorie der Natur im Allerkleinsten („Standardmodell”):
  - Materie besteht aus 12 fundamentalen Bausteinen: **6 Quarks** und **6 Leptonen** (und deren Antiteilchen)
  - Vier fundamentale **Kräfte** zwischen fundamentalen Bausteinen, vermittelt durch **Kraftteilchen**
  - **Higgs-Teilchen** (Entdeckung 2012): verantwortlich für **Masse** aller Bausteine



symmetrymagazine.org

Kräfte im Standardmodell

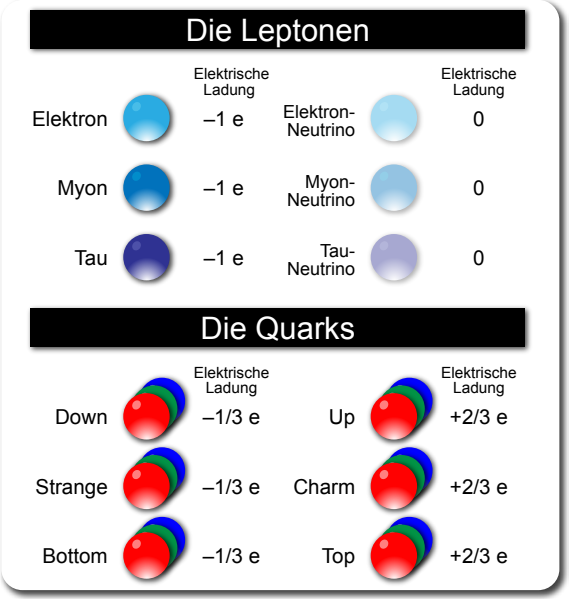
- Kräfte („Wechselwirkungen”): **Austauschteilchen** mit Spin 1ħ (Bosonen)
  - **Starke** Wechselwirkung
    → 8 Gluonen
  - **Elektromagnetische** Wechselwirkung
    → Photon
  - **Schwache** Wechselwirkung
    → $W^{\pm}$-, Z-Bosonen
- **Vereinigung** der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung: **elektroschwache** Wechselwirkung

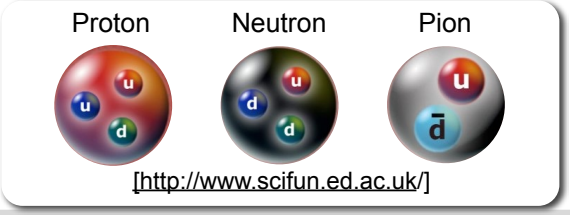


[http://www.particlephysics.ac.uk/]

Teilchen im Standardmodell

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





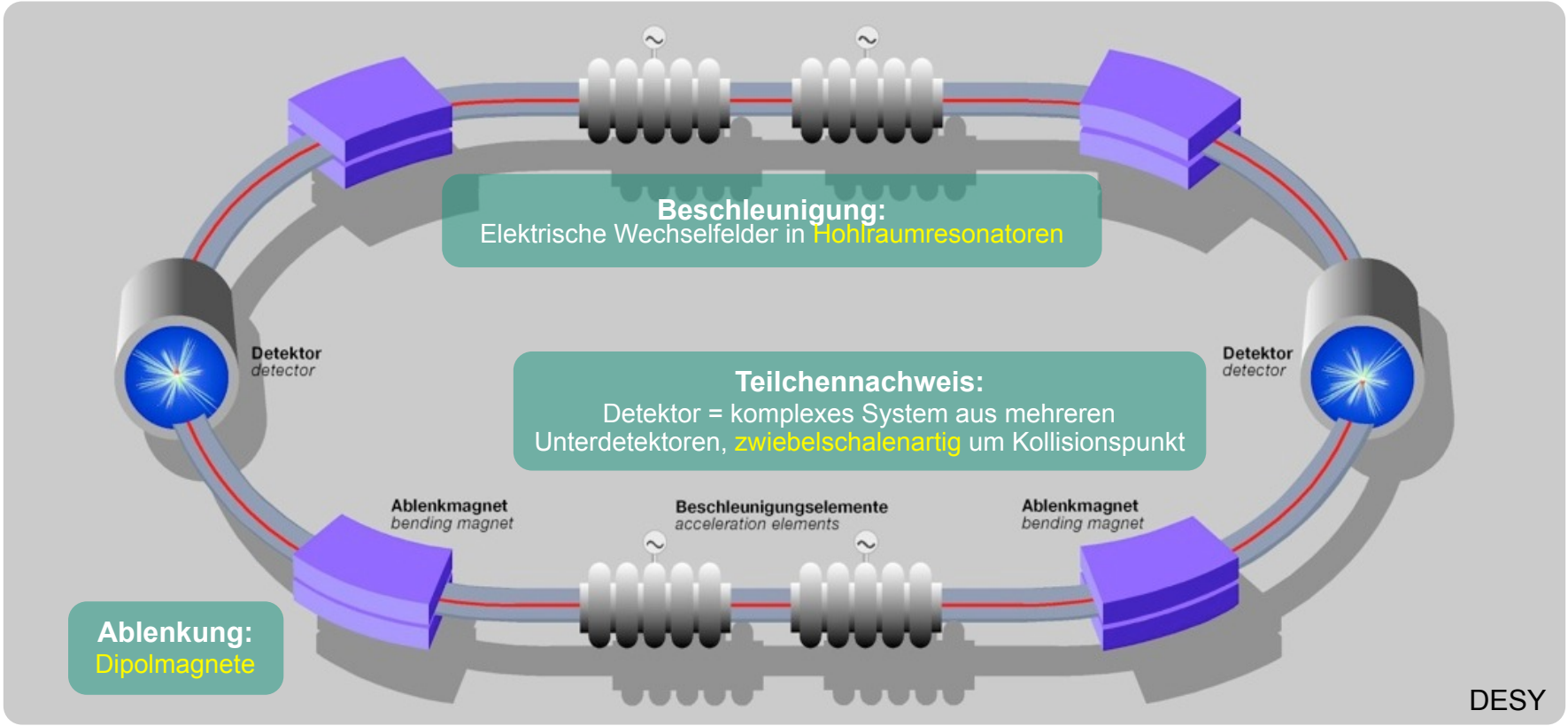
[http://www.scifun.ed.ac.uk/]

