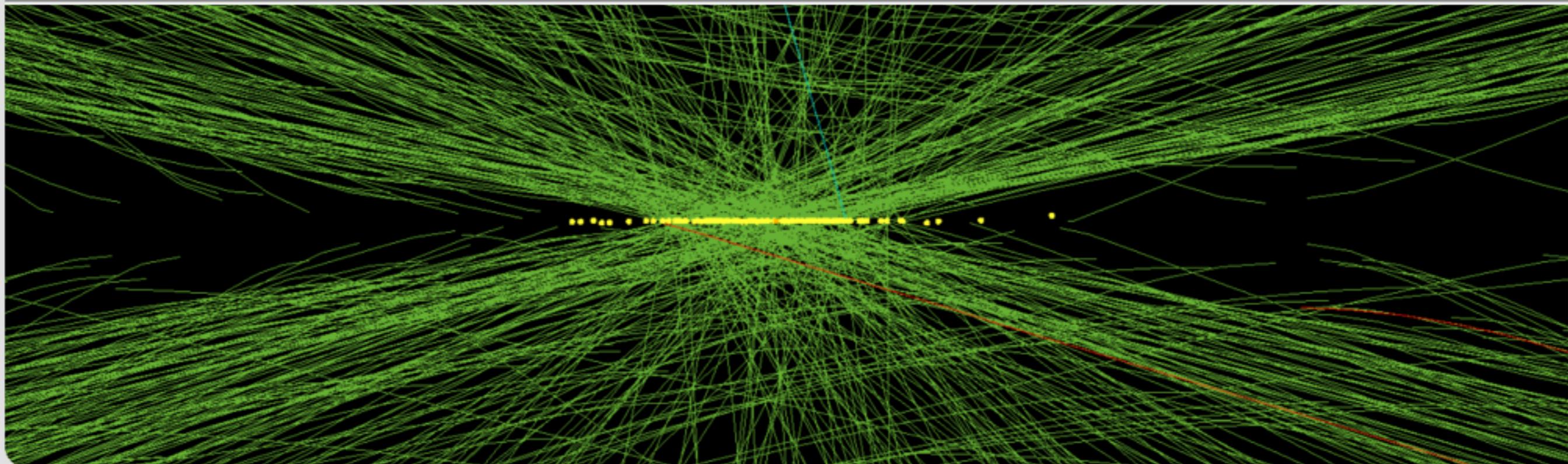


# Wie kann man Elementarteilchen „sehen“?

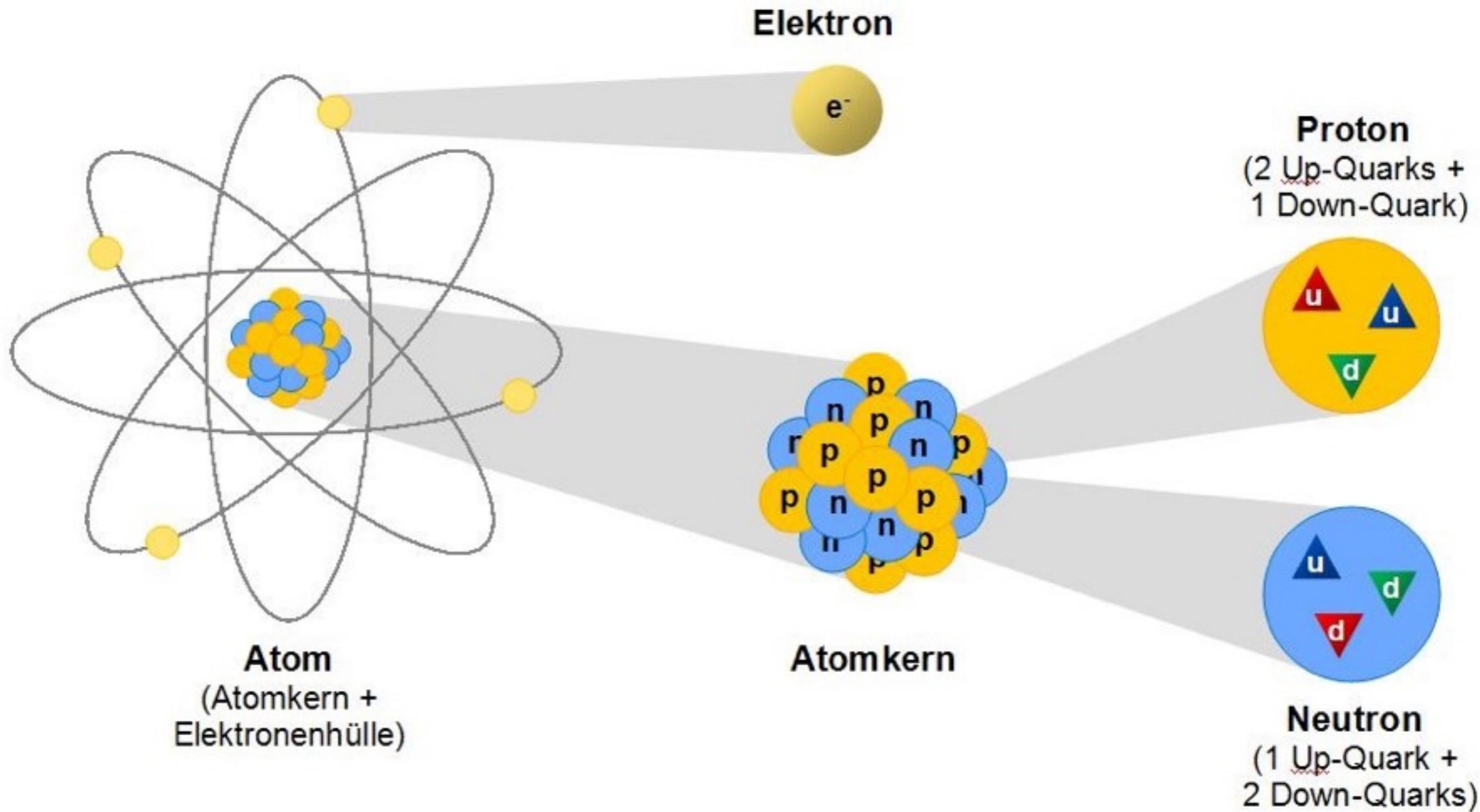
Wissenschaftsfestival EFFEKTE 2015  
Karlsruhe, 28. Juni 2015

Ulrich Husemann

Institut für Experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie



# Erforschung des Atoms



[Netzwerk Teilchenwelt]

