



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Detektoren und Eventdisplays

Forschung Trifft Schule
Bad Honnef | 24.01.2025

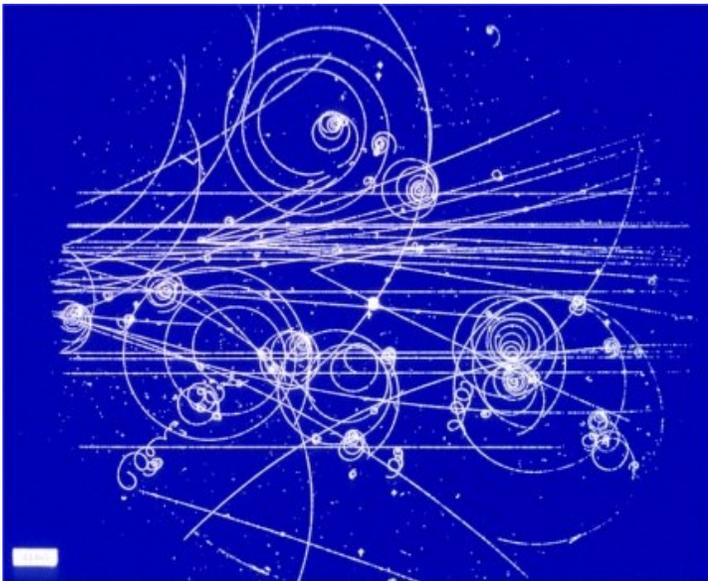


NETZWERK
TEILCHENWELT

Wie weist man Elementarteilchen nach?

► Bildgebende Detektoren

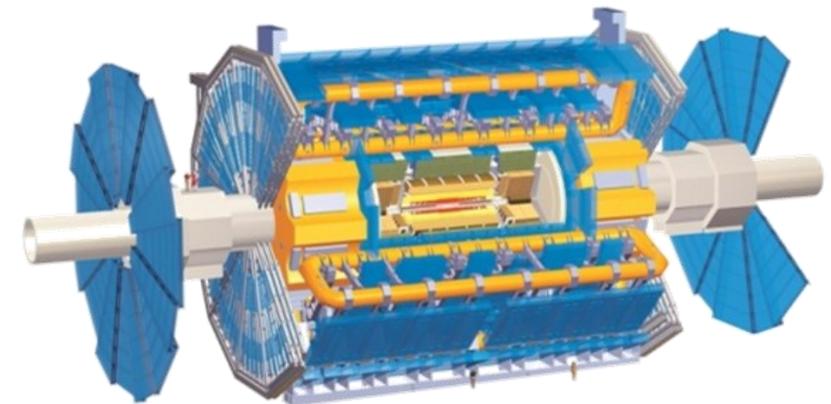
- Nebelkammer
- Blasenkammer



► sichtbare Teilchenspuren

► Elektronische Detektoren

- ATLAS-Detektor
- Geiger-Müller-Zählrohr



► elektrische Signale

- ## ► Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

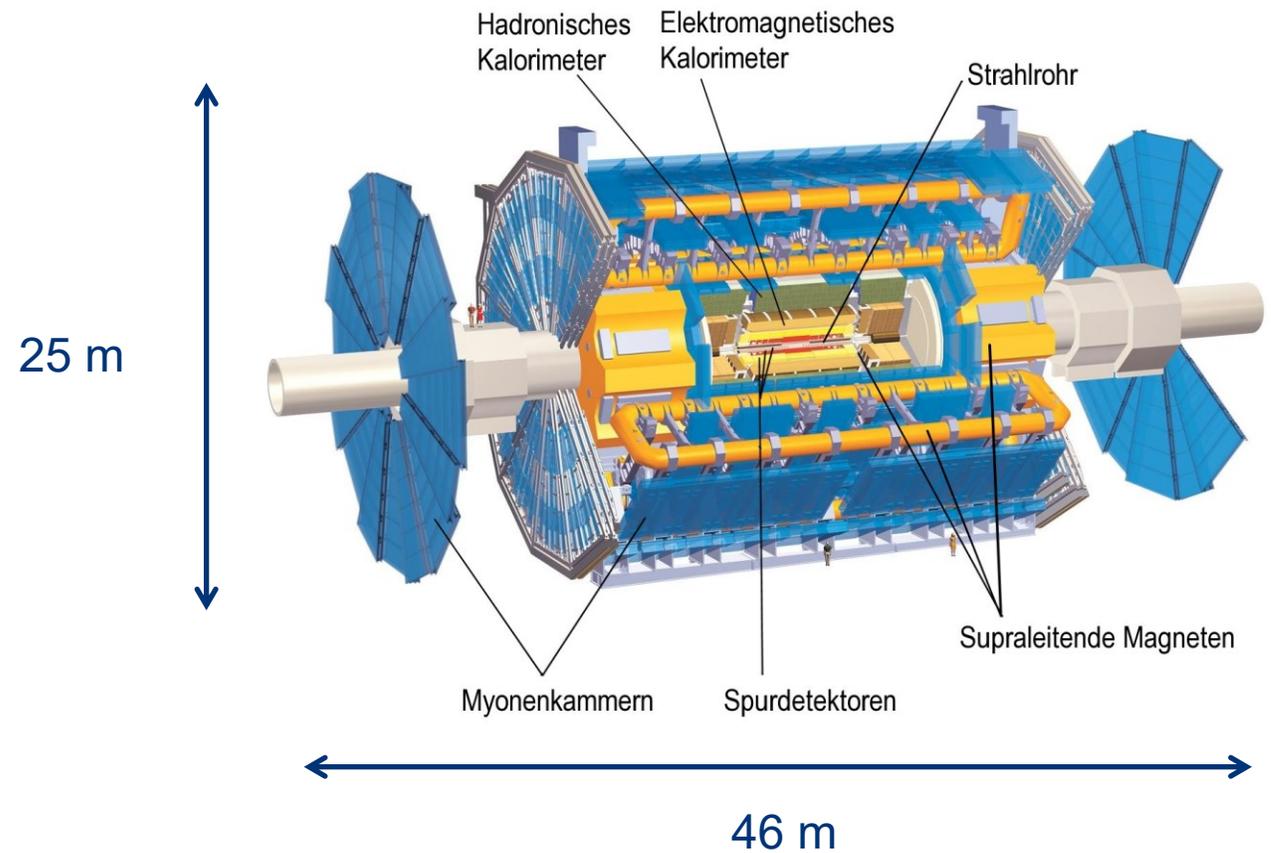
Der ATLAS-Detektor ist das hier nicht!



Das ist nur der Magnet!

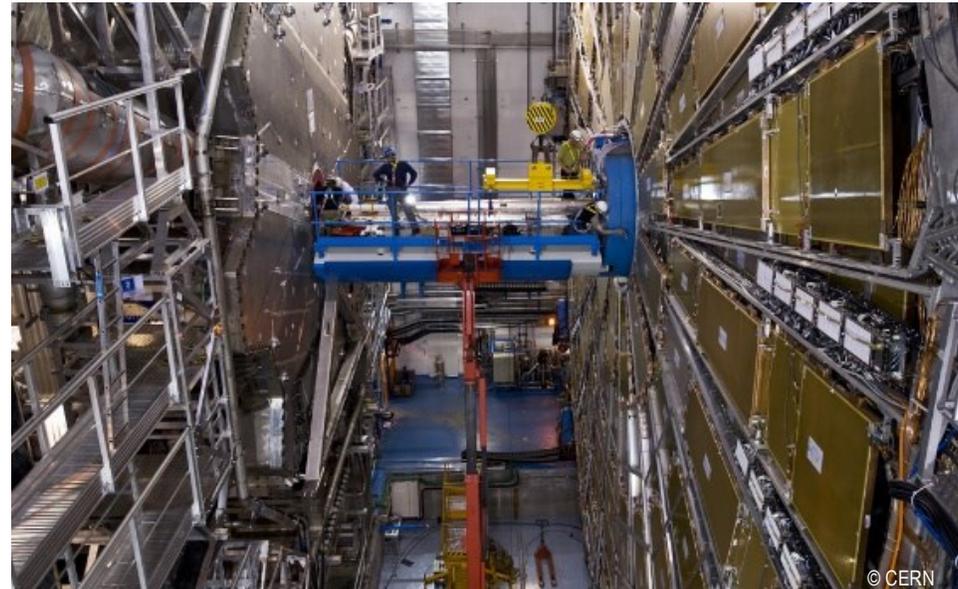
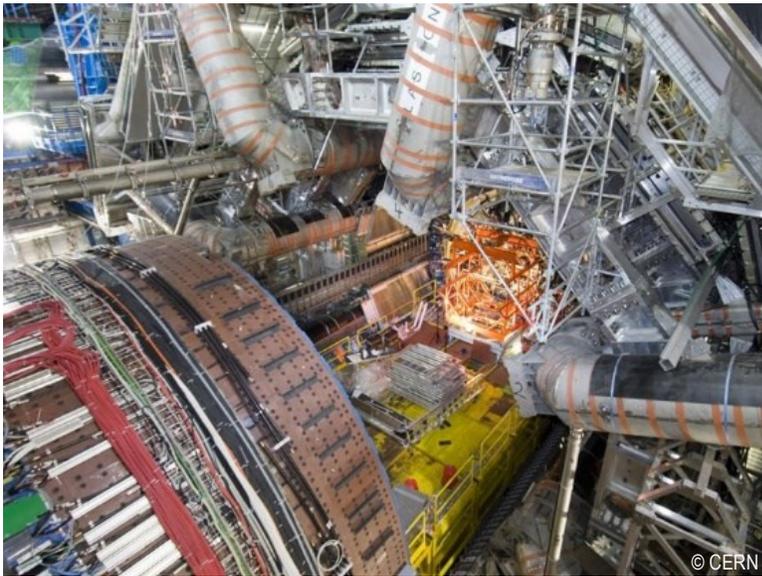
Der ATLAS-Detektor (A Toroidal LHC AparatuS)

