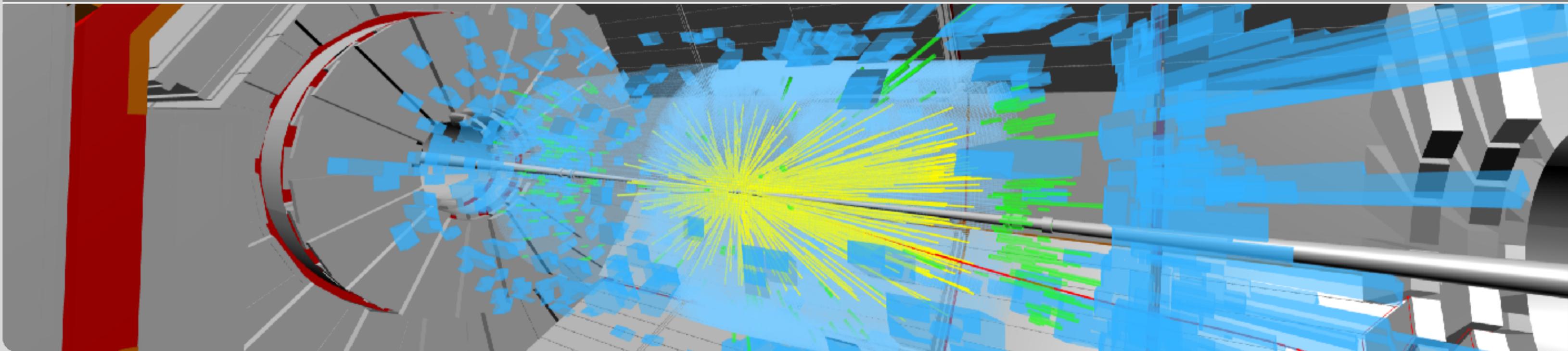


Rocket Science im Tunnel: Experimente der Teilchenphysik

Karlsruhe, 23.10.2019

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



Wer bin ich?

Promotion

Siegen 2005

HERA-B-Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY



UNIVERSITY of
ROCHESTER



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

Genauso spannend wie Rocket Science...



[teepublic.com](https://www.teepublic.com)

... und ähnlich kompliziert!

- Große Fragen: wir suchen nach **fundamentalen Teilchen und Kräften** in der Natur
- Große Maschinen: zur Beantwortung dieser Fragen benötigen wir **riesige Teilchenbeschleuniger und aufwändige Experimente**

Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?



Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



Ergebnisse: Wo stehen wir heute?

Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?

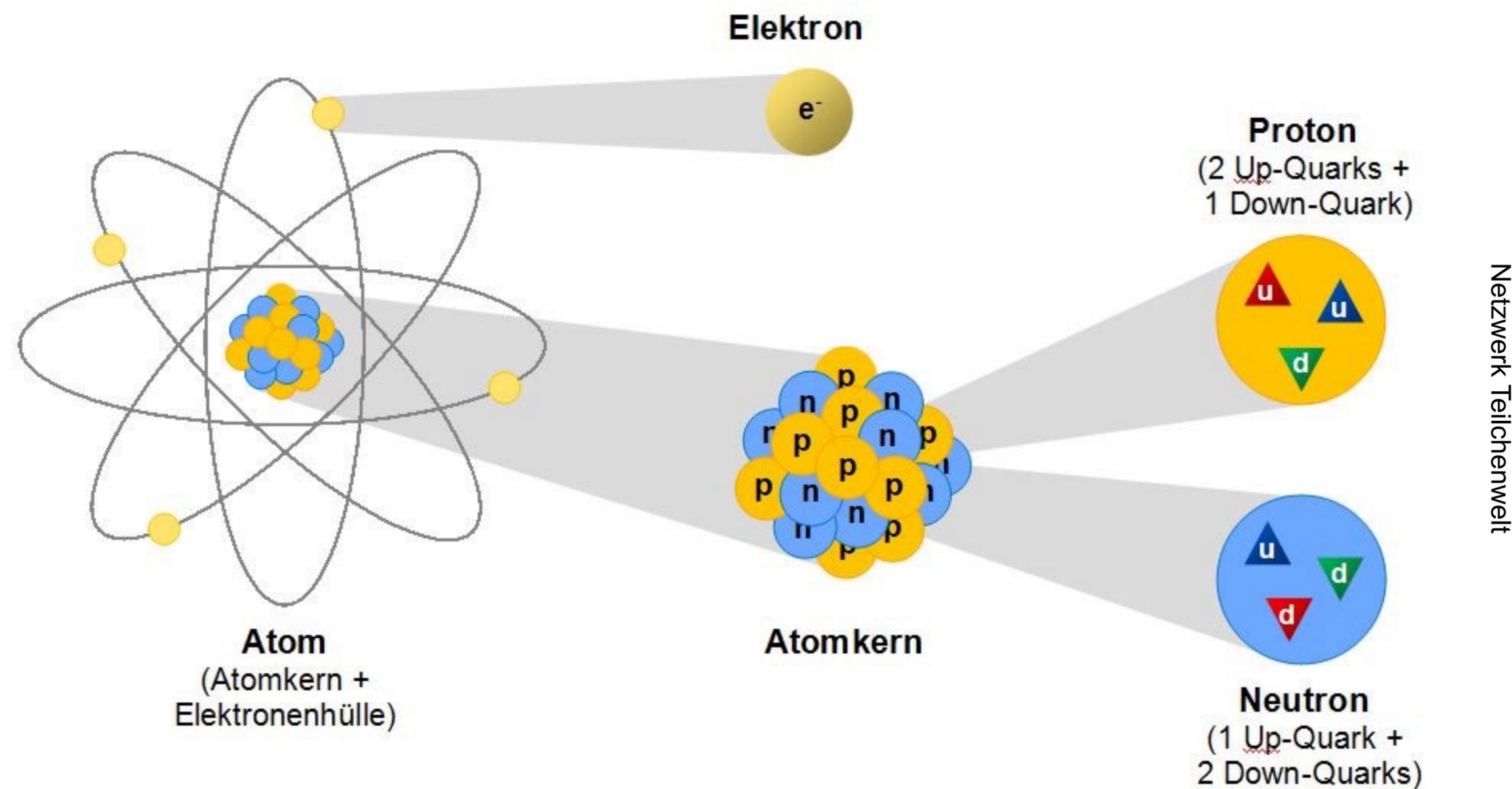


Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



Ergebnisse: Wo stehen wir heute?

Erforschung des Atoms: Größenskalen



$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

10^{-14} m

$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

Physikalische Grundlagen

- Spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905):
 - **Relativitätsprinzip**: physikalische Gesetze sind in allen Inertialsystemen gleich
 - Universelle **Grenzwgeschwindigkeit**: 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