Teilchenkollisionen

Netzwerk Teilchenwelt

- Schlüsselexperiment: Erzeugung neuer Teilchen in hochenergetischen **Teilchenkollisionen**
- Relativitätstheorie: $E = mc^2$ **Energie** umgewandelt in **Masse**

Prinzip des Teilchenbeschleunigers



Teilchenbeschleuniger

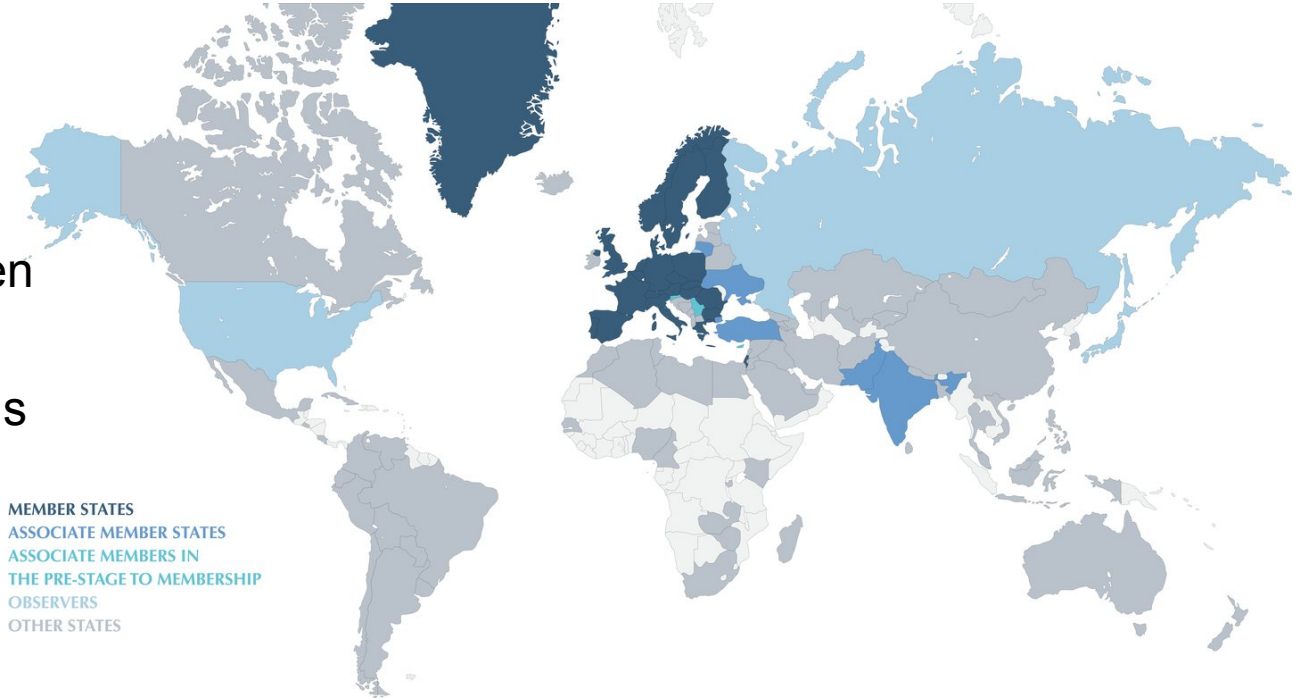
Large Hadron Collider LHC (CERN):

- Weltweit leistungsstärkster Beschleuniger, ca. 100 m unter der Erde, 27 km Umfang
- Protonen auf 6.5 TeV (entspricht 99.999999% der Lichtgeschwindigkeit) beschleunigt