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

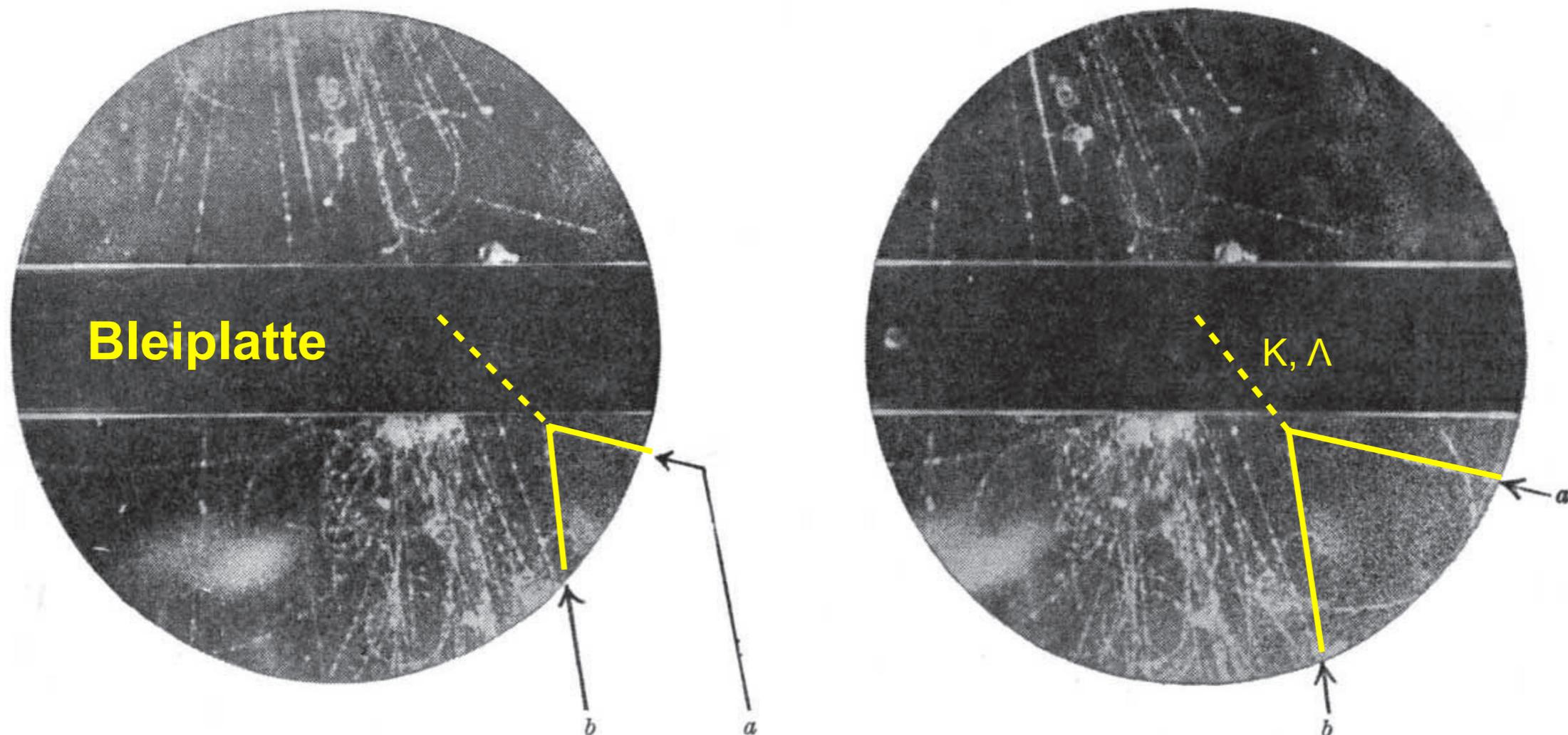
$10^{-14} \text{ m}$

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

- Bestandteile des Atoms
  - Hülle aus **Elektronen**
  - Kern aus **Protonen** und **Neutronen**
- Entdeckung vieler weiterer „elementarer“ Teilchen (1. Hälfte des 20. Jahrhunderts)
  - Radioaktiver **Betazerfall**: Neutron zerfällt in Proton + Elektron + **Neutrino**
  - Kosmische Strahlung: **Mesonen**, **seltsame** Teilchen, ...
- Protonen und Elektronen **stabil**, alle anderen Teilchen **zerfallen** mehr oder weniger schnell

# Seltsame Teilchen sehen?

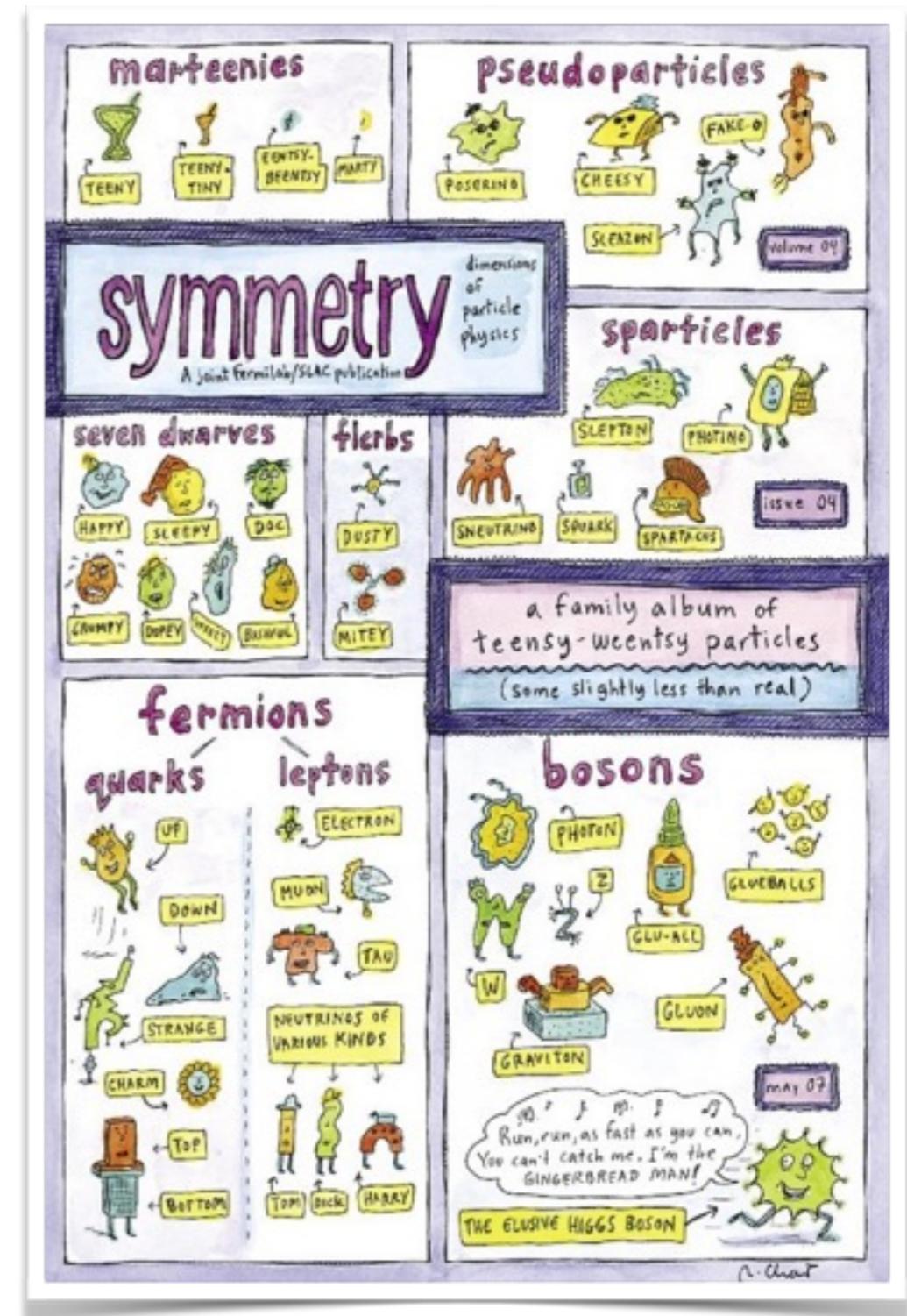
- Historische Aufnahme (1947): **Nebelkammer**
  - Geladene Teilchen hinterlassen „Kondenssstreifen“
  - Aufnahmen mit **Fotokameras** aus zwei Perspektiven:  
Zerfallsprodukte der seltsamen Teilchen „aus dem Nichts“



[G.D. Rochester, C.C. Butler, Nature 160 (1947) 855]

# Teilchenzoo 2.0

- Neues Ordnungsprinzip (ab 1960er Jahre)
- Materie besteht aus 12 fundamentalen Bausteinen: **6 Quarks** und **6 Leptonen** (und deren Antiteilchen)
- Vier fundamentale Kräfte: **Kraftteilchen**
- Higgs-Teilchen verantwortlich für **Masse** der Bausteine
- Proton aufgebaut aus Quarks und Kraftteilchen „Gluonen“



[<http://www.symmetrymagazine.org/>]

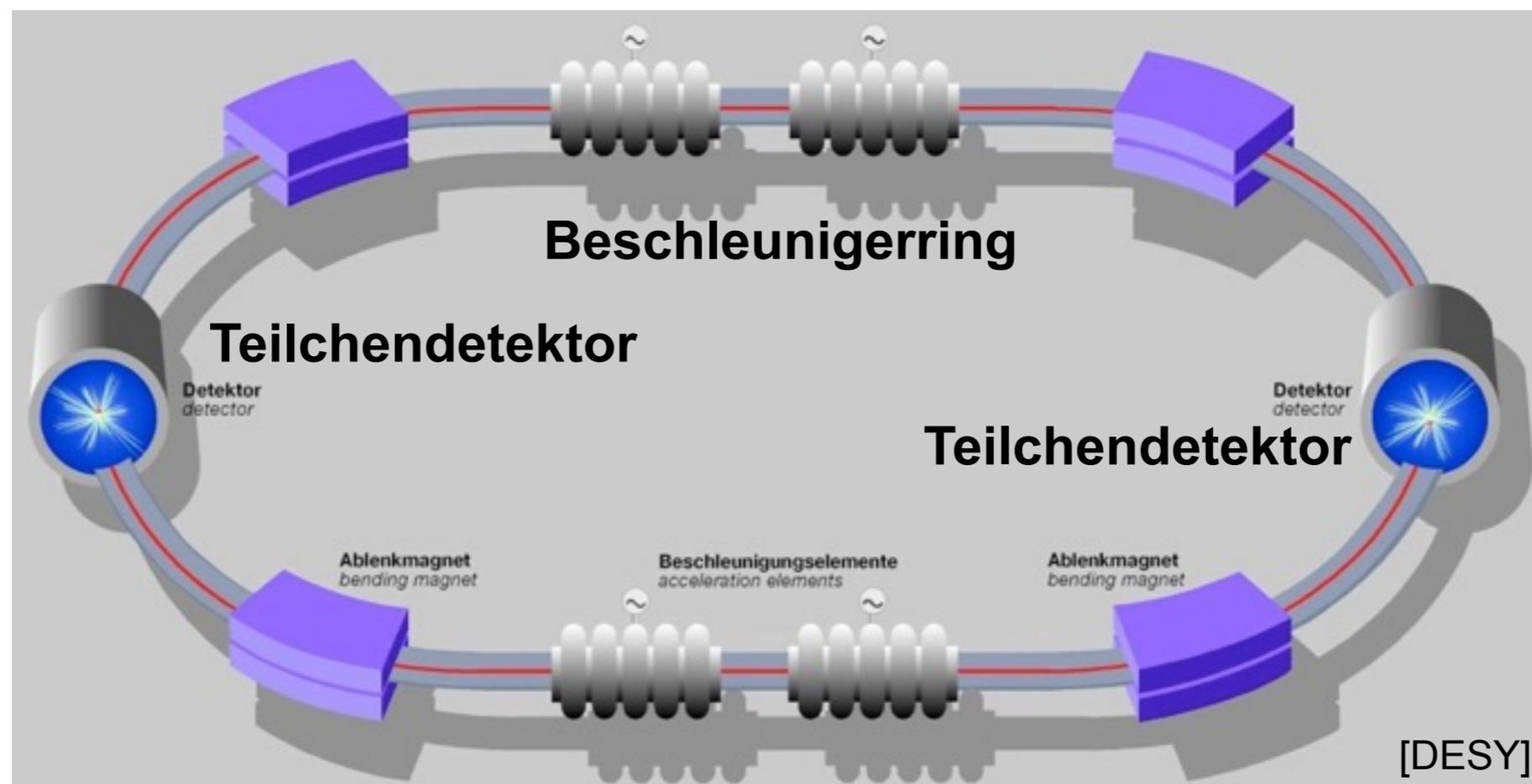
# Teilchenkollisionen

- Erzeugung neuer Teilchen in hochenergetischen  
**Teilchenkollisionen** ( $E = mc^2$ )