- ▶ 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>

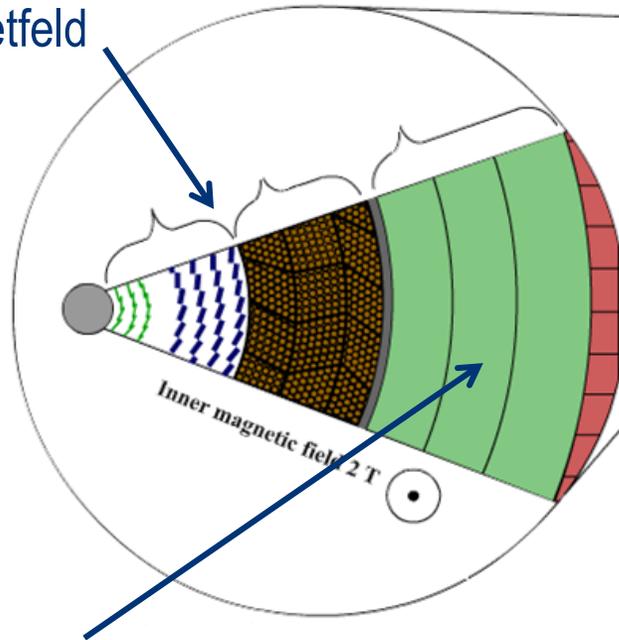


Detektoraufbau am Beispiel von ATLAS

- ▶ 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

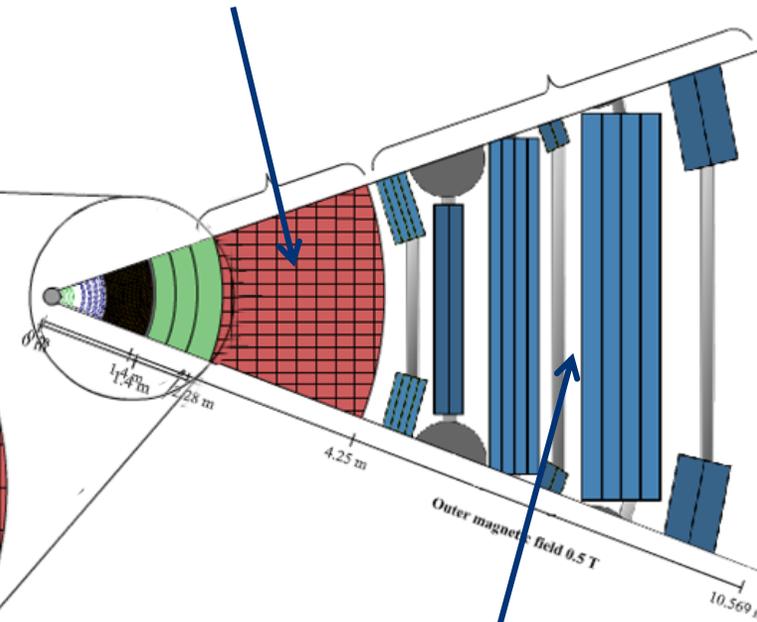


Elektromagnetisches Kalorimeter

- 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

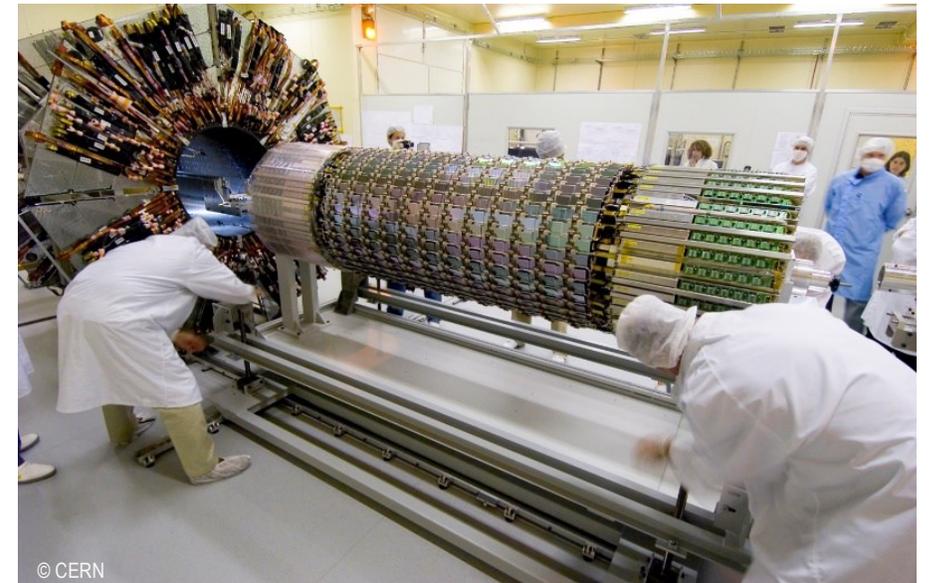
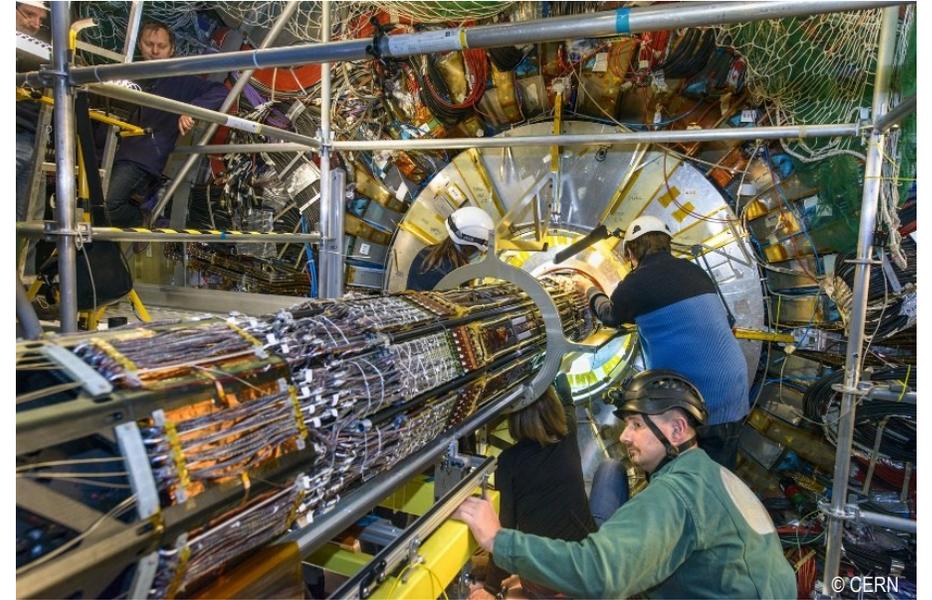
ATLAS - Spurdetektoren

▶ Pixel Detektor

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

▶ Silicon Microstrip Tracker

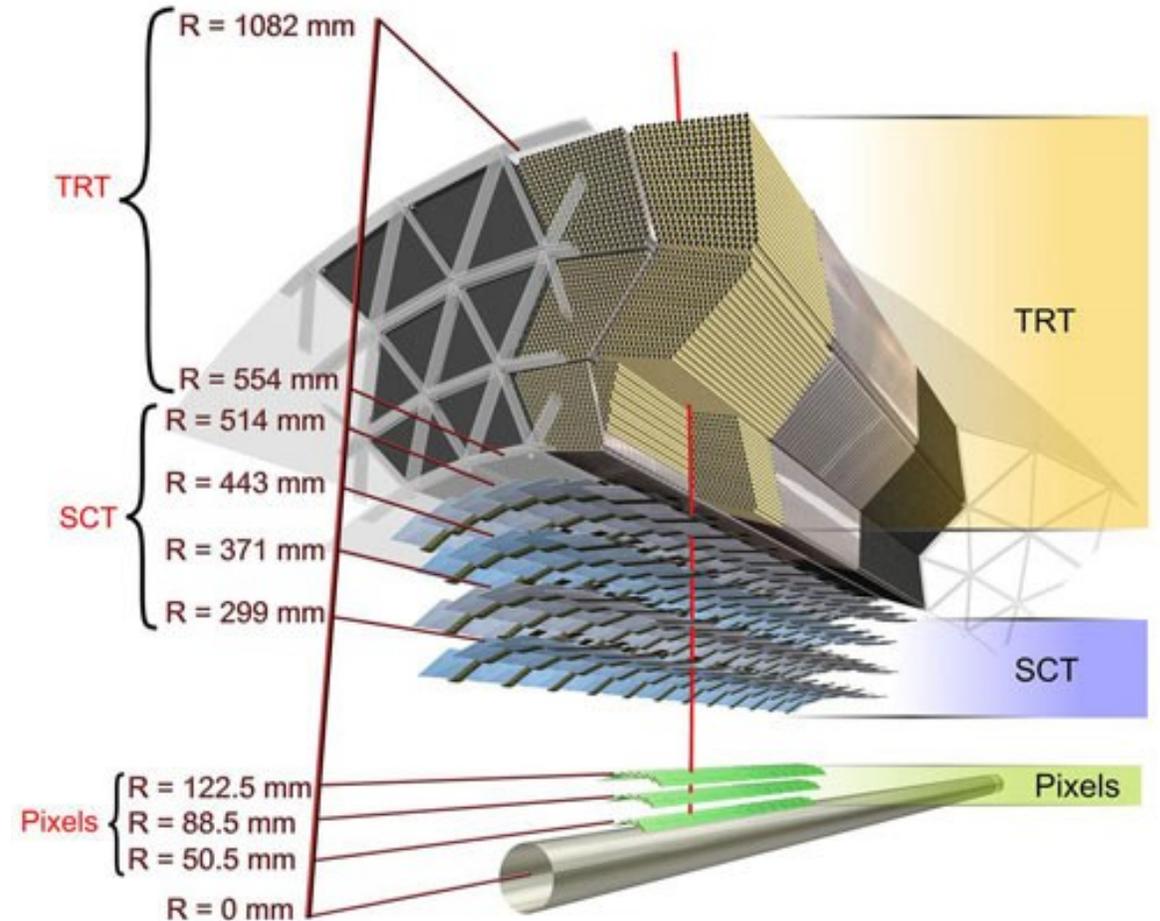
- Bestehend aus 4,088 doppelseitigen Modulen
- 6 Million Auslese Kanäle



ATLAS - Spurdetektoren

► Übergangsstrahlungsdetektor (TRT)

