

# Detektoren und Eventdisplays

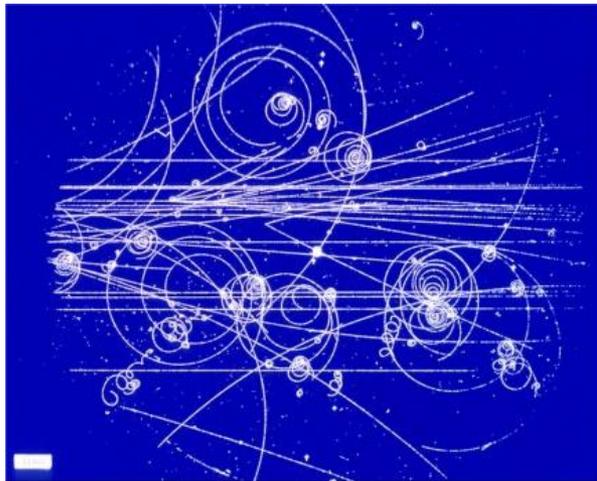
Darmstadt | 15.02.2024



# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ► Bildgebende Detektoren

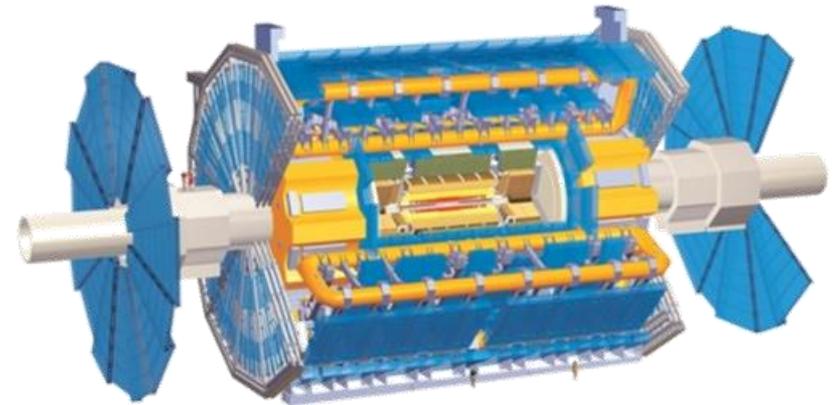
- Nebelkammer
- Blasenkammer



## ► sichtbare Teilchenspuren

## ► Elektronische Detektoren

- ATLAS-Detektor
- Geiger-Müller-Zählrohr



## ► elektrische Signale

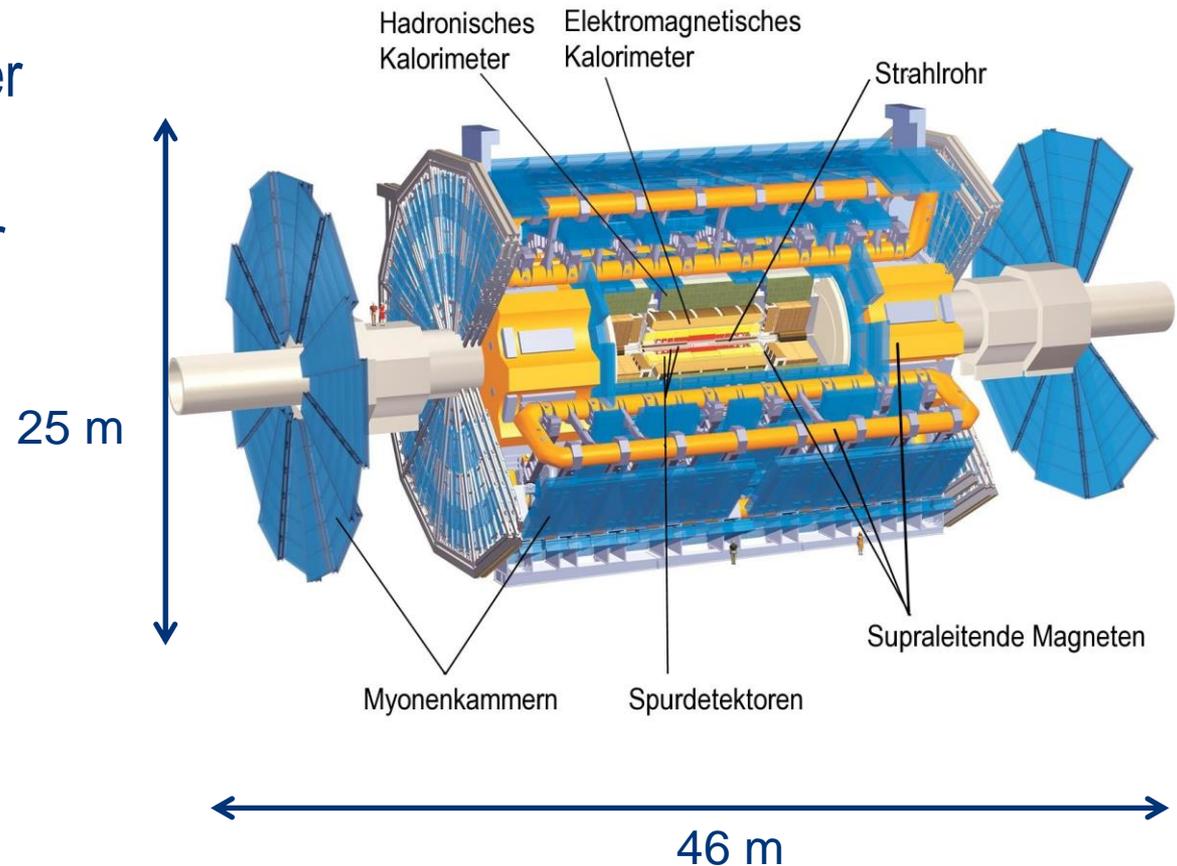
## ► Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

# Der ATLAS-Detektor ist das hier nicht!



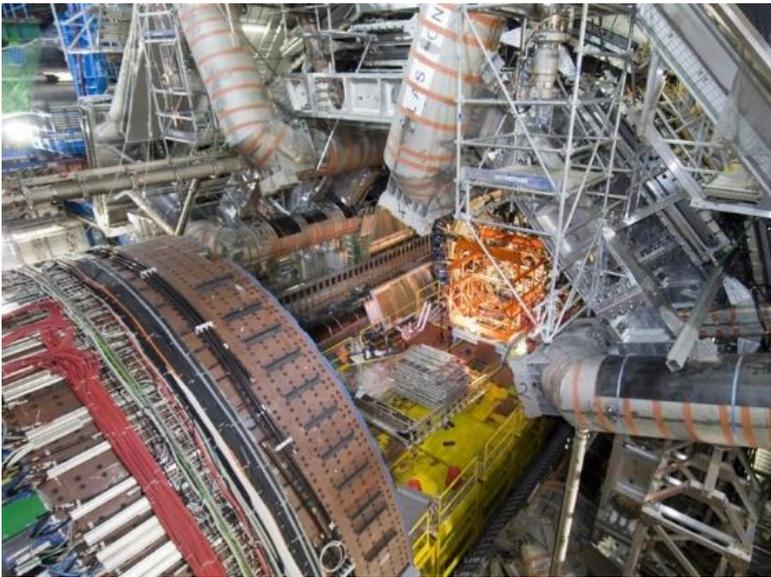
# Der ATLAS-Detektor (A Toroidal LHC AparatuS)

- ▶ Masse 7000t
- ▶ Gesamtlänge aller Kabel: 3000km
- ▶ ~6000 Mitarbeiter aus über 40 Ländern



# Der ATLAS-Detektor

- ▶ virtuell besuchbar
- ▶ <https://atlas-public.web.cern.ch/Discover/Visit/Virtual-Visit>

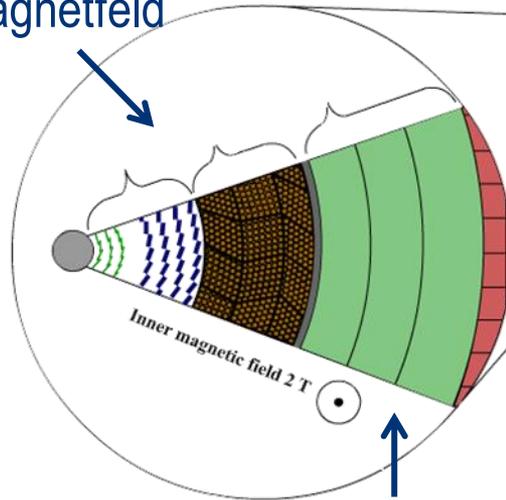


# Detektoraufbau am Beispiel von ATLAS

- ▶ Verschiedene Subdetektoren „zwiebelschalenartig“ angeordnet
- ▶ Aufbau von innen (Kollisionspunkt) nach außen
  - Spurdetektoren
  - Elektromagnetisches Kalorimeter
  - Hadronisches Kalorimeter
  - Myonenkammern
- ▶ Mit Magnetfeldern werden Teilchenspuren gekrümmt
  - Impulsmessung (und Identifikation)

## Spurdetektoren

- messen die Spuren und Impulse von el. geladenen Teilchen
- befinden sich in einem Magnetfeld

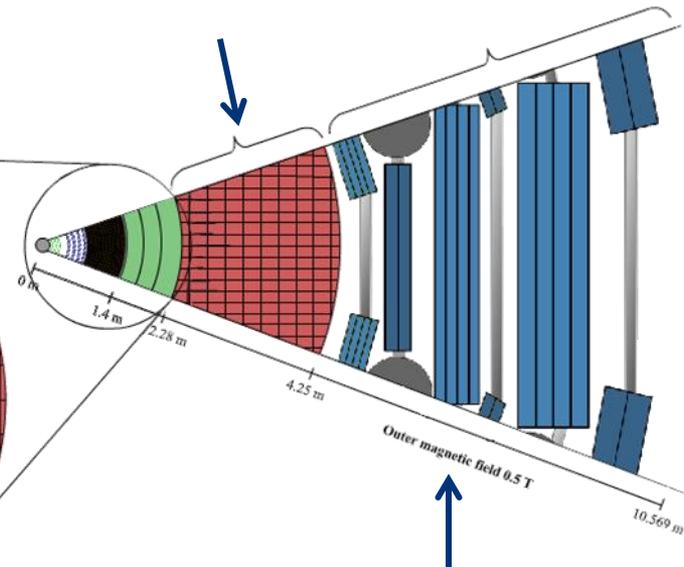


## Elektromagnetisches Kalorimeter

- misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

## Hadronisches Kalorimeter

- misst die Energie von Hadronen (= aus Quarks bestehende Teilchen)



