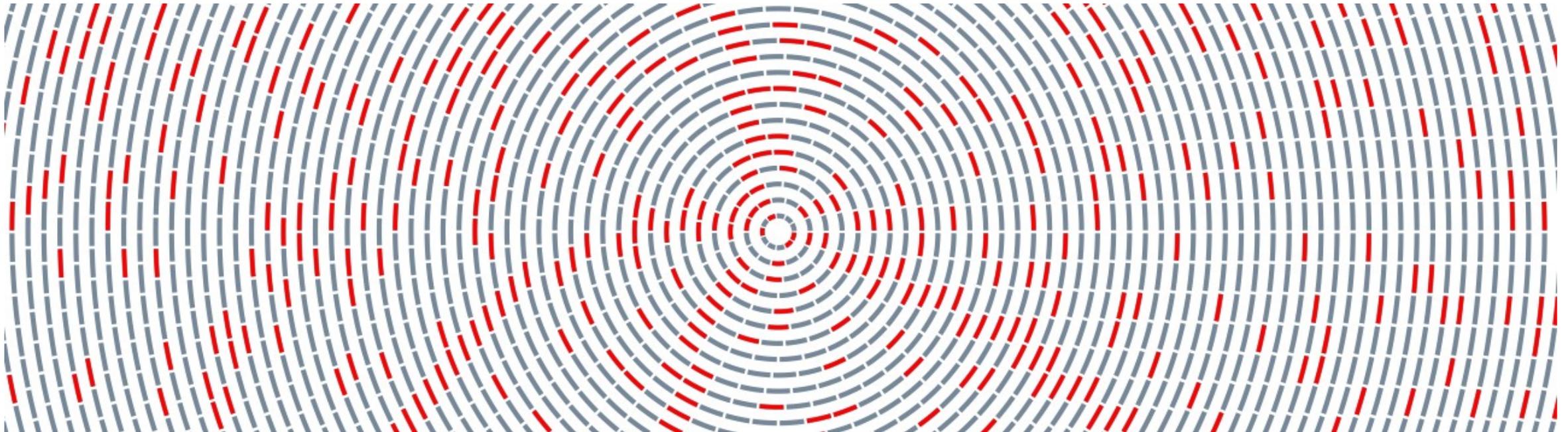


# Belle II Masterclass

Das schönste Puzzle der Welt

Jonas Eppelt, Isabel Haide, Fillip Gostner, Lea Reuter, Alexander Heidelberg, Torben Ferber



# Outreach – der Anstoß

## Wir wollten...

- ...vorstellen, was wir (Belle II @ KIT) eigentlich tun.
- ...nicht nur Physikinteressierte für unsere Arbeit begeistern.
- ...einfach und spielerisch andere unsere Forschung erleben lassen.
- ...modulare Elemente für verschiedene Outreach-Aktivitäten zur Verfügung haben.

## Bestehende Masterclasses...

- ...fokussieren sich auf die eigentliche Teilchenphysik.
- ...beschäftigen sich mit der Datenauswertung.
- ...geben häufig keinen Überblick darüber, wie die eigentliche Messung funktioniert.
- ...zeigen nicht, was wir (Belle II @ KIT) tun.

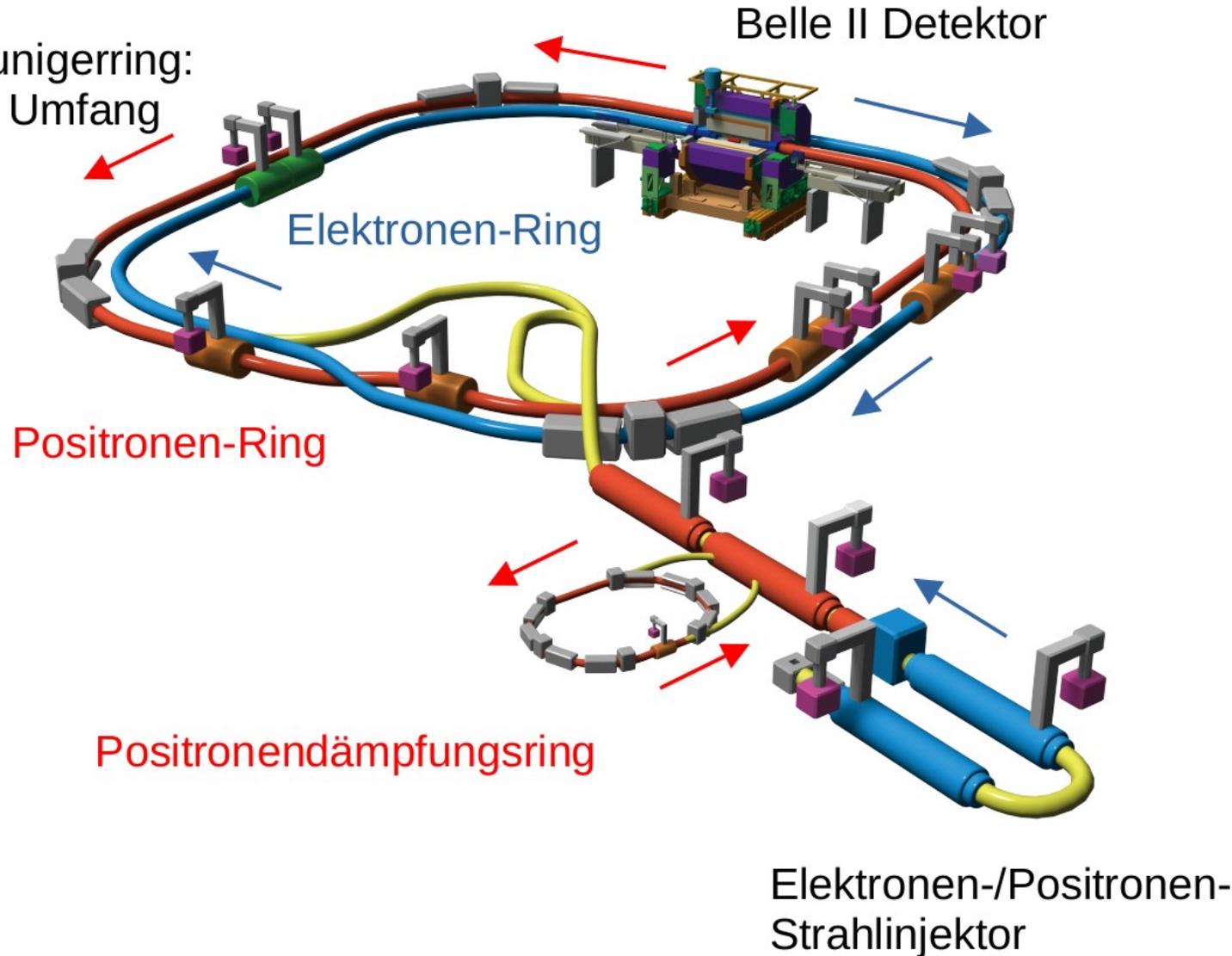
# Das Puzzle der Teilchenphysik – die Idee am Anfang

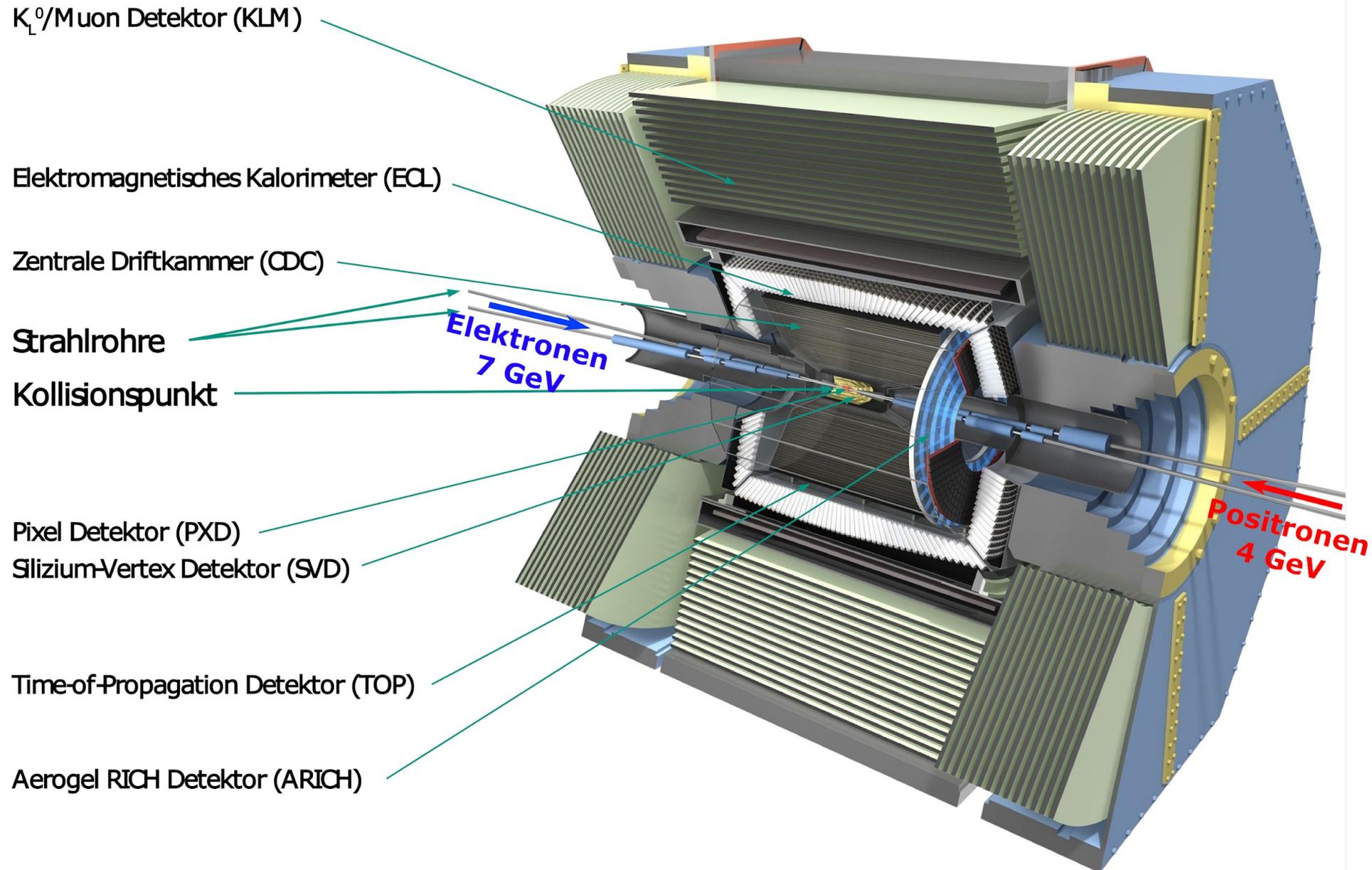
## In unserer Masterclass sollen Schüler\*innen...