- Volumen 12m^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



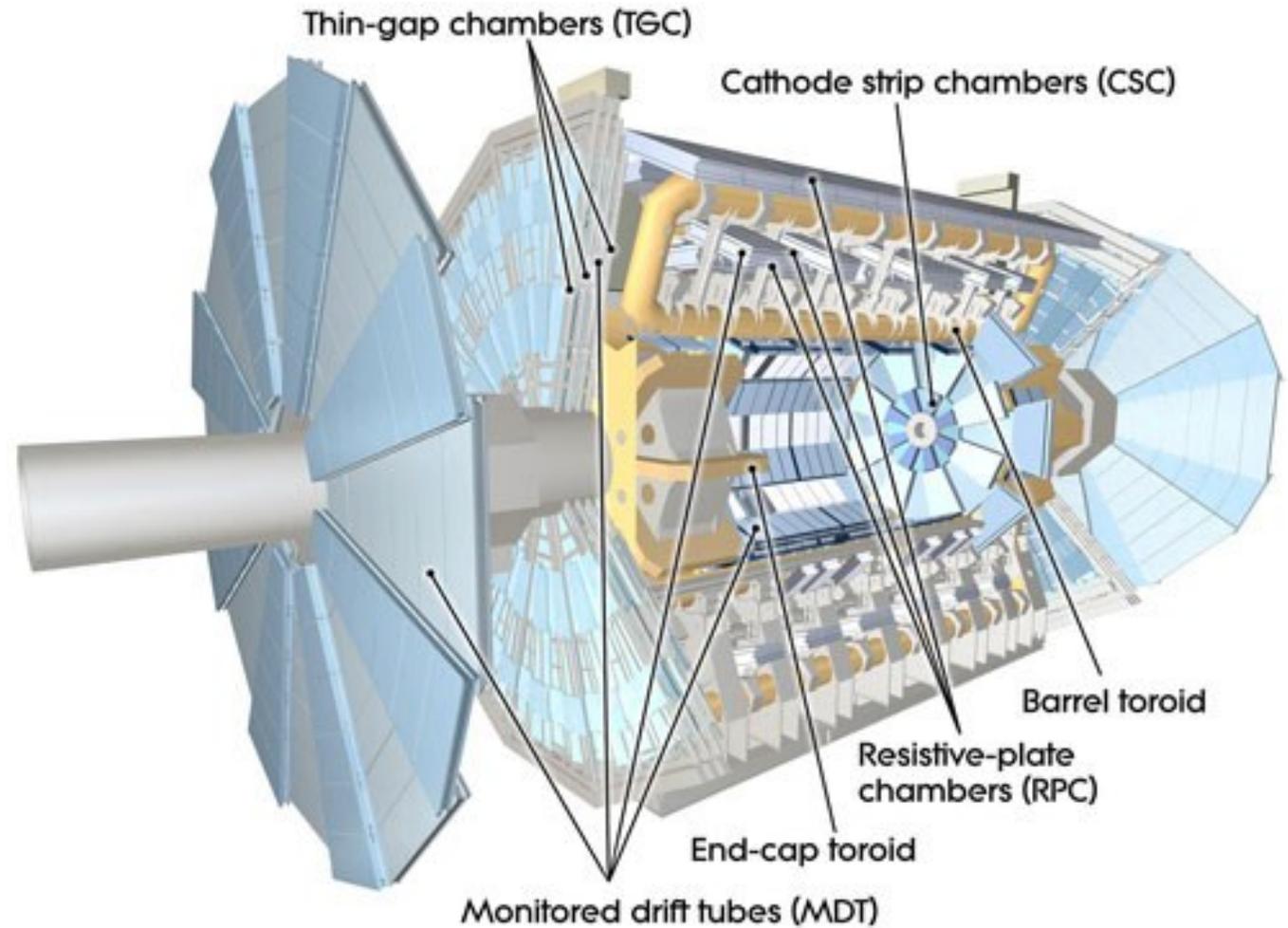
Kalorimeter

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

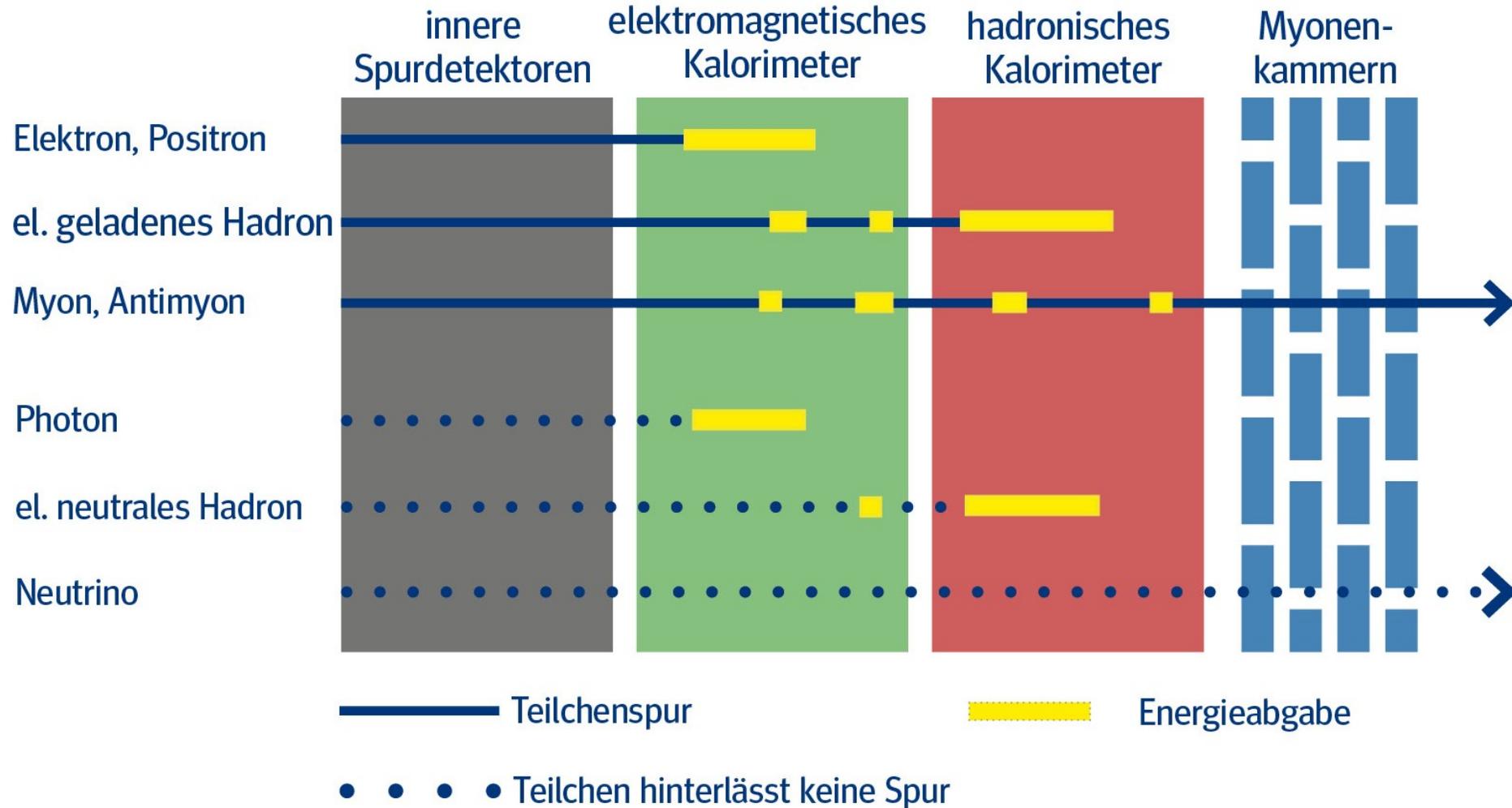


Myonenkammern

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



Teilchensignaturen im ATLAS-Detektor



Arbeitsblätter: ATLAS-Detektor

- ▶ Enthalten in der Materialsammlung von NTW
- ▶ <https://www.teilchenwelt.de/material/materialsammlung>



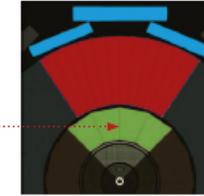
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 2A: ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER



- ▶ Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Das elektromagnetische Kalorimeter

- ▶ Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente 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?

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Energie des ursprünglichen Teilchens | <input type="checkbox"/> Impuls des Teilchens |
| <input type="checkbox"/> elektrische Ladung des Teilchens | <input type="checkbox"/> Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|--|---|---|
| <input type="checkbox"/> Silizium | <input checked="" type="checkbox"/> flüssiges Argon | <input type="checkbox"/> Gas in Driftrohren |
| <input checked="" type="checkbox"/> Blei | <input checked="" type="checkbox"/> Stahl | <input type="checkbox"/> 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.

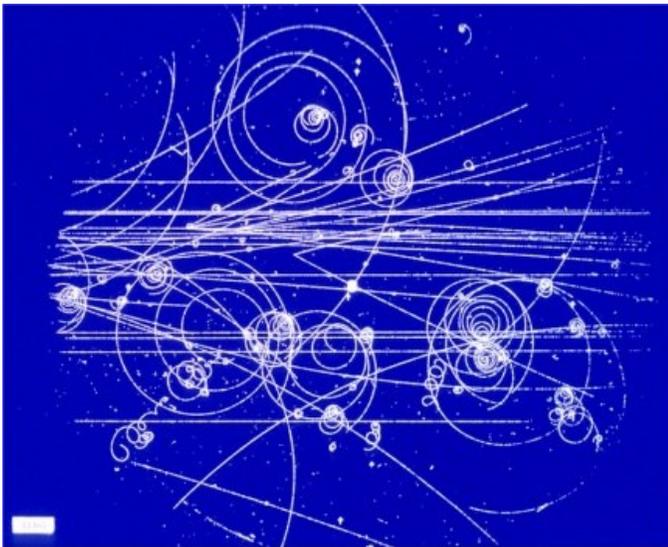
* Im Film werden nur die angekreuzten Teilchen erwähnt; für diese stimmt auch die Antwort auf Frage 2.

Genau genommen wechselwirken alle elektrisch geladenen Teilchen im elektromagnetischen Kalorimeter. Hadronen und Myonen durchqueren es jedoch, ohne darin sämtliche Energie abzugeben: Hadronen lösen Teilchenschauer aus Hadronen aus, Myonen ionisieren das Material. Diese Teilchensorten hinterlassen auch in weiter außen liegenden Detektorteilen Signale.

Aufgaben/Materialien für den Schulunterricht

► Bildgebende Detektoren

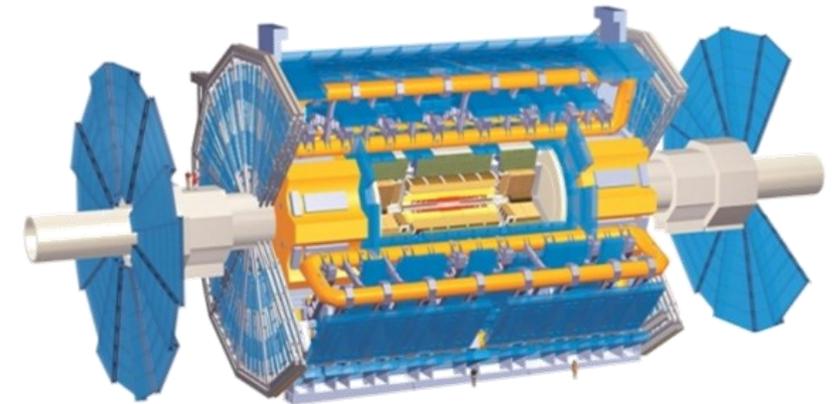
- Nebelkammer
- Blaskammer



► Blaskammeraufnahmen mit GeoGebra

► Elektronische Detektoren

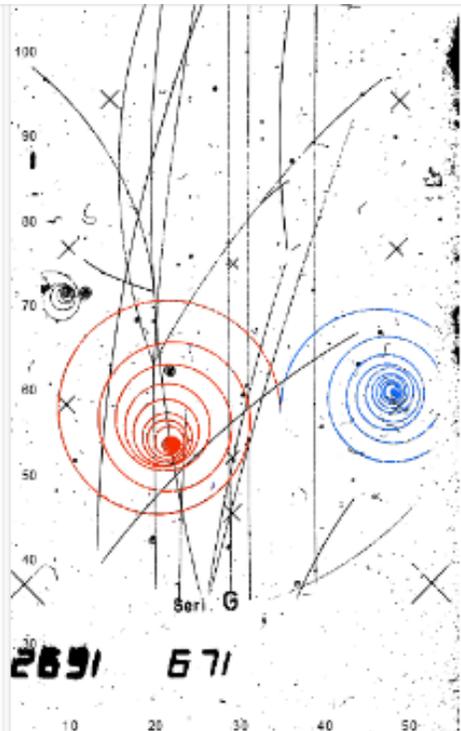
- ATLAS-Detektor
- Geiger-Müller-Zählrohr



► Eventdisplays von Großdetektoren

Bildgebende Detektoren im Unterricht

- ▶ Blasenkammerbilder mit GeoGebra auswerten
- ▶ Tutorials und unterschiedliche Aufgaben auf Arbeitsblättern



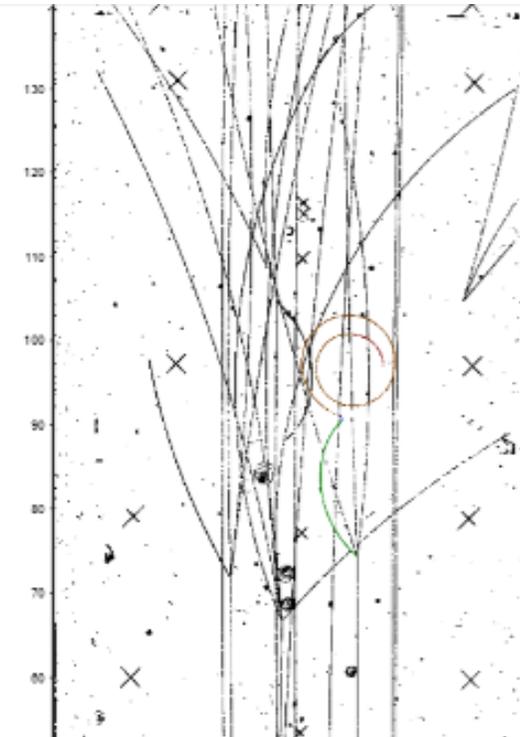
Dies ist eine Übung zur Blasenkammeraufnahme 2691, auf welcher zwei Spuren vom gleichen Vertex farblich hervorgehoben sind.

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!



1. Aufgabe - Identifikation des Teilchens

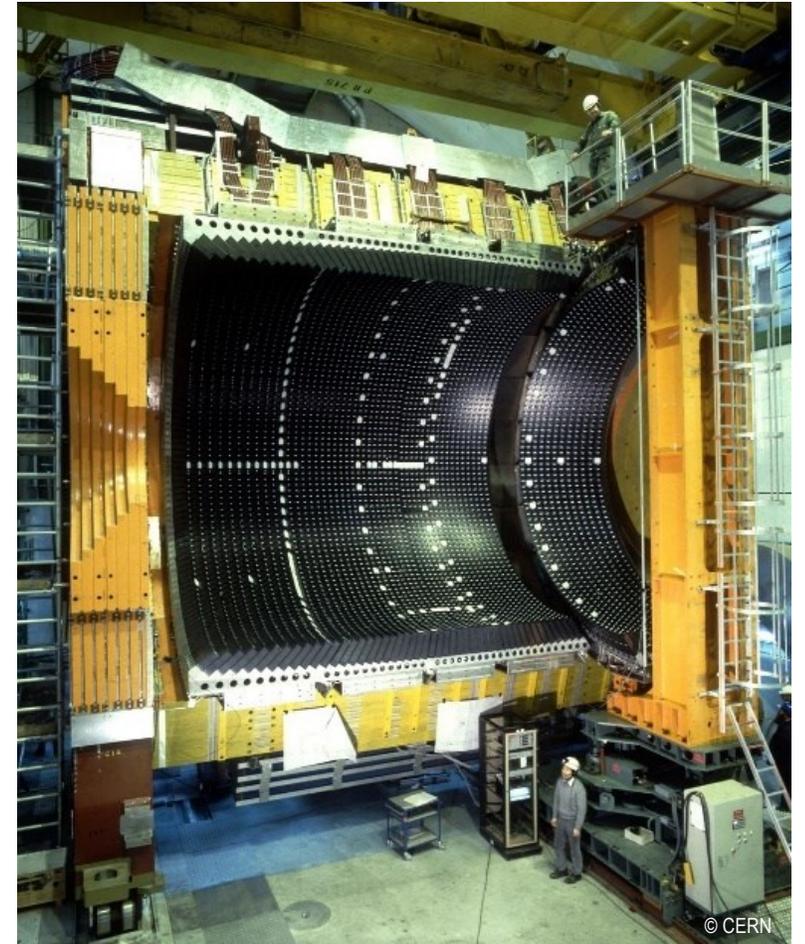
Die grün hervorgehobene Spur wurde von einem Pion erzeugt. Entscheide, um welches Pion es sich gehandelt hat. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- π^0 π^+ π^-