## Myonenkammern

- messen die Spuren und Impulse von Myonen
- befinden sich in einem Magnetfeld

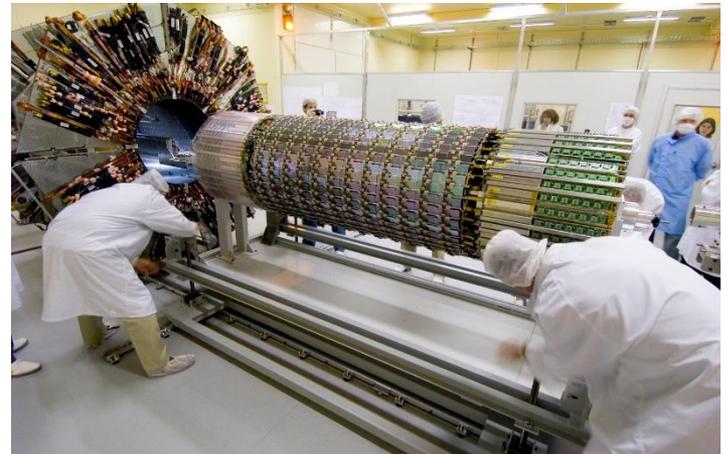
# ATLAS - Spurdetektoren

## ▶ Pixel Detektor

- Bestehend aus 92 Millionen Pixel
- Oberfläche  $\sim 2 \text{ m}^2$
- Ortsauflösung  $\sim 10 \mu\text{m}$

## ▶ Silicon Microstrip Tracker

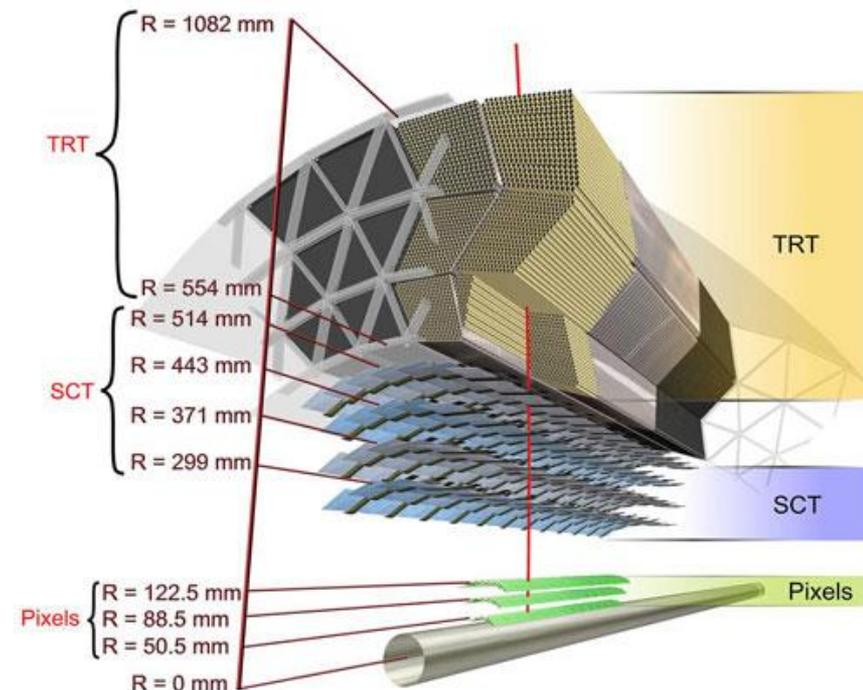
- Bestehend aus 4,088 doppelseitigen Modulen
- 6 Million Auslese Kanäle



# ATLAS - Spurdetektoren

## ► Übergangsstrahlungsdetektor (TRT)

- Volumen  $12\text{m}^3$
- Besteht aus "Straw Tubes":
  - Geiger Müller Zählrohre
  - Durchmesser 4mm
  - Im Inneren 0.03mm Gold ummantelter Wolfram Draht
- 300.000 Straws
- Genauigkeit der Ortsauflösung: 0.17mm



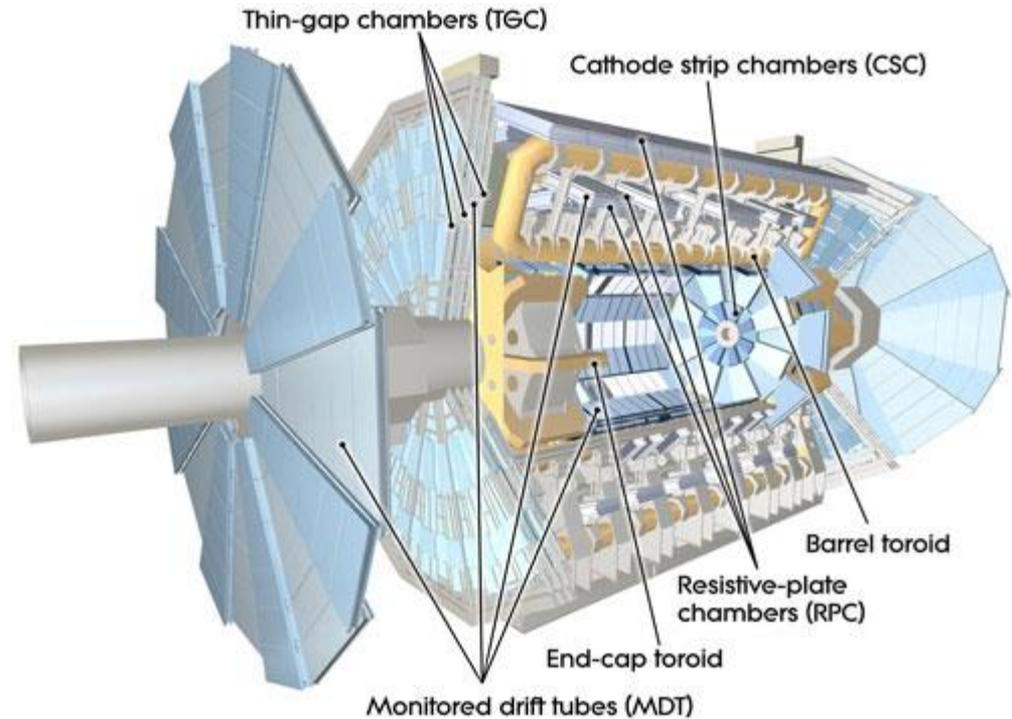
# Kalorimeter

- ▶ Messung der Energie
- ▶ Aufbau in Schichten (Absorber – Detektor – Absorber – ...)
  - Wechselwirkung im Absorbermaterial führt zu Teilchenschauer
  - Energie wird in Detektorschichten nachgewiesen
- ▶ EM Kalorimeter
  - Nachweis via elektromagnetischen Kaskaden
  - Abhängig von  $Z$  des Materials
- ▶ Hadronisches Kalorimeter
  - Nachweis via starker Wechselwirkung

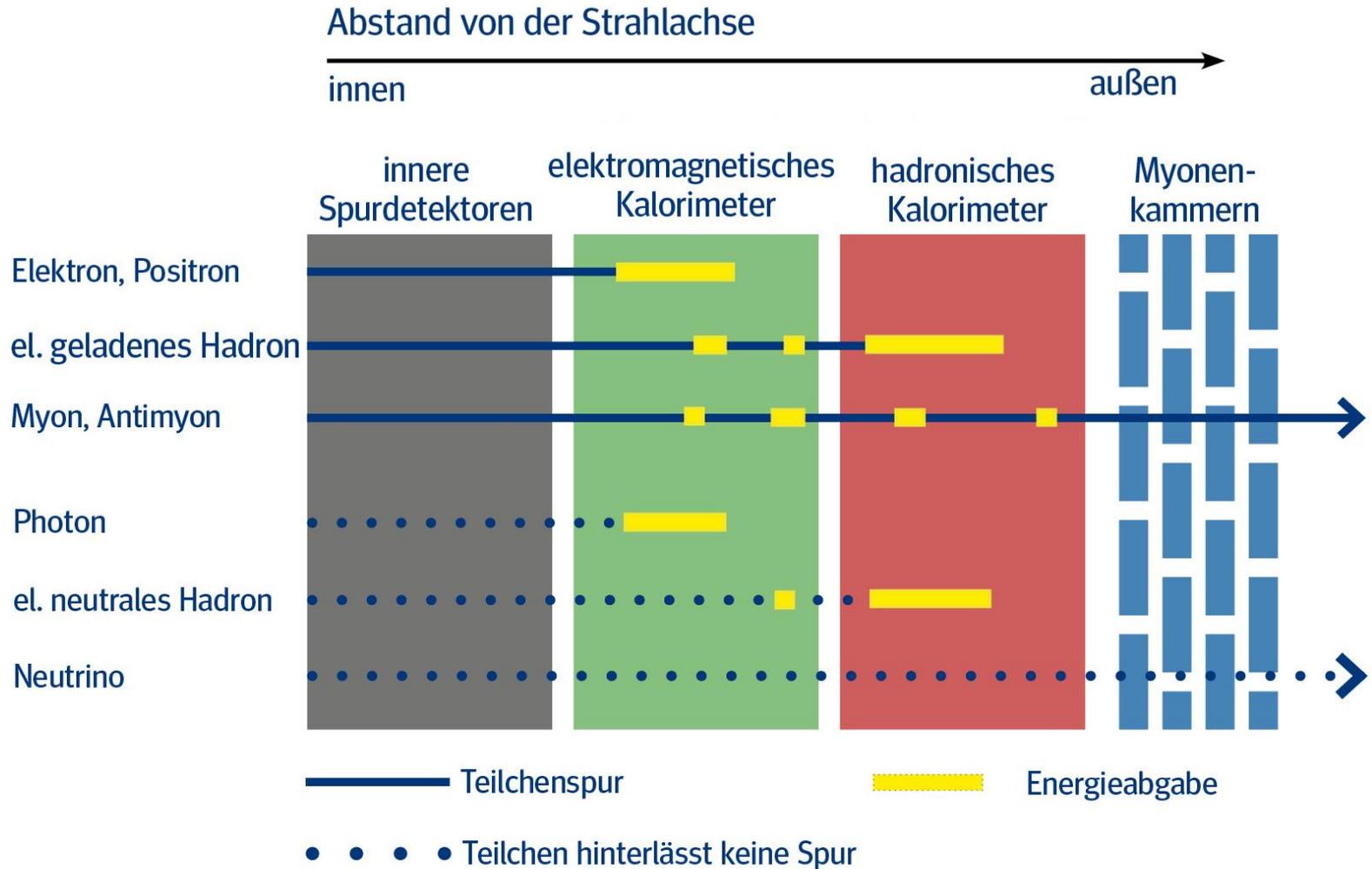


# Myonenkammern

- ▶ Mehr als 380.000 Driftrohren
- ▶ Gesamtfläche ~ eines Fußballfelds
- ▶ Ortsauflösung: wenige Hundertstel Millimeter



# Teilchensignaturen im ATLAS-Detektor



# Arbeitsblätter: Aufbau ATLAS-Detektor

▶ Enthalten in der Materialsammlung von NTW

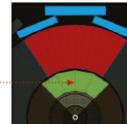
▶ <https://www.teilchenwelt.de/material/materialsammlung>



➤ Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in dem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Das elektromagnetische Kalorimeter

➤ Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektor-Komponente befindet.