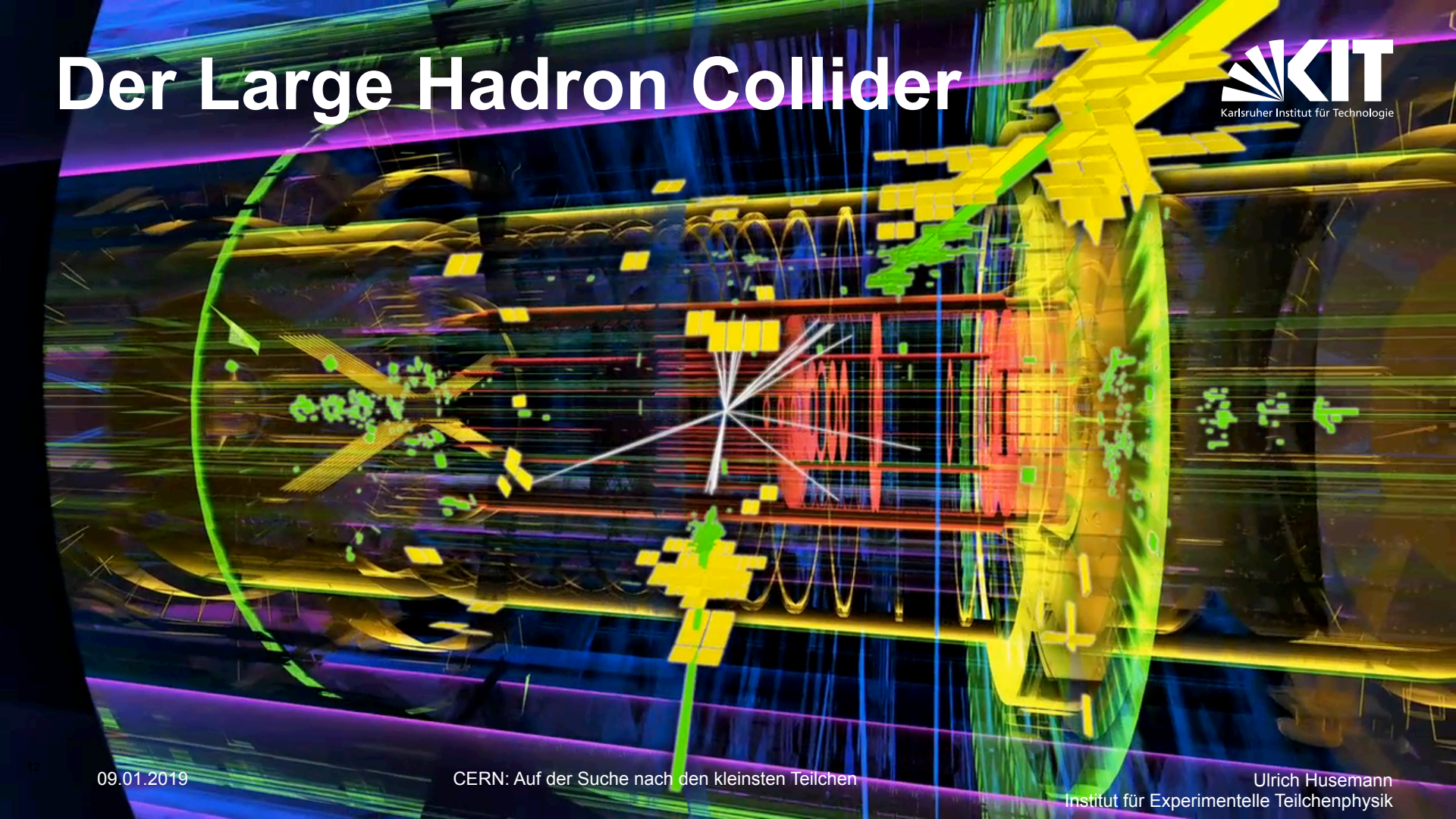
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

CERN – Wissenschaft für den Frieden

- Gründung: 1954
- CERN heute:
  - 22 Mitgliedsstaaten
  - 3300 Mitarbeiter
  - >12000 Nutzer aus >100 Nationen
  - Budget (2018): ca. 1200 MSFR

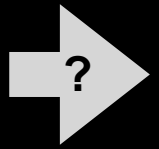


Der Large Hadron Collider



Fotokamera 2.0?

Juhanson, Rolleiflex_camera.jpg, CC BY-SA 3.0

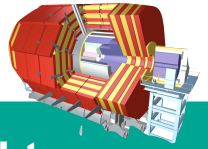


www.canon.de

- „Interessante" Elementarteilchen **sehr selten** produziert
  → häufige Wiederholung der Teilchenkollisionen
- **Überlagerung** durch „uninteressante" Prozesse
  → hohe räumliche und zeitliche **Auflösung**

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

Anforderungen



	Digitalkamera	Detektor	
Auflösung	50 Megapixel	140 „Megapixel”	✅
Pixelgröße	4,1×4,1 μm^2	≥ 150×100 μm^2	✅
Bilder pro Sekunde	5	40 Millionen	❌
Automatische Auswahl der besten Bilder	nein	ja	❌
Lebensdauer am LHC	1–2 Monate	10 Jahre	❌