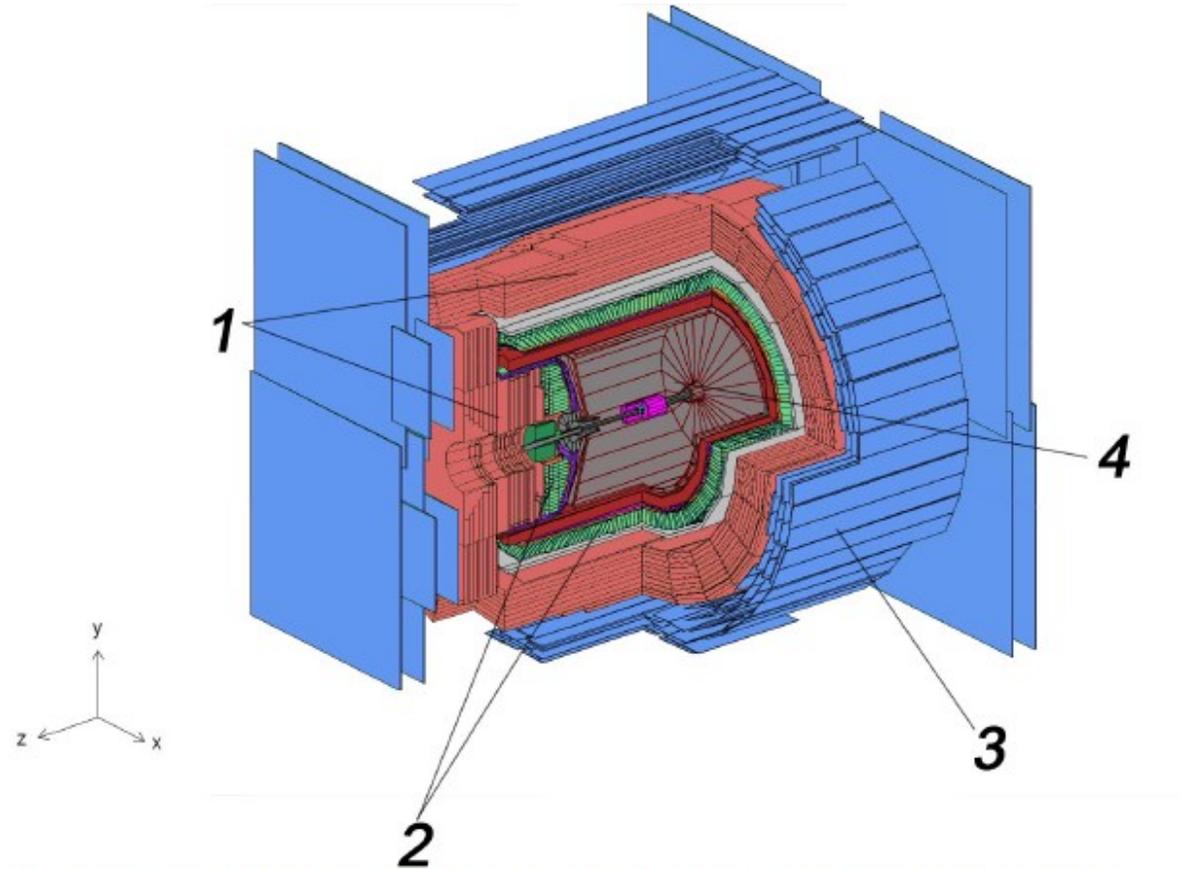


Beispiel für Großdetektoren: OPAL

- ▶ 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

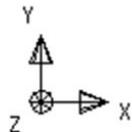
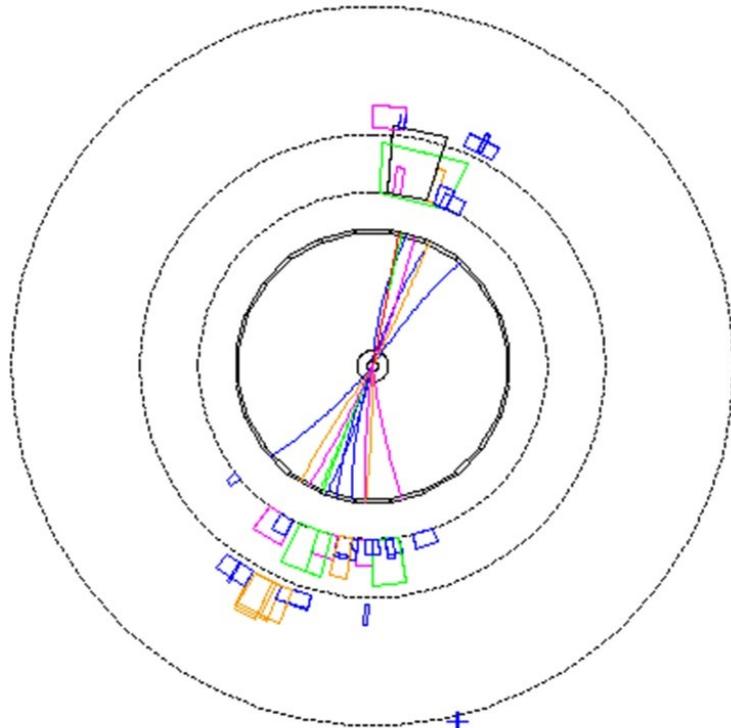
2 elektromagnetische Kalorimeter

3 Myonenkammer

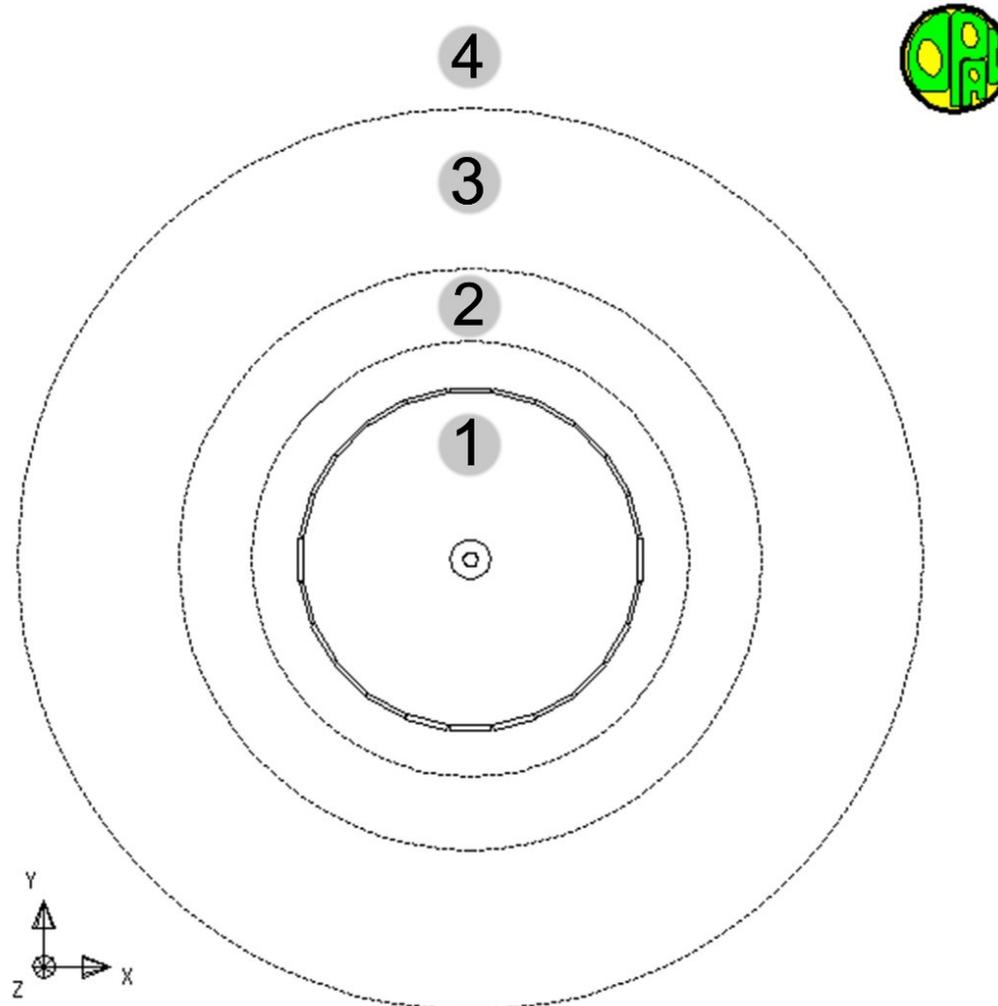
4 Spurkammer

Das OPAL-Eventdisplay

Run:event 5293: 20246 Ctrk(N= 26 Sump= 53.4) Ecal(N= 41 SumE= 63.0)
Ebeam 45.600 Vtx (-.04, .04, 1.88) Hcal(N=17 SumE= 10.2) Muon(N= 0)