1. Welche Teilchensorte(n) weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- |  |  |                                    |
|--|--|------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektronen               | <input type="checkbox"/> Myonen*             | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input type="checkbox"/> Protonen*                           | <input checked="" type="checkbox"/> Photonen | <input type="checkbox"/> Neutronen |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen* | <input type="checkbox"/> alle Hadronen       |                                    |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen  | <input type="checkbox"/> alle Leptonen       |                                    |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchen mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
- Sie erzeugen Photonen.
- Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
- Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

3. Wie erzeugen die Sekundärteilchen elektrische Signale?

- Ionisation
- Szintillation

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- Energie des ursprünglichen Teilchens
- elektrische Ladung des Teilchens
- Impuls des Teilchens
- Spur des Teilchens

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- Silizium
- flüssiges Argon
- Gas in Driftrohren
- Blei
- Stahl
- Szintillatoren

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:

Photonen und elektrisch geladene Teilchen erzeugen in Blei- und Stahlschichten Schauer aus Elektronen,

Positronen und Photonen. Diese Teilchen ionisieren flüssiges Argon. Die freigesetzten Elektronen wandern zu

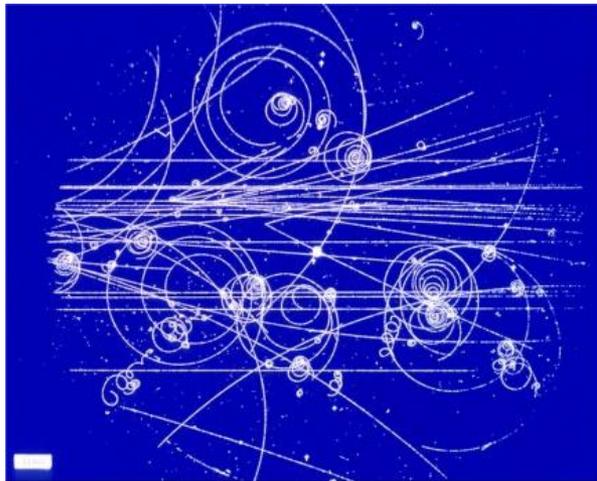
Elektroden. Aus der insgesamt gemessenen elektrischen Ladung kann man schließen, wieviel Energie das ursprüngliche Teilchen besaß.

\* In Fern werden nur die angekreuzten Teilchen erwähnt, für diese stimmt auch die Antwort auf Frage 2. Genau genommen wechselwirken alle elektrisch geladenen Teilchen im elektromagnetischen Kalorimeter. Hadronen und Myonen durchqueren es jedoch, ohne dass sämtliche Energie abzugeben. Hadronen lösen Teilchenschauer aus Hadronen aus, Myonen ionisieren das Material. Diese Teilchensorten hinterlassen auch in weiter außen liegenden Detektorregionen Signale.

# Aufgaben/Materialien für den Schulunterricht

## ► Bildgebende Detektoren

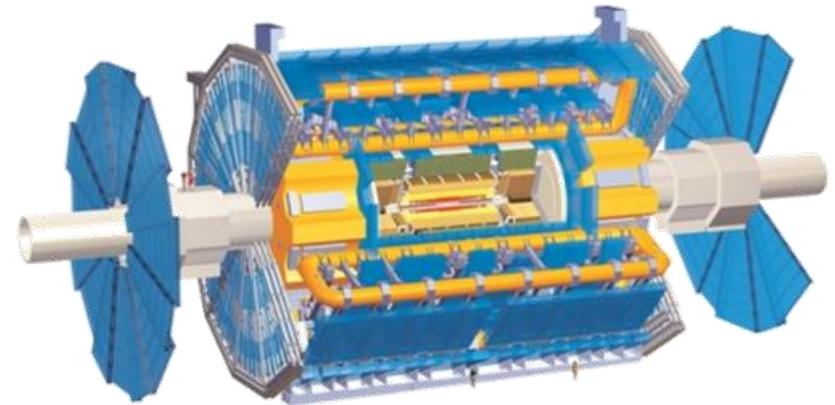
- Nebelkammer
- Blasenkammer



## ► Blasenkammeraufnahmen mit GeoGebra

## ► Elektronische Detektoren

- ATLAS-Detektor
- Geige-Müller-Zählrohr



## ► Eventdisplays von Großdetektoren

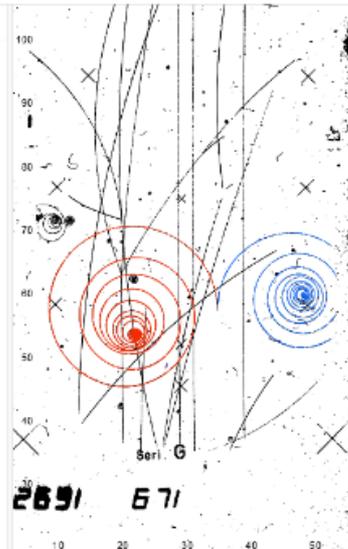
# Bildgebende Detektoren im Unterricht

- ▶ Blasenkammerbilder mit GeoGebra auswerten
- ▶ Tutorials
- ▶ Diverse Aufgaben auf Arbeitsblättern

## 3. AB2691 - Impulsbestimmung von neutralen Teilchen

Autor: Netzwerk Teilchenwelt

### 3. AB2691 - Impulsbestimmung von neutralen Teilchen



Dies ist eine Übung zur Blasenkammeraufnahme 2691, auf welcher zwei Spuren vom gleichen Vertex farblich hervorgehoben sind.

Die Blasenkammeraufnahme stammt von der 2 m Blasenkammer am CERN. Die Strahlteilchen bewegen sich auf der Aufnahme vom unteren zum oberen Bildrand. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

In dieser Übung sollen die Geschwindigkeiten zweier Teilchen verglichen werden. Dazu findet zunächst eine Teilchenidentifikation sowie eine Analyse des Prozesses am Vertex statt. Weiterhin wird der Impulserhalt im Vertex betrachtet.

Mit dem Knopf "Weiter" unten rechts gelangst du zur ersten Aufgabe.

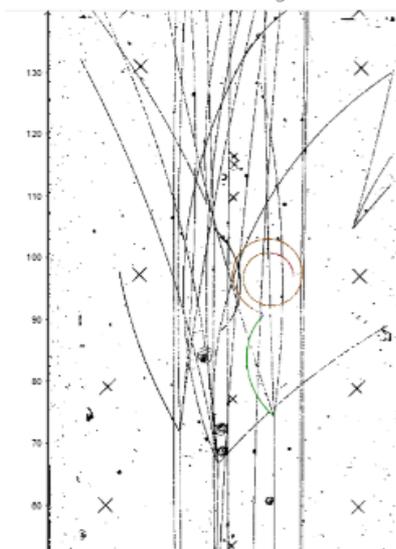
Viel Erfolg!



## 2. AB2806 - Die Umwandlung des Pions

Autor: Netzwerk Teilchenwelt

### 2. AB2806 - Die Umwandlung des Pions



**1. Aufgabe - Identifikation des Teilchens**

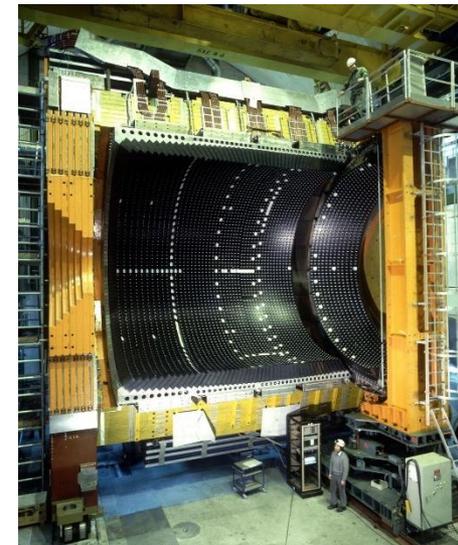
Die grün hervorgehobene Spur wurde von einem Pion erzeugt. Entscheide, um welches Pion es sich gehandelt hat. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

$\pi^0$      $\pi^+$      $\pi^-$

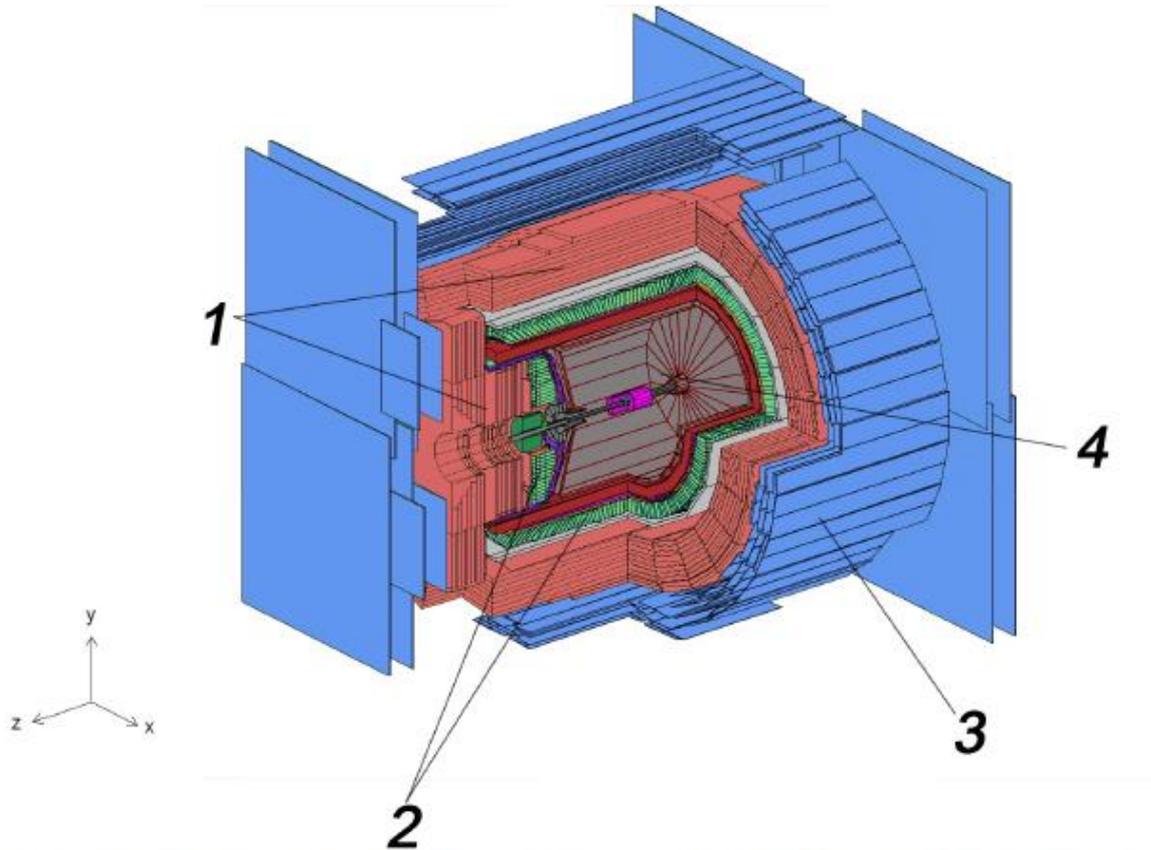
 

# Beispiel für Großdetektoren: OPAL

- ▶ Der OPAL-Detektor war Detektor bei LEP
- ▶ LEP: Teilchenbeschleuniger, der bis 2000 im selben Tunnel wie der LHC betrieben wurde
- ▶ Kollisionen von Elektronen und Positronen bei Energien bis 104 GeV pro Teilchen
- ▶ Präzise Untersuchung der Eigenschaften von Z-Teilchen (LEP1) und W-Teilchen (LEP2)