→ nur mit speziellen **Eigenentwicklungen** realisierbar

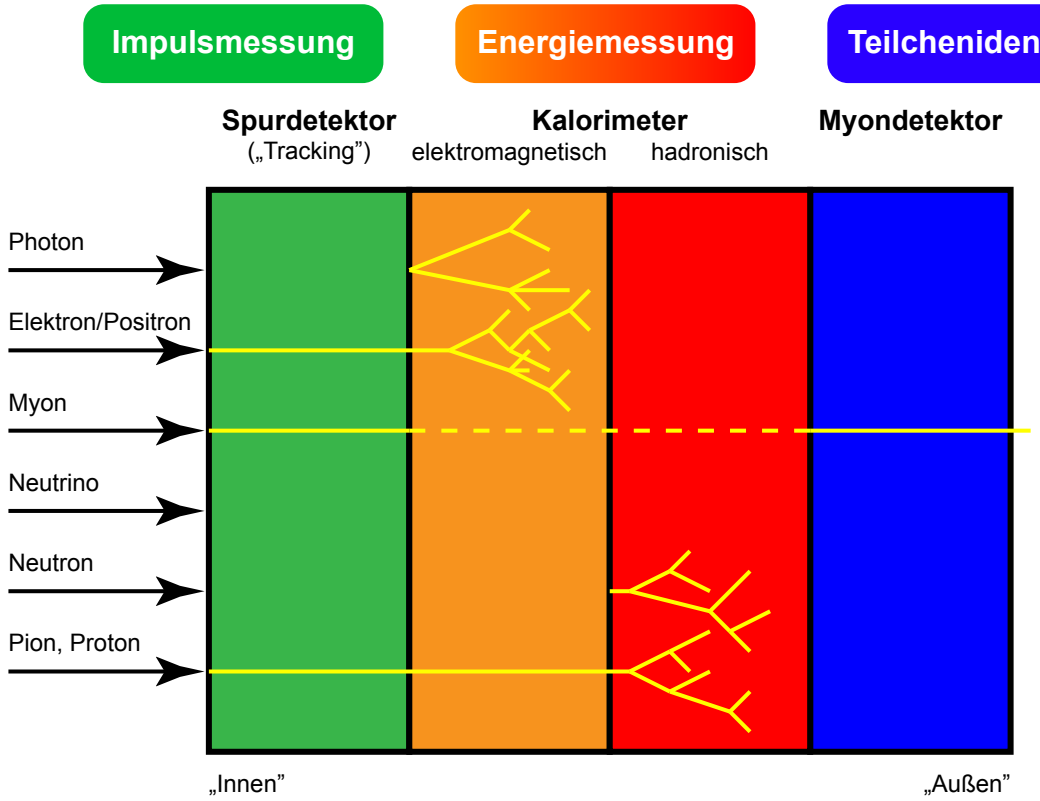
Messprogramm am LHC

- Aufgabe: messe für so viele Kollisionsprodukte wie möglich so viele Eigenschaften wie möglich
  - **Ort** der Entstehung
  - **Impuls** (= Masse·Geschwindigkeit)
  - **Bewegungsenergie**
  - **Teilchentyp**
- Aufbau der Detektoren: **Zwiebelschalen**
  - Kein einzelner Detektor kann alle Eigenschaften messen → geschickte **Kombination** von Detektoren
  - Möglichst alle stabilen Teilchen nachweisen → größtmögliche **Abdeckung**

www.exquisine.de

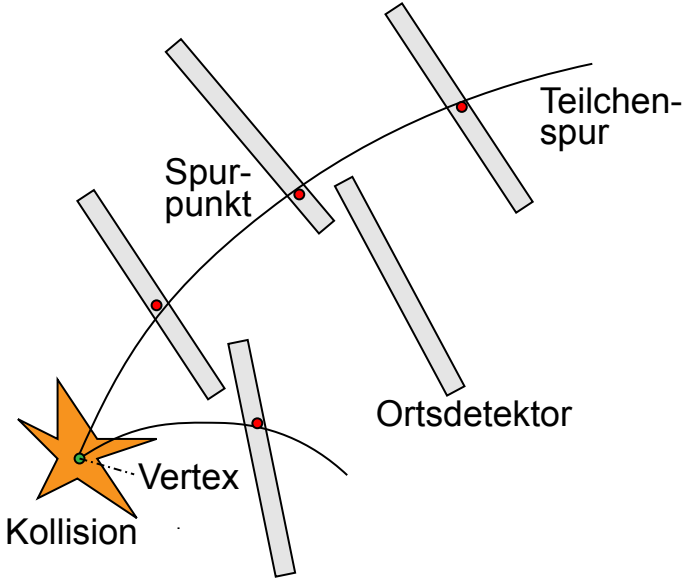
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