- ...die Schritte von Detektorsignalen zu rekonstruierten Teilchen selbst gehen
- ...lernen, wie wir wichtige Eigenschaften von Teilchen messen
- ...die täglichen Probleme der Teilchenphysik kennenlernen
- ...lernen, wie wir all diese Messungen kombinieren, um uns auf die Suche nach dunkler Materie zu begeben

# SuperKEKB Beschleuniger

Beschleunigerring:  
ca. 3 km Umfang





# Voraussetzungen und Rahmenbedingungen

## Zielgruppe:

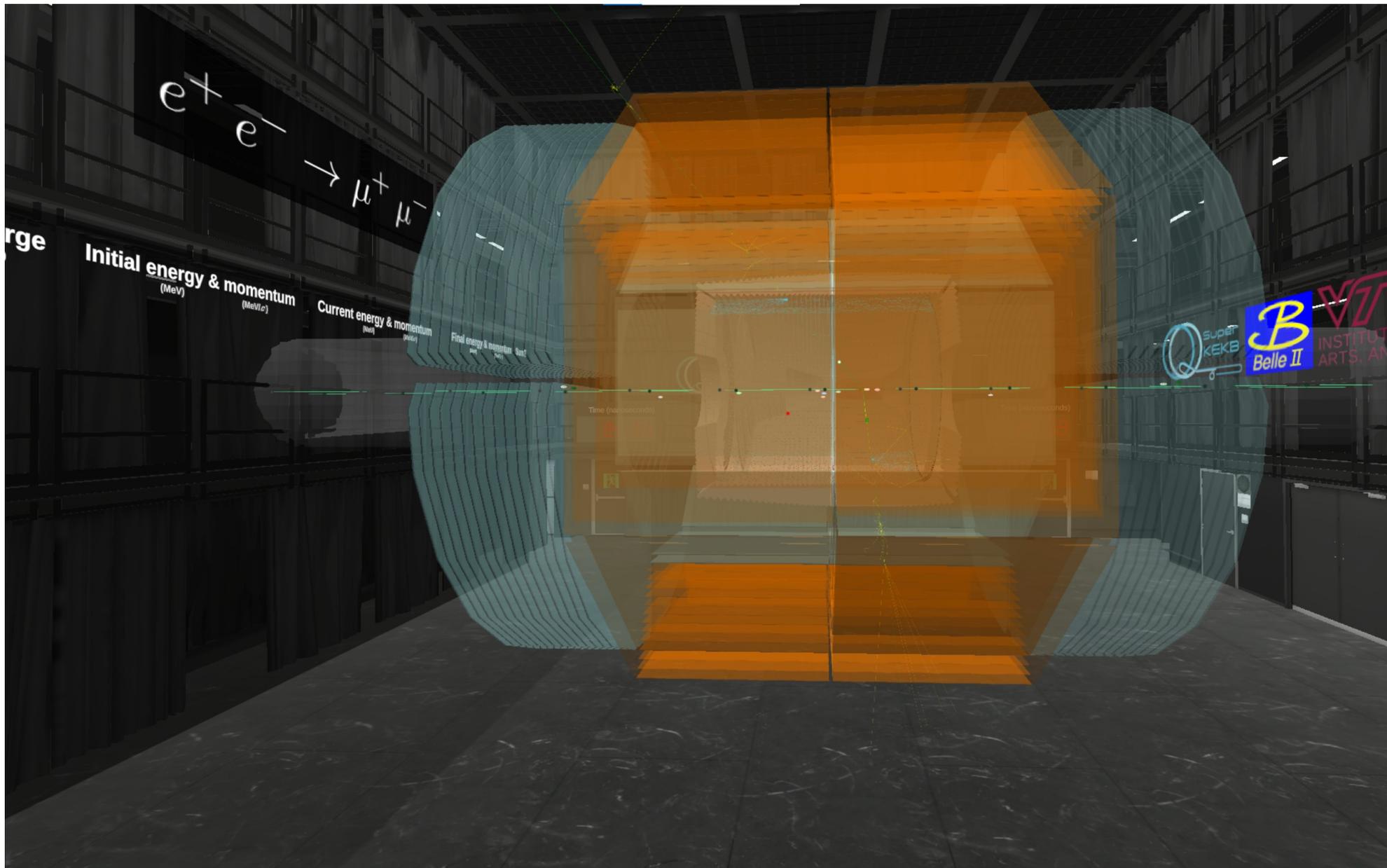
- Ab ca. 10. Klasse
- Begriffe wie Impuls, Energie, Magnetfelder und Lorentzkraft sollten bekannt sein
- Kein Teilchenphysik- oder Quantenmechanikvorwissen notwendig

## Technische Umsetzung:

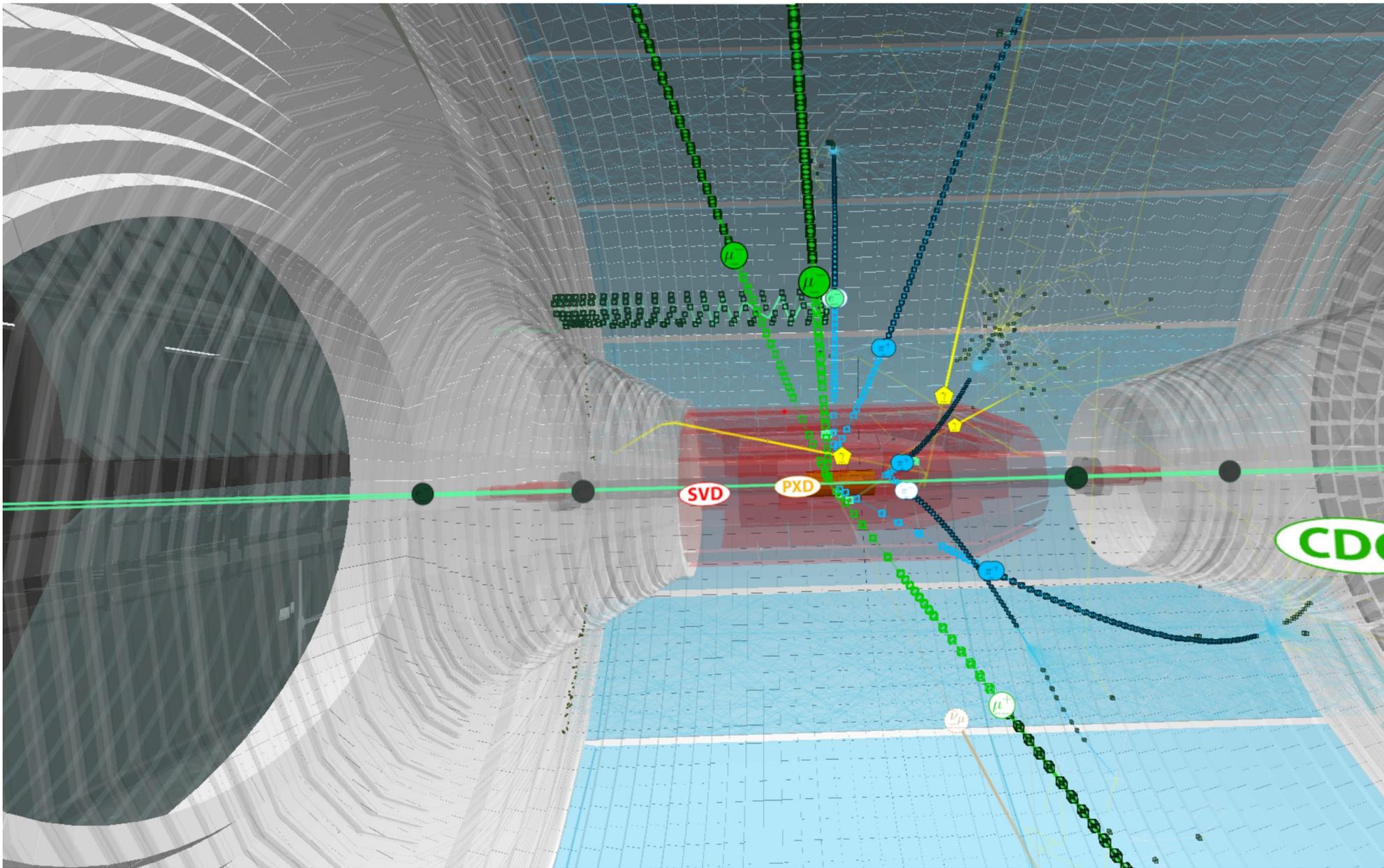
- Einsatz von Jupyternotebooks für interaktive Vorträge und Praxisteile (keine Programmierkenntnisse notwendig)
- Nutzung des Belle II Virtual Reality Models (Entwicklung: Virginia Tech)

