

# Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig  
11. Mai 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



# Zusammenfassung: WW Teilchen mit Materie

- Übersicht über relevante Wechselwirkungen mit Materie:

	geladene Teilchen			Neutrale Hadronen
Photonen	Elektronen	Hadronen		
Paarbildung	Bremsstrahlung	Kernwechselwirkungen		
Compton				
Photoeffekt	Ionisation			
	Cherenkov- & Übergangsstrahlung			

- Charakterisiert durch Strahlungslänge ( $X_0$ ) und Wechselwirkungslänge ( $\lambda$ )

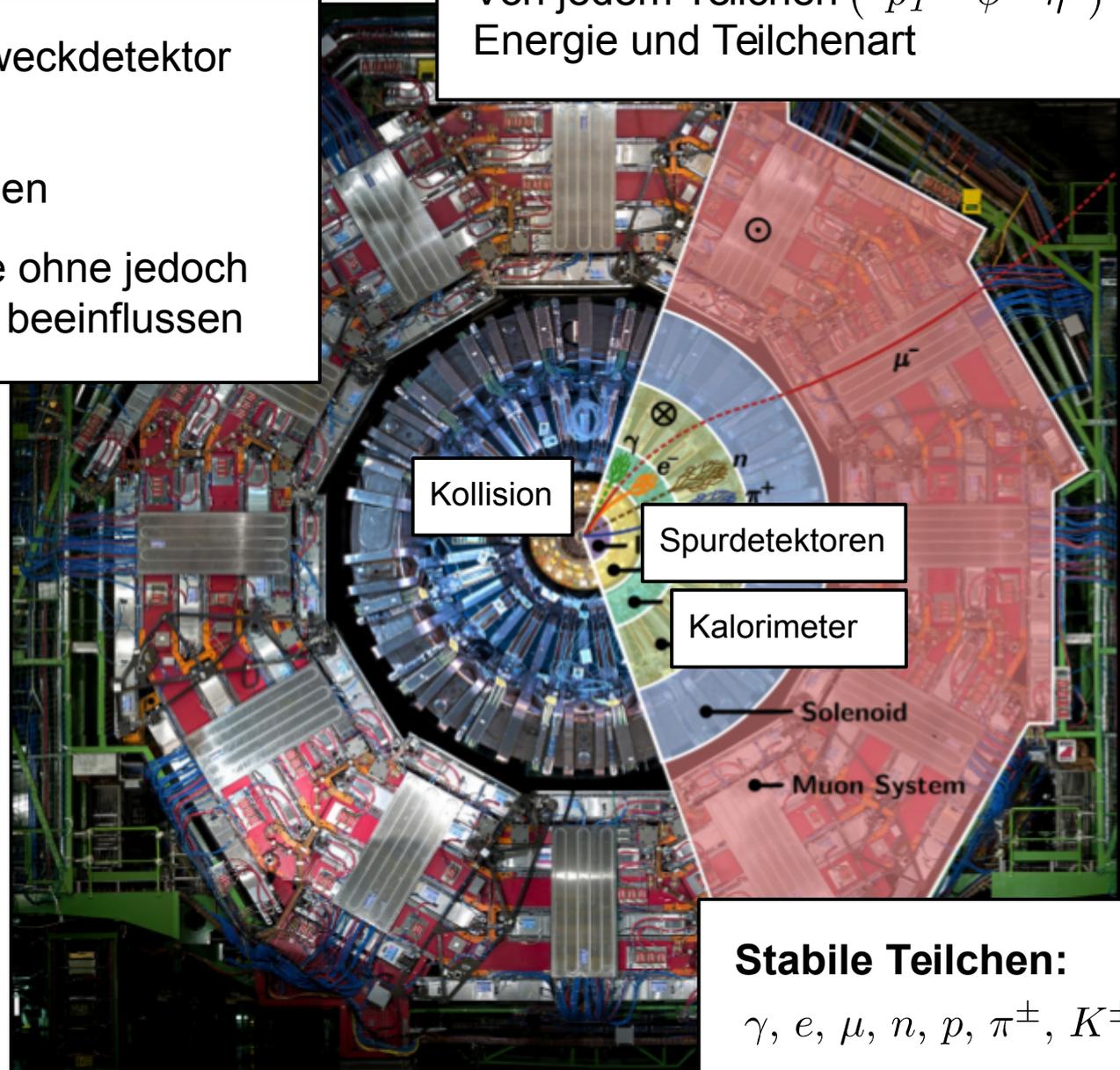
# **Kapitel 2.4: Detektionstechniken**

# Teilchennachweis

- Orientierung an Vielzweckdetektor der Teilchenphysik
- Redundante Messungen
- Optimale performance ohne jedoch andere Detektoren zu beeinflussen