# Moderne Experimente

- Prinzip moderner Experimente der Teilchenphysik
  - Hochenergetische Teilchenkollisionen in **Beschleuniger**
  - Nachweis mit spezieller „Kamera“: **Teilchendetektor**
  - Falls Teilchen **kurzlebig**: Nachweis stabiler **Zerfallsprodukte**



# Teilchenbeschleuniger

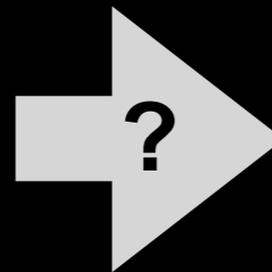
## ■ LHC (CERN):

- Weltweit leistungsstärkster Beschleuniger, 27 km Umfang
- Protonen auf 99.999999% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt



# Wie kann man Elementarteilchen am LHC „sehen“?

# Fotokamera 2.0?

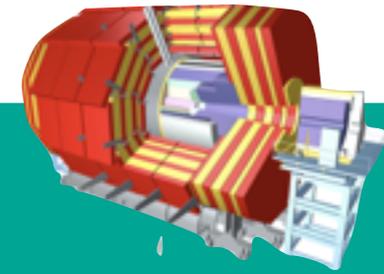


[Juhanson, Rolleiflex\_camera.jpg, CC BY-SA 3.0]

[www.canon.de]

- **Anforderungen** zum Nachweis von Elementarteilchen
  - „Interessante“ Elementarteilchen **sehr selten** produziert  
→ häufige Wiederholung der Teilchenkollisionen
  - **Überlagerung** durch „uninteressante“ Prozesse  
→ Trennung durch hohe räumliche und zeitliche Auflösung

# Anforderungen



	Digitalkamera	Detektor	
Auflösung	50 Megapixel	100 „Megapixel“	✓
Pixelgröße	$4,1 \times 4,1 \mu\text{m}^2$	$\geq 150 \times 100 \mu\text{m}^2$	✓
Bilder pro Sekunde	5	40 Millionen	✗
Lebensdauer am LHC	1–2 Monate	10 Jahre	✗

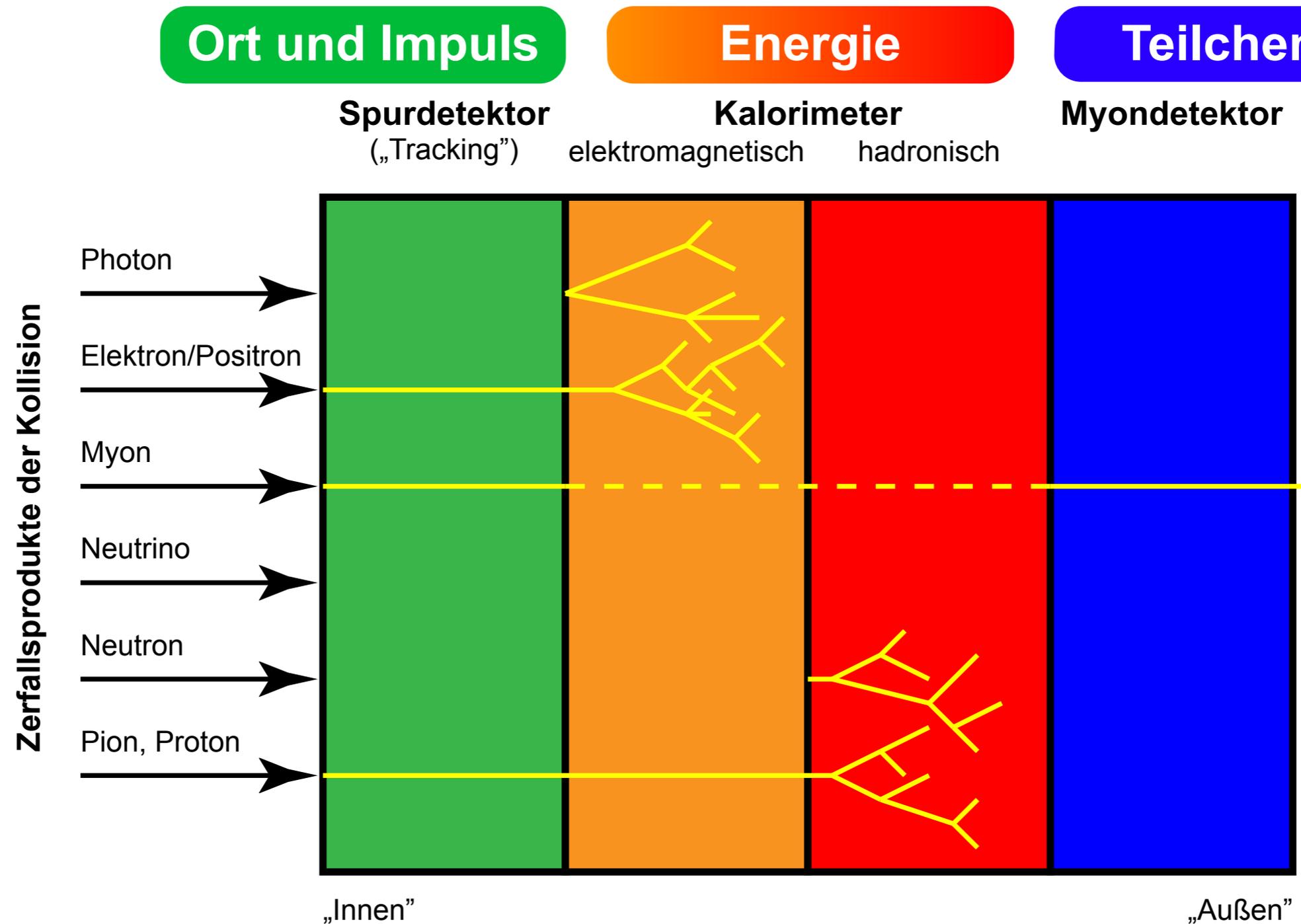
→ nur mit speziellen **Eigenentwicklungen** realisierbar