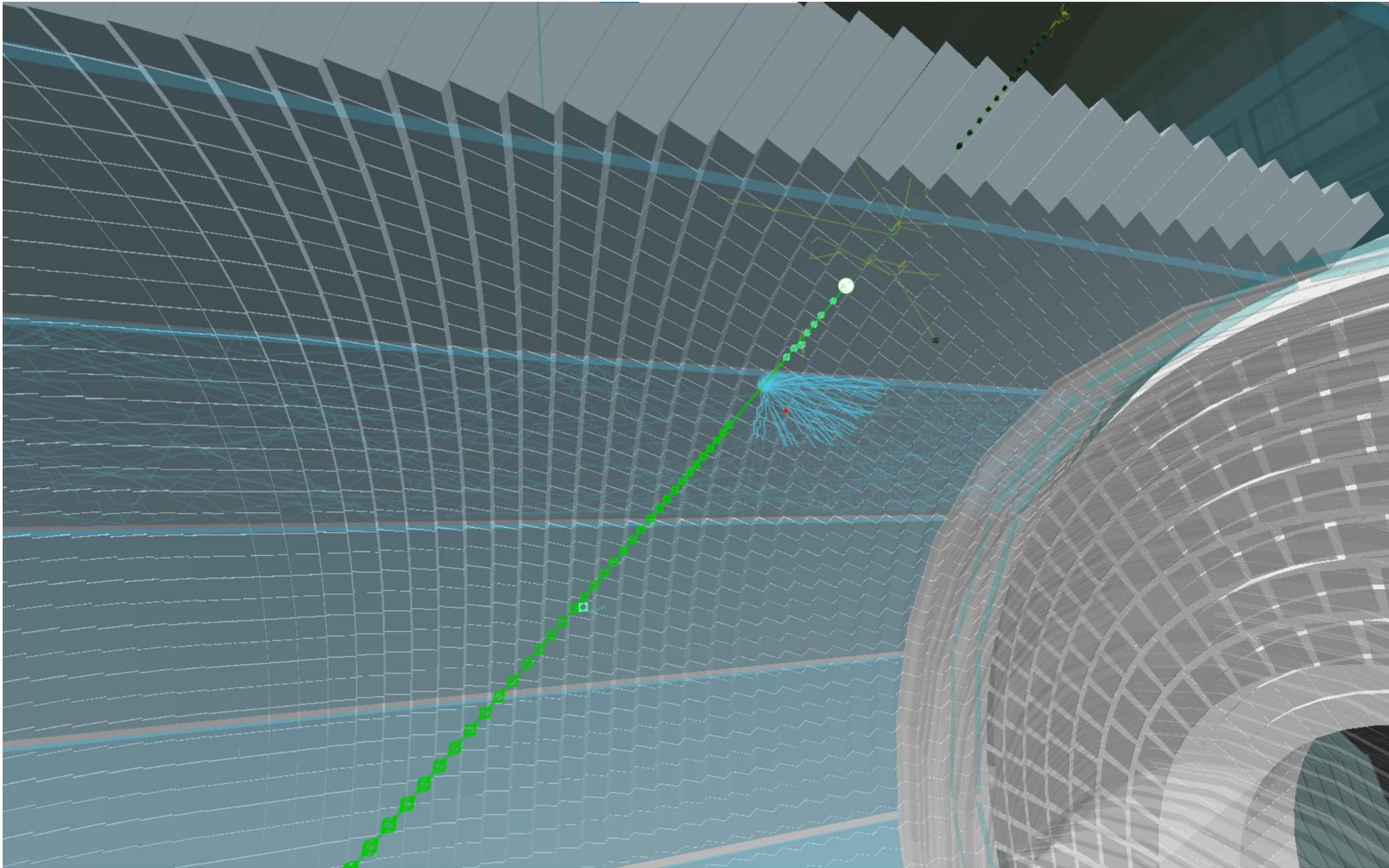
# Ablaufplan

Inhalt	Methode	Zeit
Einführung in die Teilchenphysik	Vortrag mit VR-Detektor	45 Minuten
Teilcheneigenschaften und ihre Messung	1. Jupyter-Notebook	1 Stunde
Pause & (optional) Virtueller Detektor	VR-Brillen	1 Stunde
Ereignisse	2. Jupyter-Notebook	45 Minuten
Dunkle Materie	Vortrag	20 Minuten
Suche nach Dunkler Materie	3. Jupyternotebook	45 Minuten



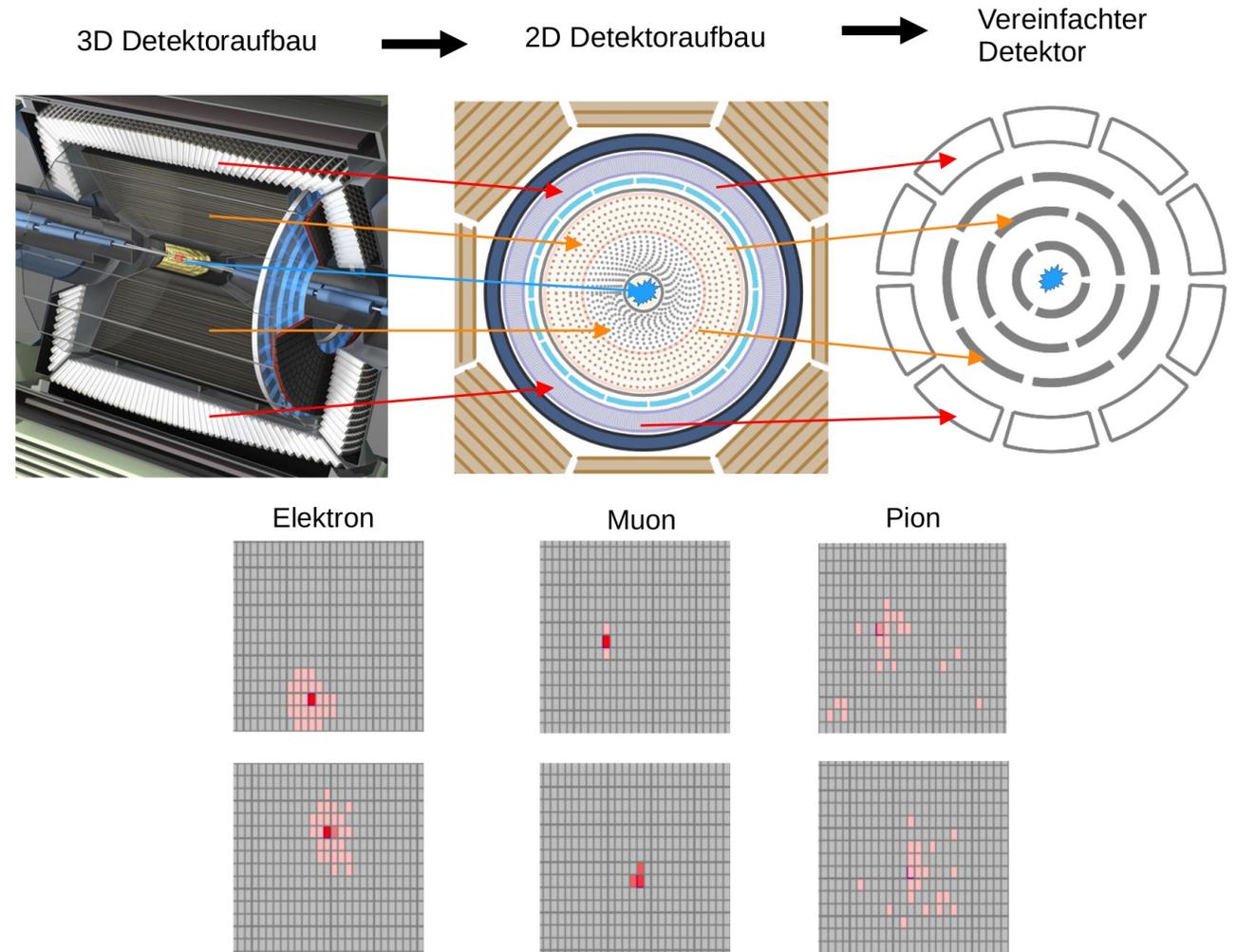






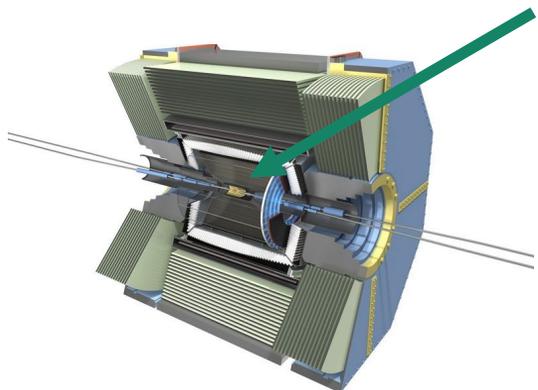
# Konzept: Simulation eines Rekonstruktionsprozesses