## Was wir wissen wollen:

Von jedem Teilchen ( $p_T$   $\phi$   $\eta$ )  
Energie und Teilchenart

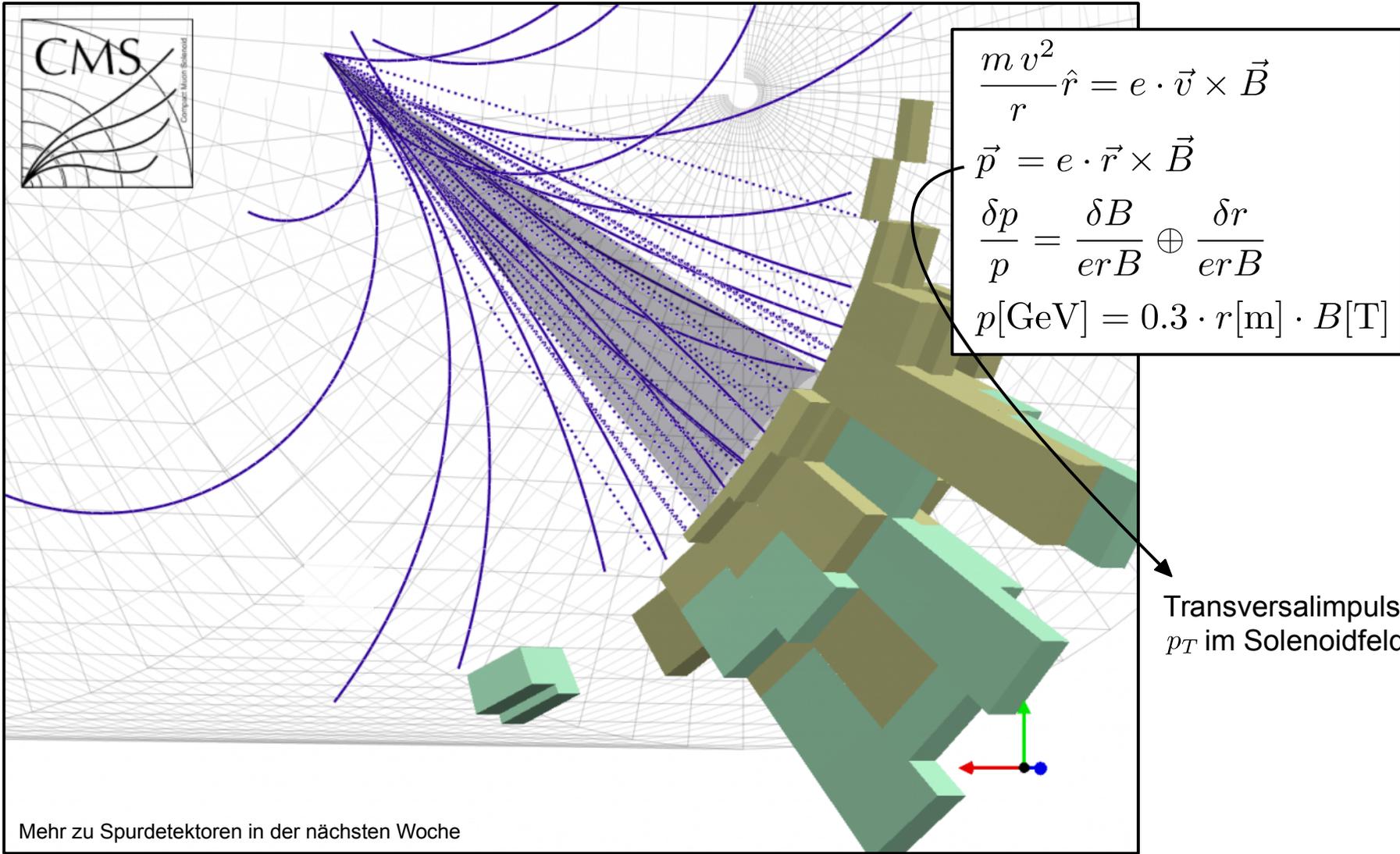


## Stabile Teilchen:

$\gamma, e, \mu, n, p, \pi^\pm, K^\pm$

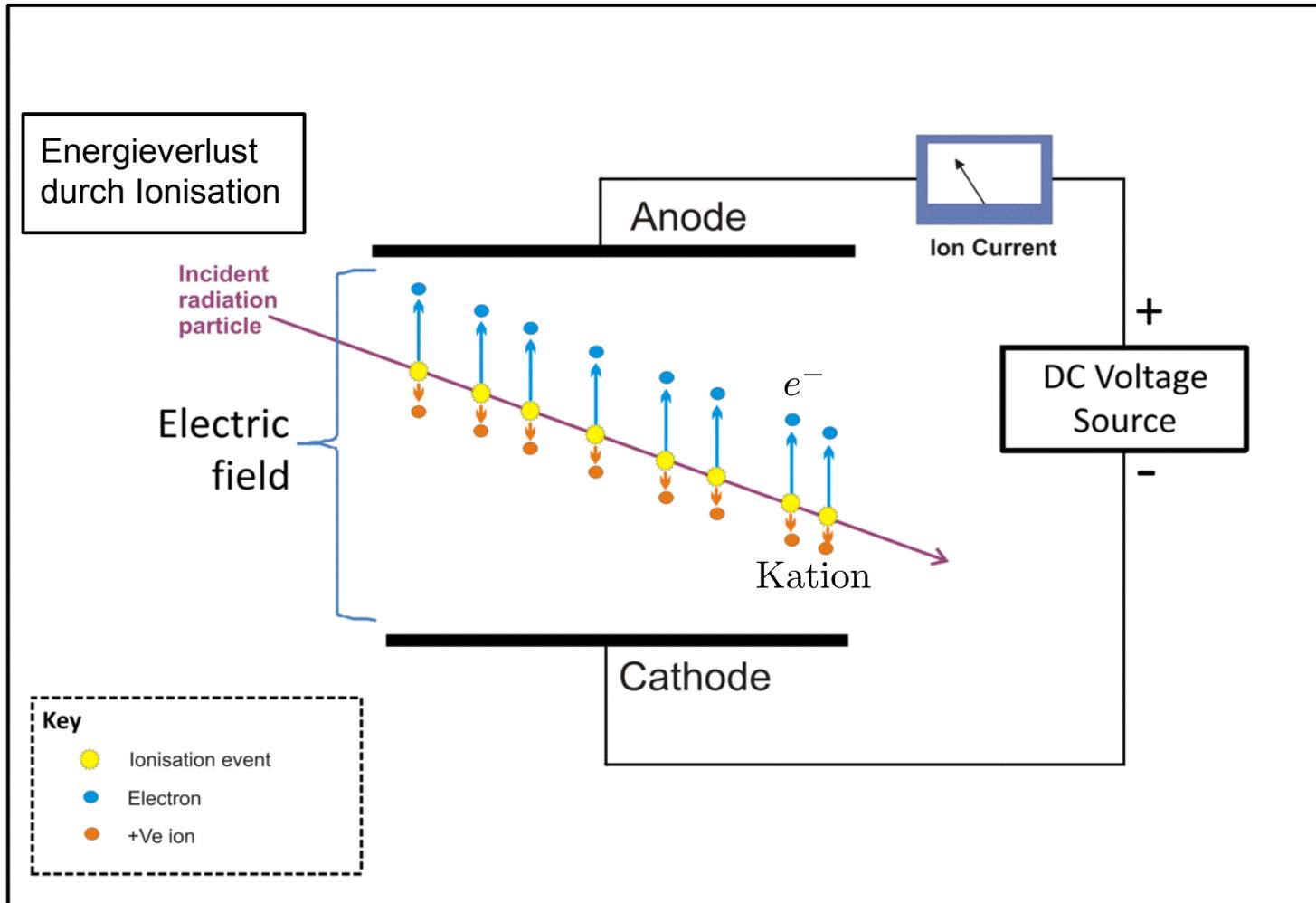
# Impulsbestimmung aus der rekonstruierten Spur

- Spurdetektoren in Magnetfeldern erlauben Impulsbestimmung: üblicherweise Solenoid-, manchmal auch Toroidfelder



# Spurdetektoren (Prinzip)

- Messung **Ortsdurchgang** eines geladenen Teilchens (unmöglich für neutrale Teilchen)