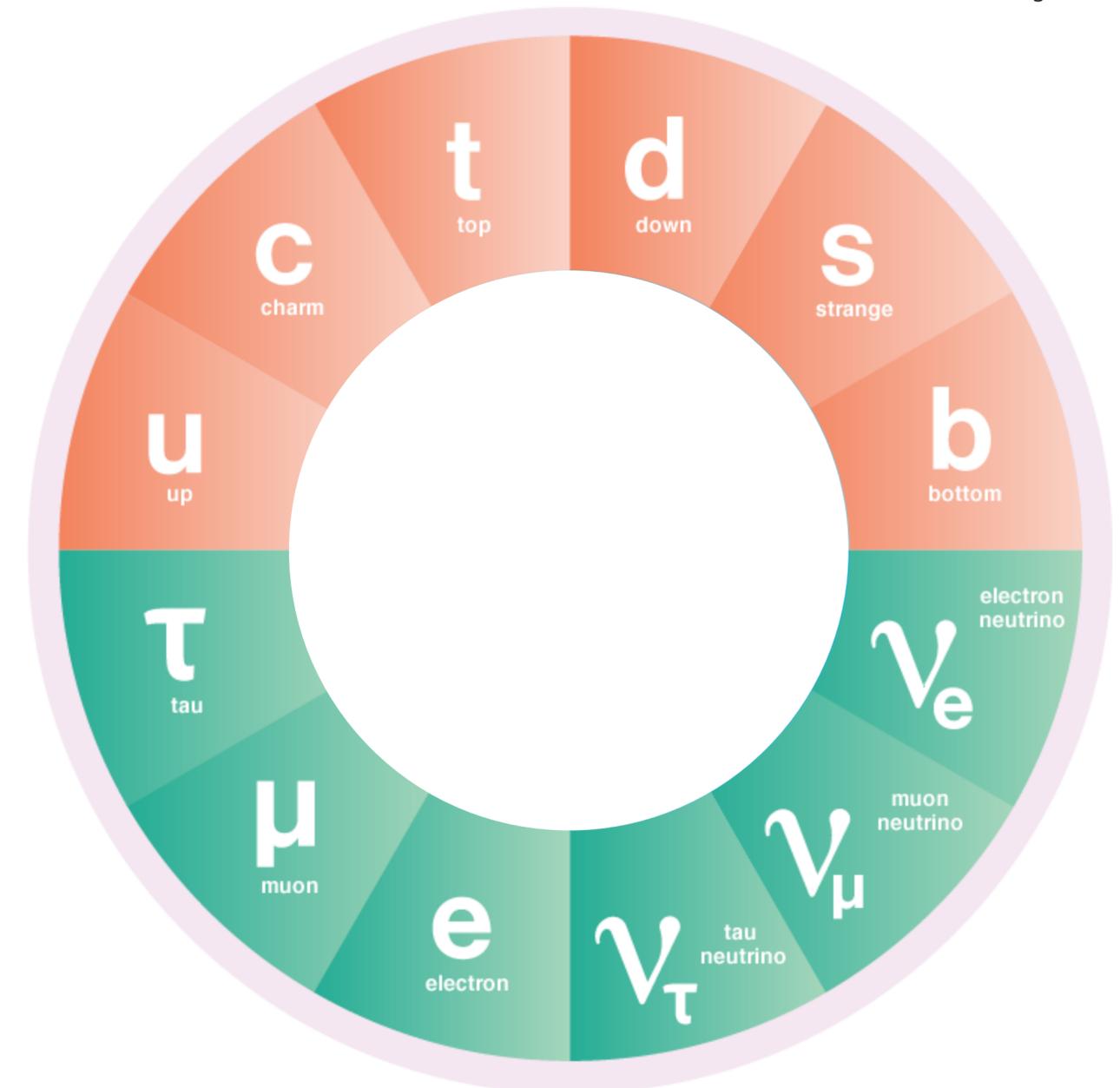


Werner Heisenberg

[nobelprize.org](https://www.nobelprize.org)

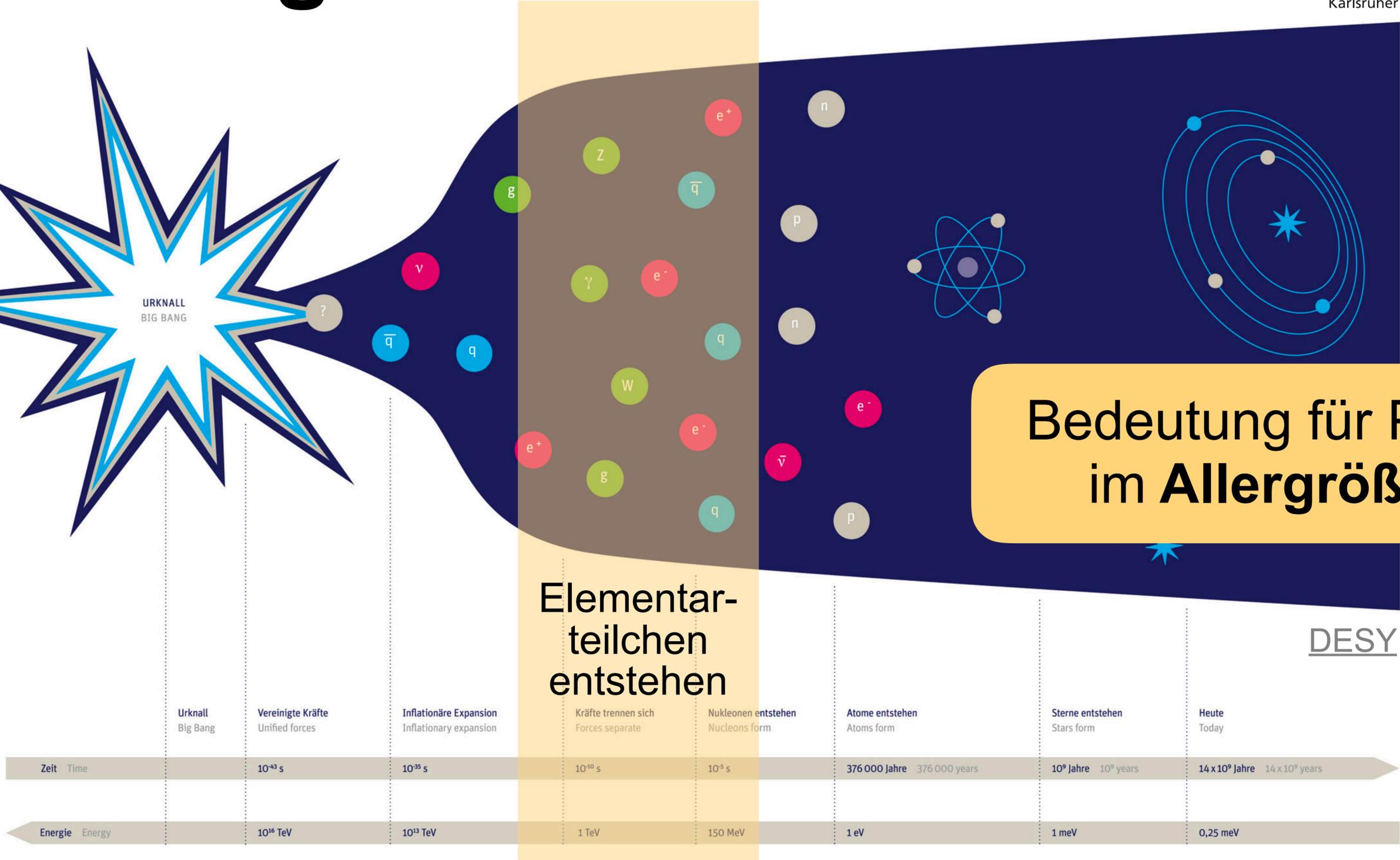
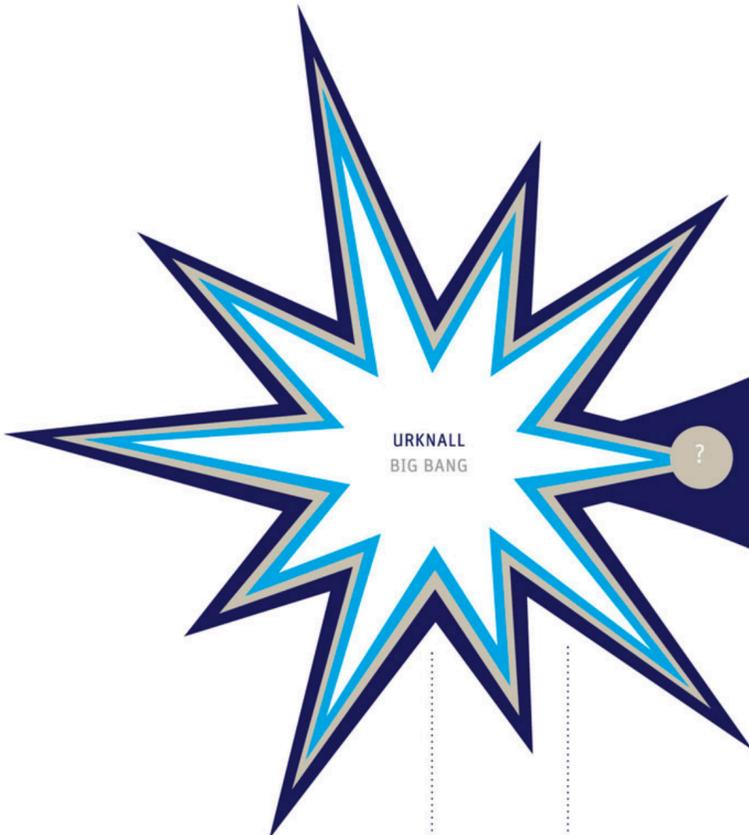
Teilchenzoo 2019

- Aktuelle Vorstellung von 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
- Alle Teilchen **entdeckt** und (relativ) **genau vermessen**