# Messprogramm

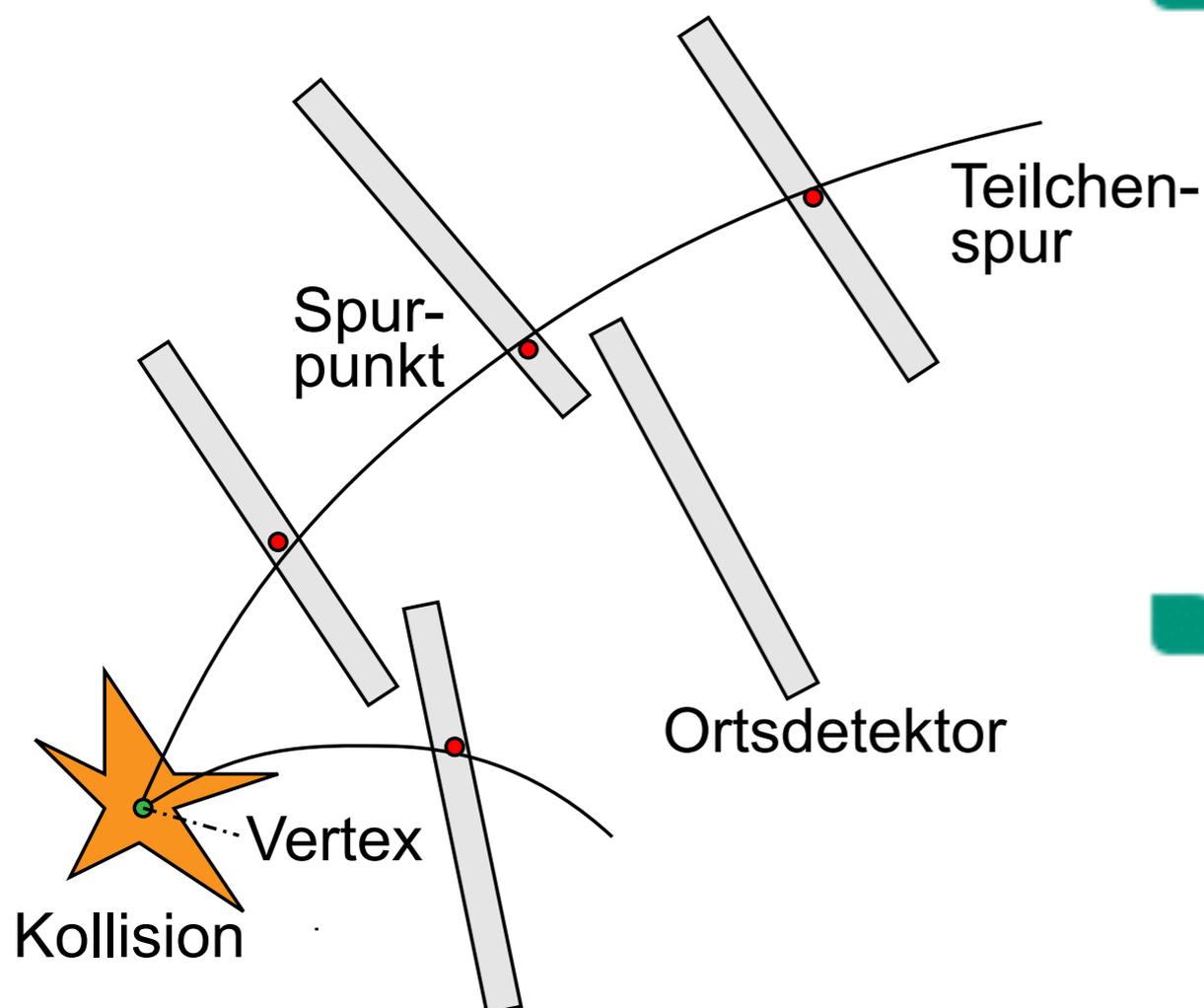
- Programm: messe so viele Eigenschaften wie möglich  
so vieler Teilchen wie möglich
  - Ort der Entstehung
  - Impuls (= Masse·Geschwindigkeit)
  - Bewegungsenergie
  - Teilchentyp
- Aufbau der Detektoren: **Zwiebelschalen**
  - Kein einzelner Detektor kann alle Eigenschaften messen  
→ geschickte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



# Teilchennachweis



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



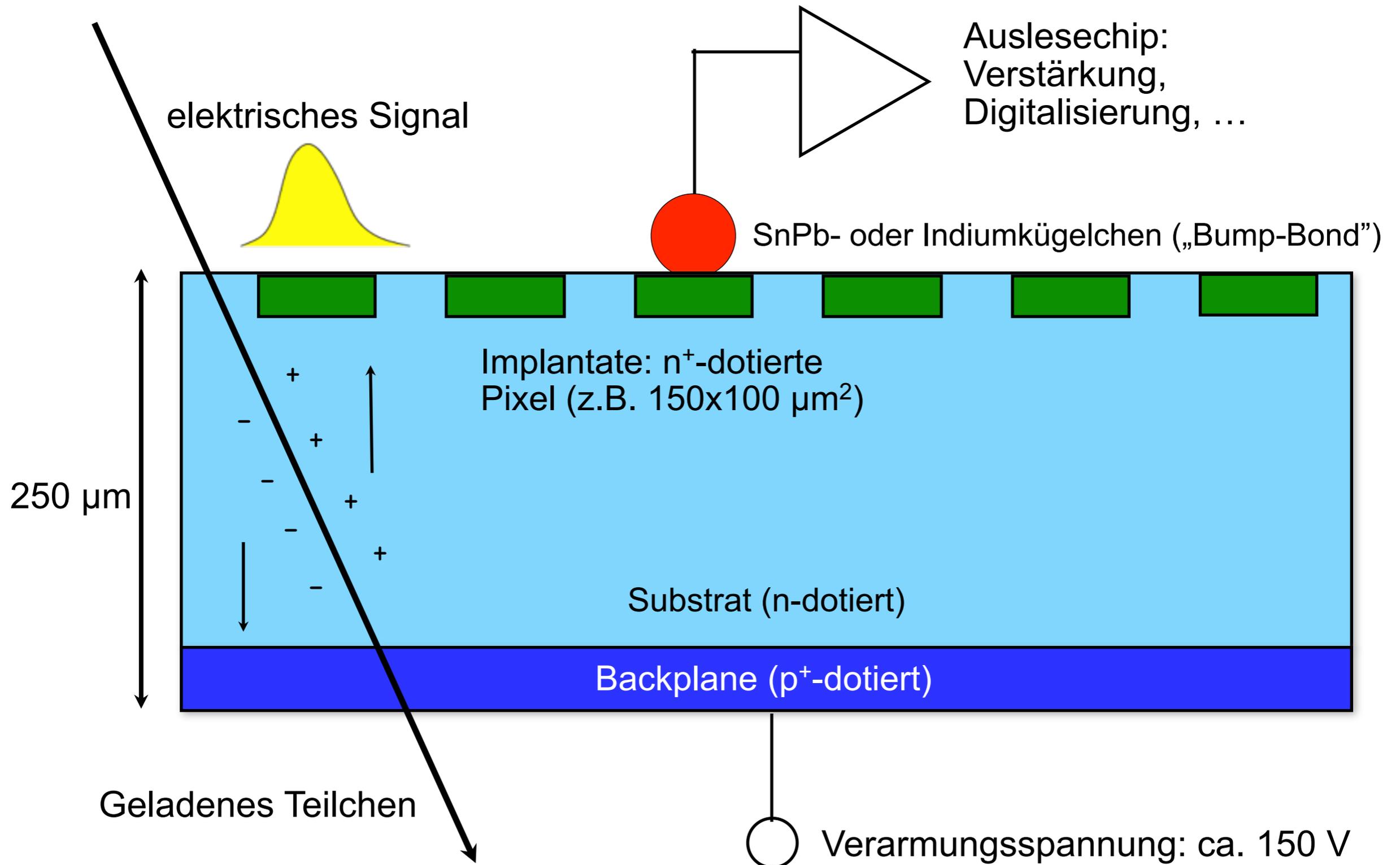
## ■ Ortsmessung

- Geladene Teilchen **ionisieren** Detektormaterial → **Spurpunkte**
- Verbindung der Spurpunkte im Computer: **Teilchenspuren**

## ■ Impulsmessung

- Geladene Teilchen werden **im Magnetfeld abgelenkt**
- **Starke Ablenkung** → **niedriger Impuls** (und umgekehrt)

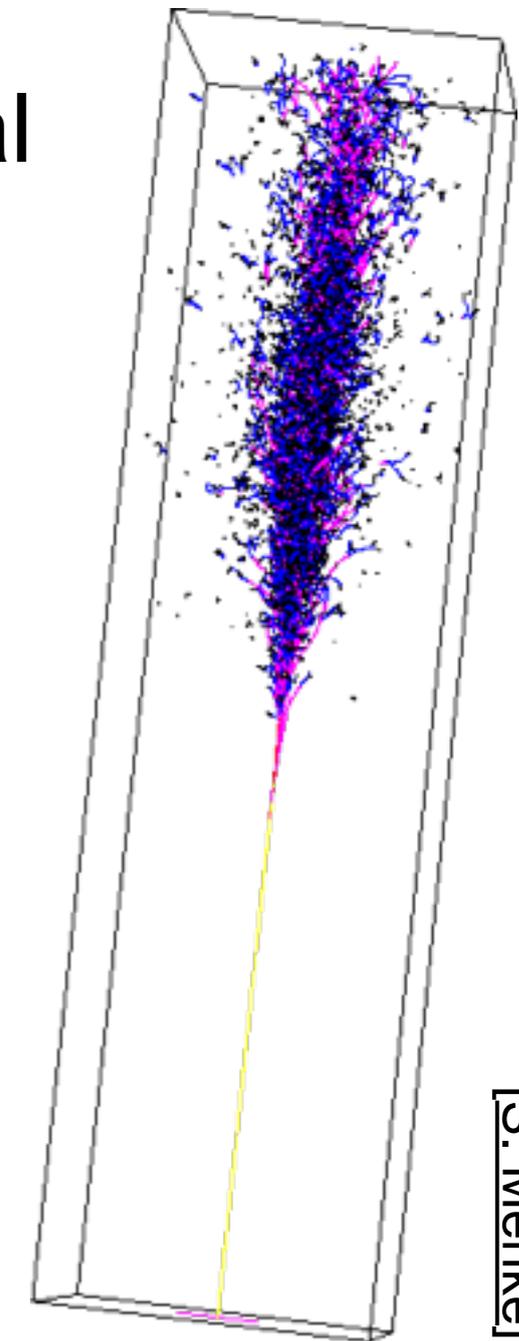
# Ortsdetektor aus Silizium



# Energiemessung

## 40-GeV-Elektron auf Bleiglas

- Idee: Teilchen reagiert mit massivem Material
  - Ursprüngliches Teilchen **absorbiert**
  - **Schauer** neuer Teilchen  
→ **Energie** des ursprünglichen Teilchens
- Experimenteller Aufbau: **Kalorimeter**
  - Schauernachweis z. B. über **Lichtblitze** in Szintillatoren
  - Massives Material: schwere Kristalle, Blei, Messing, ...