# Aufbau des OPAL-Detektors



(Quelle: Vollmer, C. F. (2004). Bestimmung der Masse und Breite des W-Bosons im semileptonischen Zerfallskanal mit dem OPAL Detektor bei LEP, verändert durch Philipp Lindenau)

1 hadronische Kalorimeter

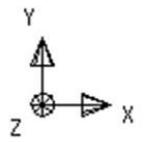
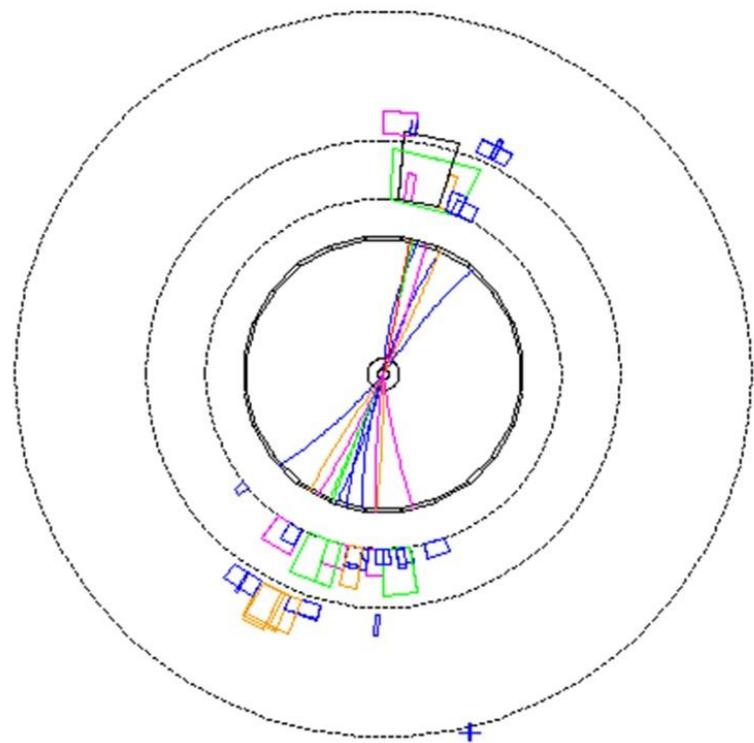
2 elektromagnetische Kalorimeter

3 Myonenkammer

4 Spurkammer

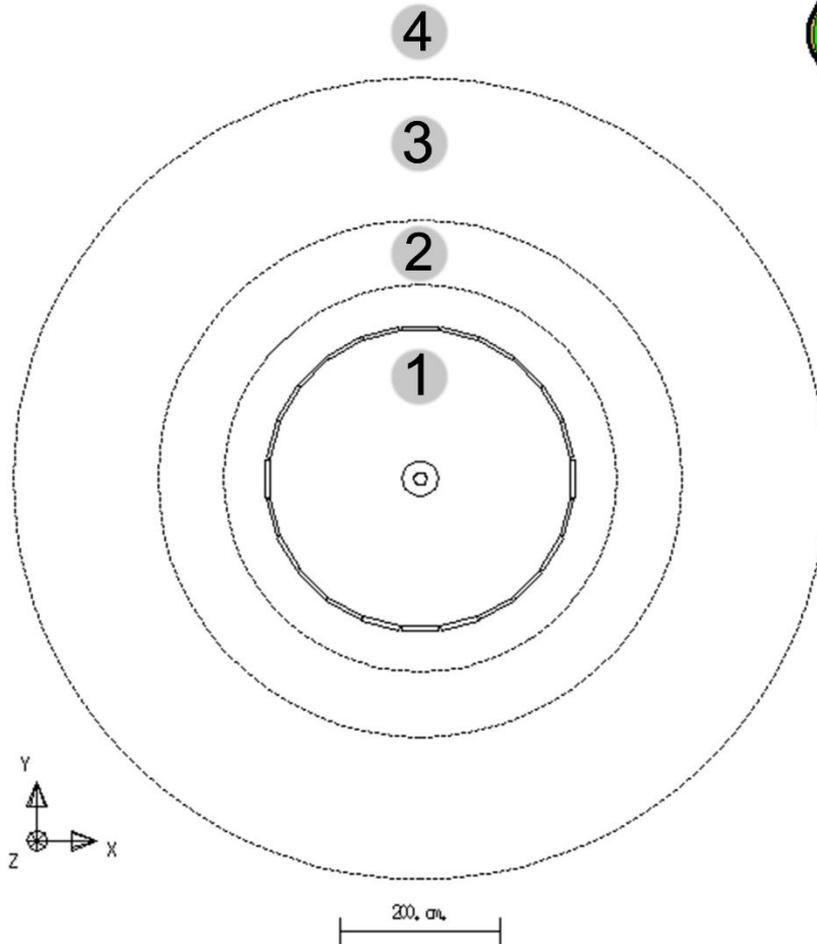
# Das OPAL-Eventdisplay

Run: event 5293: 20248 Ctrk(N= 26 SumE= 53.4) Ecal(N= 41 SumE= 63.0)  
Bbeam 46.800 Vtx ( -.04, .04, 1.86) Hcal(N=17 SumE= 10.2) Muon(N= 0)



Centre of screen is ( .0000, 19.2888, .0000) 200 cm 124850 GeV

# Das OPAL-Eventdisplay

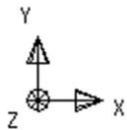
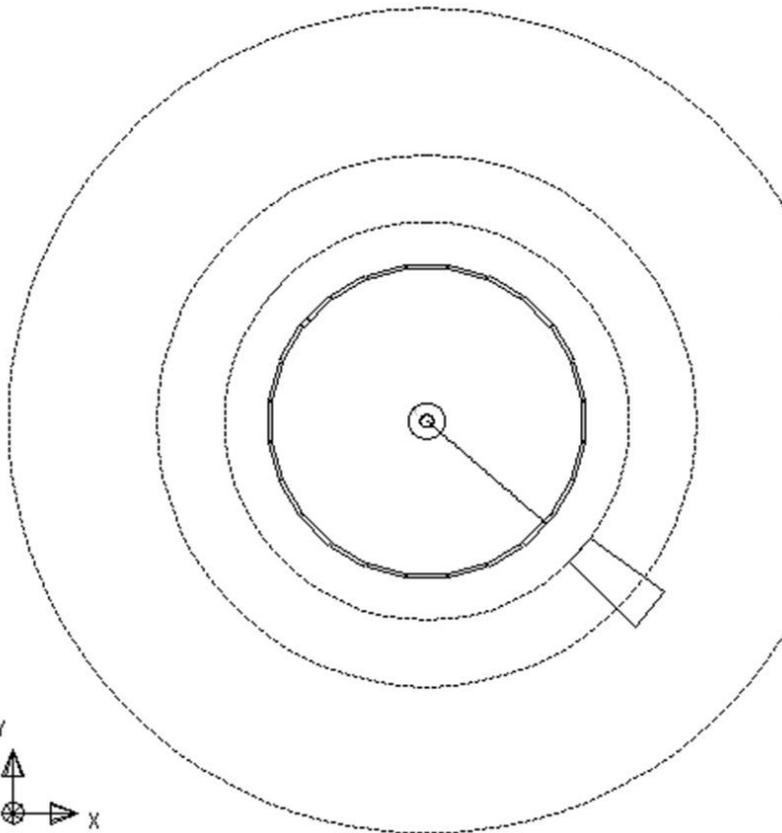


1 Spurkammer

2 elektromagn. Kalorimeter

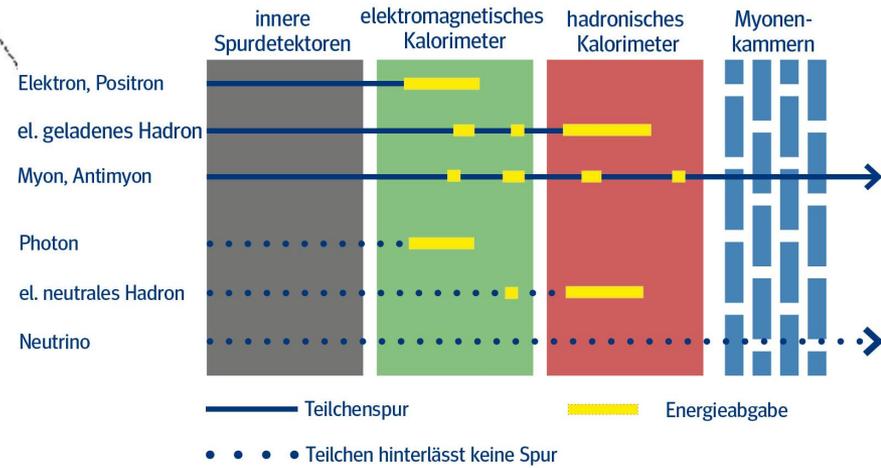
3 hadronisches Kalorimeter

4 Myonkammer

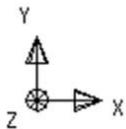
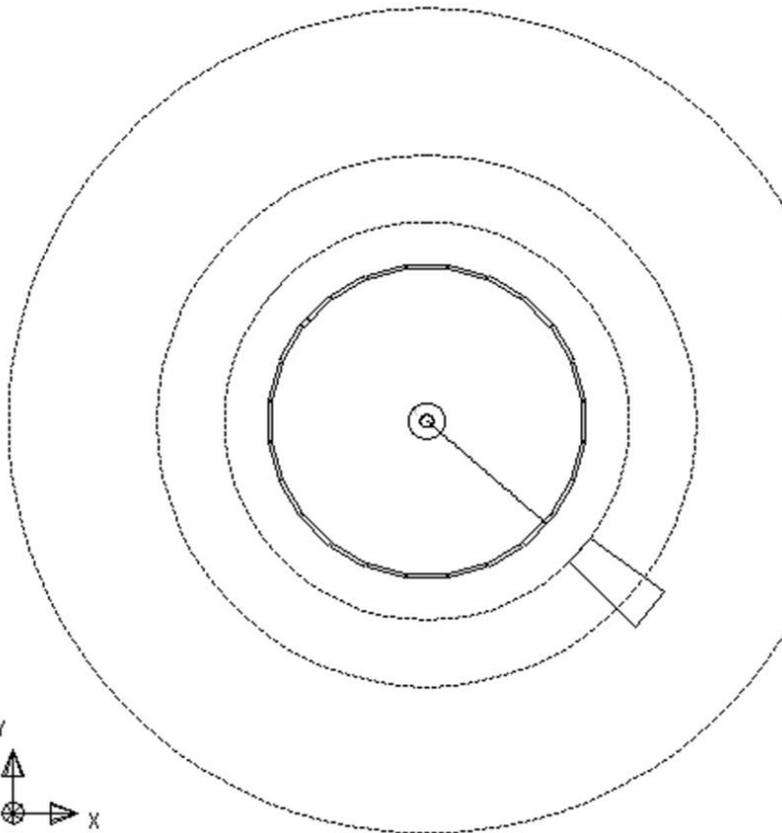