- Einführung in Teilchenphysik und Detektoren
- Vereinfachter Rekonstruktionsprozess mit Spurdetektor und elektromagnetischem Kalorimeter
- Einführung von Energie-, Impuls- und Ladungserhaltung
- Finden von fehlender Energie (= fehlendes Teilchen)



# Spurrekonstruktion

- Vereinfachter Spurdetektor
- Getroffene Spurelemente werden rot markiert dargestellt



▾ Teilchen 1

$p_T$   0.00

$p_T, \text{fein}$   0.00

$\phi$   0.00

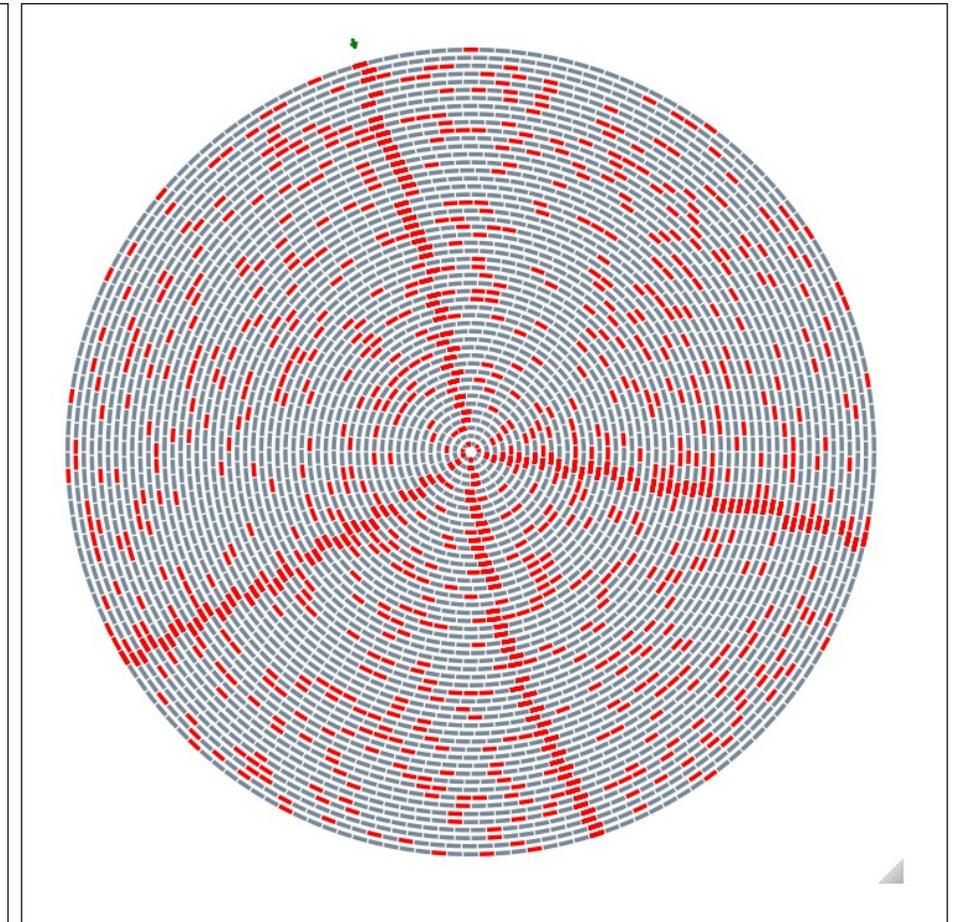
$\phi \text{ fein}$   0.00

elektrische ...  positiv  
 negativ

▸ Teilchen 2

▸ Teilchen 3

▸ Teilchen 4



▼ Teilchen 1

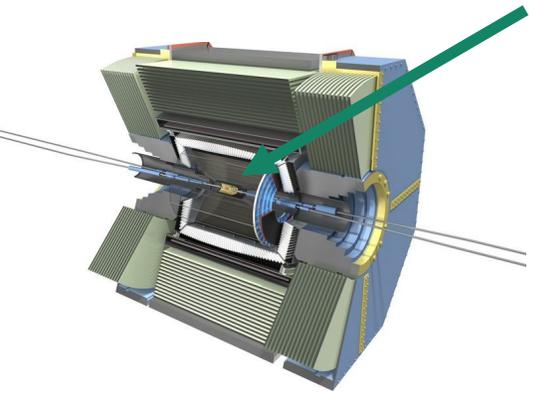
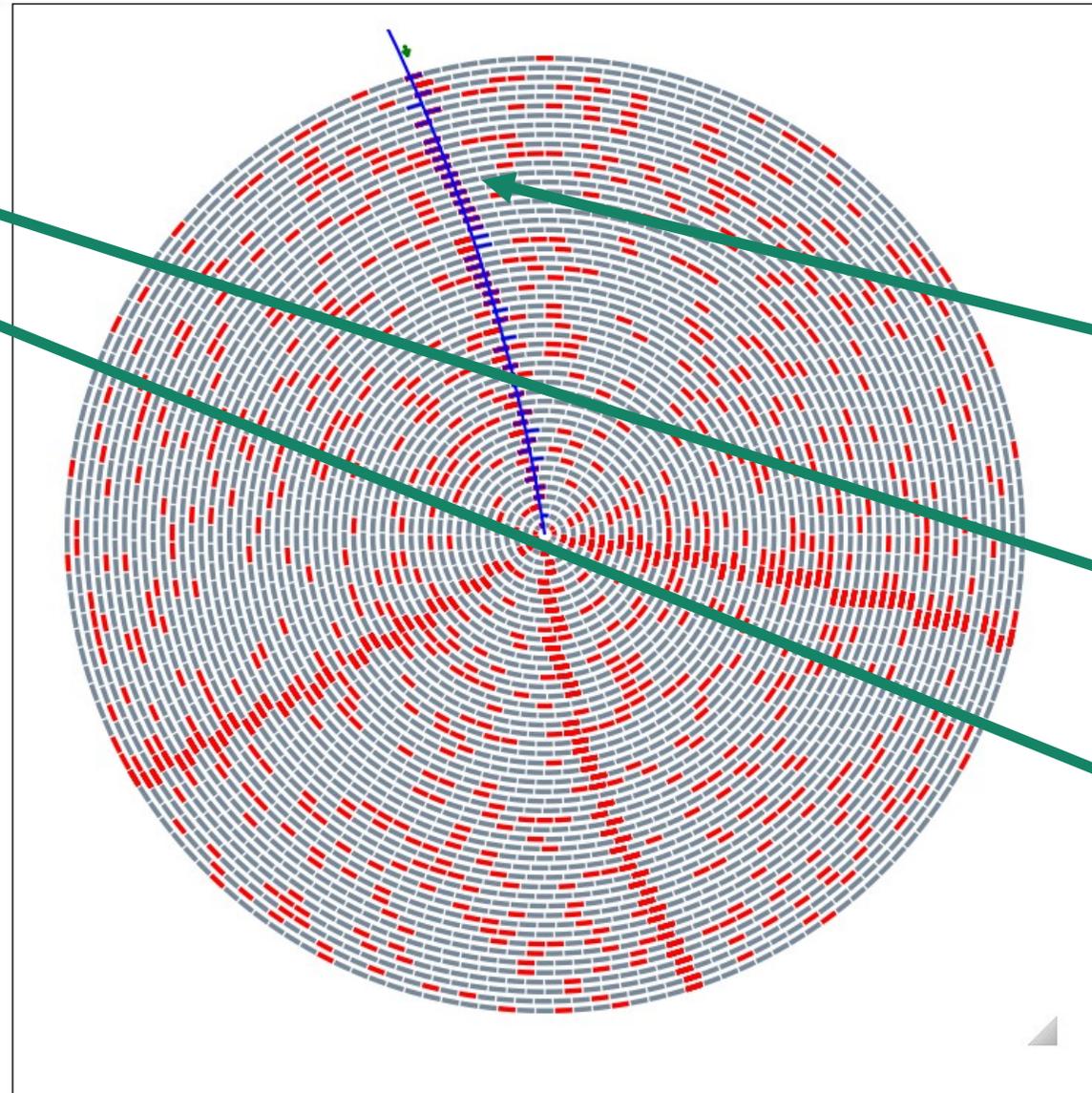
$p_T$	<input checked="" type="checkbox"/>	1.88
$p_T$ , fein	<input type="checkbox"/>	0.00
$\phi$	<input type="checkbox"/>	-0.15
$\phi$ fein	<input type="checkbox"/>	0.00