Teilchendetektoren



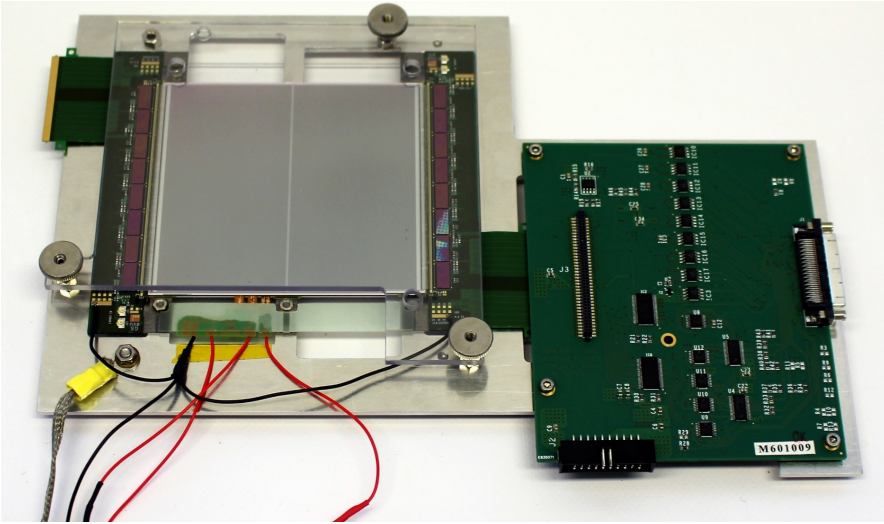
wichtig: wie **reagieren** Teilchen mit Detektormaterial?

Detektoren: Beispiel Spurdetektor

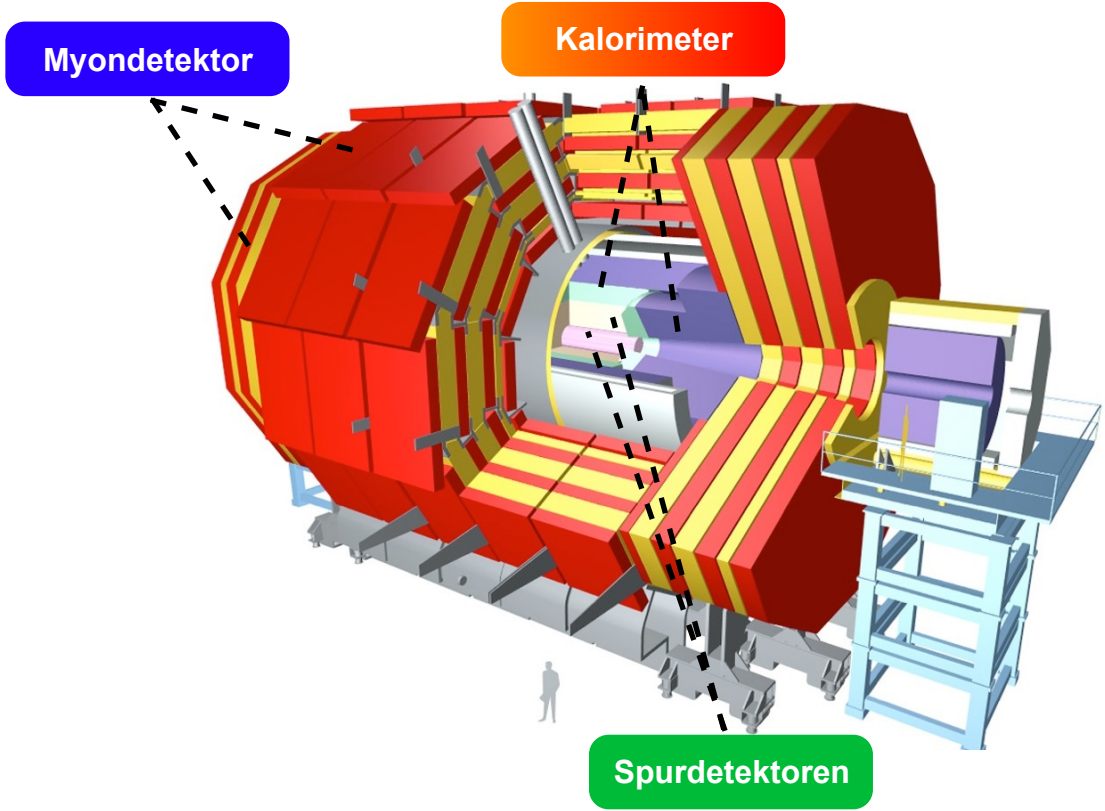


- Spuren geladener Teilchen im Magnetfeld: Messung von **Impuls** und **Entstehungsort**

- Technologie: **Siliziumdetektoren** = fein segmentierte Halbleiter-dioden (100 µm breite Streifen)