Das OPAL-Eventdisplay

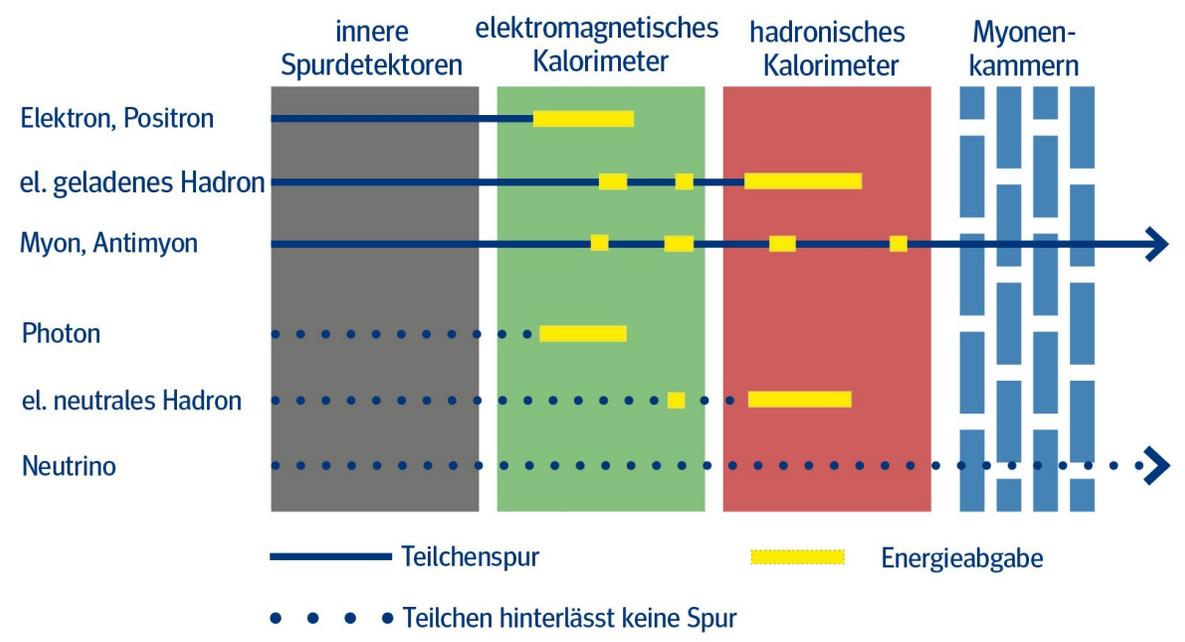
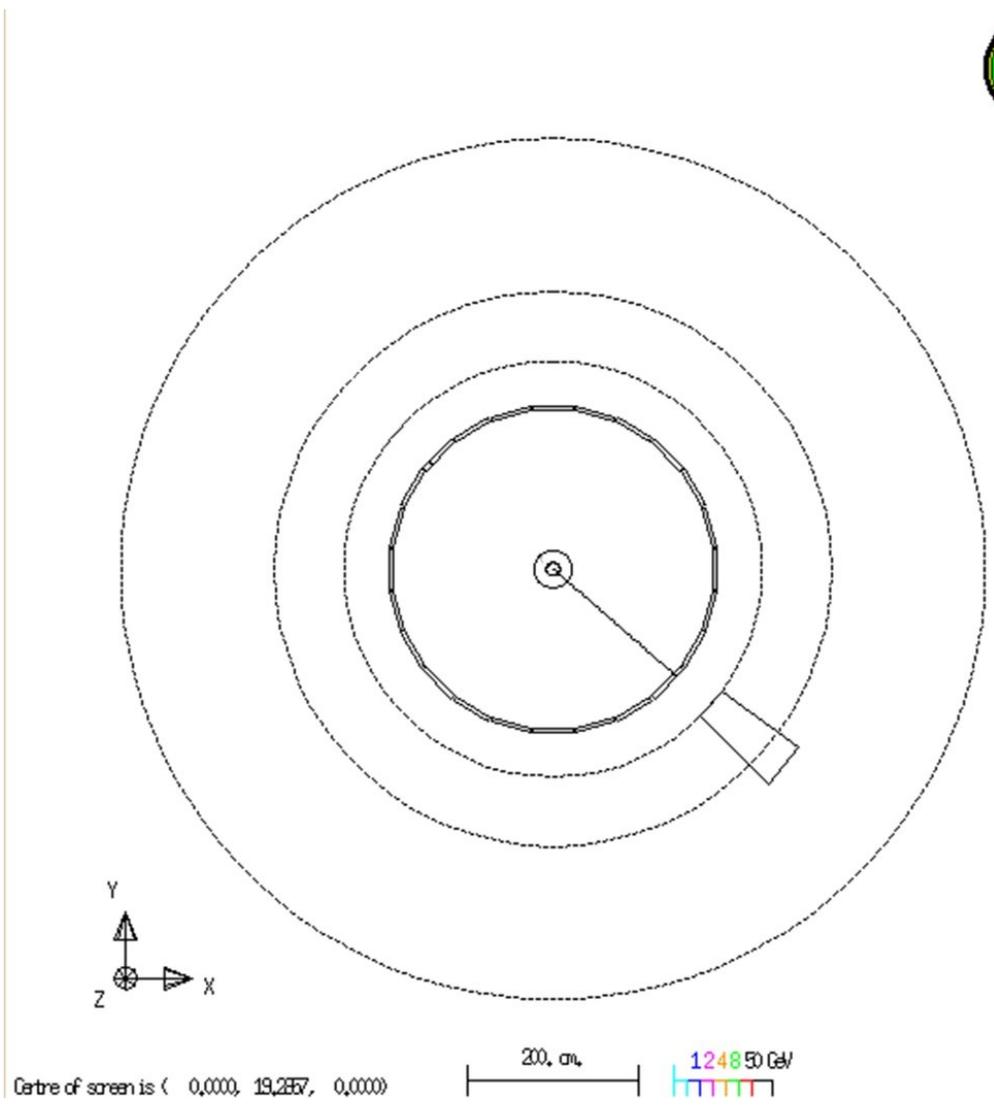


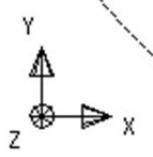
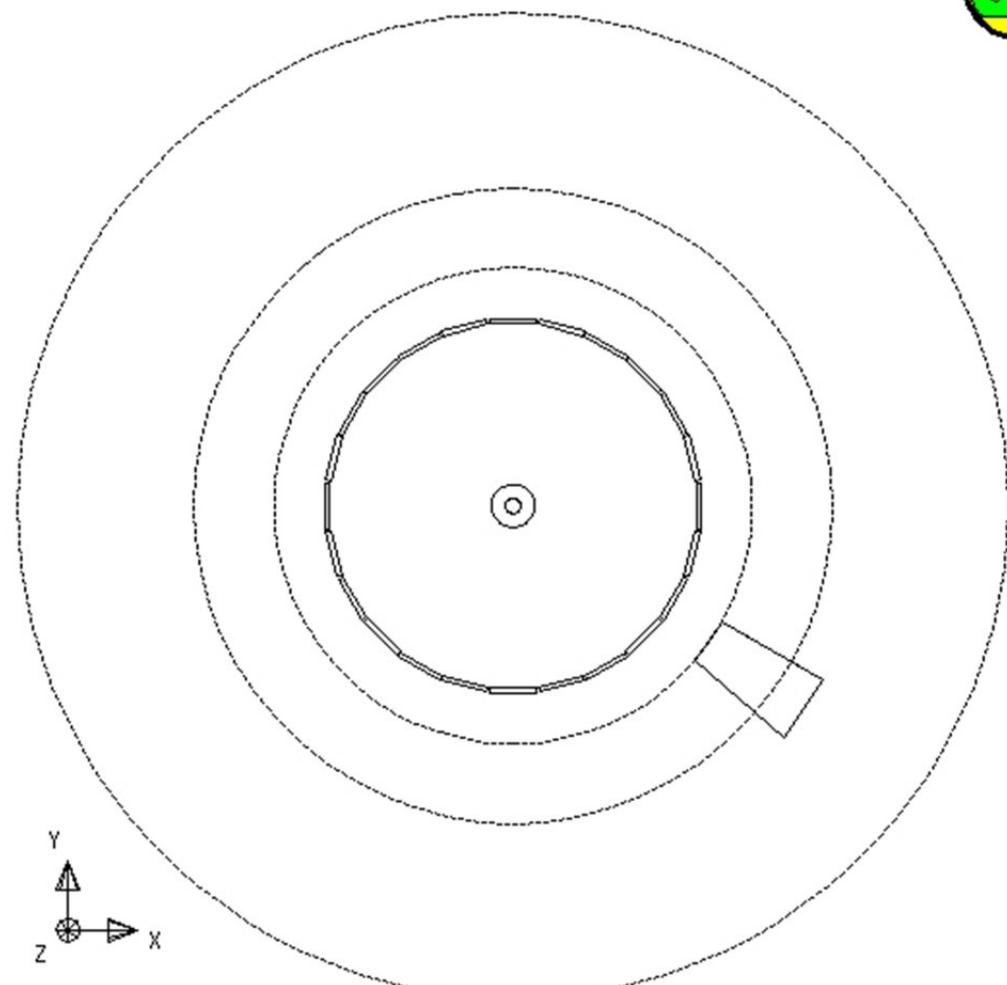
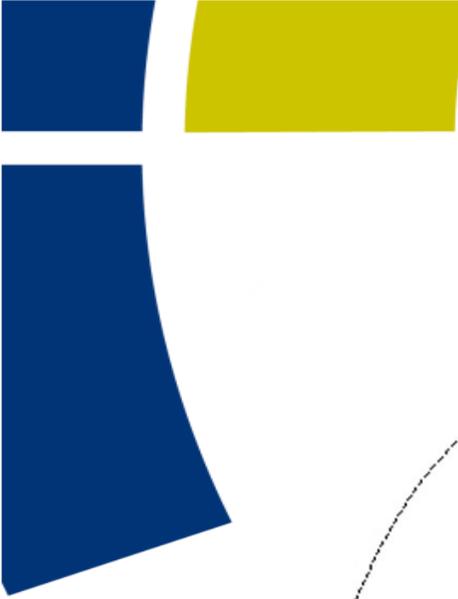
1 Spurkammer