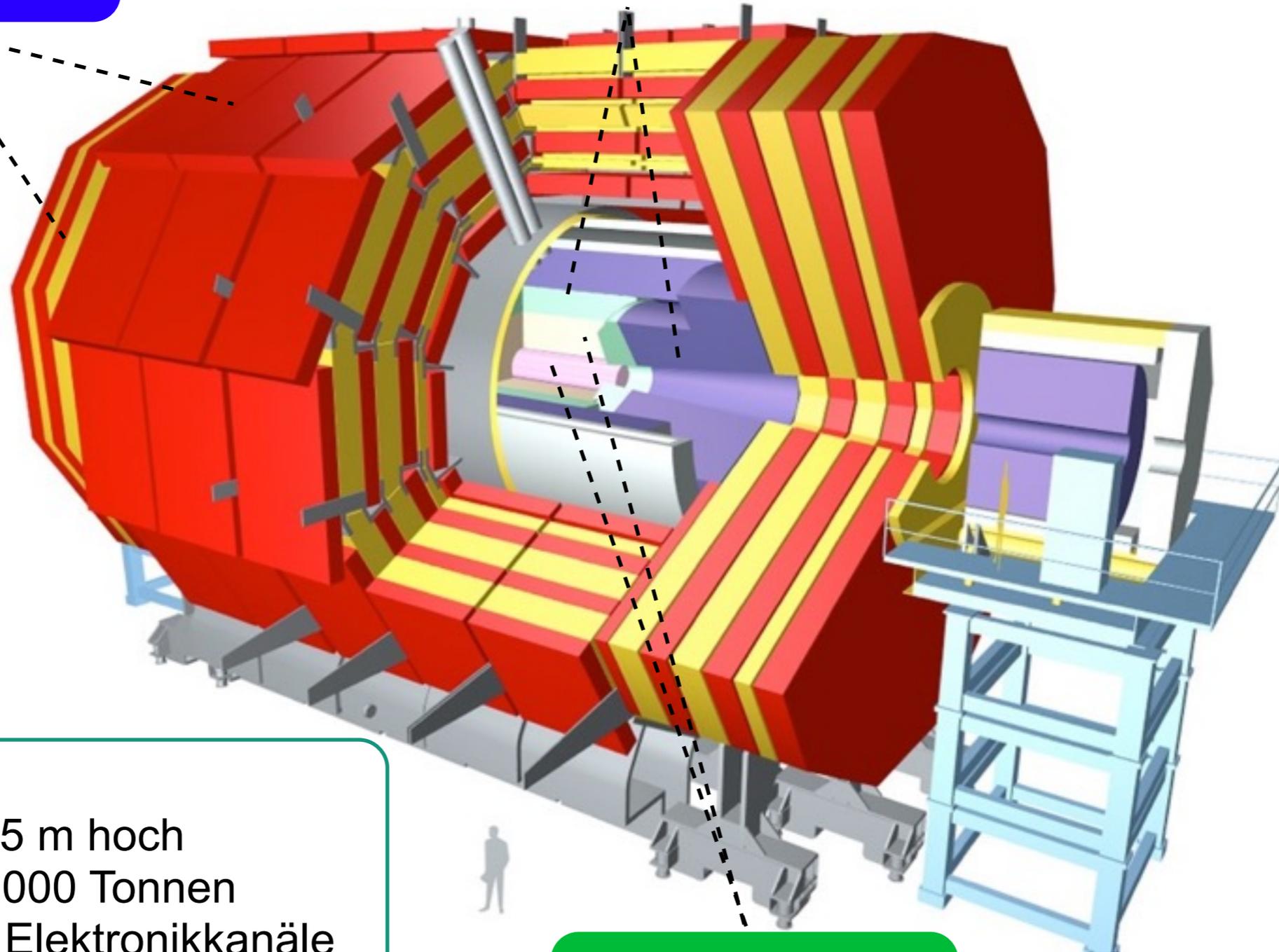


[S. Menke]

# Der CMS-Detektor

Myondetektor

Kalorimeter



## CMS-Fakten:

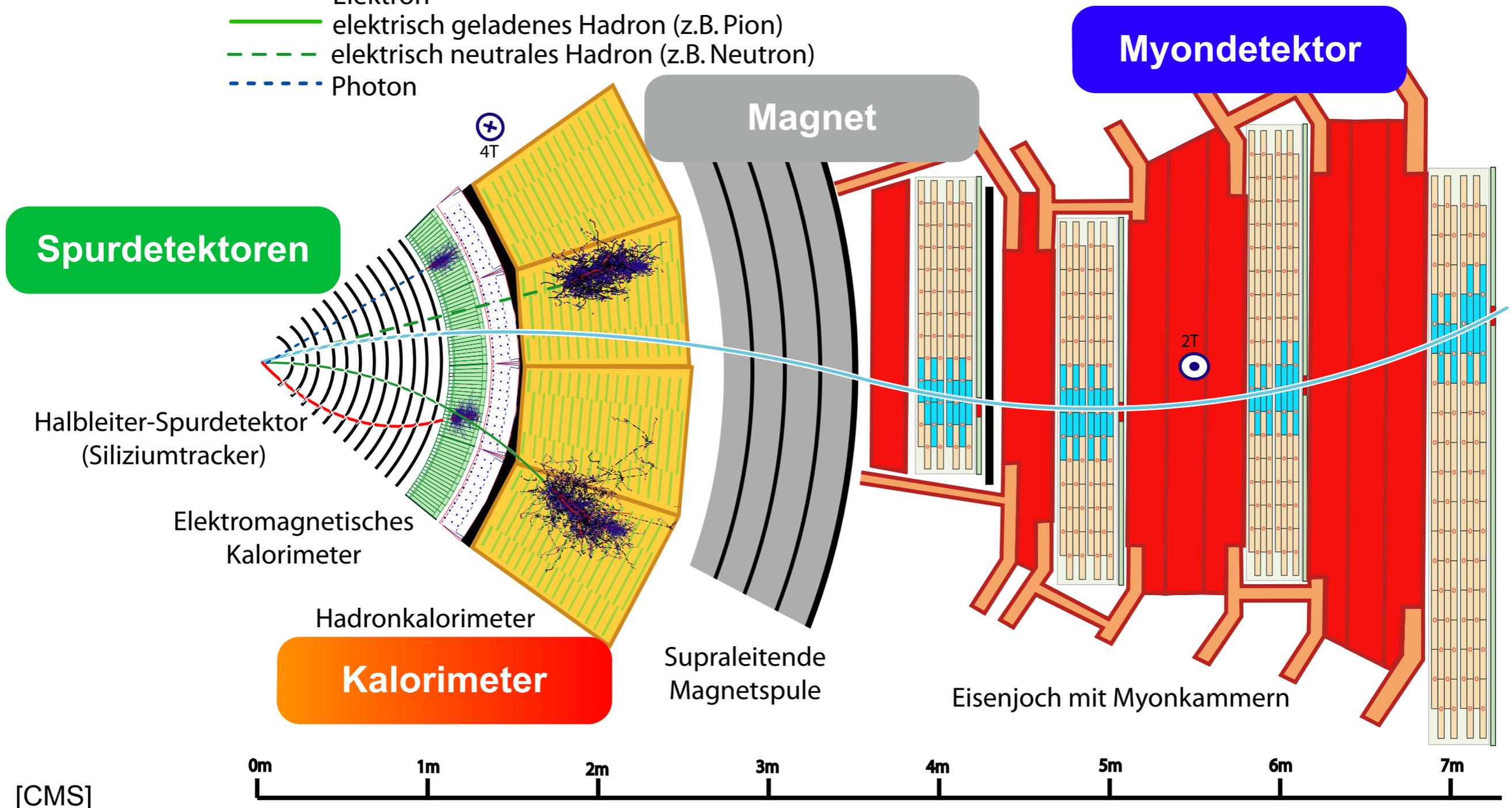
- \* 21 m lang, 15 m hoch
- \* Gewicht: 14.000 Tonnen
- \* 80 Millionen Elektronikkanäle

Spurdetektoren

[CMS]

# Teilchennachweis bei CMS

- Legende:
- Myon
  - Elektron
  - elektrisch geladenes Hadron (z.B. Pion)
  - - - elektrisch neutrales Hadron (z.B. Neutron)
  - - - Photon



[CMS]