symmetrymagazine.org

Entwicklung des Universums



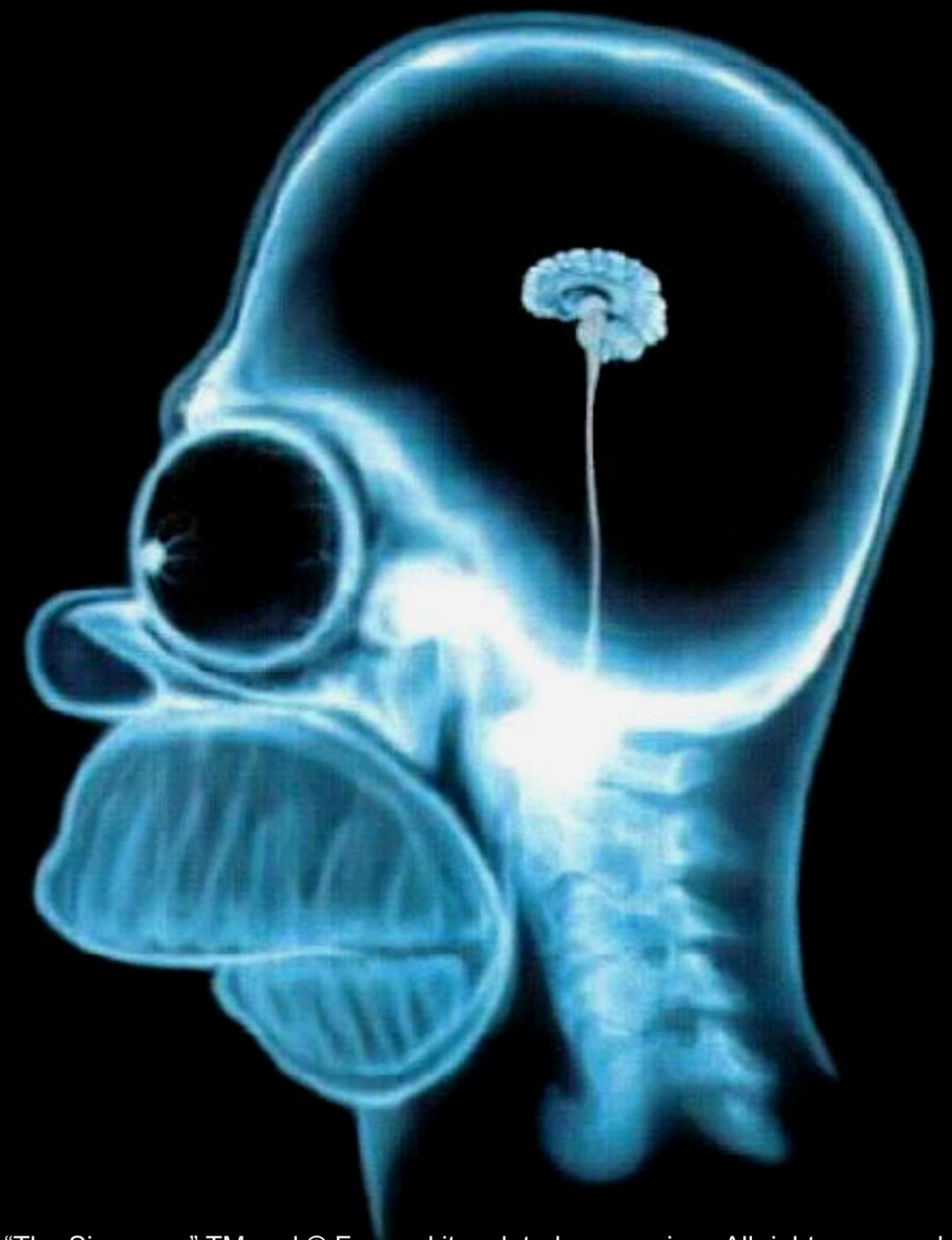
Bedeutung für Physik
im **Allergrößten**

Zeit →
Energie ←

Big Science – Small Brains?

■ Offene Fragen der Teilchenphysik 2019:

- Wodurch erhalten Elementarteilchen ihre (träge) **Masse**?
- Woraus besteht die **Dunkle Materie**, die wir im Weltraum beobachten?
- Was ist **Dunkle Energie**?
- Lassen sich die fundamentalen Kräfte weiter **vereinheitlichen**?
- Welche Ursache hat das **Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie** im Universum?



Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?



Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



Ergebnisse: Wo stehen wir heute?

Beschleuniger und Detektoren

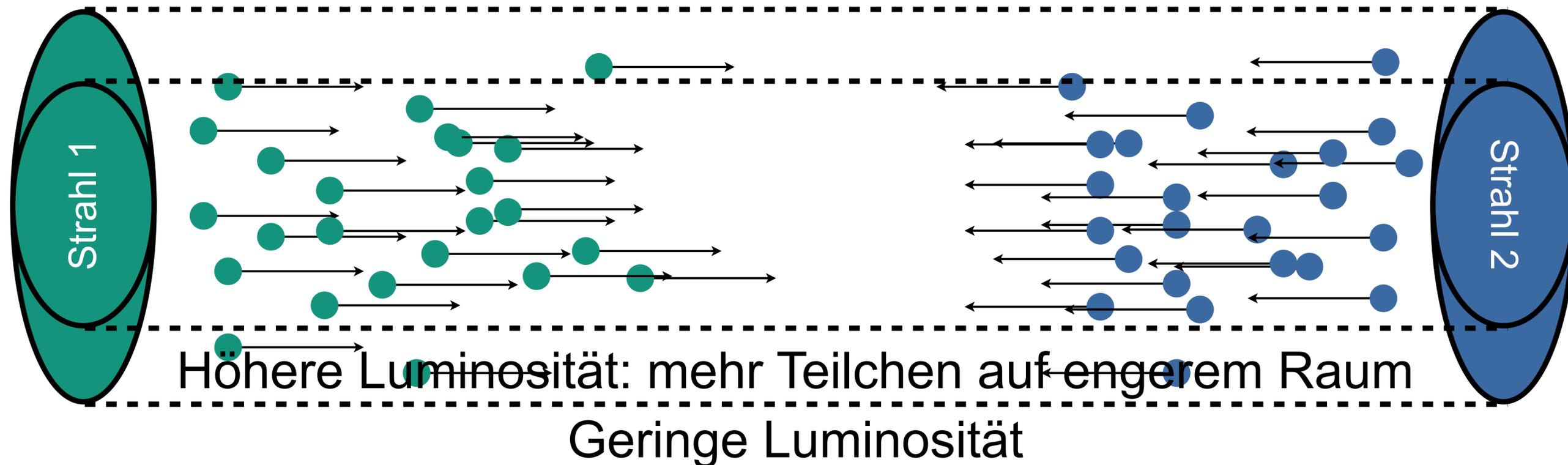
- Rolle von **Teilchenbeschleunigern**:
 - Neue Teilchen in hochenergetischen **Teilchenkollisionen**
 - Relativitätstheorie: $E = mc^2$
→ **Energie** umgewandelt in **Masse**
- Rolle von **Teilchendetektoren**:
 - Schwere Elementarteilchen **sehr kurzlebig**
→ Nachweis der **Zerfallsprodukte**
 - Ziel: möglichst **vollständiger Nachweis** aller Kollisionprodukte



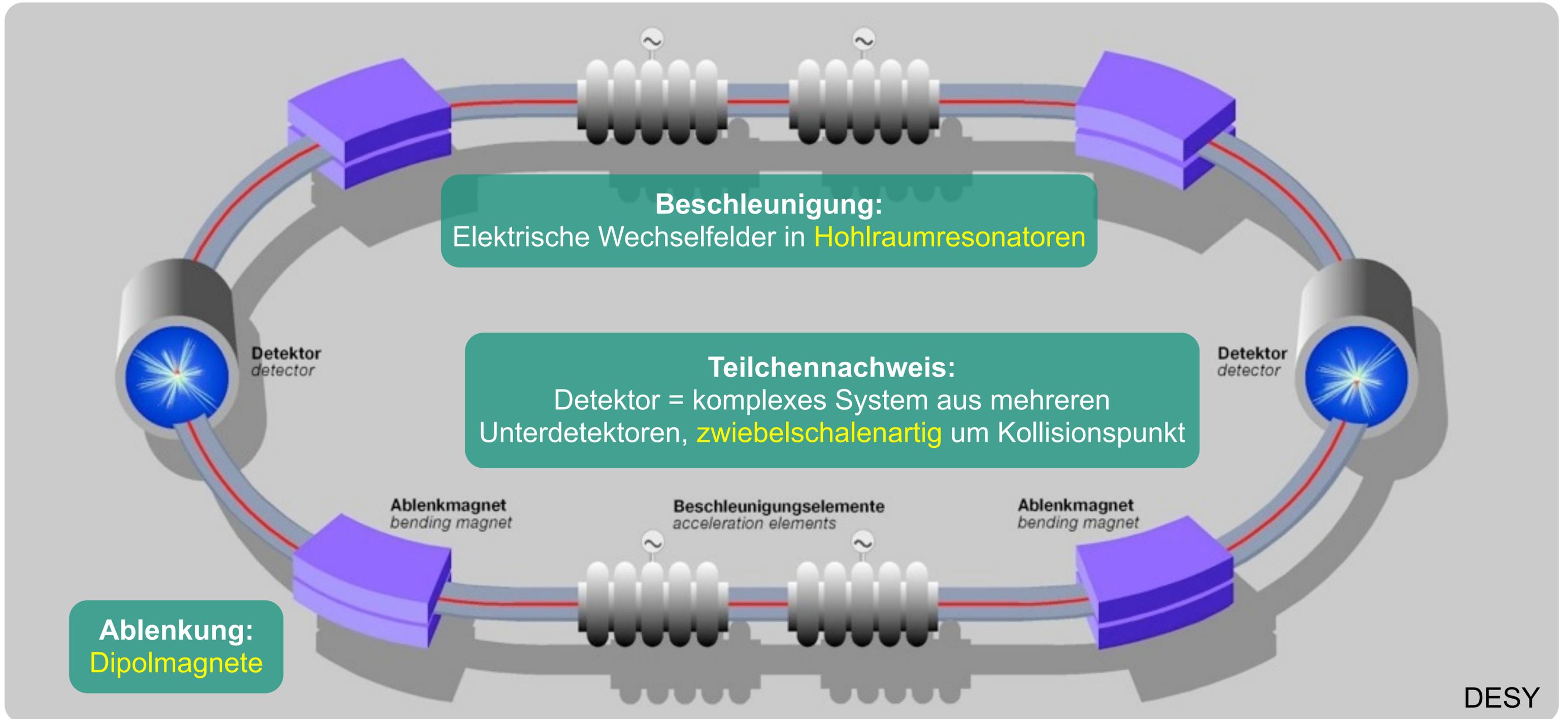
Bildquelle: Netzwerk Teilchenwelt

Höher, schneller, weiter...