Centre of screen is ( 0,000, 19,2857, 0,0000)

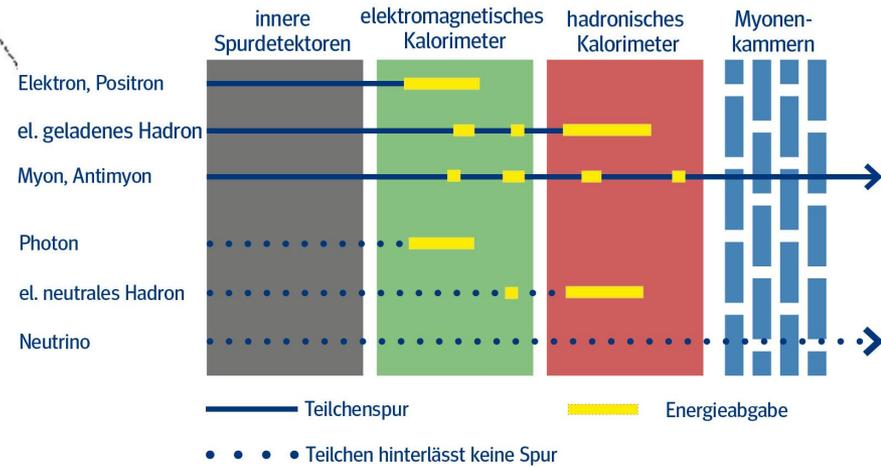
200, cm 1248 50 GeV

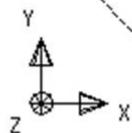
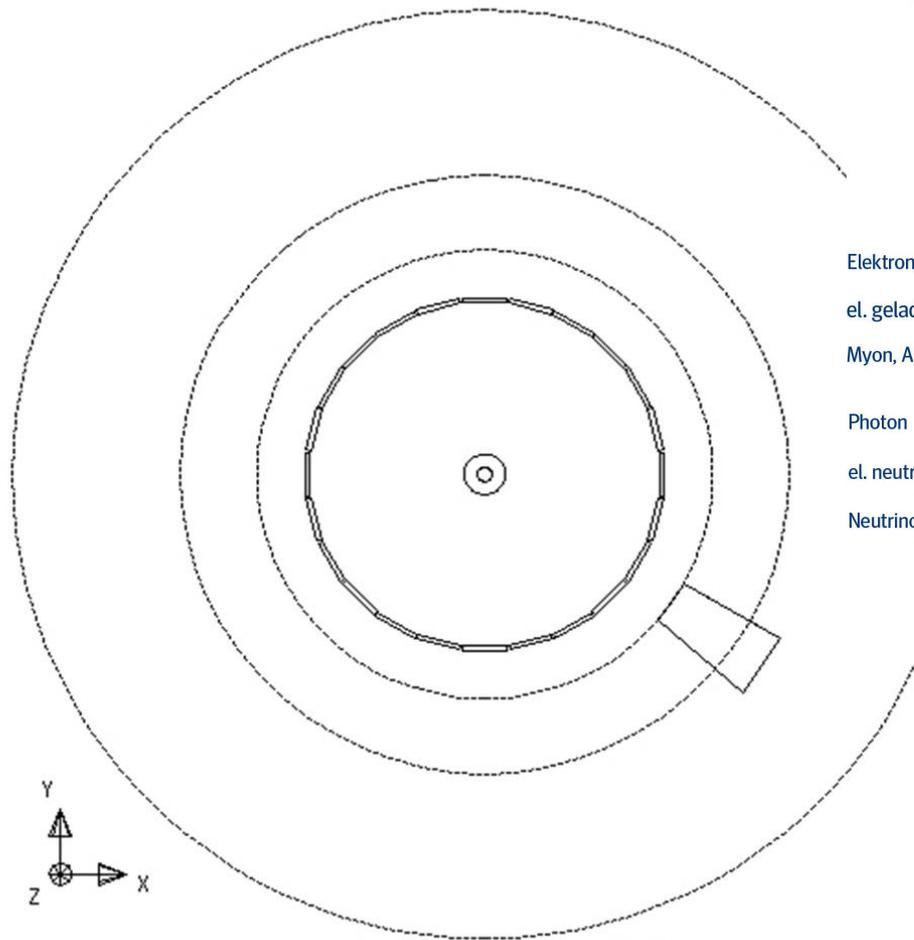


# Elektron oder Positron



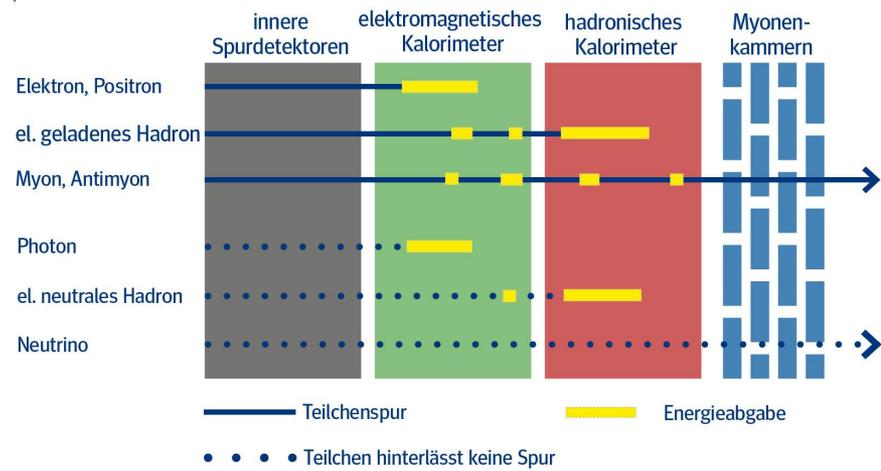
Centre of screen is ( 0,000, 19,2857, 0,0000 )      200, cm      1248 50 GeV



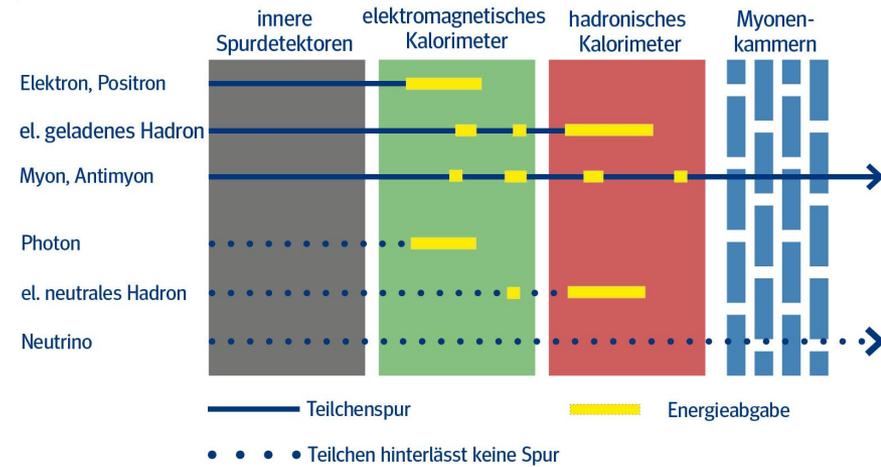
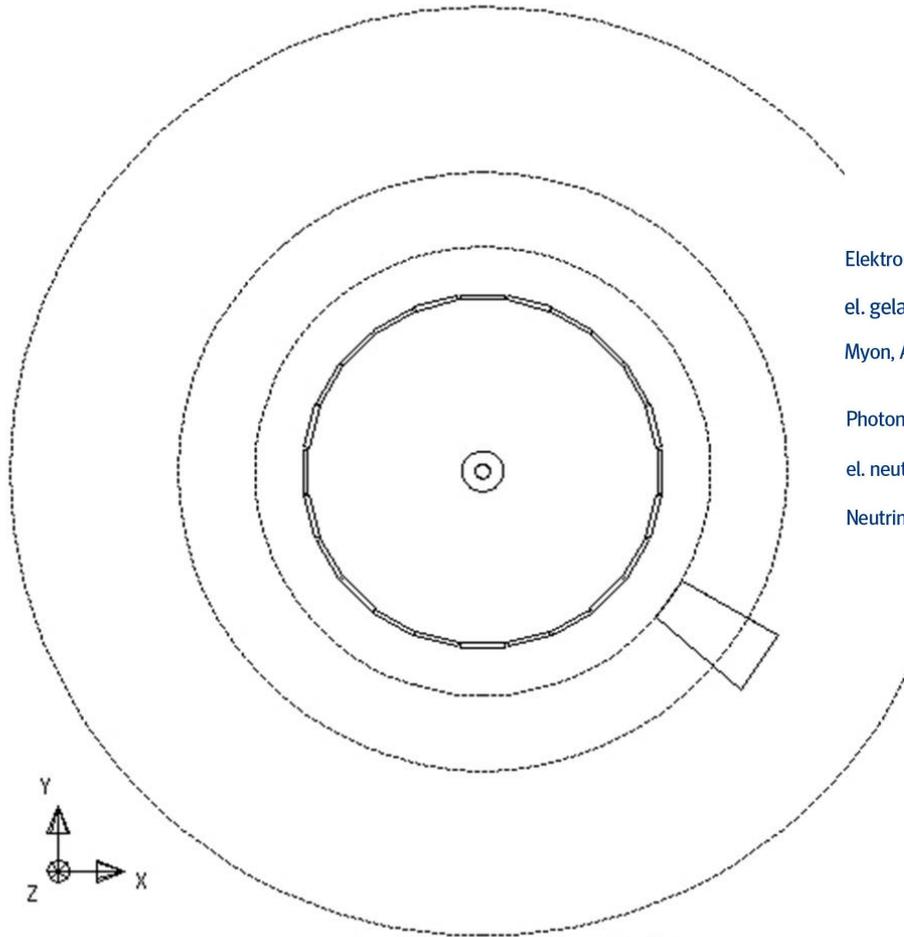