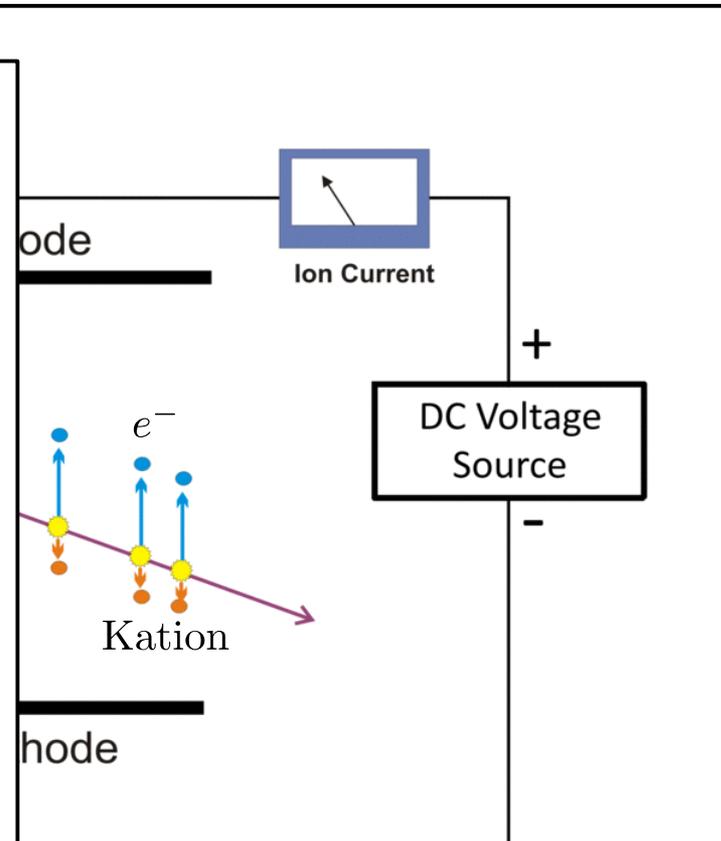


# Spurdetektoren (Prinzip)

- Messung **Ortsdurchgang** eines geladenen Teilchens (unmöglich für neutrale Teilchen)

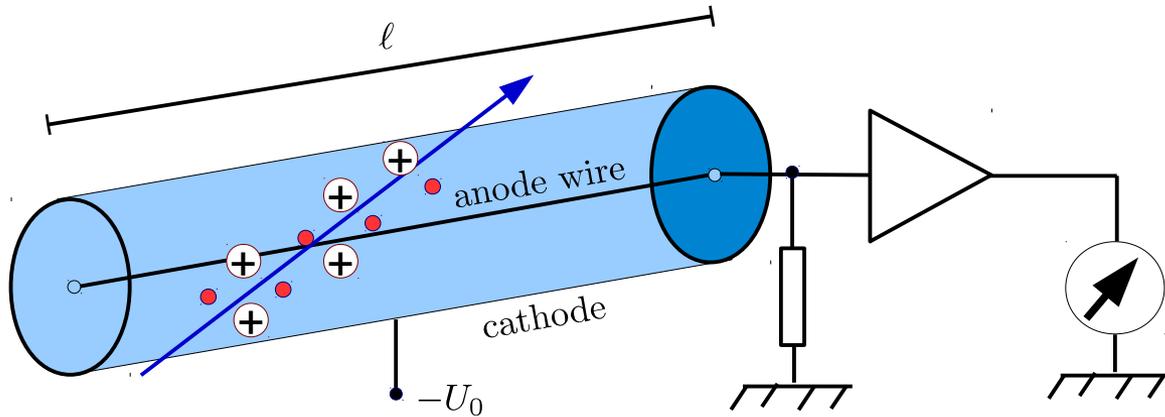
## Anforderungen:

- Gute Ortsauflösung (→ kleine Strukturen)
- Wenig Material (→ wenige Strahlungslängen, Energiemessung in anderen Detektoren, Vielfachstreuung [s. VL-04 Folie 13])
- Keine Schauer!
- Kostengünstig und einfach herzustellen



- Electron
- +Ve ion

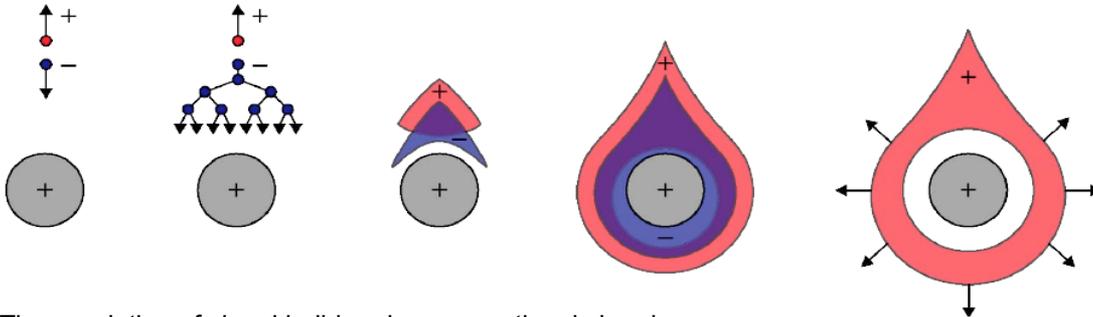
# Driftrohr



$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{U_0}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

$$\Delta U^- = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln((v_D^- \cdot \Delta t^-)/r_{\text{inner}})}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