- Höhere **Energie** → erzeuge **massivere** neue Teilchen
- Höhere **Luminosität** („Leuchtkraft“) → erhöhe Rate **seltener** Prozesse → viele Teilchen treffen sich auf engem Raum



Prinzip des Teilchenbeschleunigers



DESY

Teilchenbeschleuniger

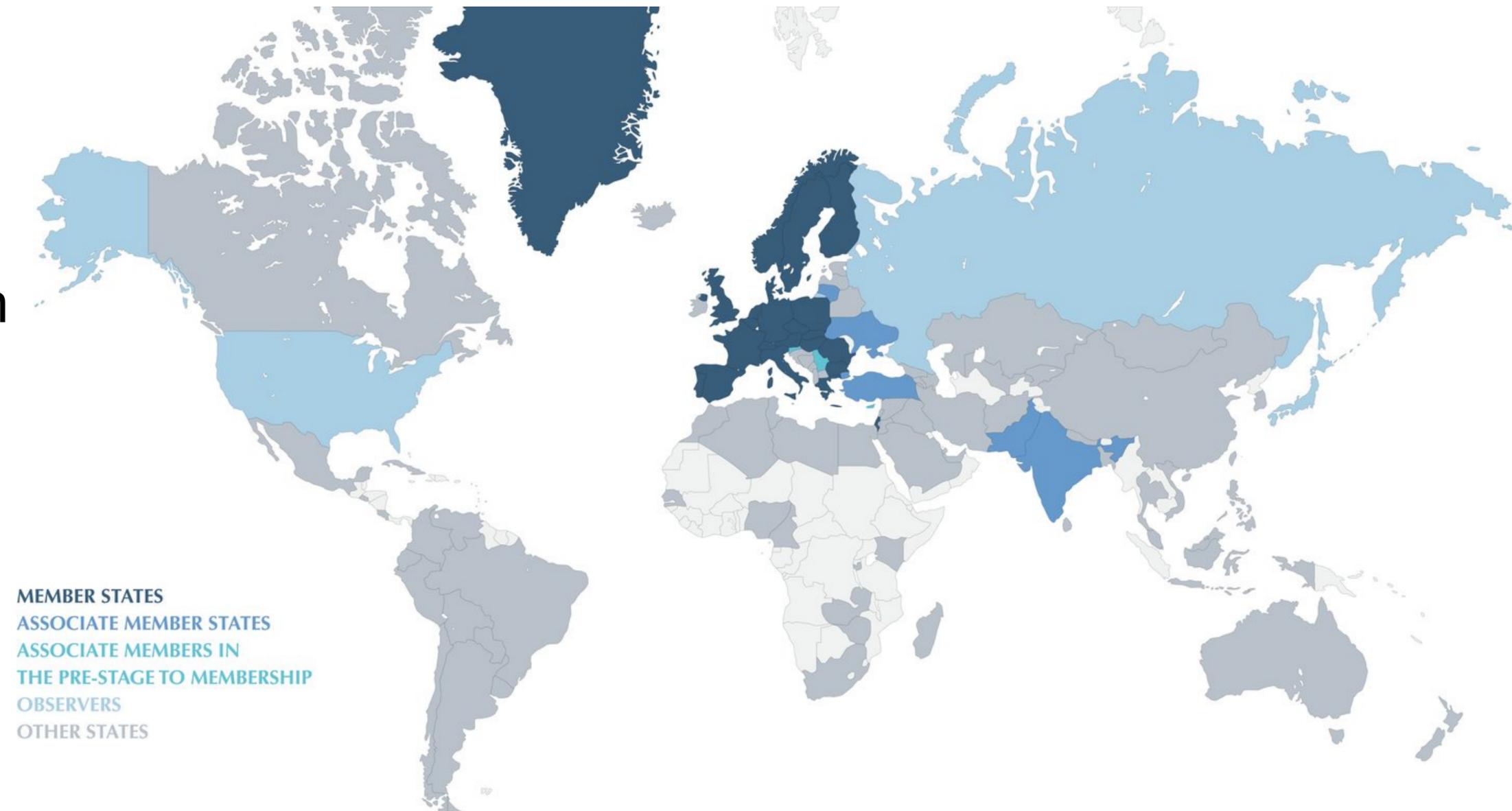


Large Hadron Collider LHC (CERN):

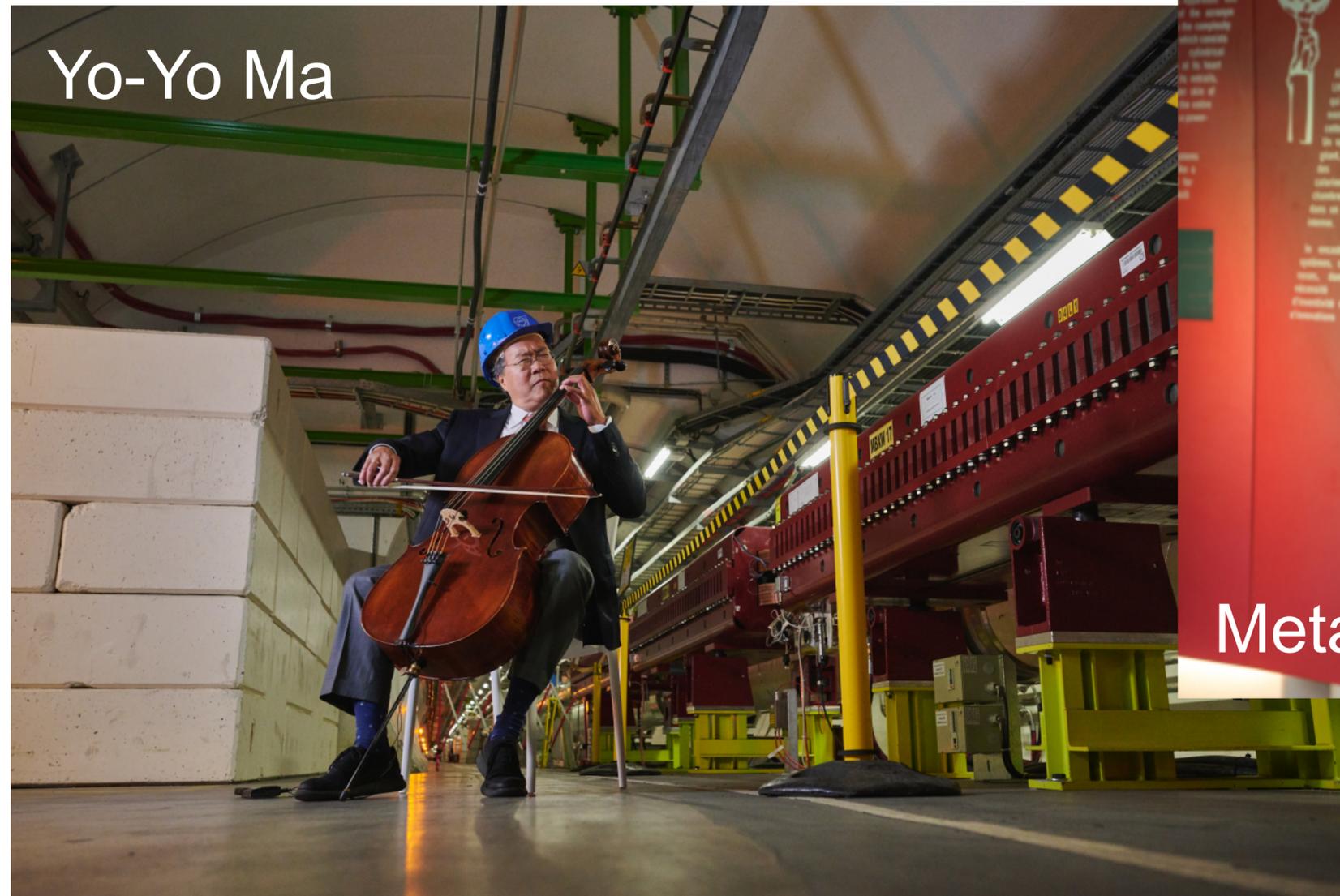
- Weltweit leistungsstärkster Beschleuniger, 27 km Umfang, ca. 100 m unter der Erde
- Protonen auf 6,5 TeV (= 99.999999% der Lichtgeschwindigkeit) beschleunigt

CERN – Wissenschaft für den Frieden

- Gründung: 1954
- CERN heute:
 - 23 Mitgliedsstaaten
 - 3300 Mitarbeiter
 - >12000 Nutzer aus >100 Nationen
 - Budget (2019): ca. 1300 MSFR



Kulturschaffende im Tunnel...