Centre of screen is ( 0,000, 19,287, 0,000)

200 cm 12 48 50 GeV



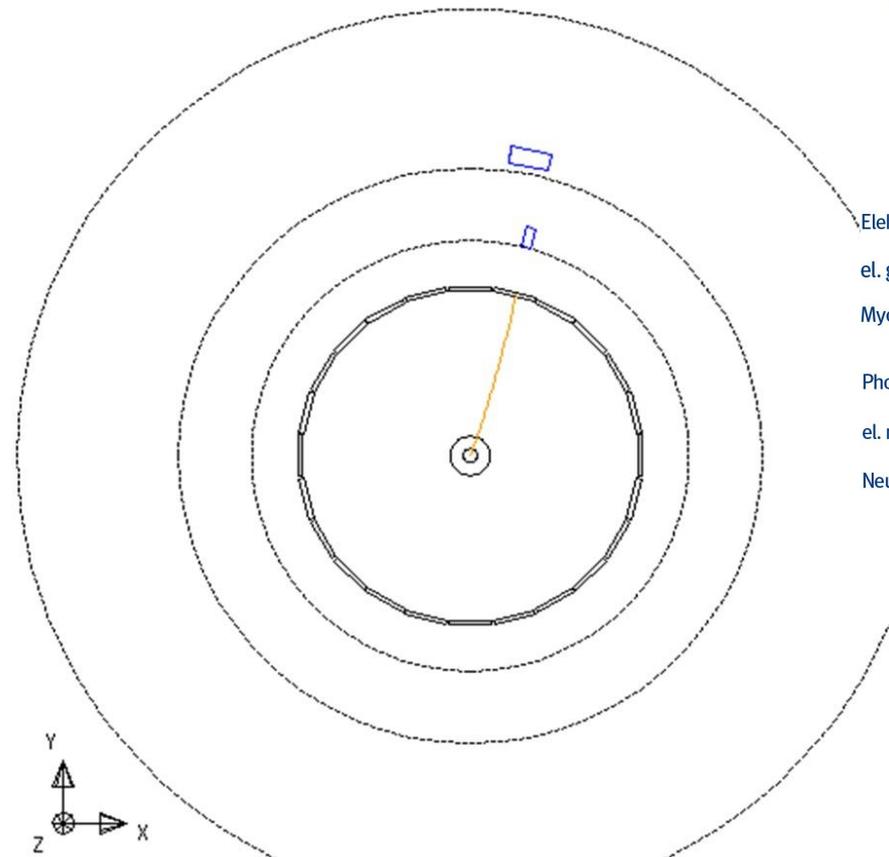
# Photon



Centre of screen is ( 0,0000, 19,2857, 0,0000)

200 cm

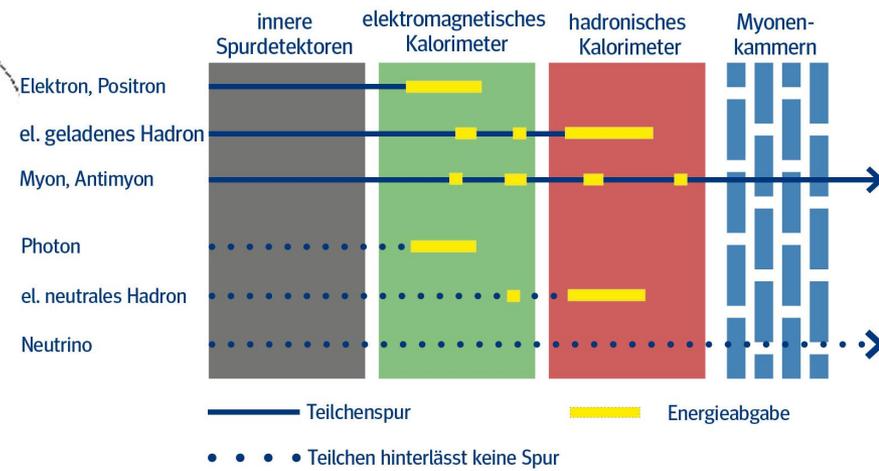
12 48 50 GeV



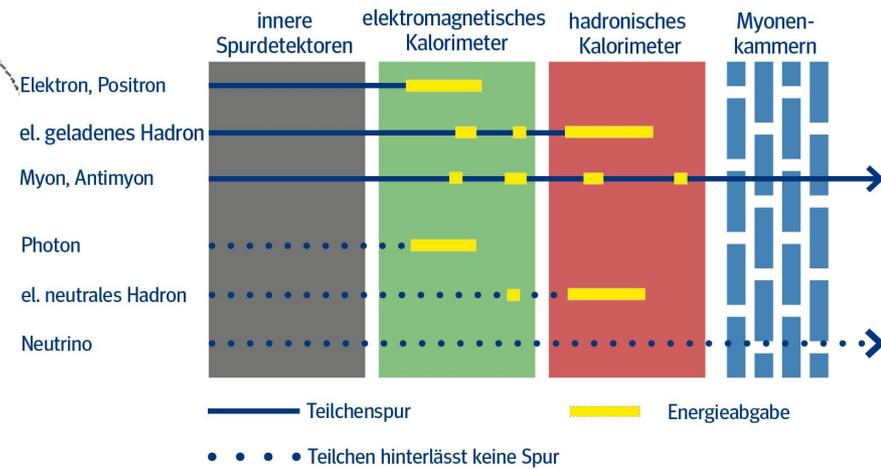
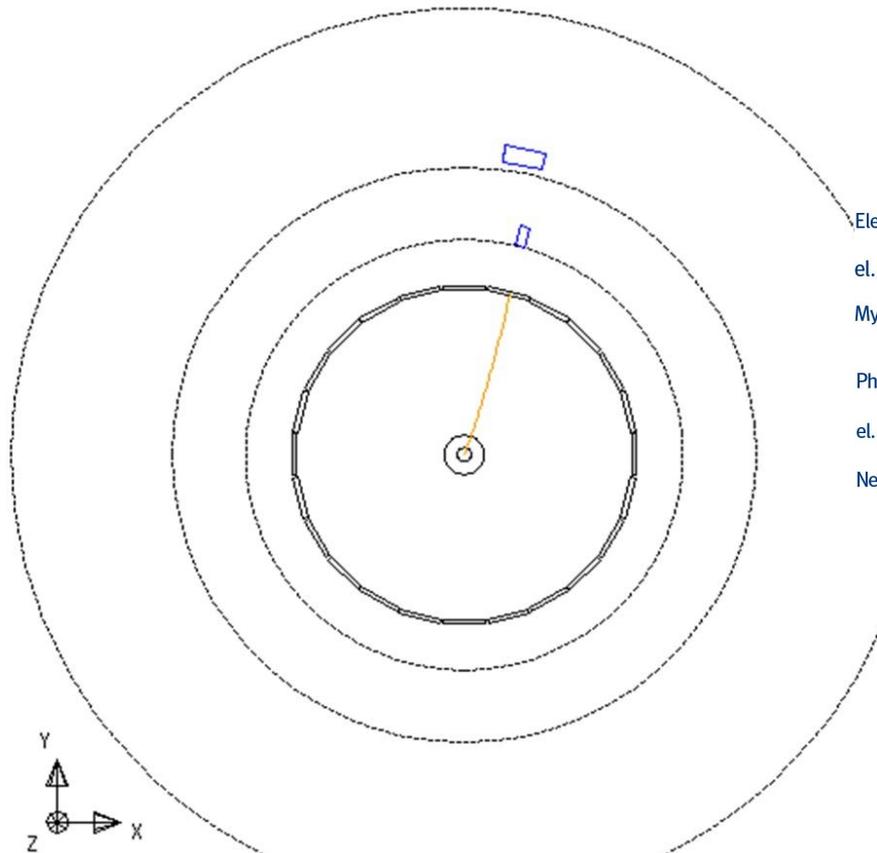
Centre of screen is ( 0,000, 38,5715, 0,0000 )