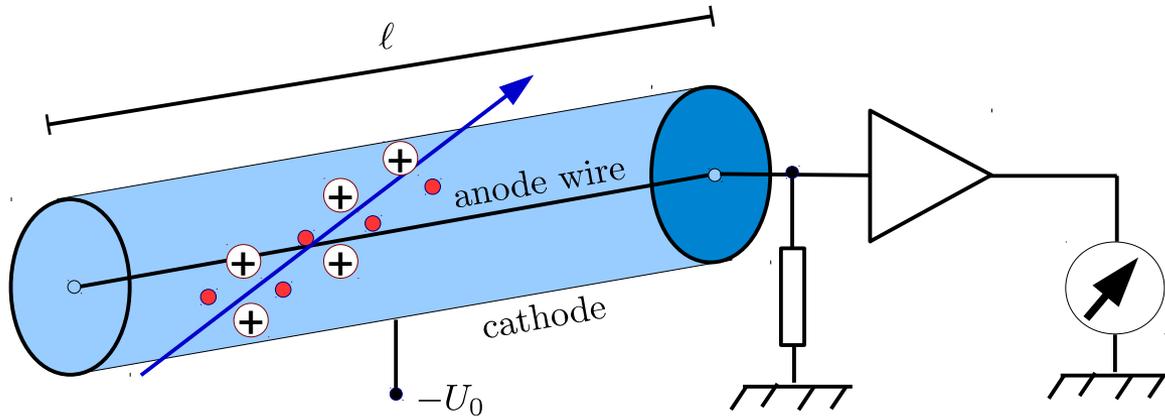
$$\Delta U^+ = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln(r_{\text{outer}}/(v_D^+ \cdot \Delta t^+))}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$



Time evolution of signal build-up in a proportional chamber

- Gefüllt mit Zählgas
- **Primärionisation** (s. Energieverlust durch Ionisation geladener Teilchen)
- Drift der leichten Elektronen und schweren Kationen zu Elektroden ( $\rightarrow$  Ladungstrennung)
- Wenn Elektronen schnell genug  $\rightarrow$  Sekundärionisation
- Führt zu **Gasverstärkung** (üblich  $\mathcal{O}(10^5)$ ) durch Townsend-Lawine
- Ausbreitung von UV-Photonen aus Ionen in Kammer  $\rightarrow$  Absorption durch **Löschgas** (engl. quench gas, z.B.  $\text{CO}_2$ )

# Elektrisches Feld im Zylinderkondensator



$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{U_0}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})} \quad \Delta U^- = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln((v_D^- \cdot \Delta t^-)/r_{\text{inner}})}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

$$\Delta U^+ = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln(r_{\text{outer}}/(v_D^+ \cdot \Delta t^+))}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