Yo-Yo Ma

<https://cds.cern.ch/images/CERN-PHOTO-201909-233-2>



Metallica

<https://cds.cern.ch/record/2313014>

außerdem: Slayer, Roger Waters,
Tom Hanks, James Blunt, ...

Der Large Hadron Collider

Unsere Kamera: Teilchendetektoren

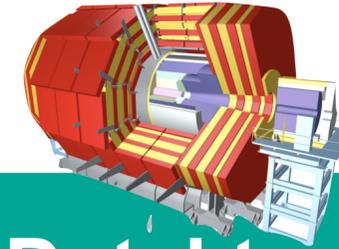


Juhanson, [Rolleiflex_camera.jpg](#), CC BY-SA 3.0

[canon.de](#)

- „Interessante“ Elementarteilchen **sehr selten** produziert
 - **Überlagerung** durch Teilchen aus viel häufigeren „uninteressanten“ Prozessen
- Anforderung: hohe räumliche und zeitliche **Auflösung**

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 Selektion der besten Bilder	nein	ja	✗
Lebensdauer am LHC	1–2 Monate	10 Jahre	✗

→ nur mit speziellen **Eigenentwicklungen** realisierbar

Teilchendetektoren: Messprinzip

Impulsmessung

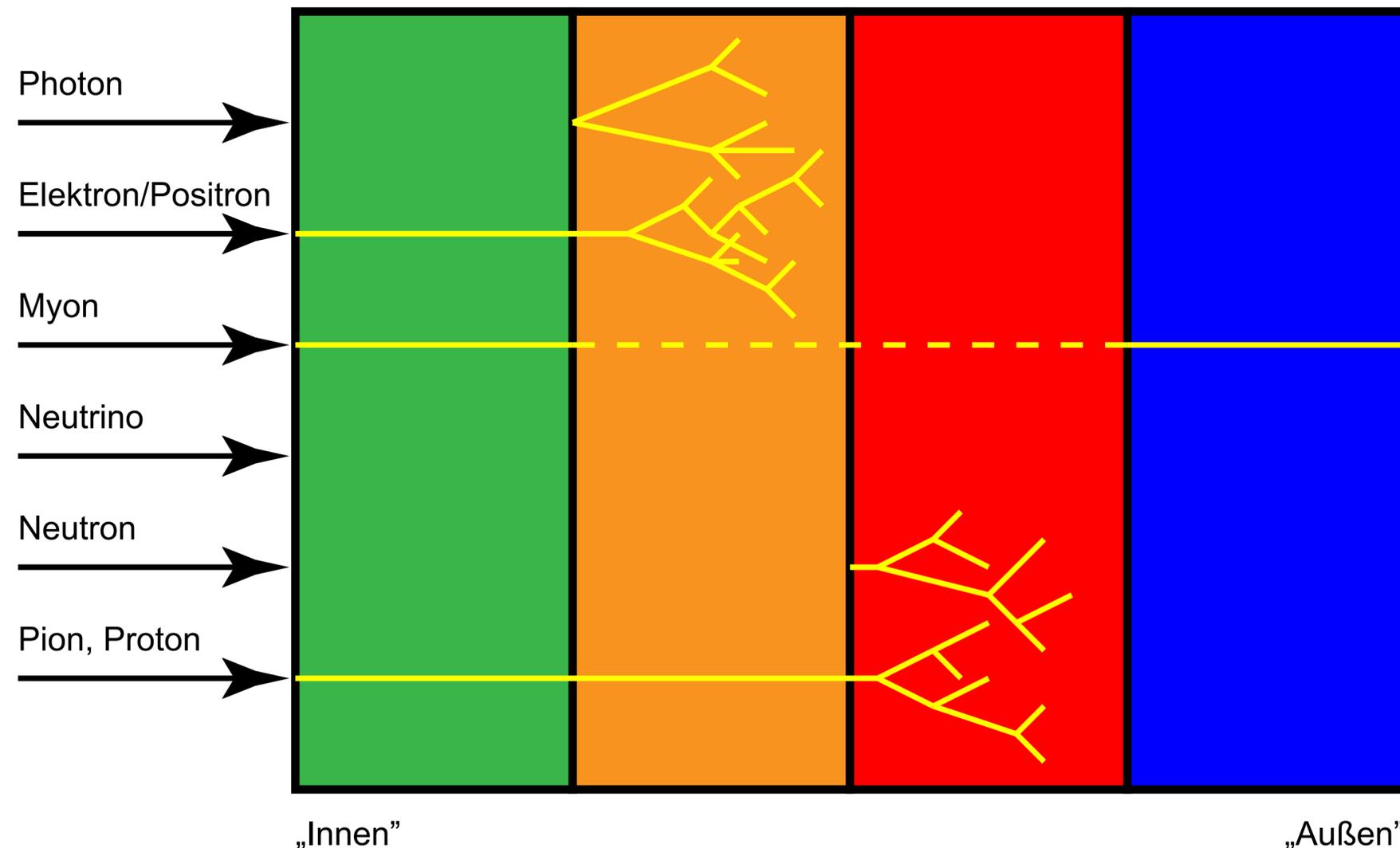
Energiemessung

Teilchenidentifikation

Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

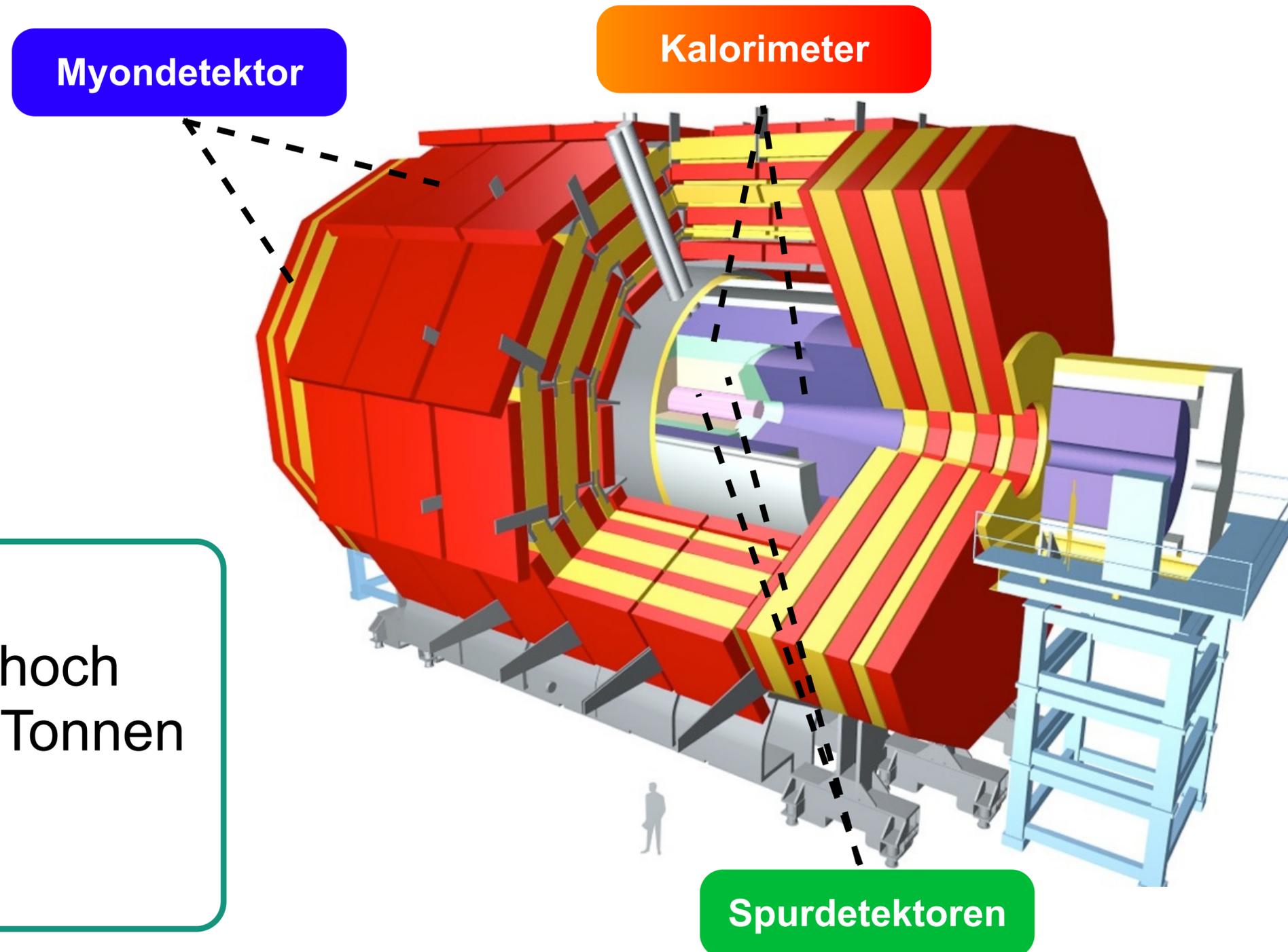


- Ziel: Energie, Impuls und Identität möglichst aller Kollisionsprodukte

- Aufbau: Schichten („Zwiebelschalen“)

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

Teilchendetektoren: Beispiel CMS



CMS-Fakten:

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

Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?



Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



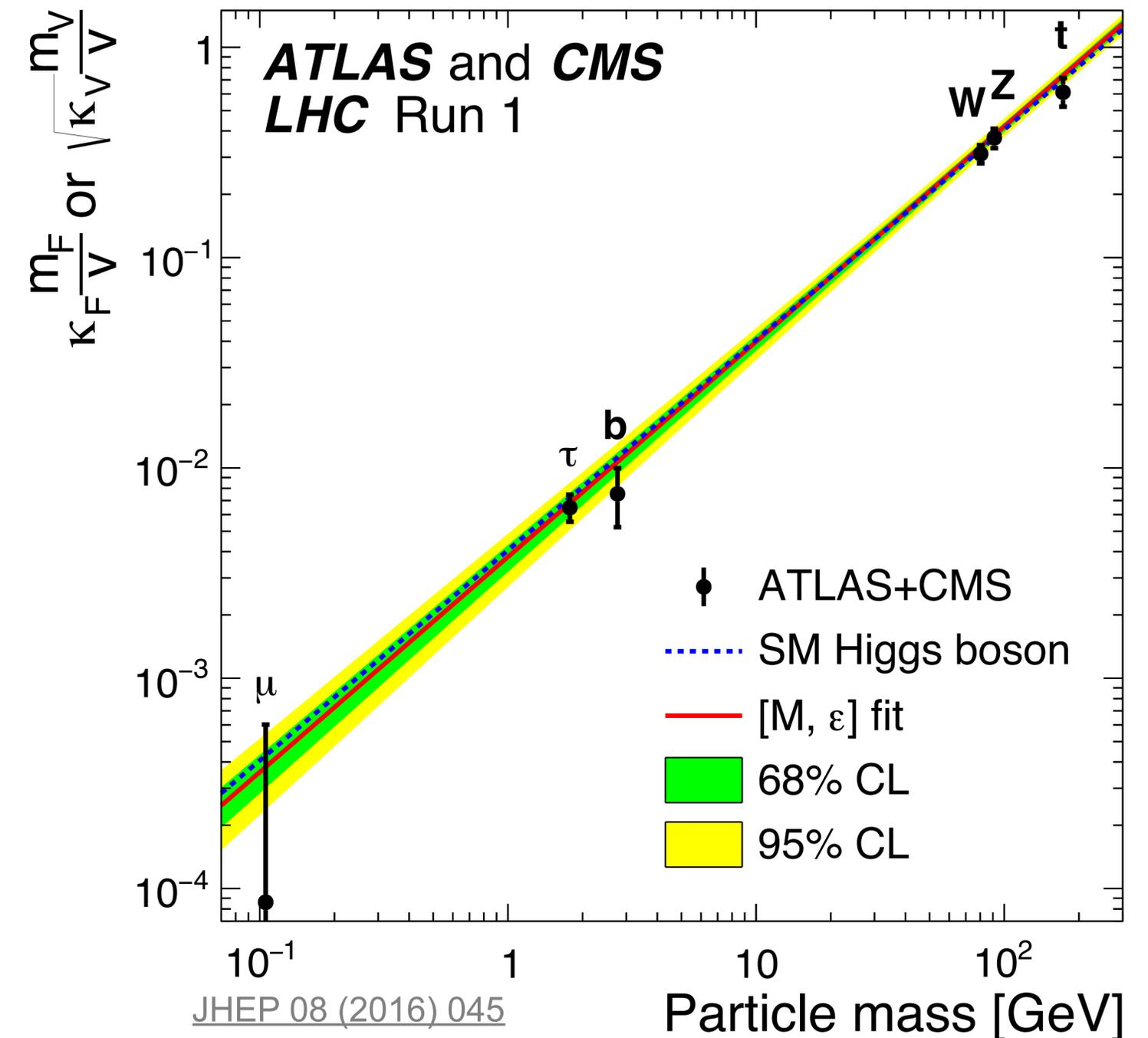
Ergebnisse: Wo stehen wir heute?



- KIT: Beiträge zu **zentralen Aspekten des Großexperiments CMS** am CERN
 - Entwicklung und Bau neuer **Detektorkomponenten**
 - **Betrieb** des Detektors
 - **Verarbeitung und Speicherung** der Daten
 - **Analyse und Interpretation** der Daten