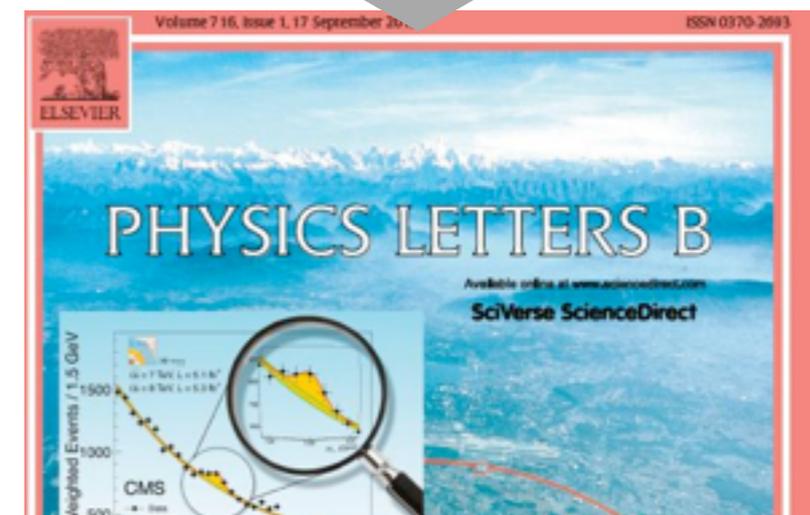
# Datenverarbeitung

- 40 Millionen Bilder pro Sekunde:  
mit heutiger Technik **nicht**  
**speicherbar**
- Trick: **schnelle Vorauswahl**  
→ nur einige hundert „wirklich  
interessante“ Ereignisse pro  
Sekunde gespeichert
- Immer noch „Big Data“  
→ **große Computersysteme**,  
Datenaufkommen z. B.  
vergleichbar mit YouTube-Videos

40 Millionen Bilder  
pro Sekunde

Hunderttausende  
„interessante“ Bilder

Hunderte „wirklich  
interessante“ Bilder



# Wie kann man Higgs-Bosonen am LHC „sehen“?

# Entdeckung des Higgs-Bosons



- 2011: erste **Anzeichen** in LHC-Daten
- 2012: **Higgs-Entdeckung** – wissenschaftlicher **Durchbruch** des Jahres
- 2013: **Nobelpreis** für theoretische Idee an F. Englert und P. Higgs
- Jetzt: genaue Vermessung der **Higgs-Eigenschaften**

# Suche nach dem Higgs

## ■ Wie kann man **Higgs-Bosonen** „sehen“?

### ■ Sehr **kurze Lebensdauer**: $10^{-22}$ Sekunden

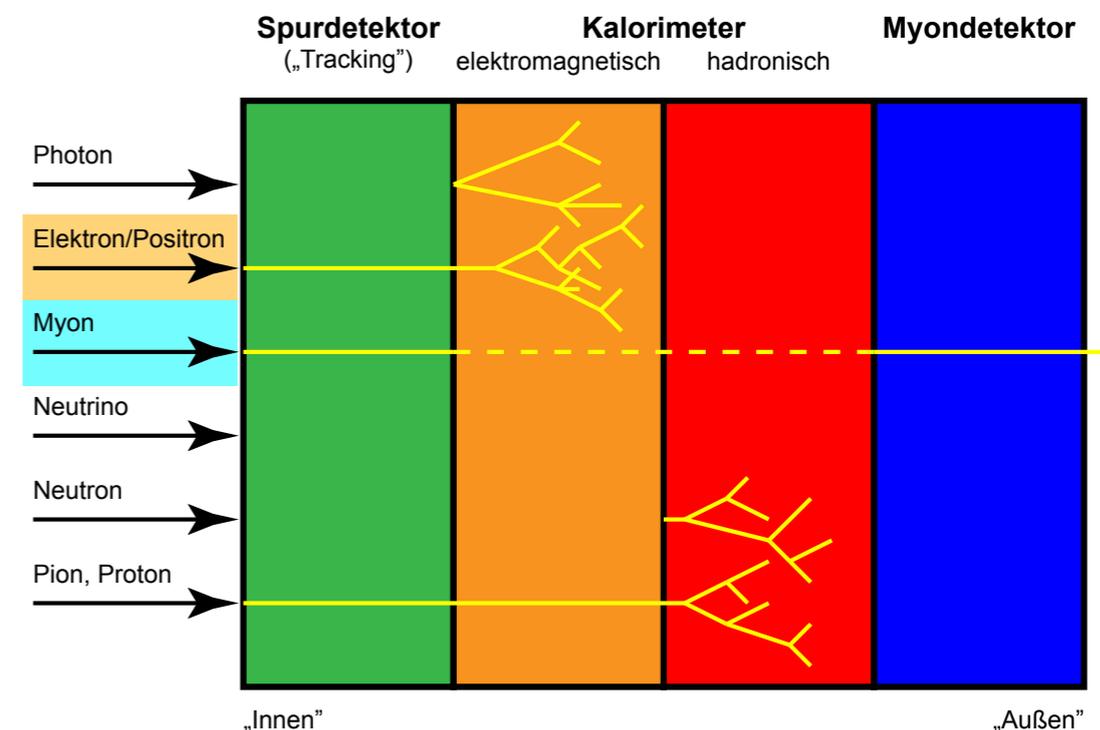
→ Rückschluss auf Higgs-Boson aus **Zerfallsprodukten**

### ■ Mehrere mögliche Zerfälle, besonders vielversprechend: Zerfall in **vier Leptonen** (z. B. zwei Elektronen, zwei Myonen)

## ■ **Nachweis** der Zerfallsprodukte

### ■ **Elektronen**: Impulsmessung in Spurdetektor, Energiemessung in Kalorimeter

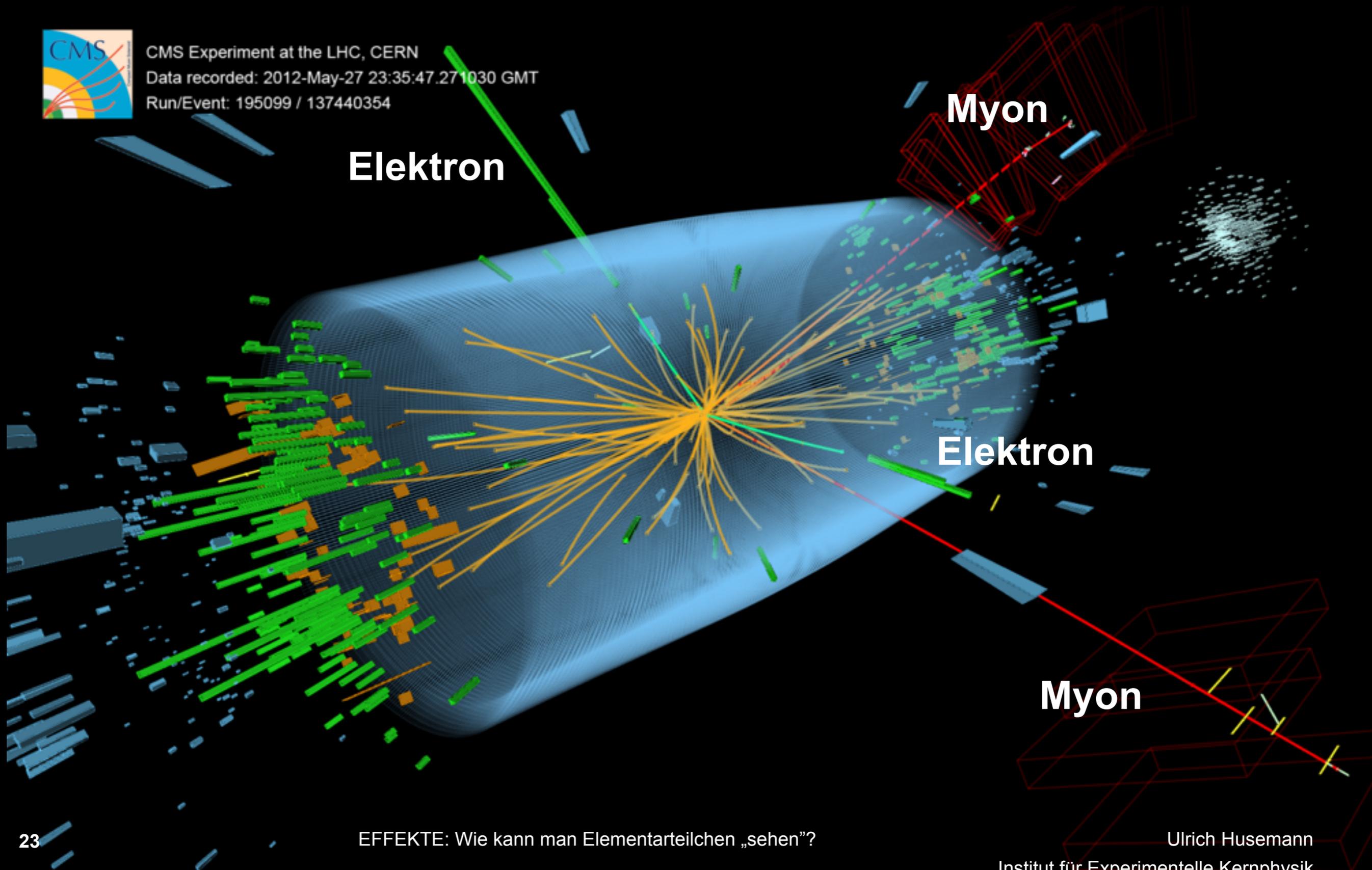
### ■ **Myonen**: Impulsmessung in Spurdetektor und Myondetektor



# Kandidat: $H \rightarrow 4 \text{ Leptonen}$



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT  
Run/Event: 195099 / 137440354