2 elektromagn. Kalorimeter

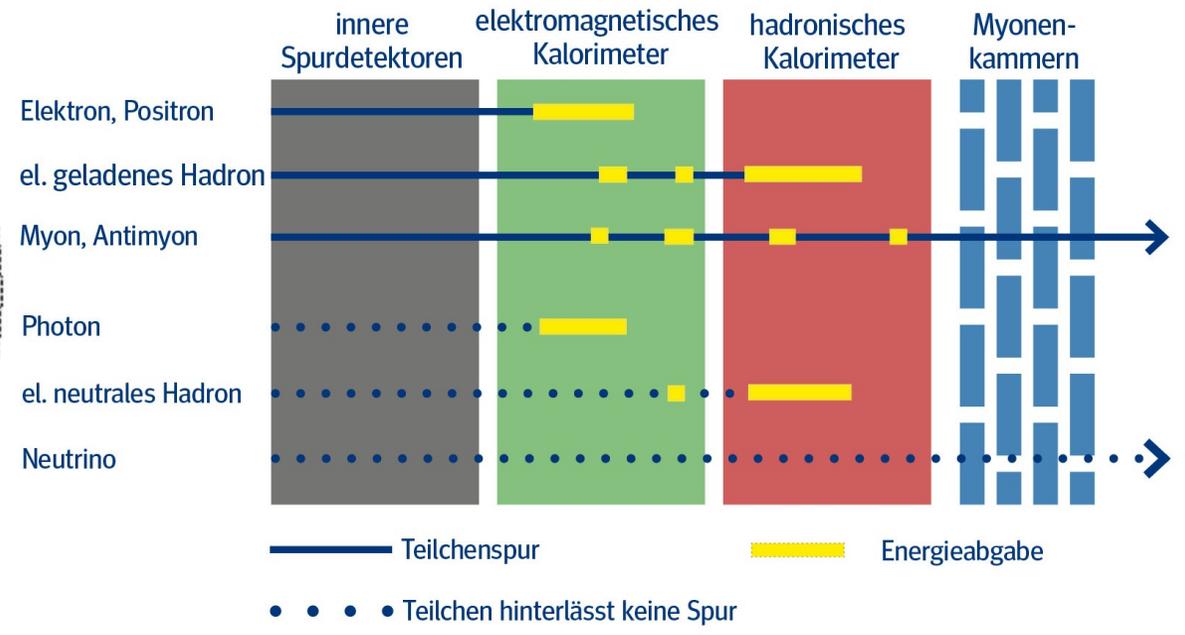
3 hadronisches Kalorimeter

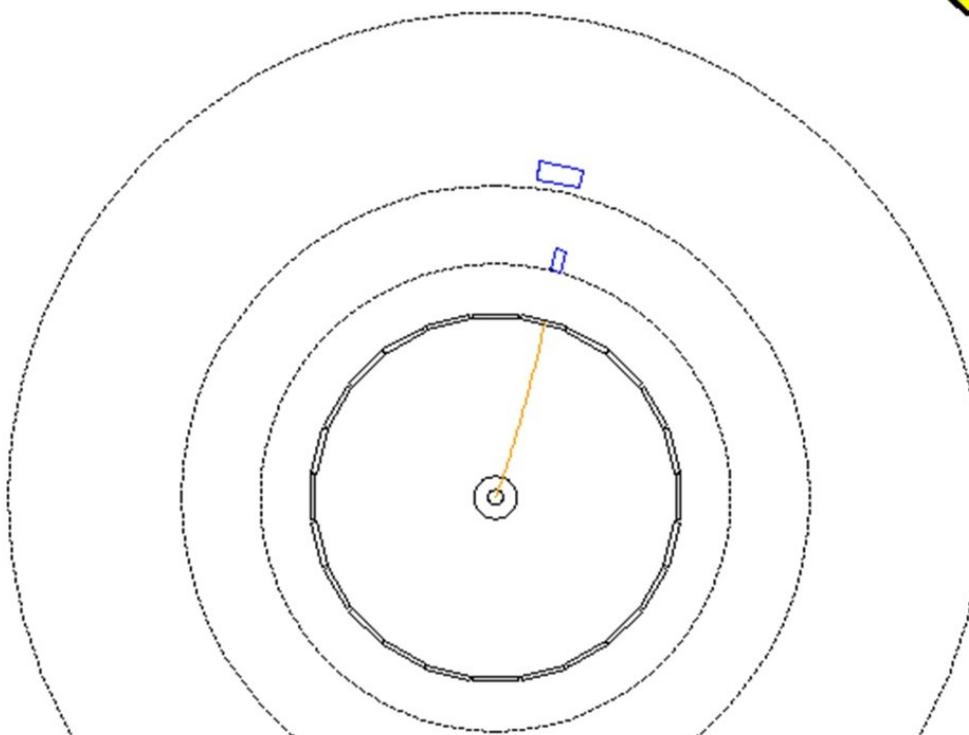
4 Myonkammer



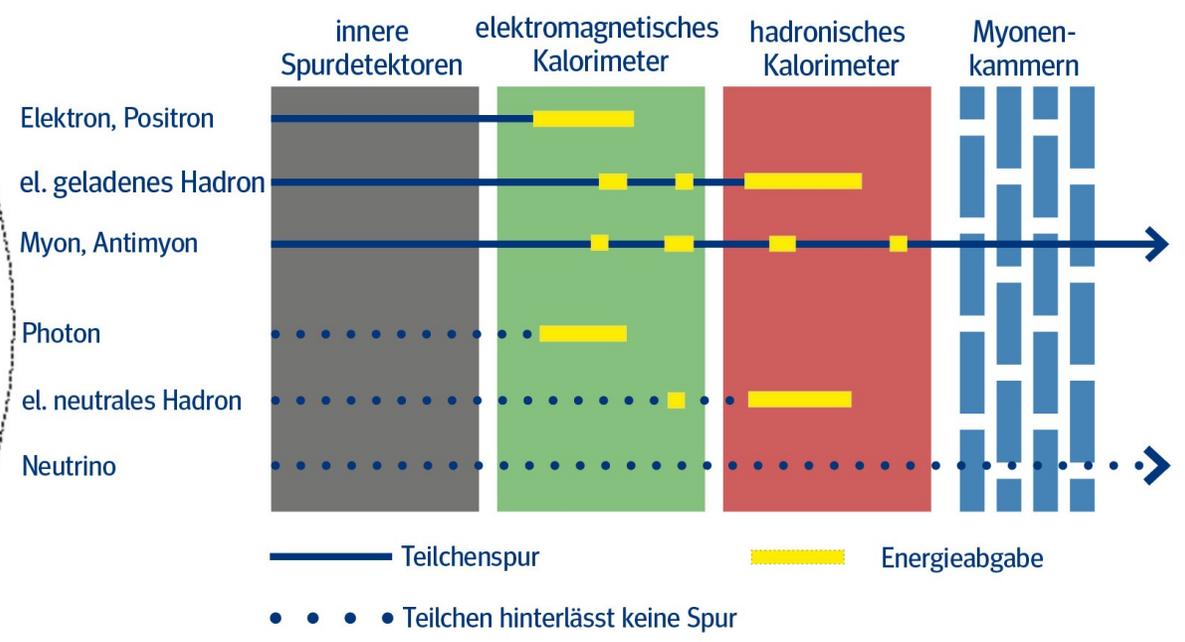


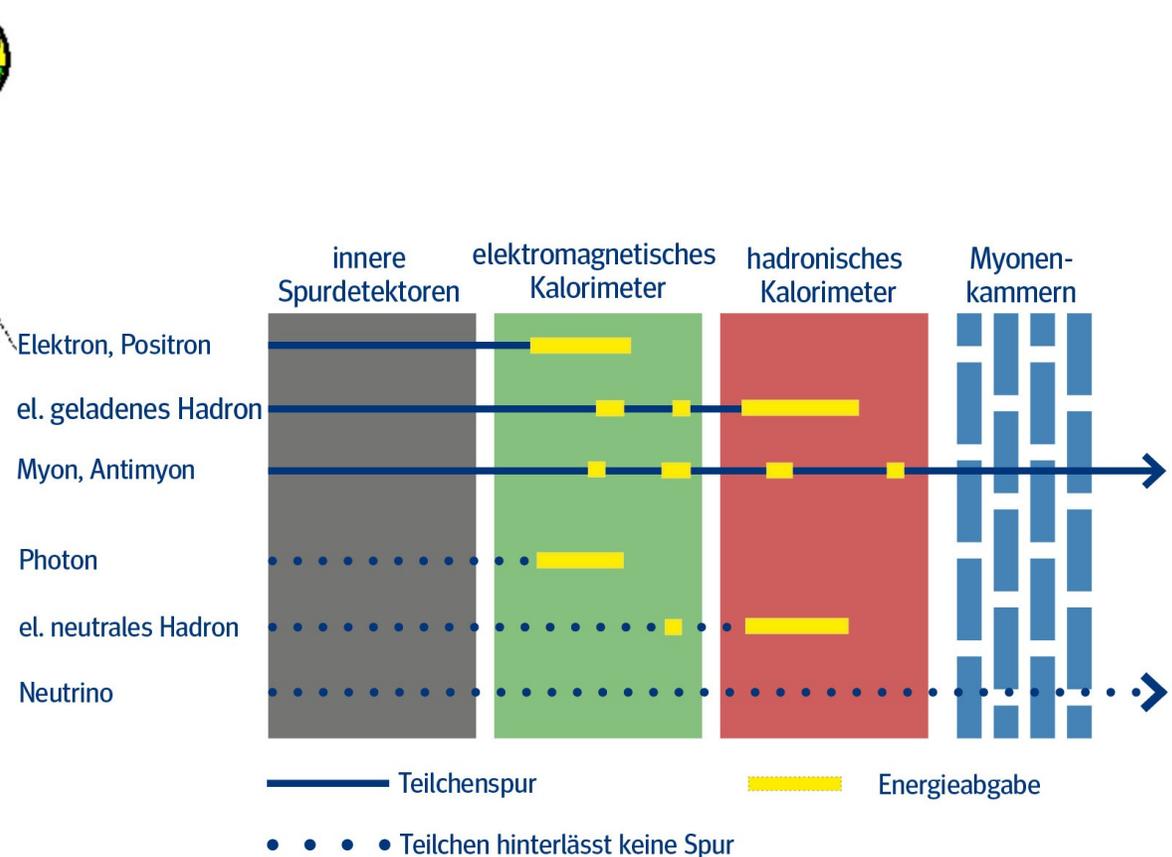
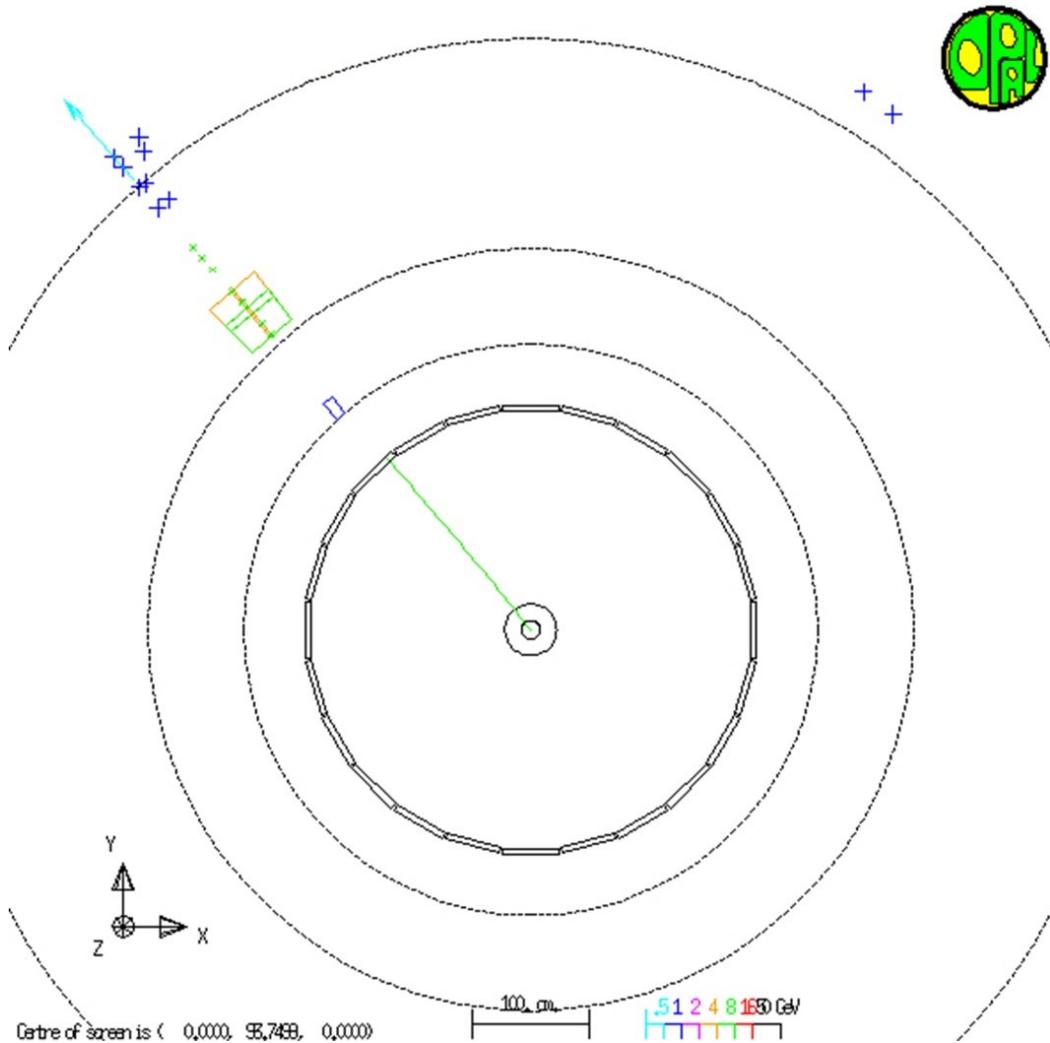
Centre of screen is (0,000, 19,267, 0,000) | 200, cm | 1248 50 GeV





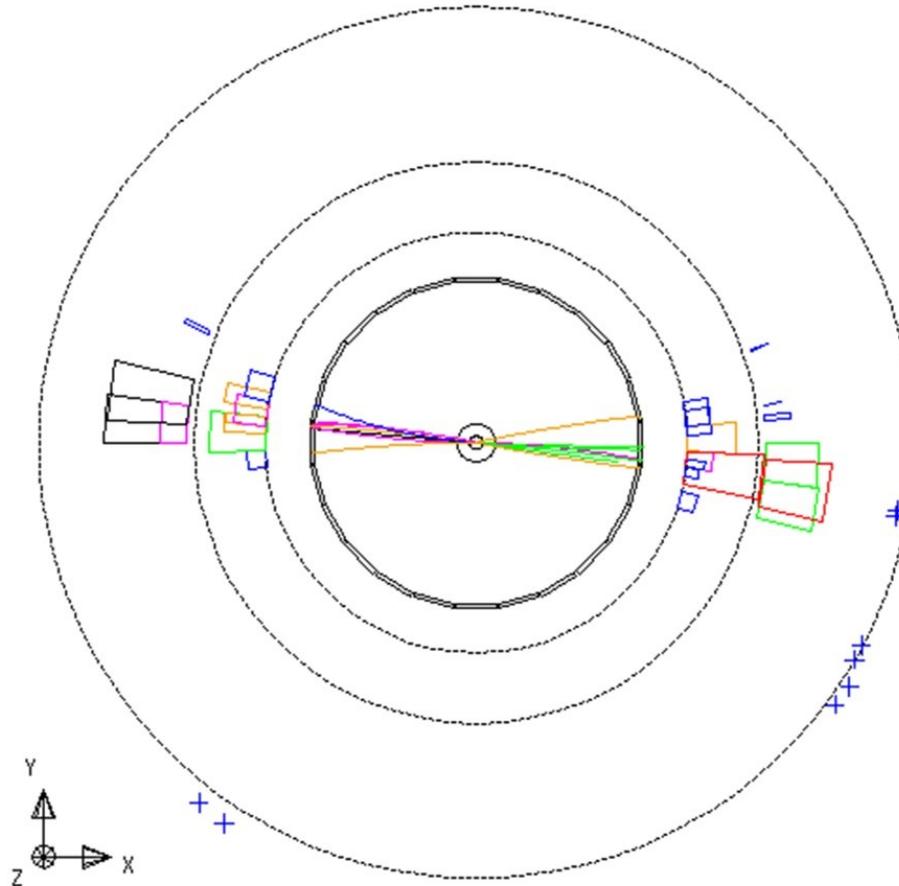
Centre of screen is (0,000, 38,5715, 0,000) 300 cm 1248 50 GeV





Jets - erzeugt durch Quarks oder Gluonen

Run:event 5293: 54644 CTrk(N= 26 Sump= 59.9) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)
Ebeam 45.599 Vtx (.00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)