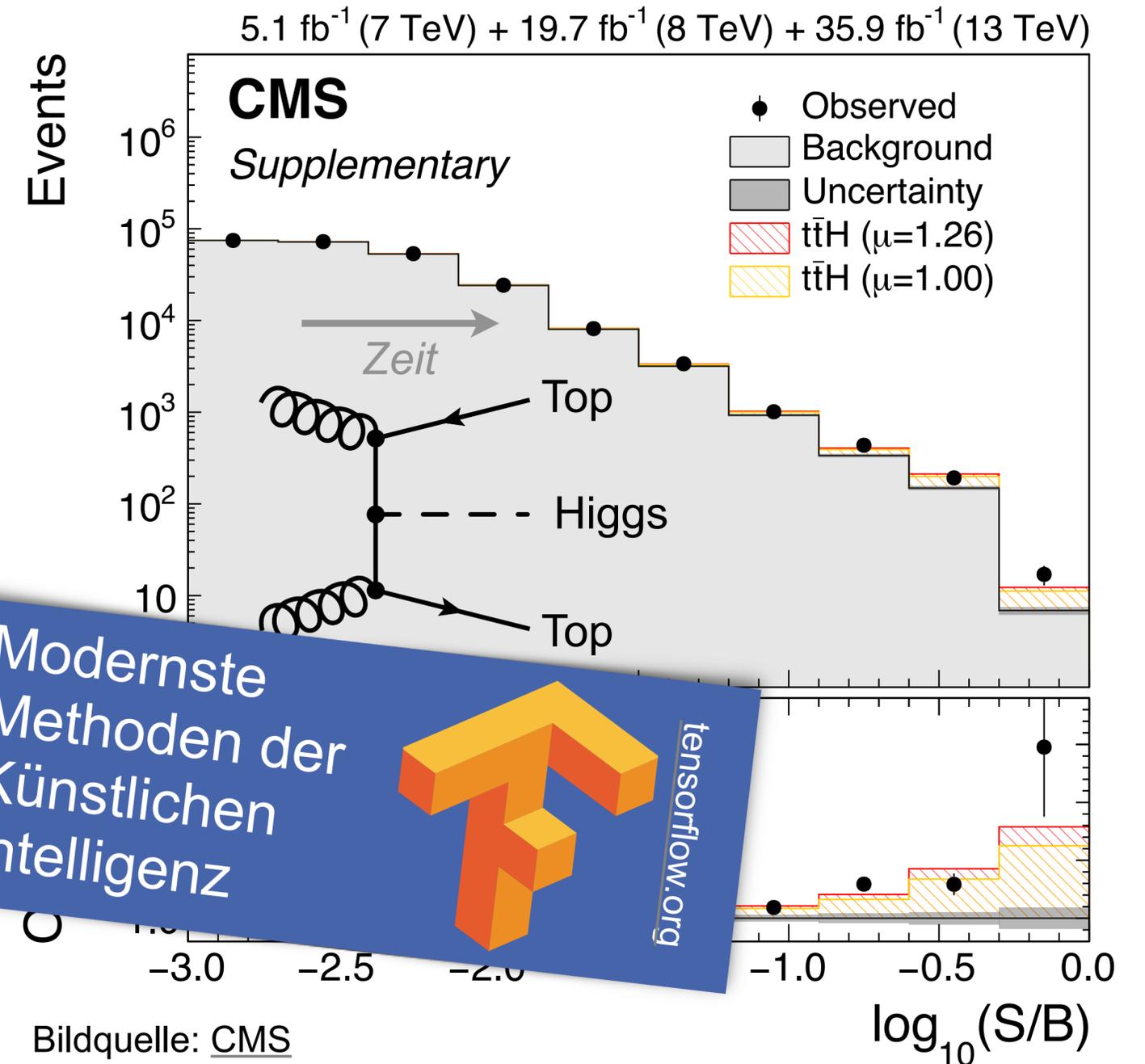
Wissenschaftliche Highlights

- 2016: Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse



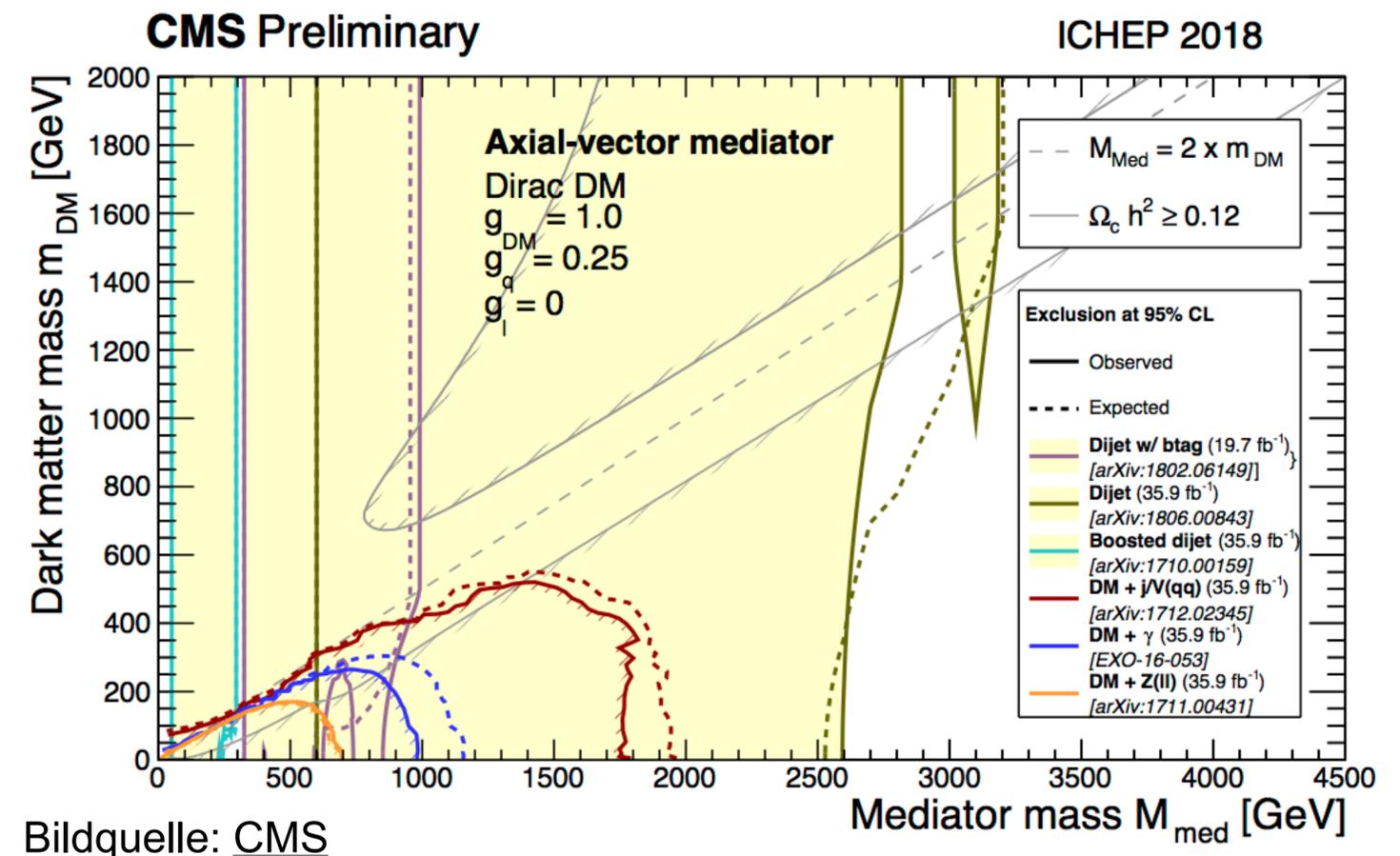
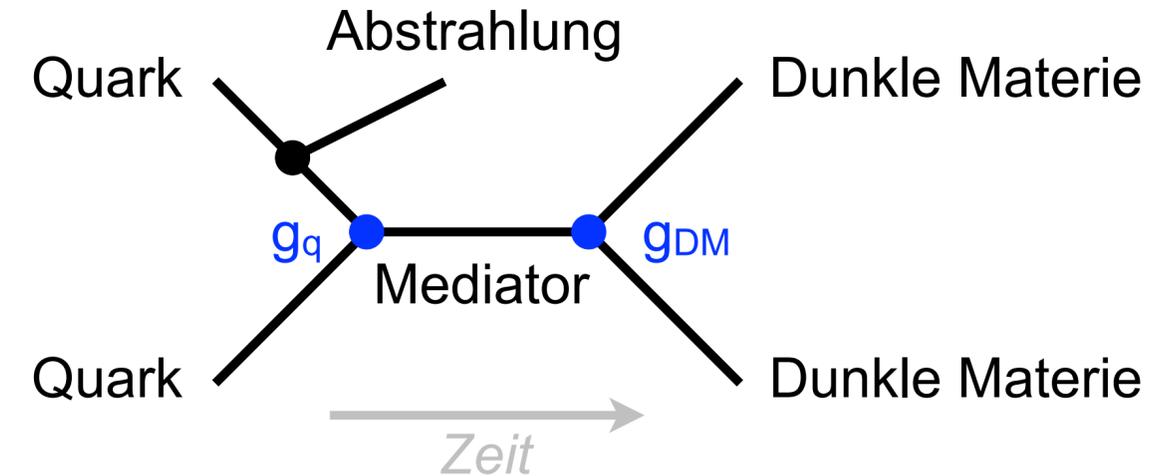
Wissenschaftliche Highlights

- 2016: Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse
- 2018: direkter Nachweis der Higgs-Wechselwirkung mit Top- und Bottom-Quarks und Tau-Leptonen



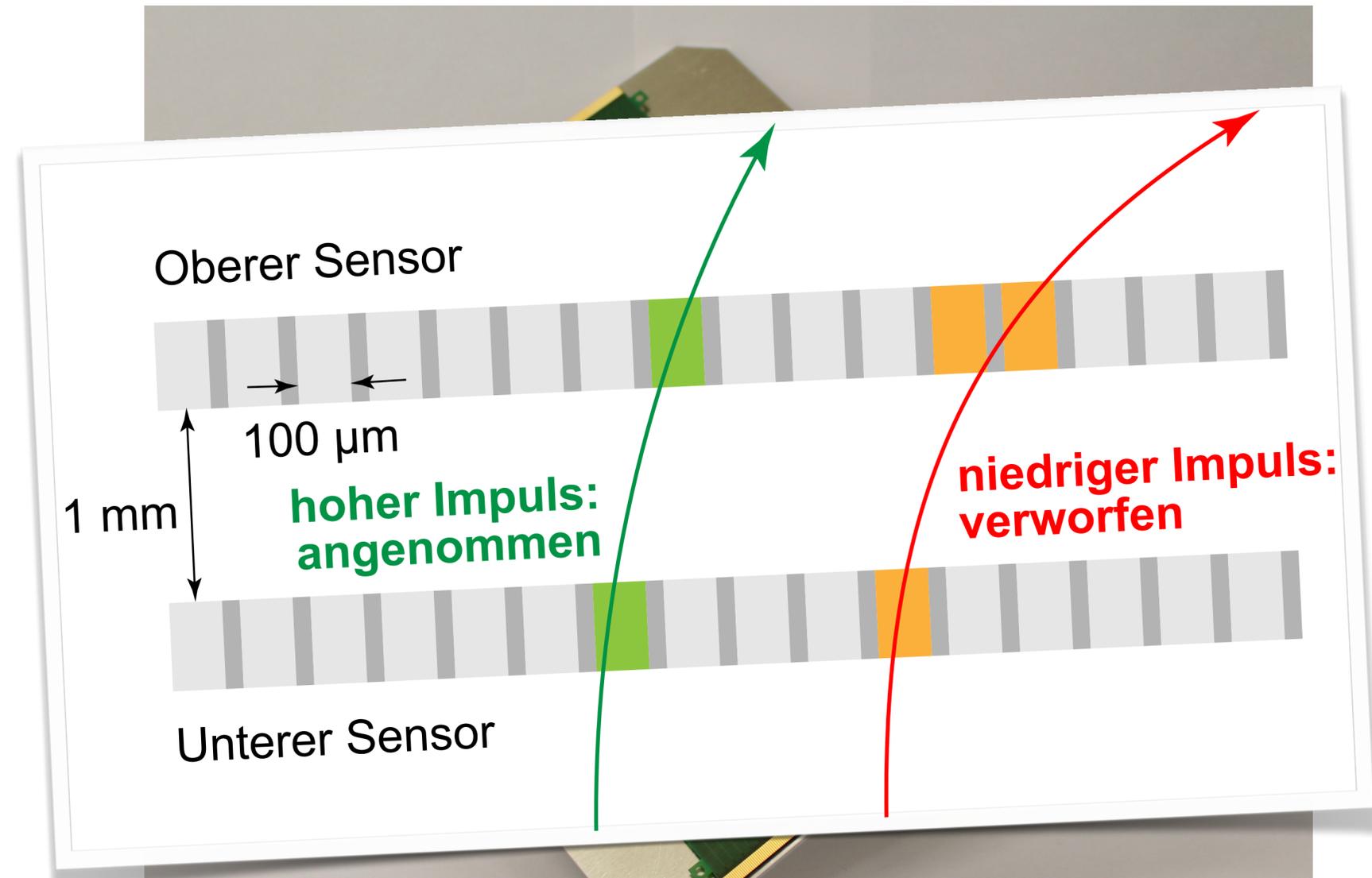
Wissenschaftliche Highlights

- 2016: Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse
- 2018: direkter Nachweis der Higgs-Wechselwirkung mit Top- und Bottom-Quarks und Tau-Leptonen
- Suche nach Neuer Physik, z. B. Dunkler Materie: große Kreativität, bisher keine signifikanten Signale