elektrische ...  positiv  
 negativ

▶ Teilchen 2

▶ Teilchen 3

▶ Teilchen 4

Teilchenspür und zugehörige Pixel

Regler für Transversalimpuls

Regler für Winkel

Teilchen 1

Teilchen 2

$p_T$

$p_T$ , fein

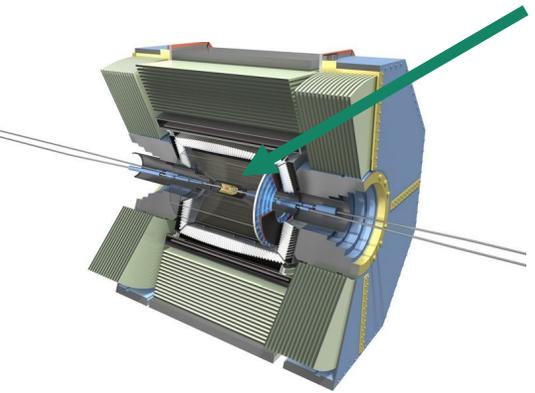
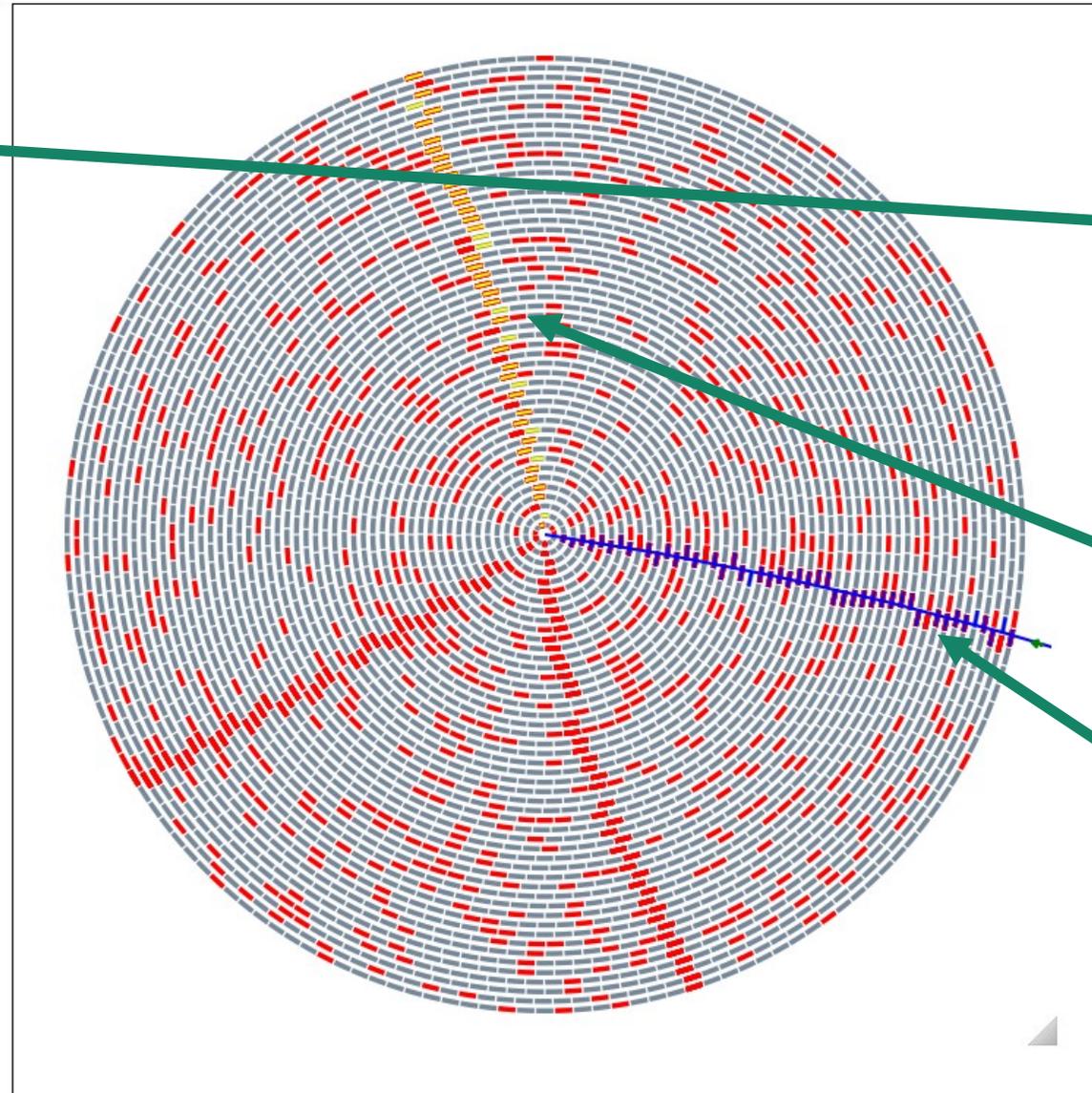
$\phi$