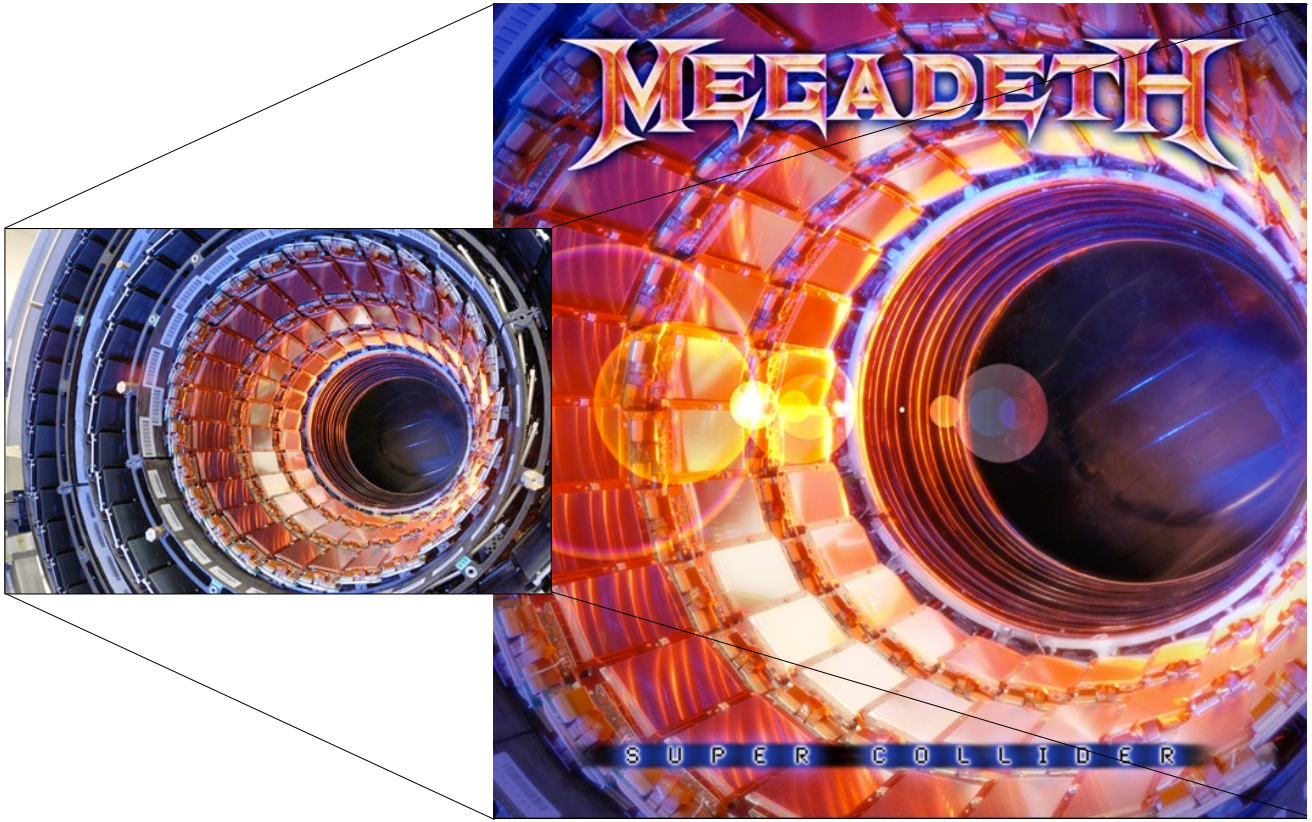
Teilchendetektoren: Beispiel CMS



CMS-Fakten:

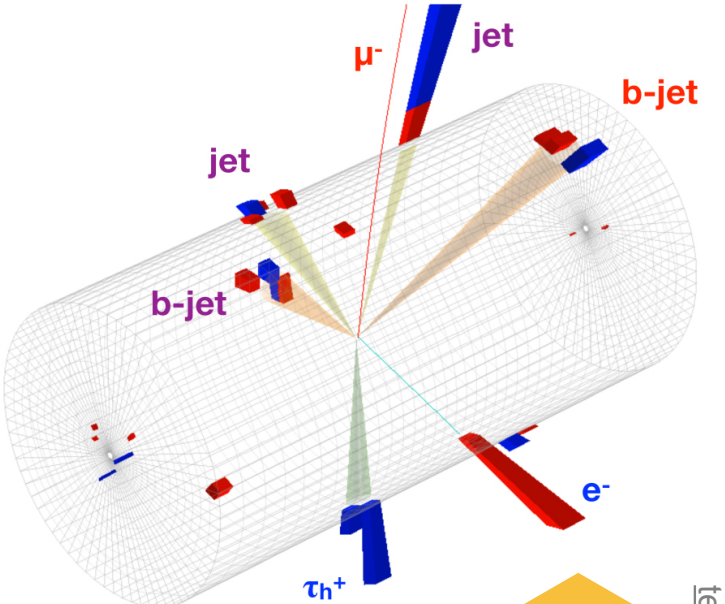
* 21 m lang, 15 m hoch
* Gewicht: 14.000 Tonnen
* 140 Millionen Elektronikkanäle

CMS-Spurdetektor und Heavy Metal



Wissenschaftliches Highlight 2018

- Frage: **wie wechselwirkt das Higgs-Boson** mit anderen Elementarteilchen?
- Beispiel: **Top-Quark** (massivstes bekanntes Elementarteilchen)
  - Suche Kollisionen, in denen Top-Quarks und Higgs-Bosonen entstehen: **extrem selten**, eine von 200 Milliarden Kollisionen
  - Technologie: **geschickte Algorithmen** zum Durchsuchen riesiger Datenmengen (u. a. moderne Deep-Learning-Algorithmen)
  - Erster **direkter Nachweis der Higgs-Top-Wechselwirkung**: Mitte 2018