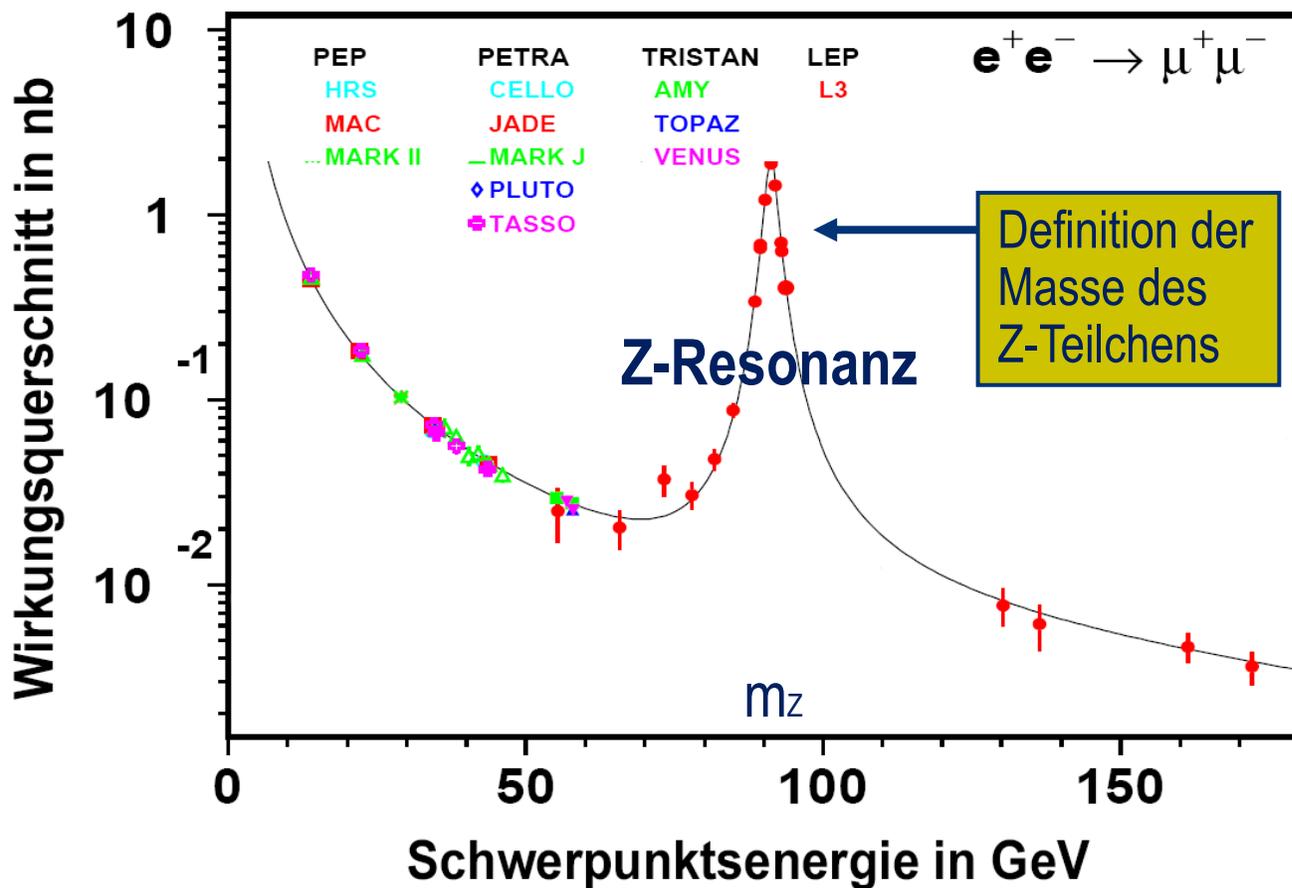
Studium der Z-Teilchen

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

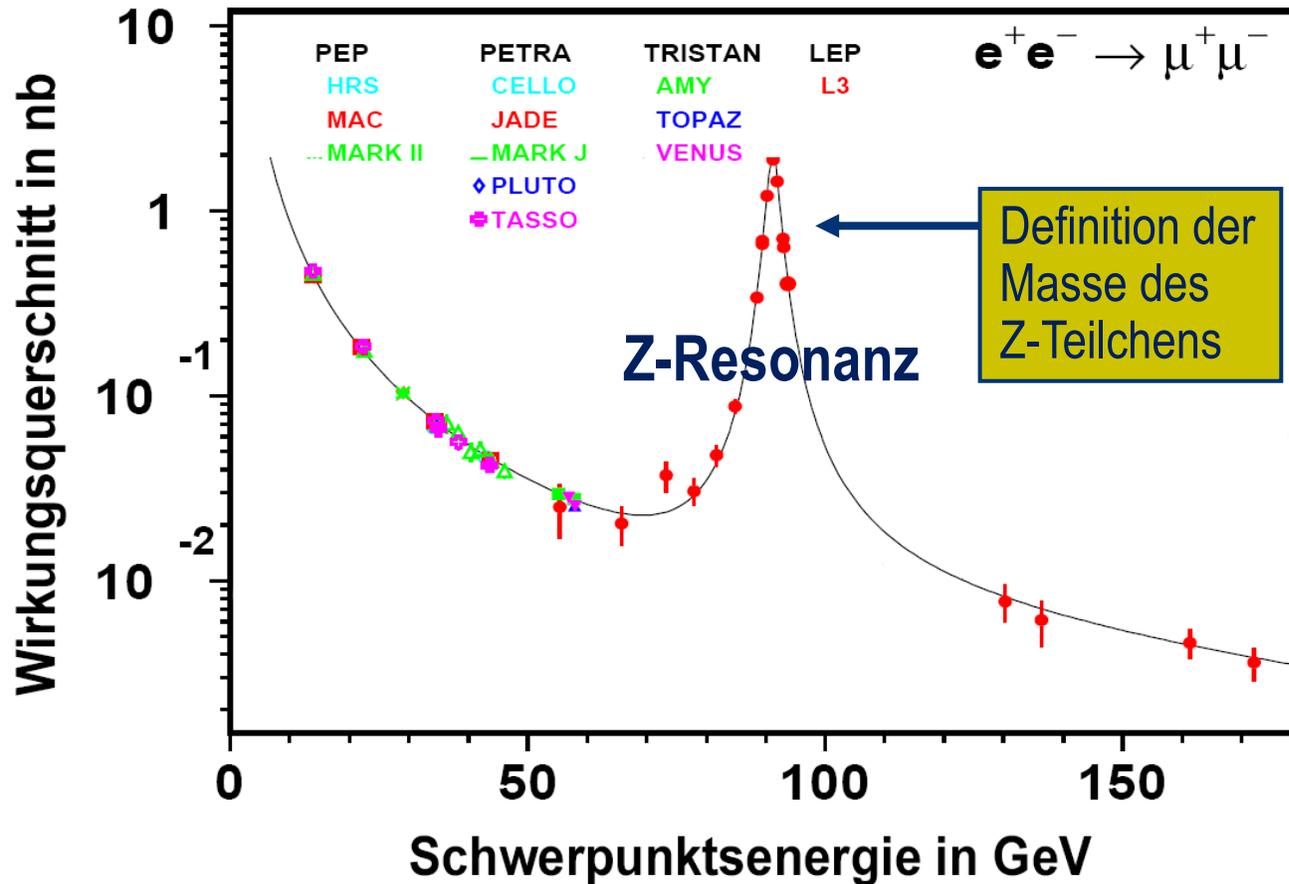


Z

Z-Resonanz experimentell



Z-Resonanz experimentell



Bei allen Energien:

- **Superposition** von Z und Photon mit unterschiedlich großen mathem. Beiträgen (Amplituden) inkl. **Interferenzterm**

Bereich der Ruheenergie des Z-Teilchens:

- Beitrag des Z-Teilchens besonders groß

Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

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

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

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

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

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

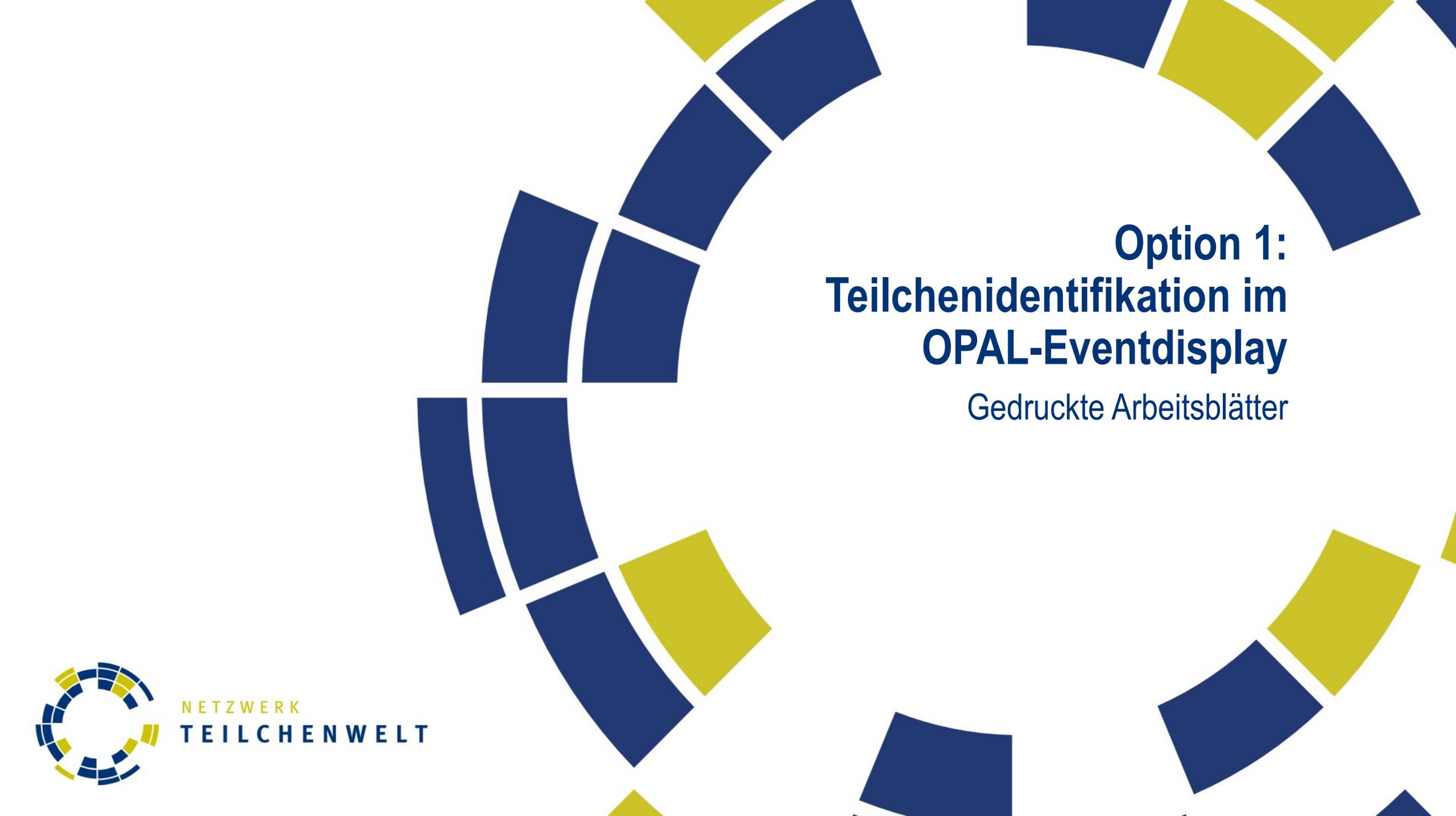
~~5. $Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$~~

nur anhand der Umwandlungsprodukte der Tauonen identifizierbar

im Detektor nicht (direkt) nachweisbar

Diskussion / Fragen





Option 1: Teilchenidentifikation im OPAL-Eventdisplay

Gedruckte Arbeitsblätter



NETZWERK
TEILCHENWELT



Option 2: Teilchenidentifikation in Blasenkammerbildern

digitale Arbeitsblätter
siehe Indico-Agenda



NETZWERK
TEILCHENWELT

Forschungs- ergebnisse bei LEP



NETZWERK
TEILCHENWELT

Was hat man gemessen?