200 cm

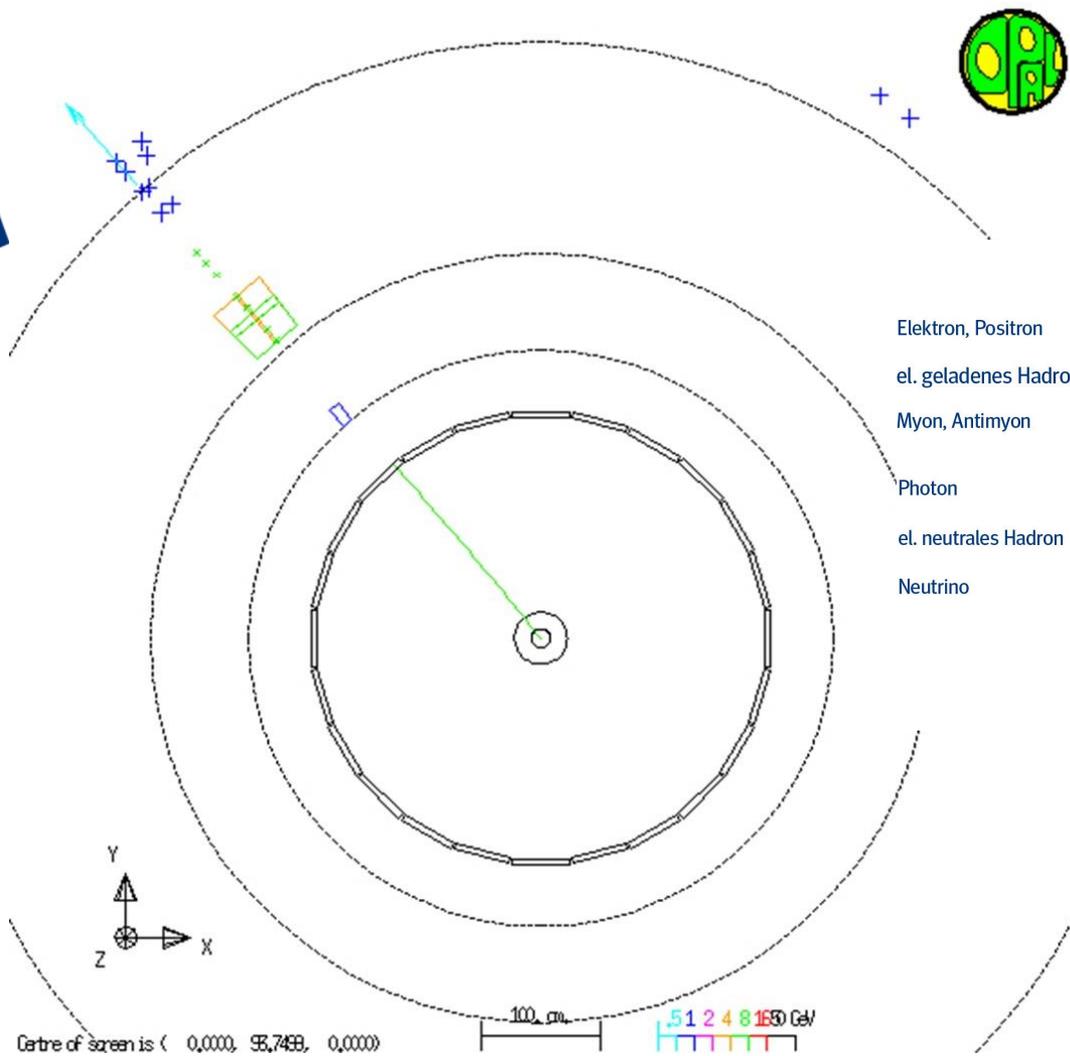
1248 50 GeV



# El. geladenes Hadron



Centre of screen is ( 0,0000, 38,5715, 0,0000)      200 cm      1248 50 GeV

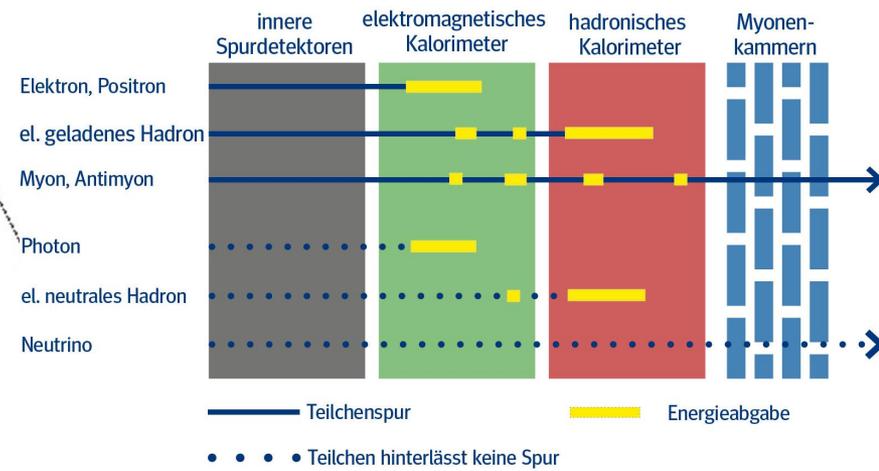
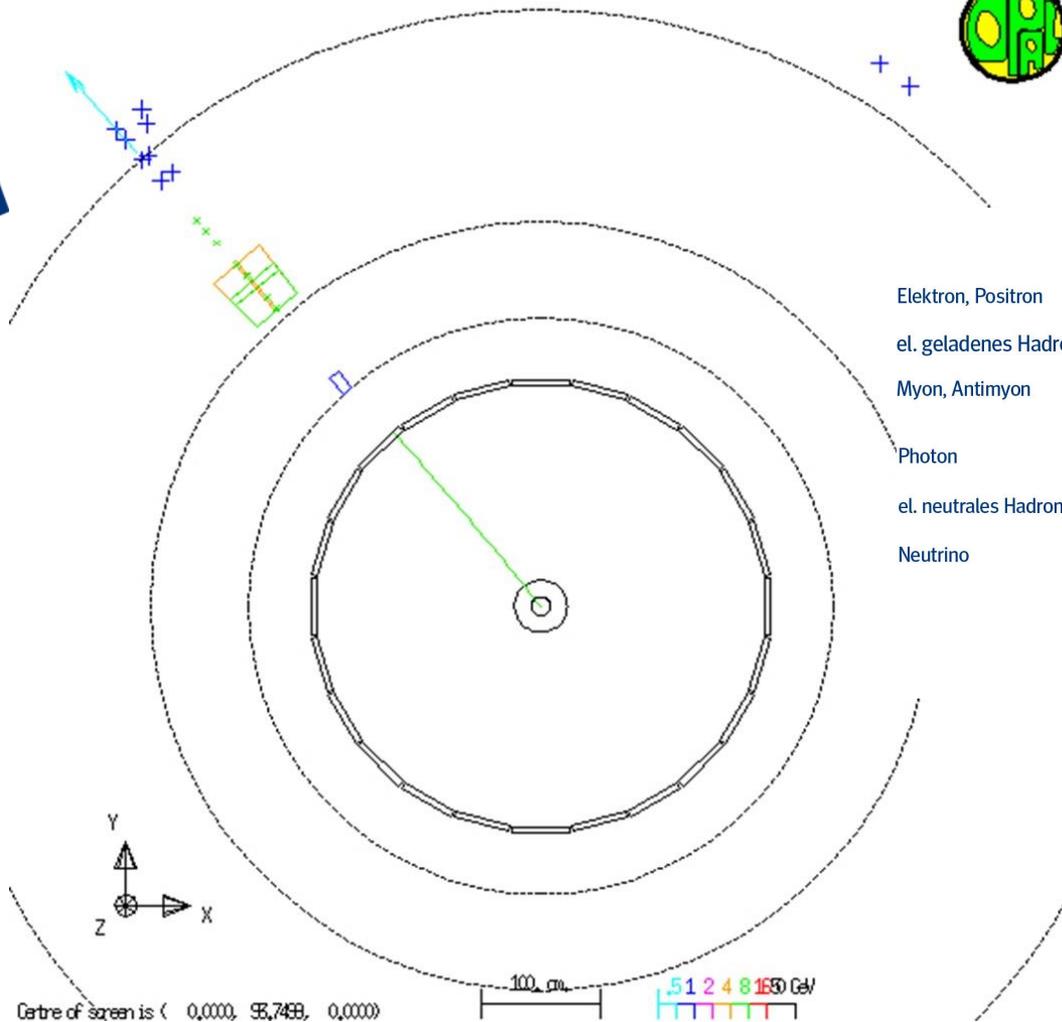


	innere Spurdetektoren	elektromagnetisches Kalorimeter	hadronisches Kalorimeter	Myonenkammern
Elektron, Positron	—	■		
el. geladenes Hadron	—	■	■	
Myon, Antimyon	—	■	■	→
Photon	•••	■		
el. neutrales Hadron	•••	■	■	
Neutrino	•••	•••	•••	→

— Teilchenspur      ■ Energieabgabe

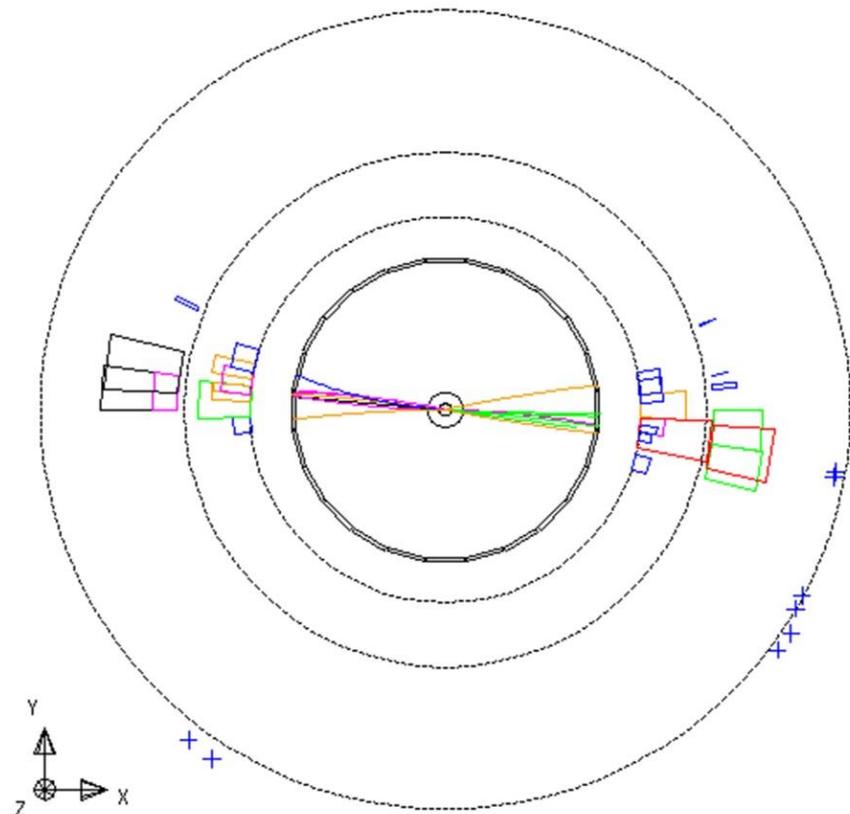
••••• Teilchen hinterlässt keine Spur

# Myon oder Anti-Myon



# Jets - erzeugt durch Quarks oder Gluonen

Run: event 5293: 54644 CTrk(N= 26 SumP= 59.9) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)  
Ebeam 46.599 Vtx ( .00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)



Centre of screen is ( .0000, 19.2857, .0000) 200. cm 124850 GeV

# Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

- ▶ Kollisionsenergie wurde bei LEP sehr genau auf die bekannte Z-Masse eingestellt.
  - Z-Teilchen dominieren Beschreibung der Prozesse und die Erzeugung der beobachtbaren Teilchen (Z-Resonanz)

1.  $Z \rightarrow q + \bar{q}$

2.  $Z \rightarrow e^- + e^+$

3.  $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$

4.  $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$

5.  $Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$

# Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

1.  $Z \rightarrow q + \bar{q}$

2.  $Z \rightarrow e^- + e^+$

3.  $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$

4.  $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$  nur anhand der Umwandlungsprodukte  
der Tauonen identifizierbar (siehe Übung)

~~5.  $Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$~~  im Detektor nicht (direkt) nachweisbar