$\phi$  fein

elektrische ...  positiv  negativ

Teilchen 3

Teilchen 4

Zweites Teilchen  
ausgewählt

Fertig  
Rekonstruierte Spur

Aktuell  
Rekonstruierte Spur

▶ Teilchen 1

▶ Teilchen 2

▶ Teilchen 3

▼ Teilchen 4

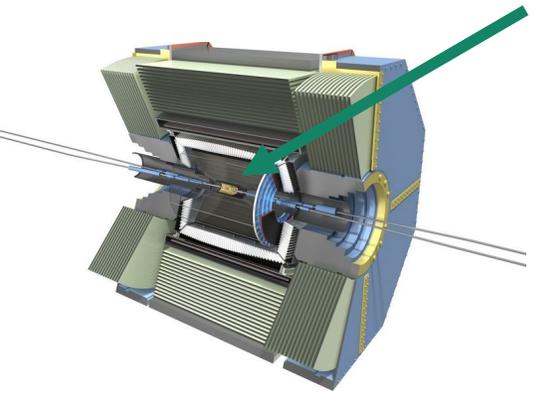
$p_T$   1.97

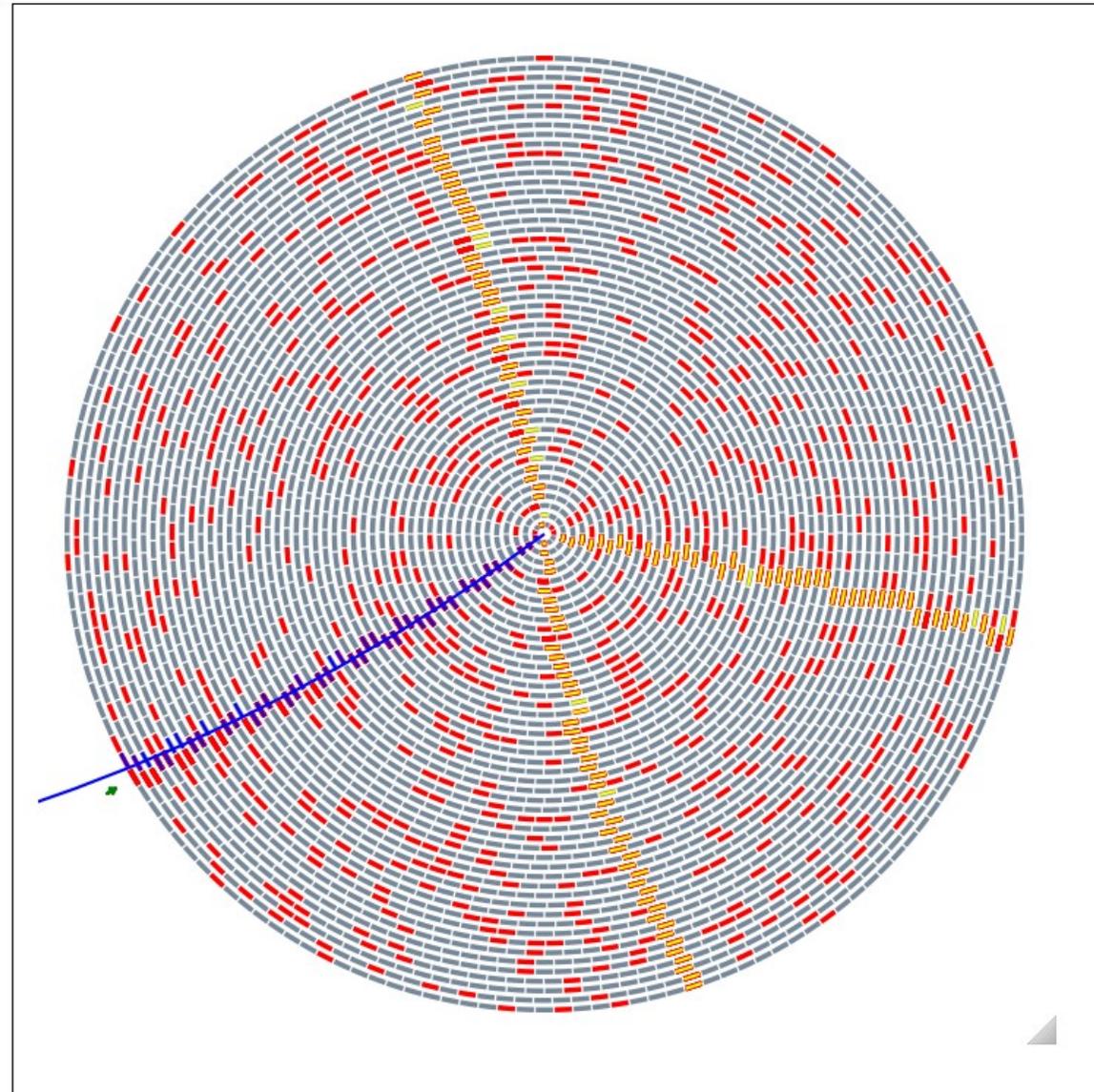
$p_T$ , fein  0.00

$\phi$   -2.21

$\phi$  fein  0.00

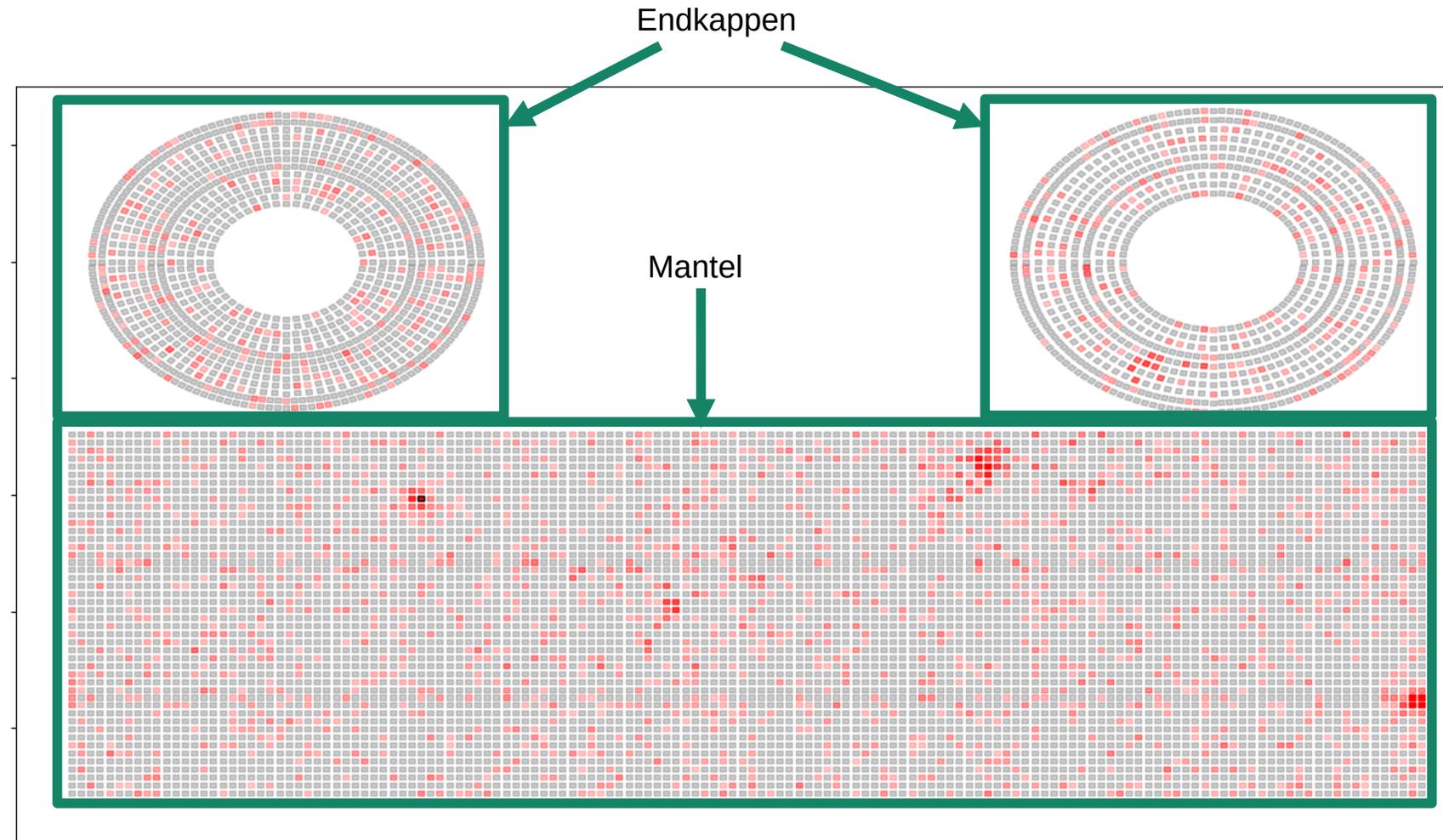
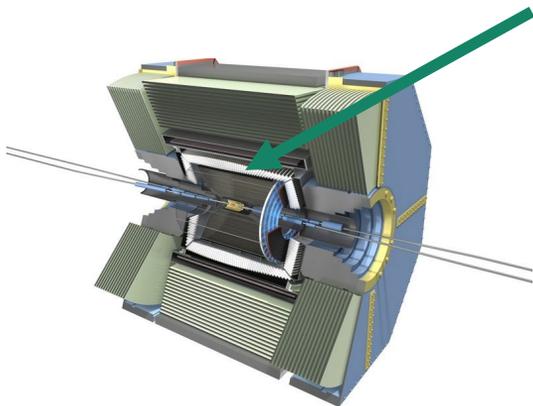
elektrische ...  positiv  
 negativ





# Elektromagnetischer Kalorimeter

- Echtes Belle II ECL
- Echte Belle II Simulation
- Teilchen bilden "Cluster" aus Energiedepositionen



# Elektromagnetischer Kalorimeter

- Cluster können mit Maus umrandet werden

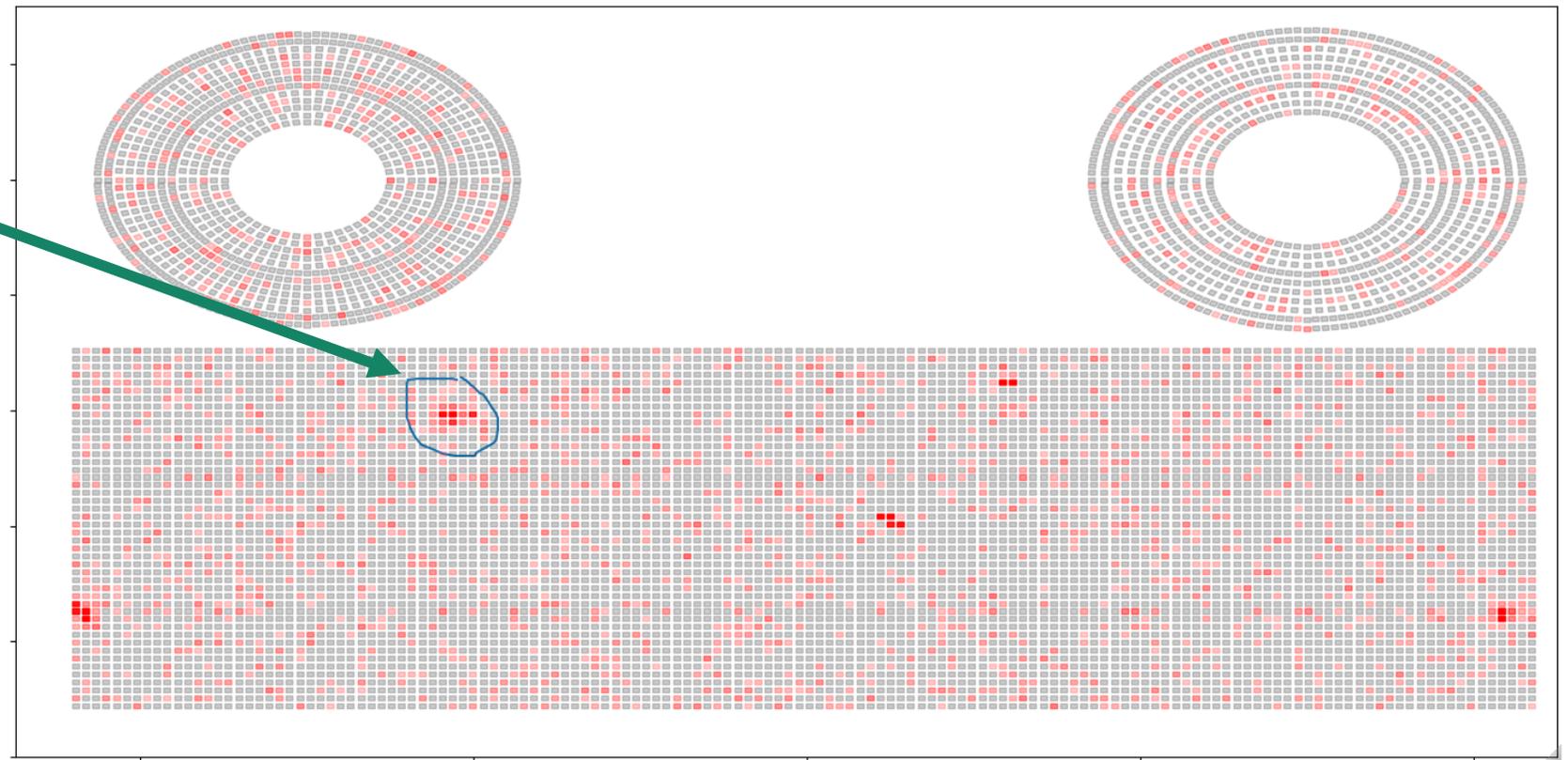
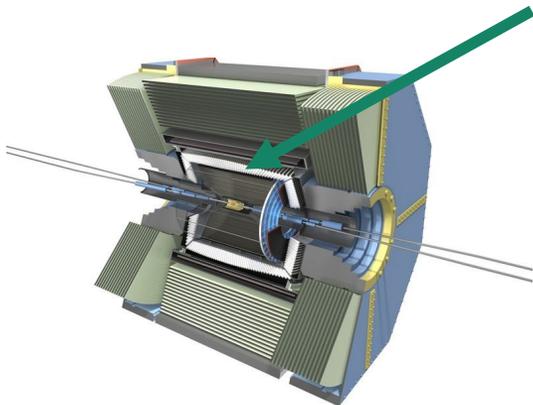
▸ Teilchen 1