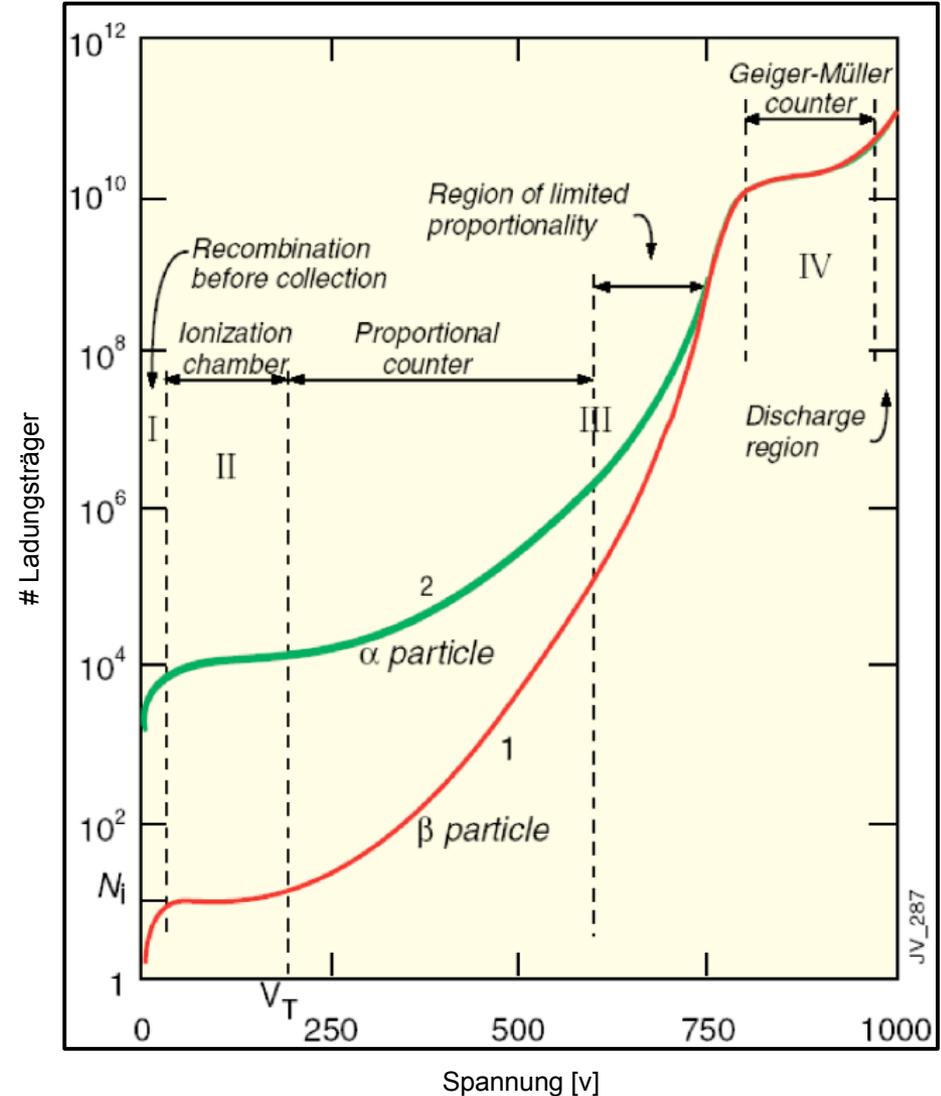
$$2\pi r \ell E(r) = \int_{\partial V} \vec{E}(r) \, df = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E}(r) \, dV = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 r \ell} = \frac{1}{r} \frac{U_0}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

$$U_0 = \int_{r_{\text{inner}}}^{r_{\text{outer}}} E(r) \, dr = \frac{Q}{\pi \epsilon_0 \ell} \ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})$$

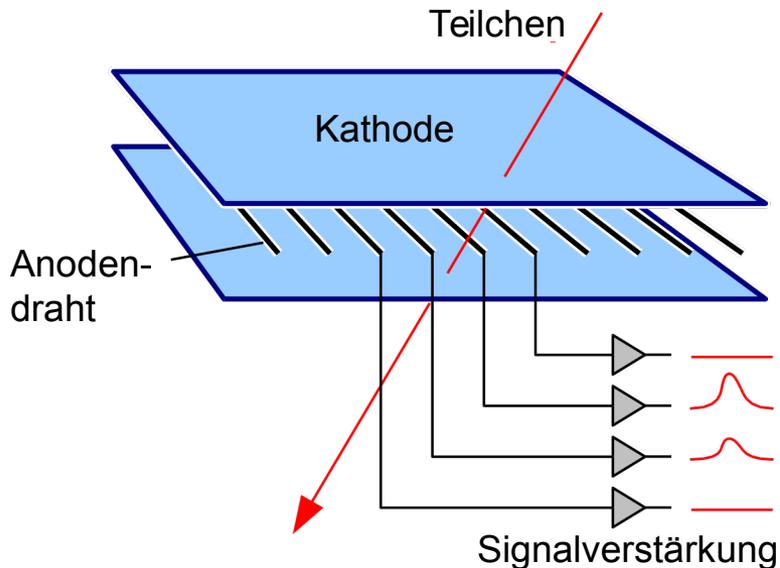
# Betriebsmoden

- **Proportionalkammer:**
  - Betrieb in Proportionalzählbereich
  - Anzahl der Elektron-Ionen Paare proportional zu Primärionisation
- **Geiger-Müller-Zählrohr** (1908 Geiger, 1928 Müller):
  - Betrieb im Plateaubereich
  - Anzahl der Elektron-Ionen Paare unabhängig von Primärionisation