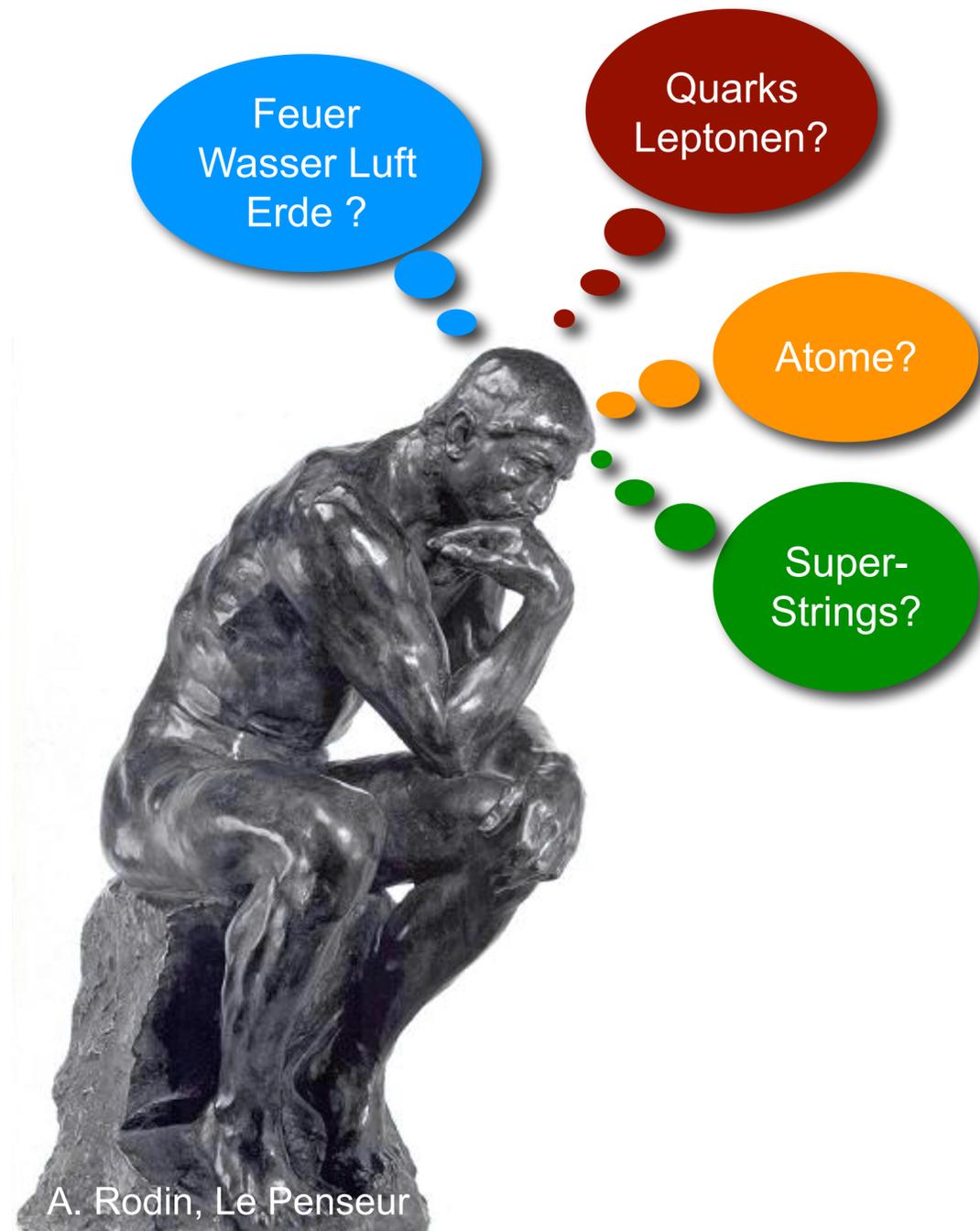


Zukunft des LHC

- LHC bei höchster Luminosität:
HL-LHC (ab 2026):
 - Etwas mehr Energie,
viel mehr Luminosität
 - Bis 2038: 20× mehr Daten als
bislang aufgezeichnet
- CMS für den HL-LHC:
 - **Neubau** von Detektoren
 - Innovative Detektorkonzepte,
z. B. **p_T -Module** (→ Bau am KIT)



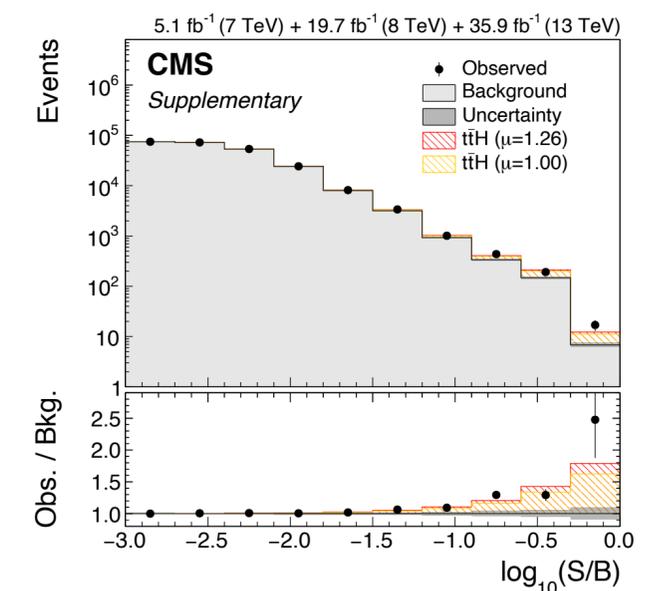
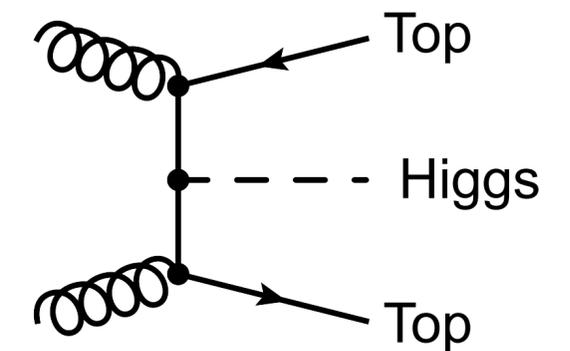
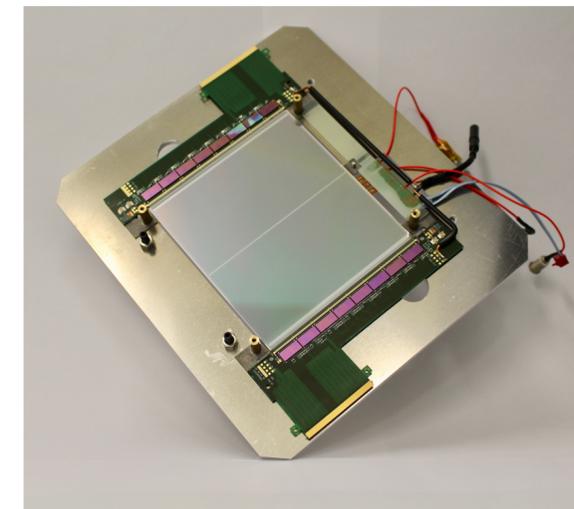
Faszination Teilchenphysik



- **Physik** – wie ist unsere Welt aufgebaut?
 - Fundamentale 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

Vom 1. Semester in die Teilchenphysik

- Physikstudium = **breite Ausbildung** in Grundlagenwissenschaft
- **Relevant** für experimentelle Teilchenphysik: (so ziemlich) **alles!**
 - Verständnis der **Fragestellungen**:
Quantenmechanik, Relativitätstheorie,
Kosmologie, ...
 - Bau und Betrieb von **Detektoren**:
Festkörper- und Molekülphysik,
Mechanik, Elektronik, Chemie,
Strömungslehre, ...
 - Analyse der **Daten**: Statistik,
angewandte Informatik, ...



Und nach dem Studium?

... und was können Sie nach dem Studium mit Ihrer Ausbildung anfangen:
(so ziemlich) **alles** und (so ziemlich) **überall**

- Universelle **Problemlöser/innen** mit Kreativität und Durchhaltevermögen
- Erfahrung in **großen internationalen Teams**
- Arbeit mit Technologien an der **Grenze des Machbaren**



Bildquelle: Getty Images

Viel Spaß und viel Erfolg in Ihrem Studium.