# Diskussion / Fragen



# Option 1: Teilchenidentifikation im OPAL-Eventdisplay



# Option 2: Teilchenidentifikation in Blasenkammerbildern



# Aufgaben

## ▶ Digital via GeoGebra App

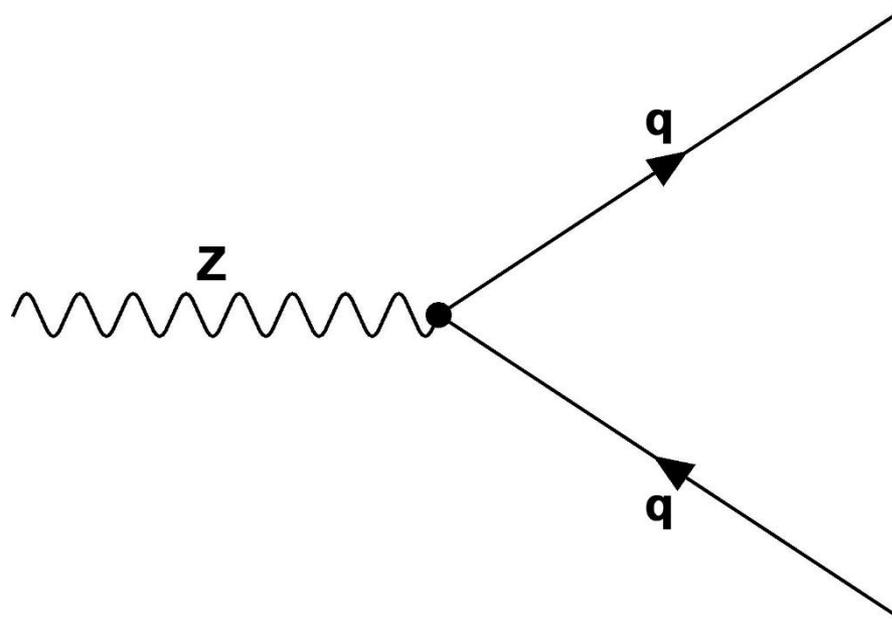
<https://www.geogebra.org/m/VAK3P8ar>

- ▶ **Schritt 1:** Lest die „Einführung zur Blasenkammer“ und vergleicht die Informationen zur Spuridentifikation mit dem Übersichtsblatt (siehe Indico)
- ▶ **Schritt 2:** Bearbeitet digitale Arbeitsblätter eurer Wahl
  - Nutzt dazu auch gern die zugehörigen gedruckten Arbeitsblätter

# Forschungsergebnisse bei LEP

# Was hat man gemessen?

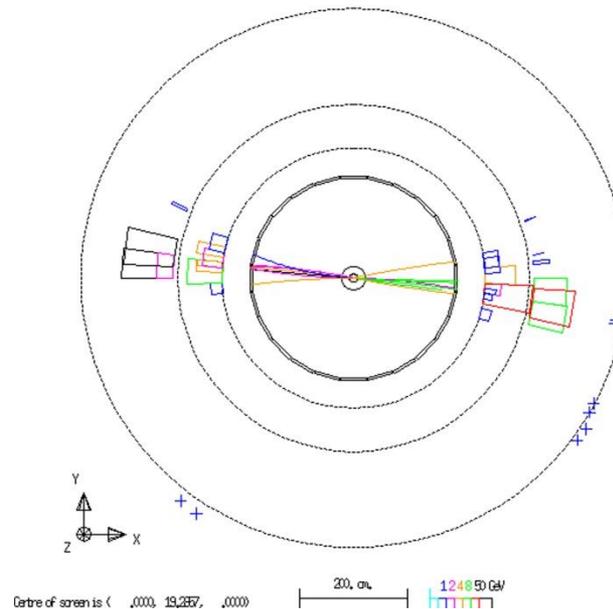
- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?



# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

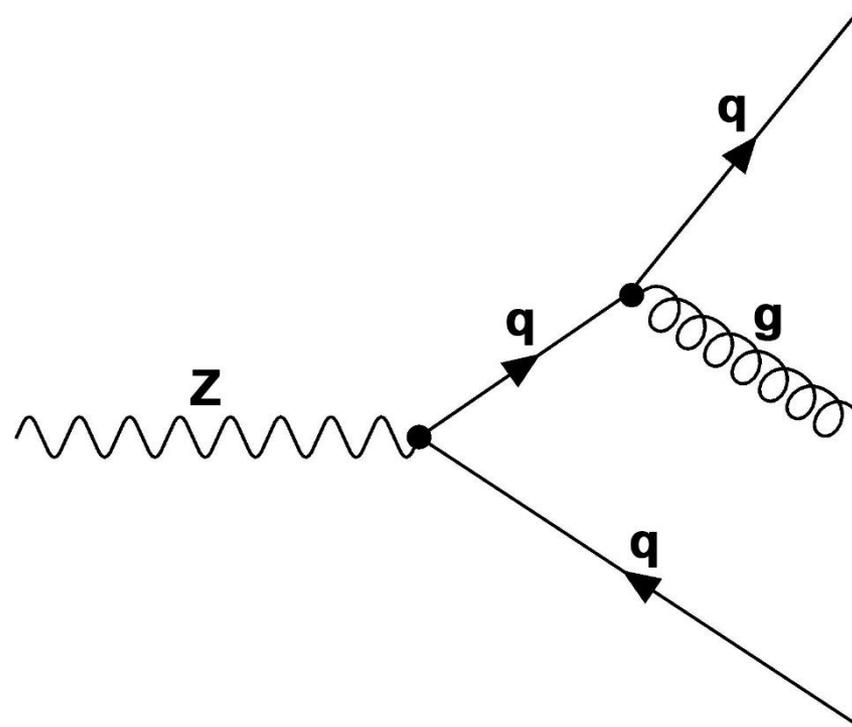
- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?

```
Run:event 5293: 54644 CTrk(N= 26 Sump= 59.0) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)  
Ebeam 46.589 Vtx ( .00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)
```



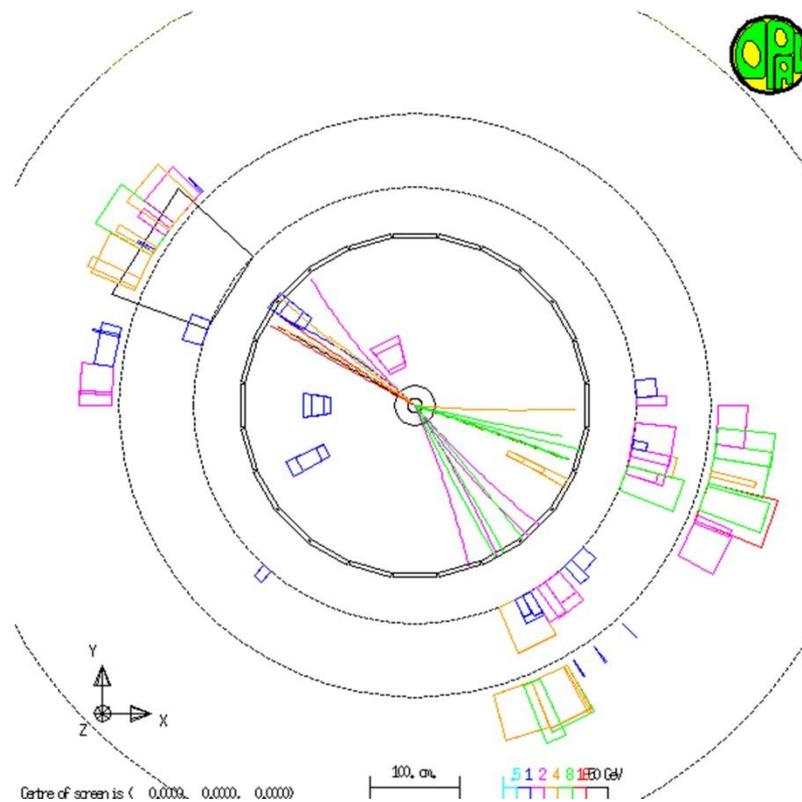
# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

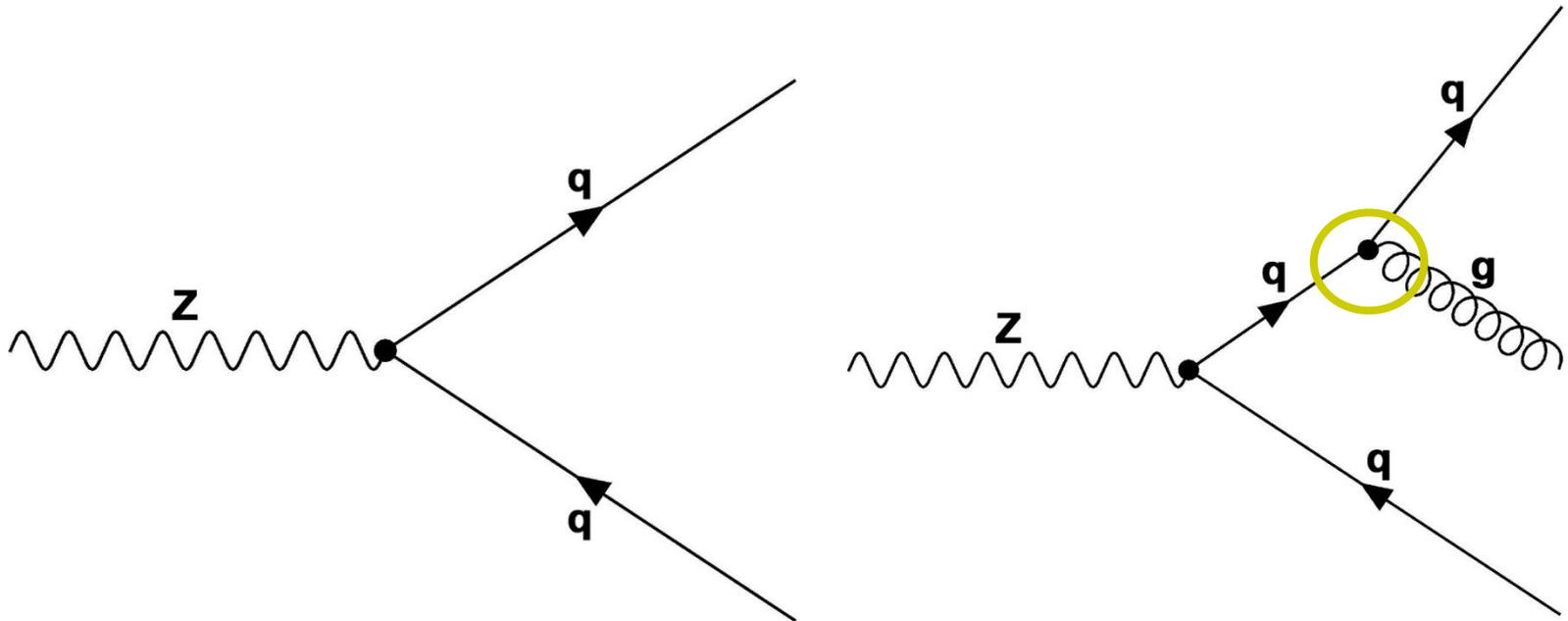


# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:



# Bestimmung des starken Kopplungsparameters



- Feynman-Diagramme unterscheiden sich nur durch einen zusätzlichen Vertex, an dem ein Prozess der starken WW stattfindet

# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess der starken Wechselwirkung abläuft ist direkt proportional zum starken Kopplungsparameter

$$P(3 - Jet) = P(2 - Jet) \cdot k \cdot \alpha_s$$

$$\alpha_s \sim \frac{P(3 - Jet)}{P(2 - Jet)}$$

- ▶ Dabei ist  $k$  ein Faktor, der durch weitere Kennwerte des Prozesses bestimmt wird und berechnet werden kann

# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Bei sehr vielen Ereignissen kann aus absoluten Häufigkeiten auf Wahrscheinlichkeit geschlossen werden

$$\alpha_s \sim \frac{H(3 - Jet)}{H(2 - Jet)}$$

# Diskussion / Fragen