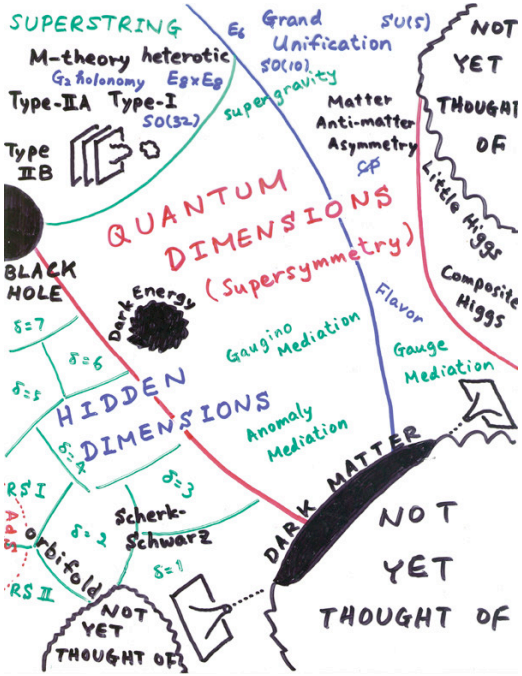


tensorflow.org

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

Physik am LHC: Ausblick

- Breites Forschungsprogramm:
  - Genaue Untersuchung des **Higgs-Bosons** und anderer bekannter Teilchen
  - Suche nach **neuer Physik**: gibt es unbekannte neue Teilchen oder Kräfte?
- Zeitplan:
  - 2015–2018: **zweite Datennahmeperiode** des LHC
  - 2019/2020: lange **Wartungspause**
  - Derzeitige Planung: **LHC-Betrieb bis 2038**
    → höhere **Strahlintensität**
    → **Neubau** zentraler Detektorkomponenten

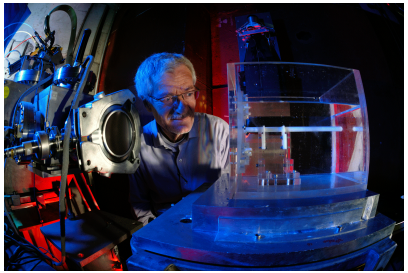


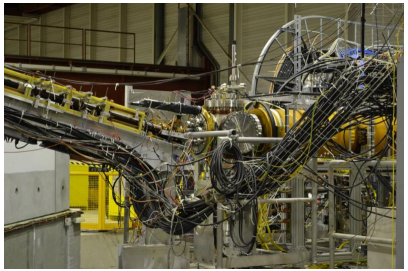
H. Murayama

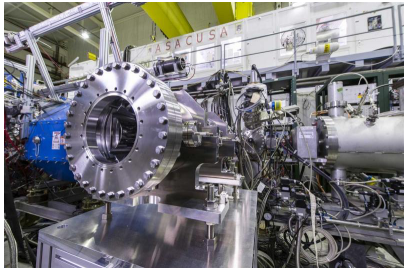
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

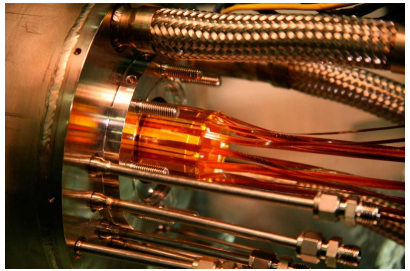
CERN: Forschung mit Antimaterie

- ACE – **biologische Effekte** von Antiprotonen
- AEGIS: fällt **Antimaterie im Gravitationsfeld** nach oben oder nach unten?
- ATRAP/ALPHA: Vergleich von **Antiwasserstoff** mit Wasserstoff
- ASACUSA: Spektroskopie von Antiwasserstoff und antiprotonischem Helium