# Was ist invariante Masse?

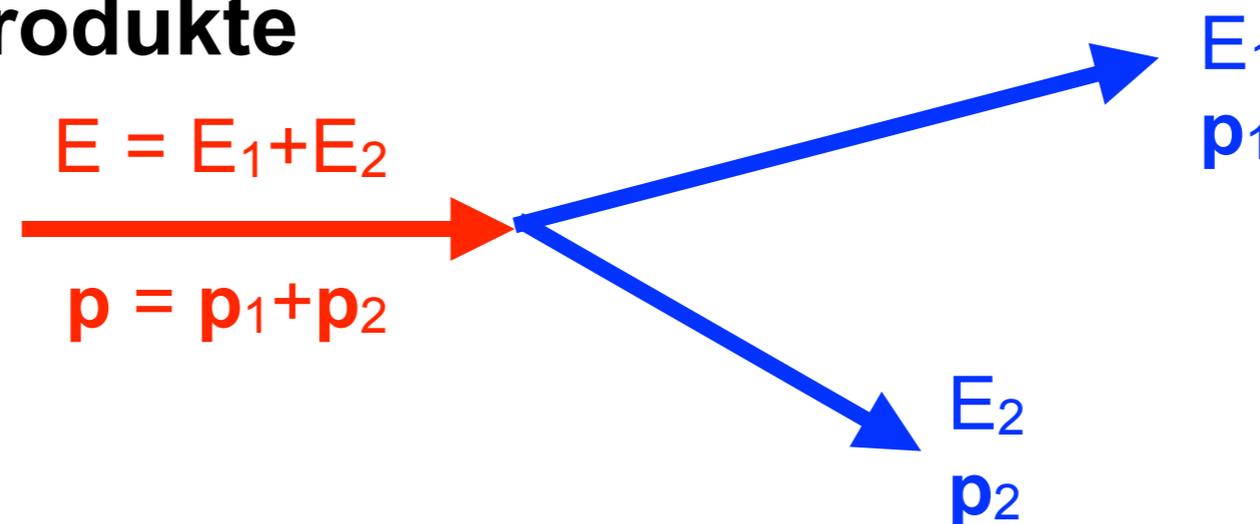
- Elementarteilchen bewegen sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit  $c$   
→ spezielle **Relativitätstheorie**



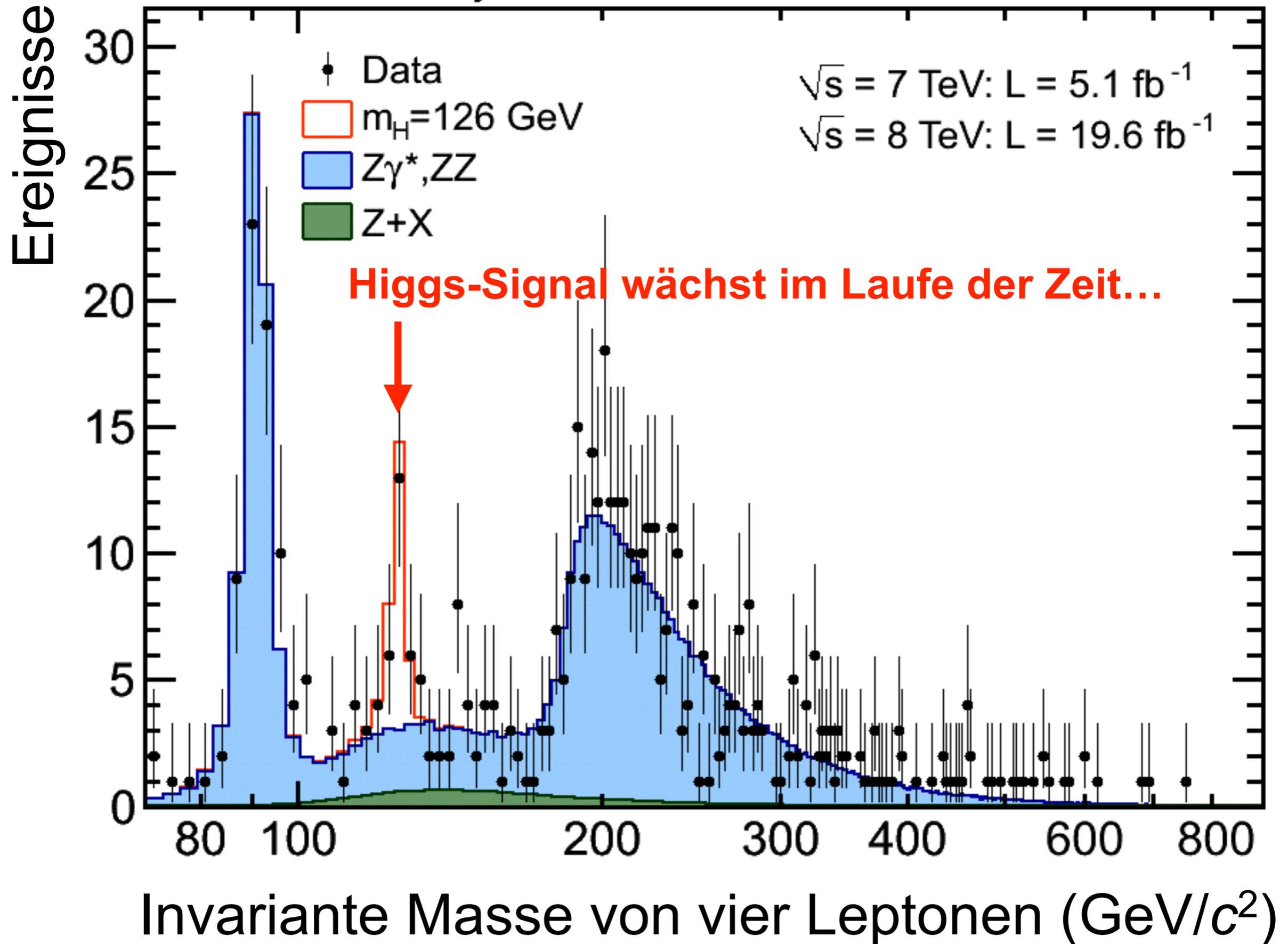
- Zusammenhang zwischen Energie  $E$ , Impuls  $p$  und Masse  $m$

$$(mc^2)^2 = E^2 - (pc)^2$$

- Energie und Impuls in Zerfällen **erhalten** → Bestimmung der **Teilchenmasse** durch Messung der Energien und Impulse der **Zerfallsprodukte**



CMS Preliminary



# Zusammenfassung

- Viele Elementarteilchen sehr kurzlebig  
→ **Zerfallsprodukte** nachweisen
- Hohe Anforderungen an Geschwindigkeit und Auflösung  
→ spezielle Eigenentwicklungen: **Teilchendetektoren**
- Beispiel: Entdeckung des **Higgs-Bosons** am LHC  
→ Bestimmung der Masse in Zerfall in vier Leptonen