▸ Teilchen 2

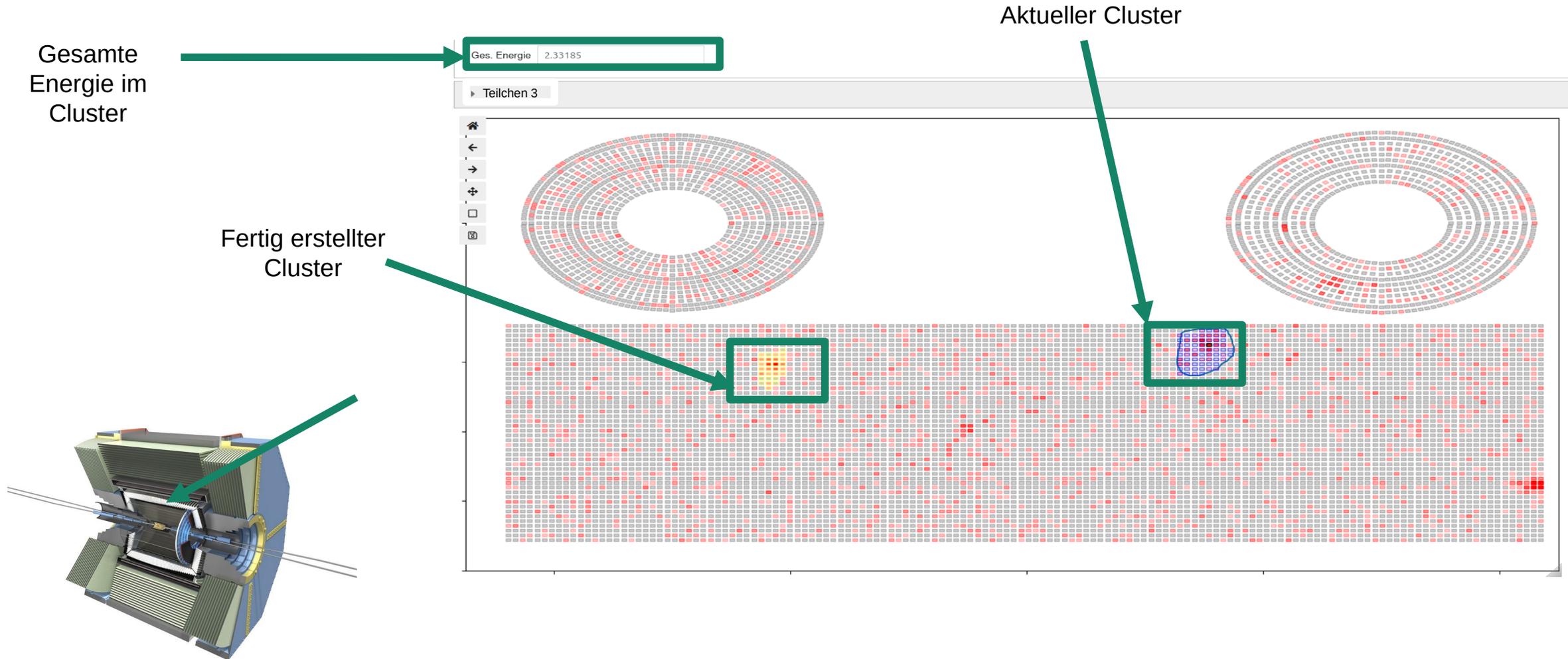
▸ Teilchen 3

▸ Teilchen 4

Ausgewählter Cluster

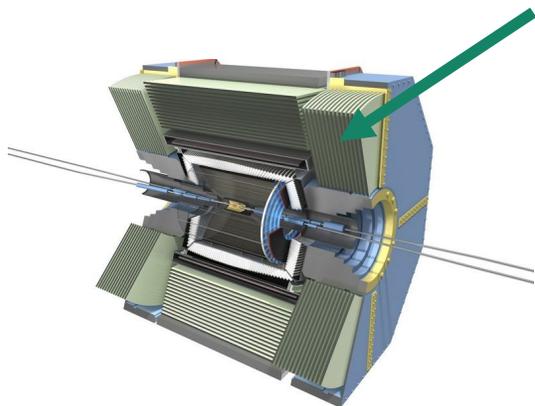


# Elektromagnetischer Kalorimeter



# Kaon/Muon Detektor (KLM)

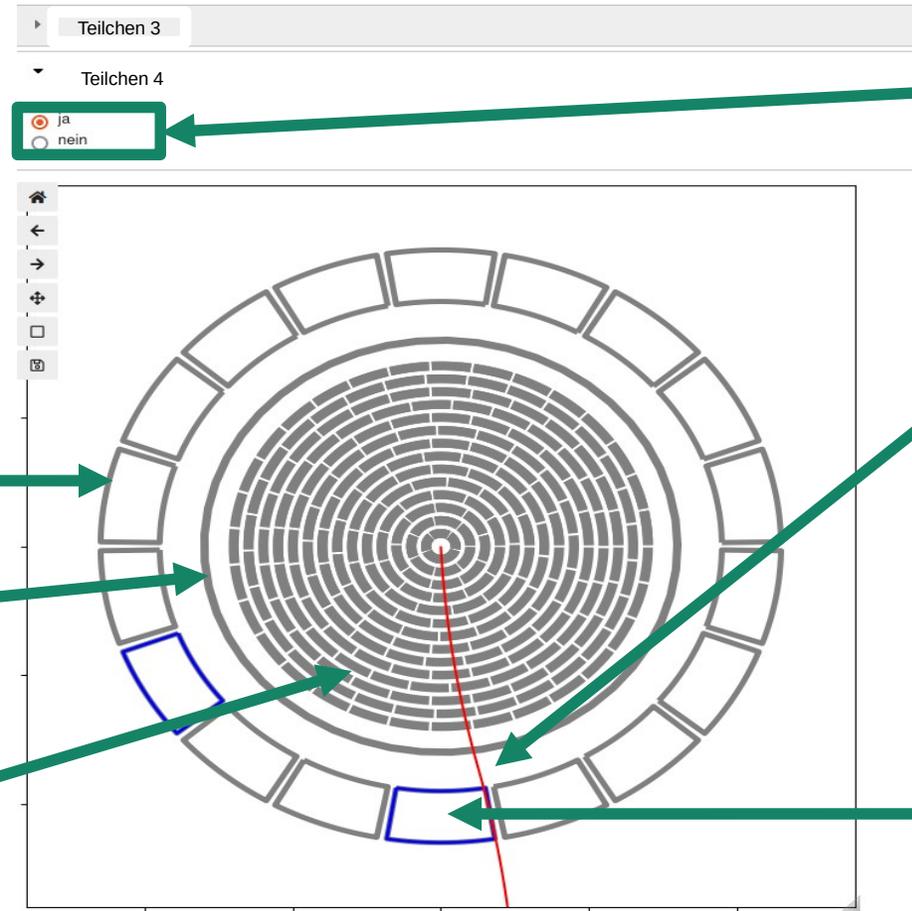
- Stellvertretend für alle Subdetektoren zur Teilchenidentifikation
- Vereinfacht zu binärem Detektor