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

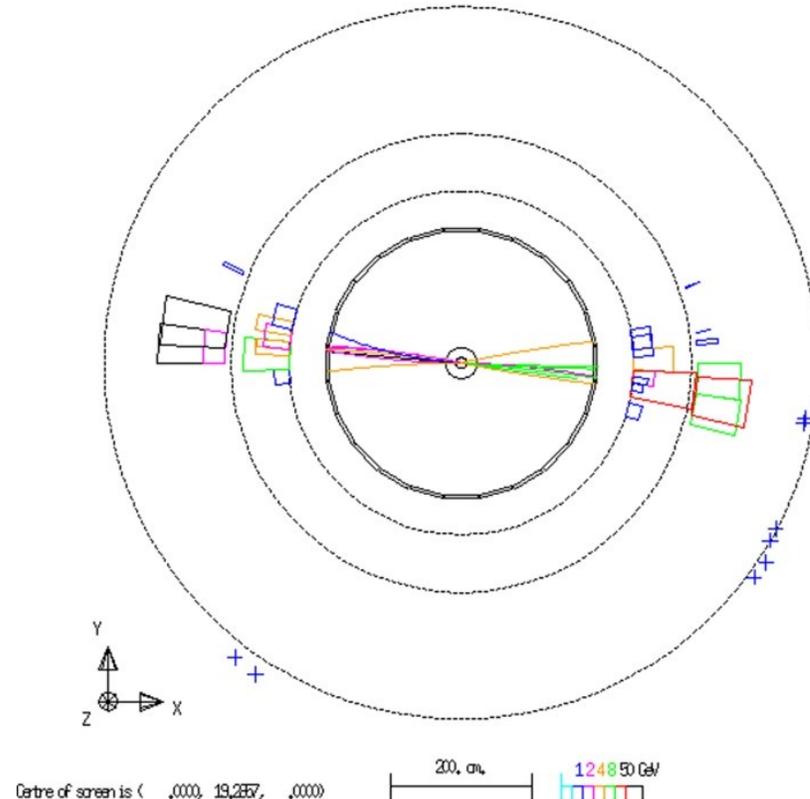
$$Z \rightarrow q + \bar{q}$$

Was hat man gemessen?

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

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

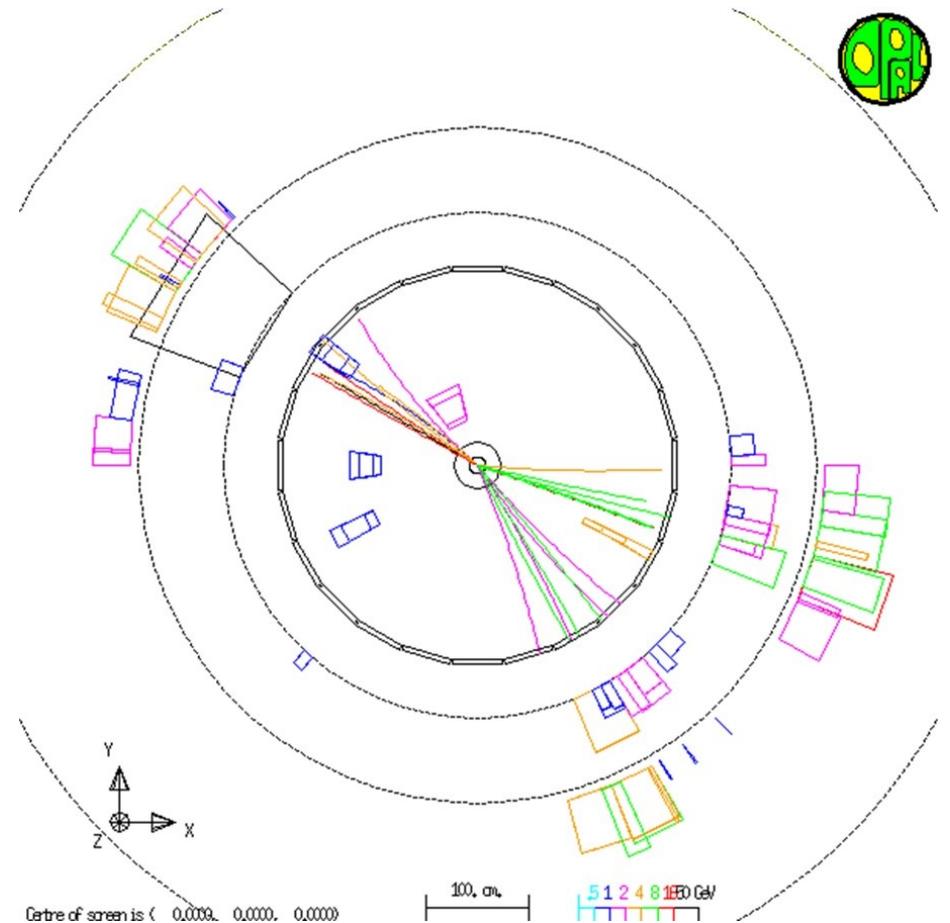
```
Run: event 5293: 54644 Ctrk(N= 26 Sump= 59.9) Ecal(N= 28 SumE= 40.2)
Ebeam 45.599 Vtx ( .00, .04, .17) Hcal(N=14 SumE= 33.0) Muon(N= 0)
```



Bestimmung des starken Kopplungsparameters

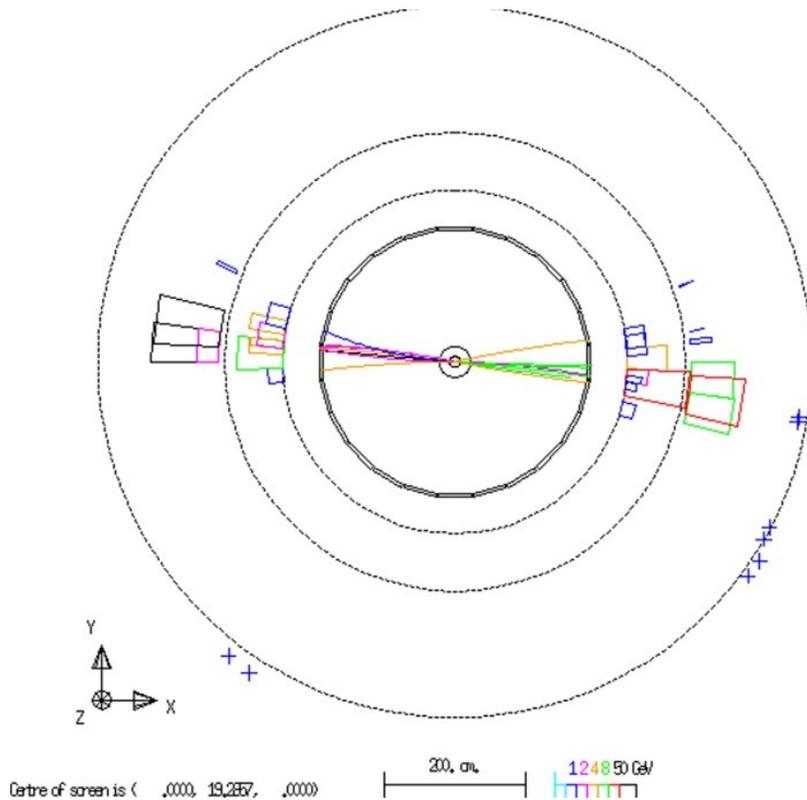
► Auch möglich: „Gluonbremsstrahlung“

$$Z \rightarrow q + \bar{q} \rightarrow q + \bar{q} + g$$

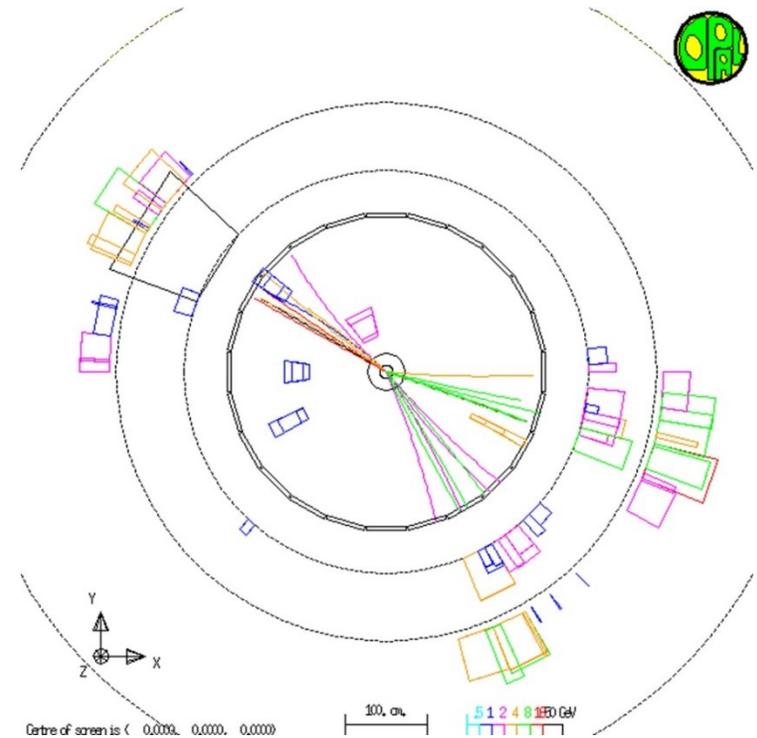


Bestimmung des starken Kopplungsparameters

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



$$Z \rightarrow q + \bar{q} \rightarrow q + \bar{q} + g$$



- Ereignistypen unterscheiden sich durch einen zusätzlichen Prozess der starken WW

Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Jede starke Wechselwirkung führt zu zusätzlichem Faktor bei Berechnung der Wahrscheinlichkeit. Dieser 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

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

Ergänzung: Anzahl der Farbladungen

- ▶ Idee: Messung des Verhältnisses R von qq zu $\mu^+ \mu^-$

$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

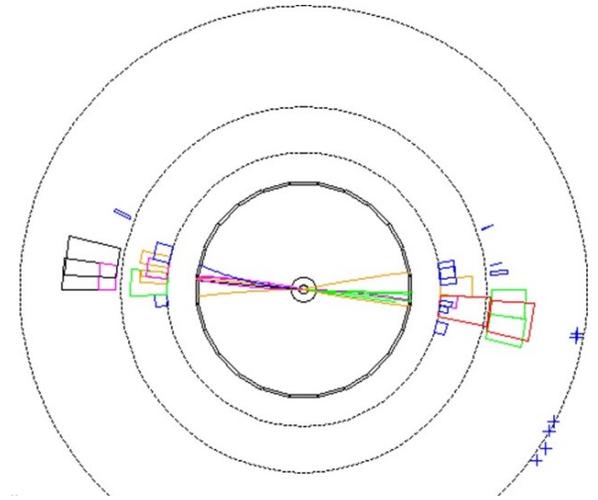
Anzahl der Farbladungen

► Idee: Messung des Verhältnisses R von qq zu $\mu^+ \mu^-$

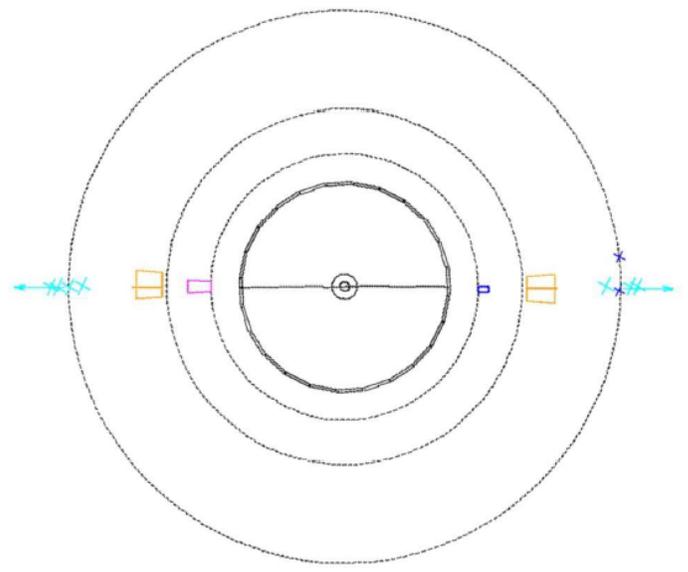
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$



#



#



Diskussion / Fragen



Anzahl der Farbladungen

$$\begin{aligned}
 R &= 3[(2/3)^2 + (1/3)^2 + (1/3)^2] = 2 \text{ for } u, d, s \\
 &= 2 + 3(2/3)^2 = 10/3 \text{ for } u, d, s, c, \\
 &= 10/3 + 3(1/3)^2 = 11/3 \text{ for } u, d, s, c, b.
 \end{aligned}$$