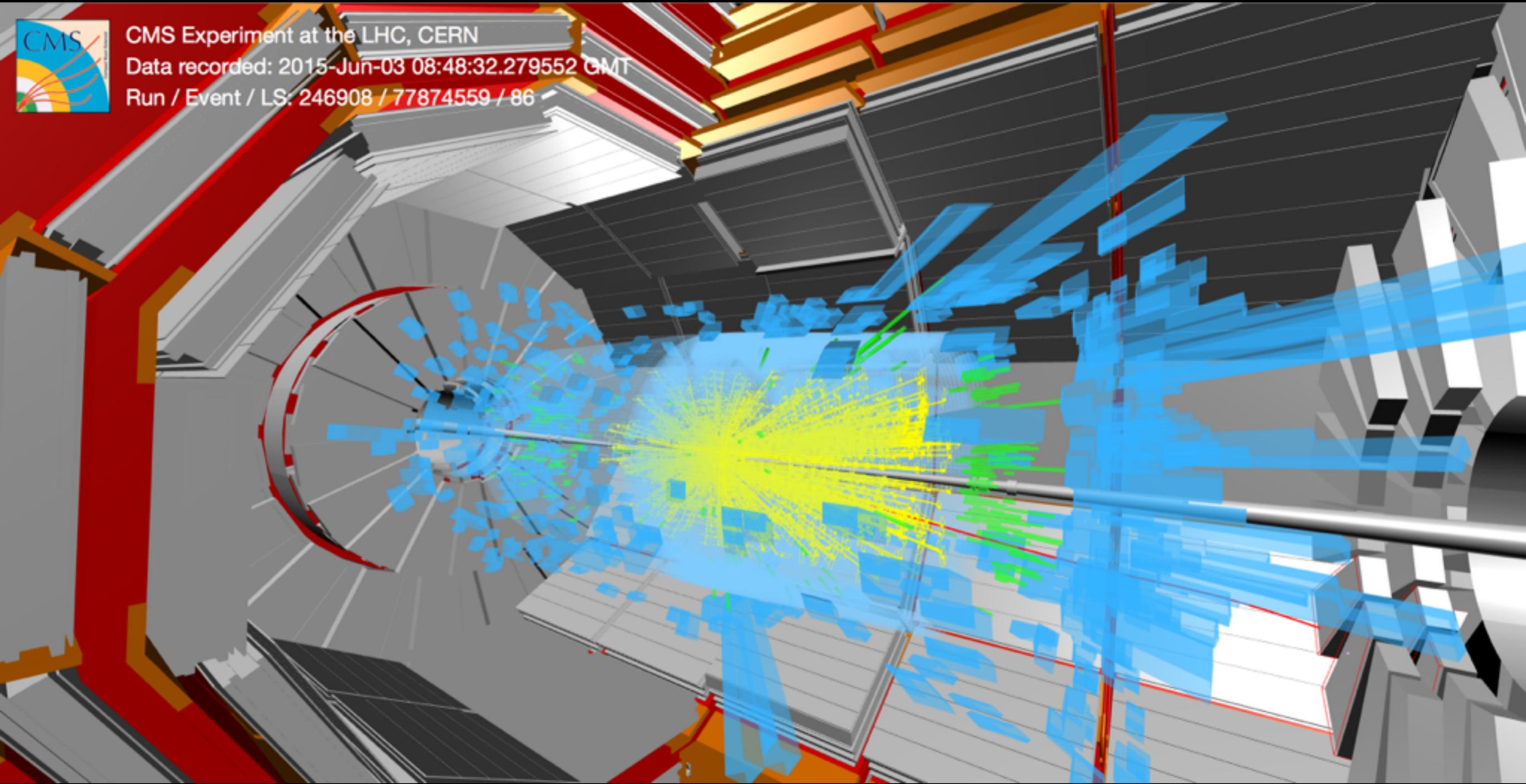
# Erste Kollisionen 2015



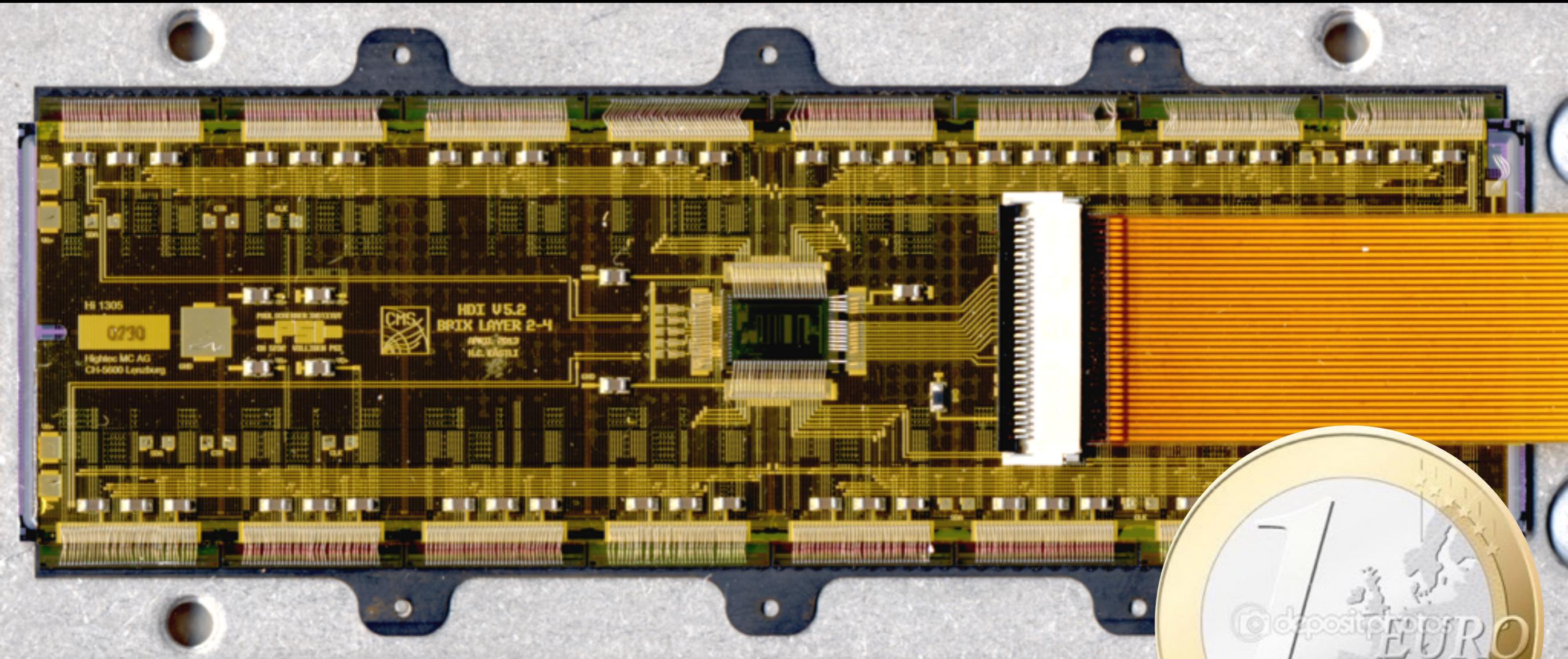
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2015-Jun-03 08:48:32.279552 GMT

Run / Event / LS: 246908 / 77874559 / 86



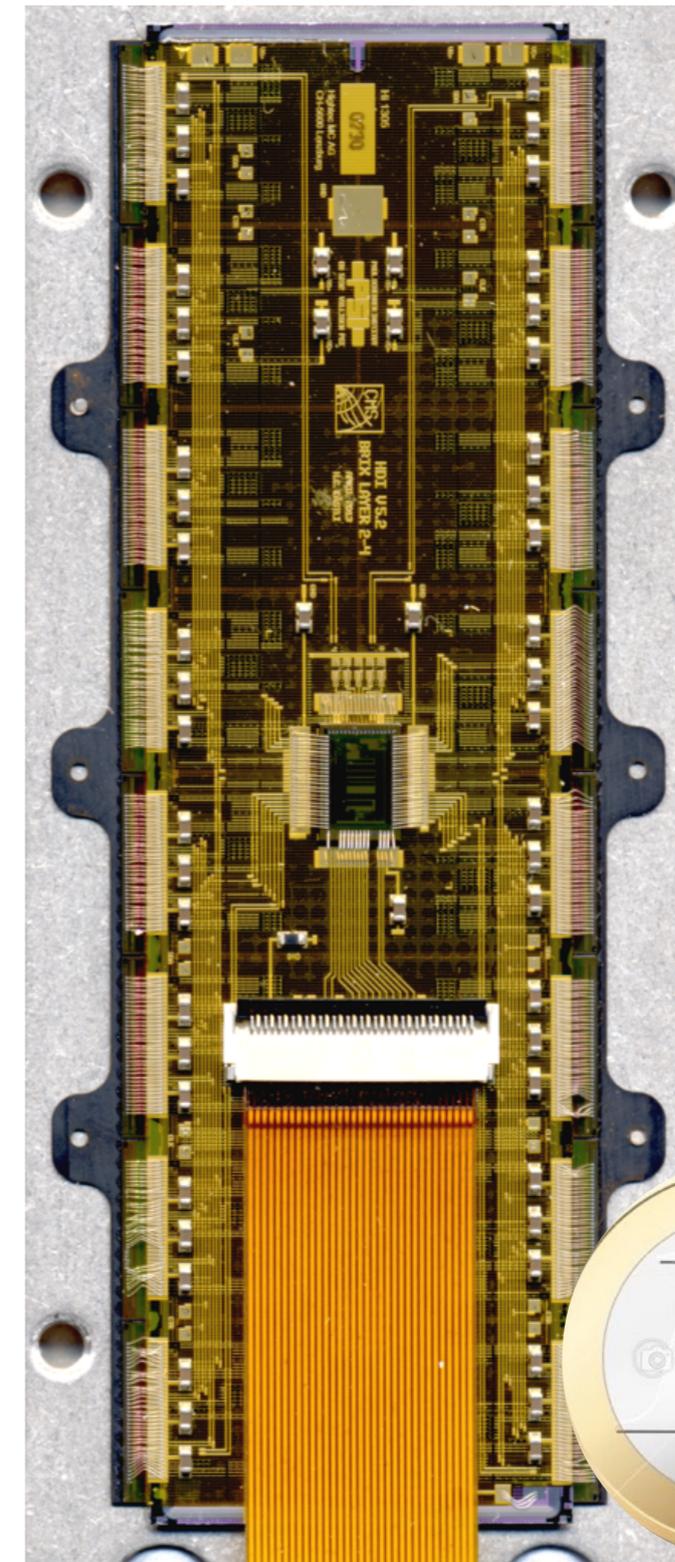
# Neuer Pixeldetektor



# Ausblick

## Modul des Pixeldetektors

- Seit Juni 2015: **zweite Datennahmeperiode** am LHC
  - Höhere **Strahlenergie**  
→ neue Entdeckungen?
  - Ende 2016: **neuer Pixeldetektor** für das CMS-Experiment
- Derzeitiger Langzeitplan: **LHC-Betrieb bis 2035**
  - Höhere **Strahlintensität**
  - **Fotokamera 3.0**: Neubau zentraler Detektorkomponenten



# Werden wir am LHC neue Elementarteilchen „sehen“?