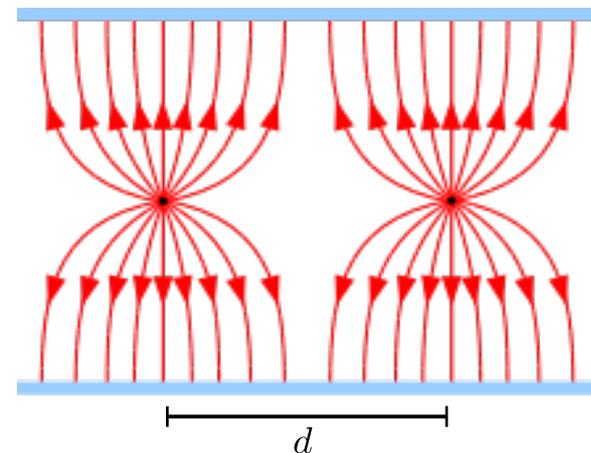


# Vieldraht-Proportionalkammer (G. Charpak 1968)

- Großflächige planare Anordnung, **viele parallele Anodendrähte** (typisch: Durchmesser  $\mathcal{O}(100 \mu\text{m})$ , Abstand  $\mathcal{O}(\text{mm})$ , Betrieb im Proportionalbereich)
- Ortsinformation: 1d durch Signal an angesprochenen Drähten
- Segmentierte Kathodenebene (z.B. Streifen senkrecht zu Anodendrähten)  
→ Information in zweiter Dimension durch Ladungsinfluenz



Elektrisches Feld einer MWPC  
(=multi-wire proportional chamber):



Ortsauflösung zwischen den  
Anodendrähten:  $\sigma_d = d/\sqrt{12}$

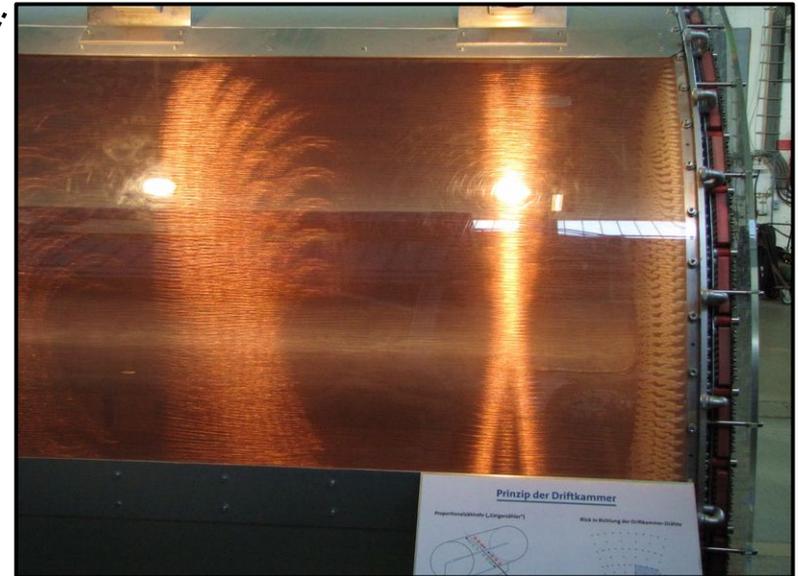
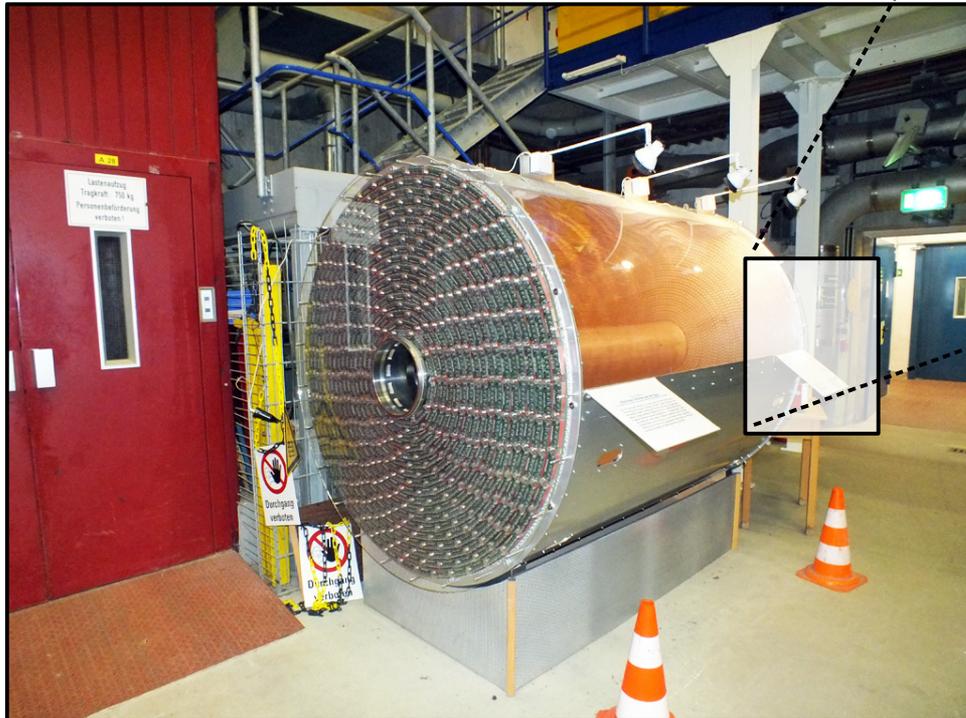
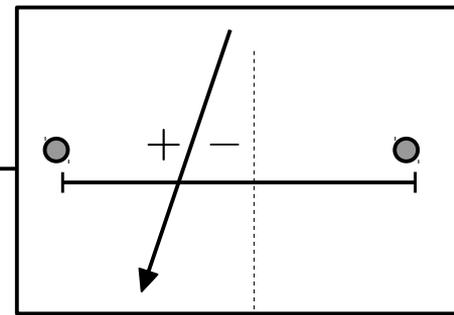