Kaon/Muon Detektor

Magnet

Angedeuteter Spurdetektor



Check auf passenden Treffer

Spur basierend auf vorheriger Messung

Treffer im KLM

# Teilchenidentifikation

- Messergebnisse zusammentragen
- Mit bekannten Teilchen vergleichen
- Auswählen der besten Teilchenhypothese

Teilchen 0
Teilchen 1

Resultate

Energie

el. Ladung

Impuls

Masse

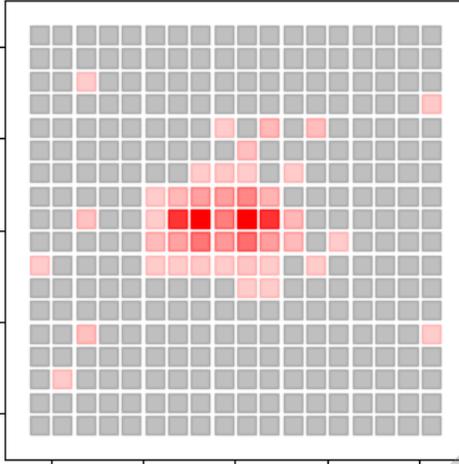
$E/p$

$p_x$

$p_y$

$p_z$

$K_L^0$



Bekannte Teilchen zum Vergleichen

Teilchen

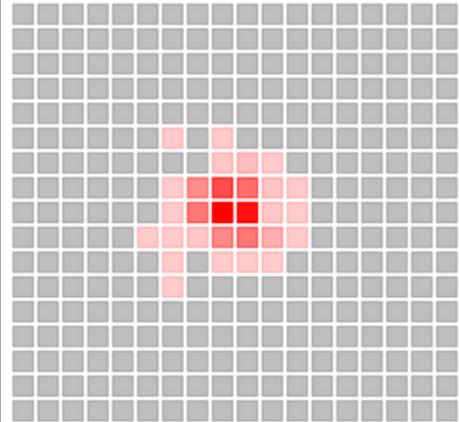
Masse

el. Ladung

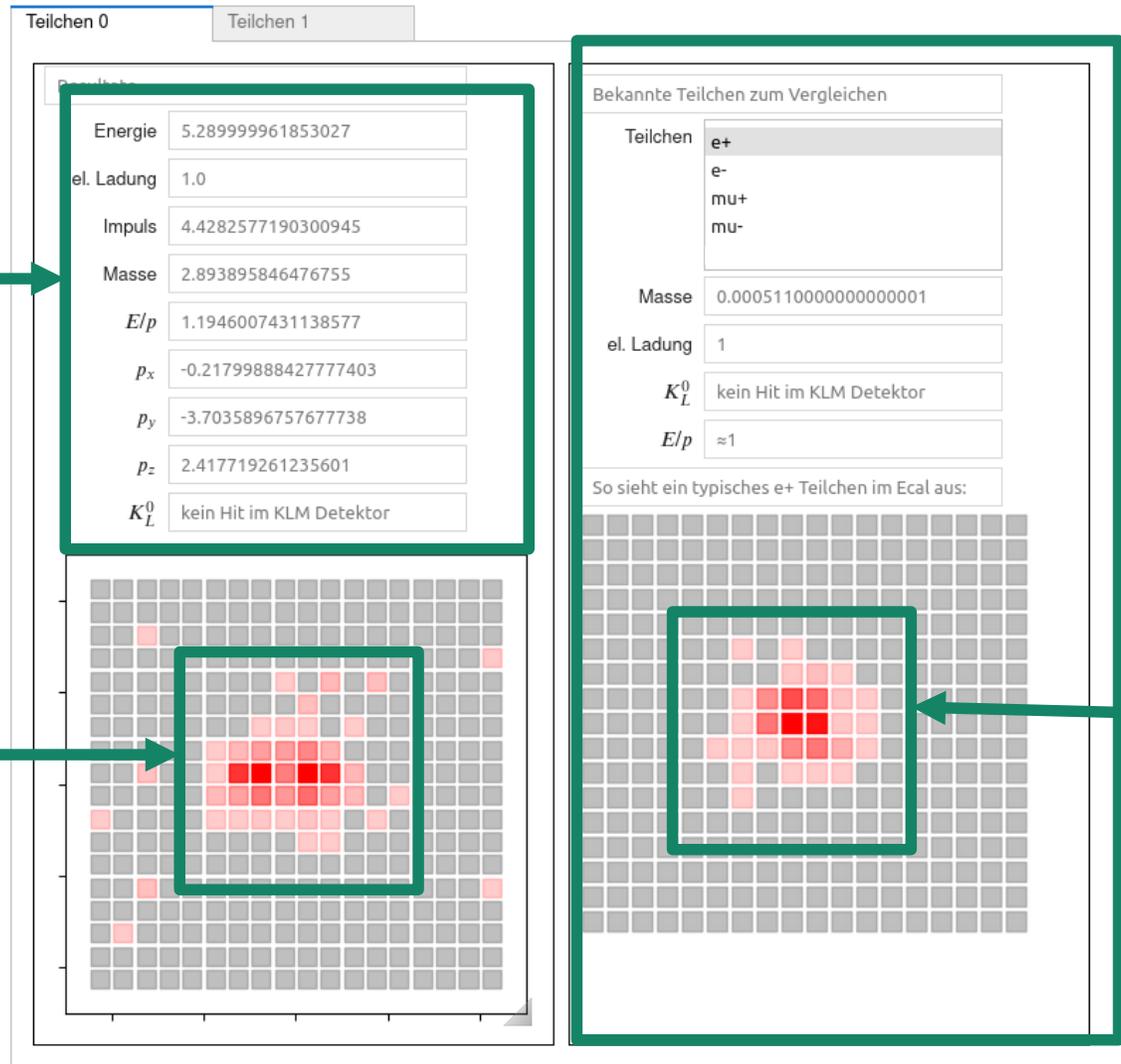
$K_L^0$

$E/p$

So sieht ein typisches e+ Teilchen im Ecal aus:



# Teilchenidentifikation



Teilchen 0    Teilchen 1

**Messergebnisse** →

Energie	5.289999961853027
el. Ladung	1.0
Impuls	4.4282577190300945
Masse	2.893895846476755
$E/p$	1.1946007431138577
$p_x$	-0.21799888427777403
$p_y$	-3.7035896757677738
$p_z$	2.417719261235601
$K_L^0$	kein Hit im KLM Detektor

→ **Steckbrief bekannter Teilchen**

Bekannte Teilchen zum Vergleichen

Teilchen	e+
	e-
	mu+
	mu-
Masse	0.0005110000000000001
el. Ladung	1
$K_L^0$	kein Hit im KLM Detektor
$E/p$	$\approx 1$

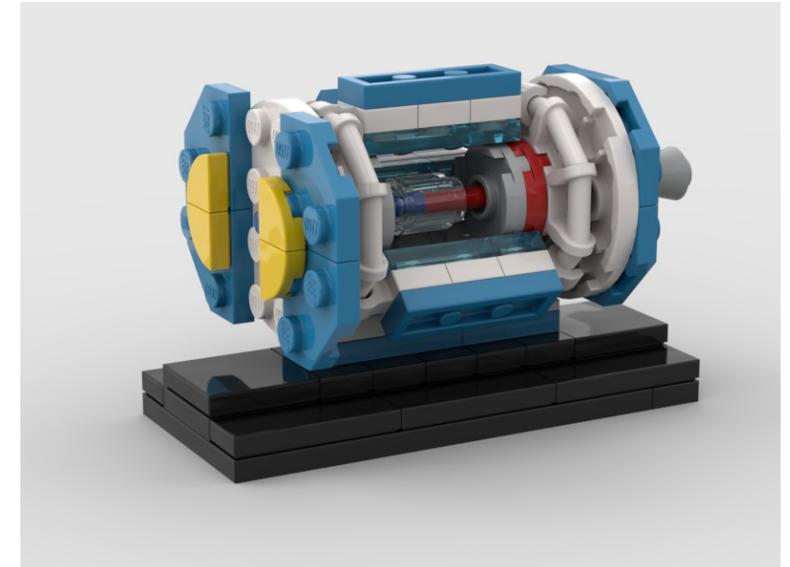
So sieht ein typisches e+ Teilchen im Ecal aus:

→ **Beispielhafte ECL Signatur**

→ **Selektierter ECL Cluster**

# Zusammenfassung

- Interaktive Jupyter Notebooks zur Verständnis von Detektorkonzepten und Analyse von aufgenommenen Daten
- Einfluss von Hintergrundrauschen und Unsicherheiten wird erklärt
- Durch Rekonstruktion von Energien und Impuls der Teilchen soll am Ende fehlende Energie gefunden und damit Dunkle Materie erklärt werden



```
[11]: sw = MissingWidget()
      sw.show()
```

Energie	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="Berechne fehlendes ..."/>								
$p_x$	<input type="text" value="0"/>									
$p_y$	<input type="text" value="0"/>									
$p_z$	<input type="text" value="0"/>									
								Masse	<input type="text" value="0"/>	