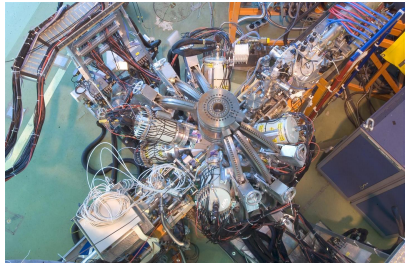






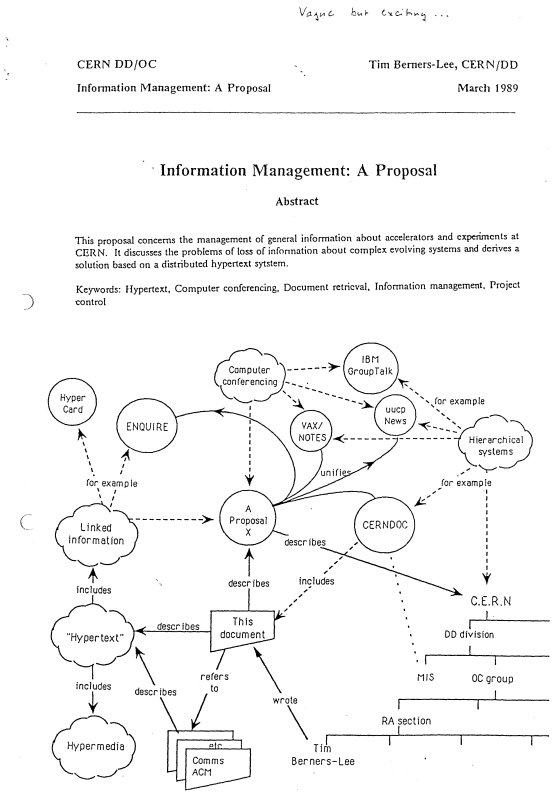
CERN: Weitere Forschungsgebiete

- CLIC: neuer **Linearbeschleuniger** für e^+e^--Kollisionen
- FCC: neuer **Kreisbeschleuniger** für e^+e^-- und Proton-Proton-Kollisionen
- AWAKE: Beschleunigung in **Plasmafeldern**
- CERN-Neutrinoplattform: Forschung und Entwicklung für neue **Neutrinodetektoren**
- ISOLDE: Physik mit **schweren Nukliden**
- CLOUD: Einfluss kosmischer Strahlung auf unser **Wetter**?



CERN: Spin-Offs

- Die Geburt des **World Wide Web:**



Vague but exciting ...

CERN DD/OC — Tim Berners-Lee, CERN/DD

Information Management: A Proposal — March 1989

Information Management: A Proposal

Abstract

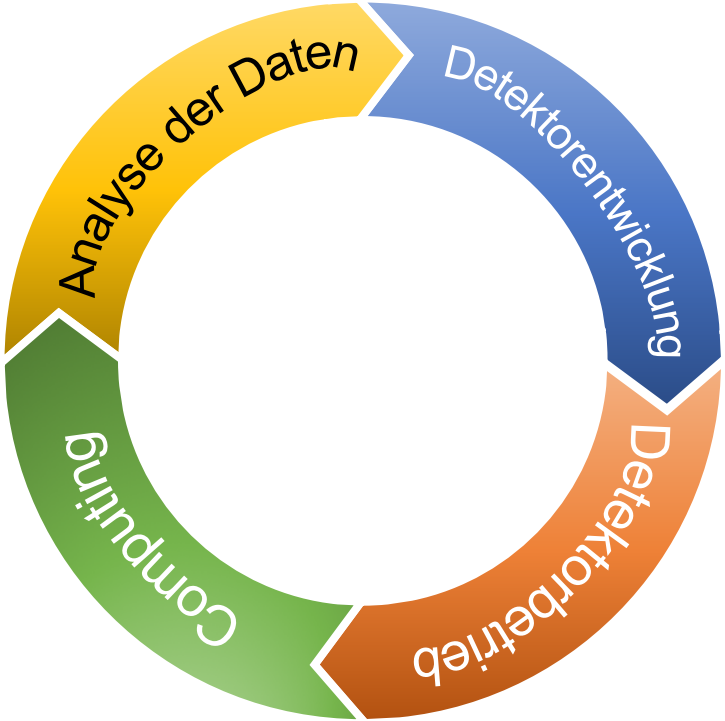
This proposal concerns the management of general information about accelerators and experiments at CERN. It discusses the problems of loss of information about complex evolving systems and derives a solution based on a distributed hypertext sytstem.

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

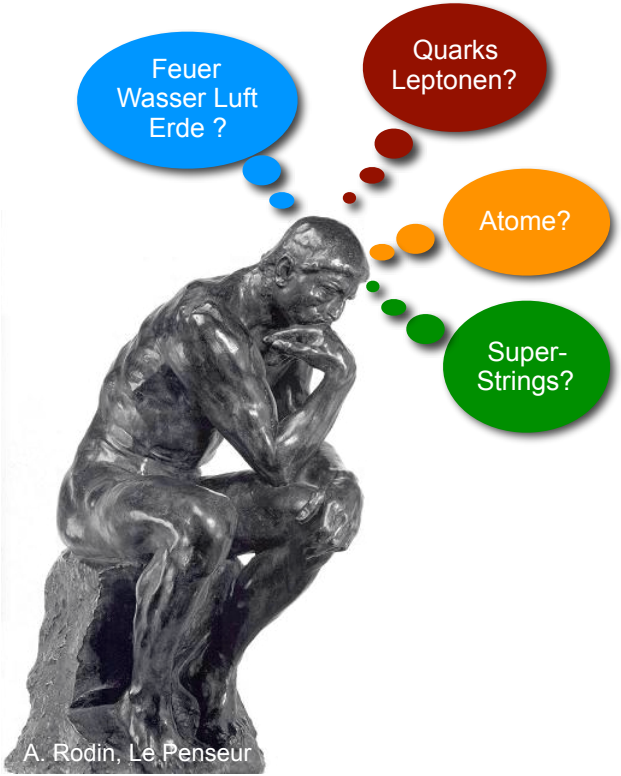
- **Bildgebende Verfahren**, z. B. in der Medizintechnik (PET, …)
- **Grid-Computing**, Software, …
- Innovative **Schweißverfahren**, **Kryotechnik**, …

KIT-Beiträge zu CERN-Experimenten

- Beiträge zu **zentralen Aspekten** des Großexperiments CMS am CERN:
  - Entwicklung neuer **Detektoren**
  - **Betrieb** des CMS-Experiments
  - **Verarbeitung und Speicherung** der Daten
  - **Analyse** der Daten



Faszination Teilchenphysik



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