# Driftkammer (Walenta, Heinze, Schürlein, 1971)

- Ortsauflösung der MWPC limitiert durch Drahtabstand
- Verbesserung durch Verwendung von **Driftzeitinformation**

$$x' = x_0 + \frac{e}{2m_2} \vec{E}(\vec{r}) \Delta t^2$$

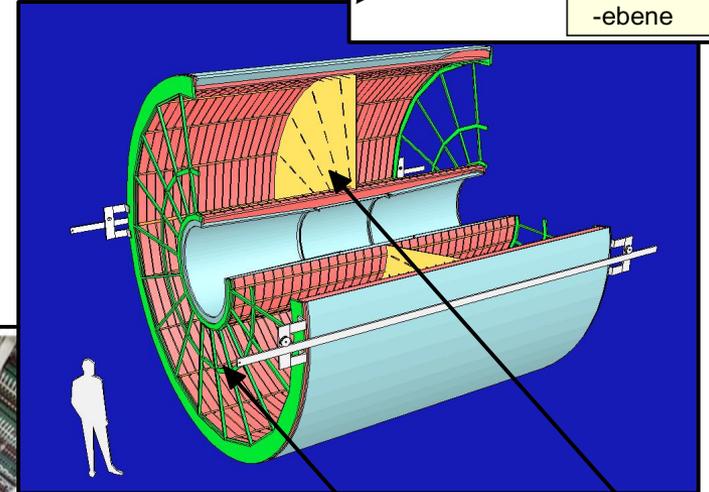
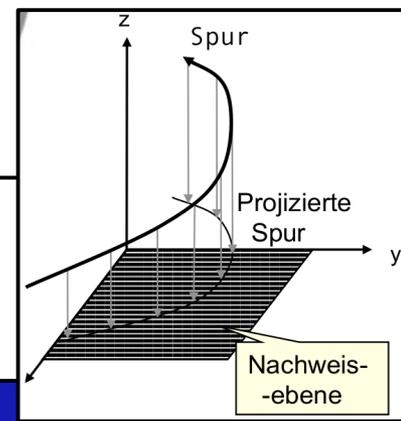
$\Delta t = t' - t_0$  : Driftzeit Elektronen  
zu Anodendraht



**Voraussetzungen:** genaue Kenntnis  
von  $\vec{E}(\vec{r})$  und  $t_0$

# Zeitprojektionskammer (D. Nygren, 1974)

- Drift der Ladungsträger in homogenem E-Feld (und hier auch B-Feld), segmentierte Auslese in Endkappen als Anoden (z.B. MWPC)
- Rekonstruktion der Spur in 3d:
  - x,y: aus Projektion auf Anode
  - z : aus Driftzeit der Ladungsträger zu den Endkappen

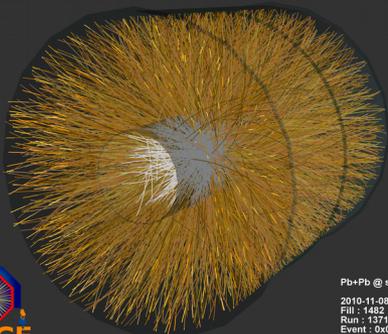


Kathodenplatte auf Hochspannung

Segmentierte Auslese auf Anodenseite



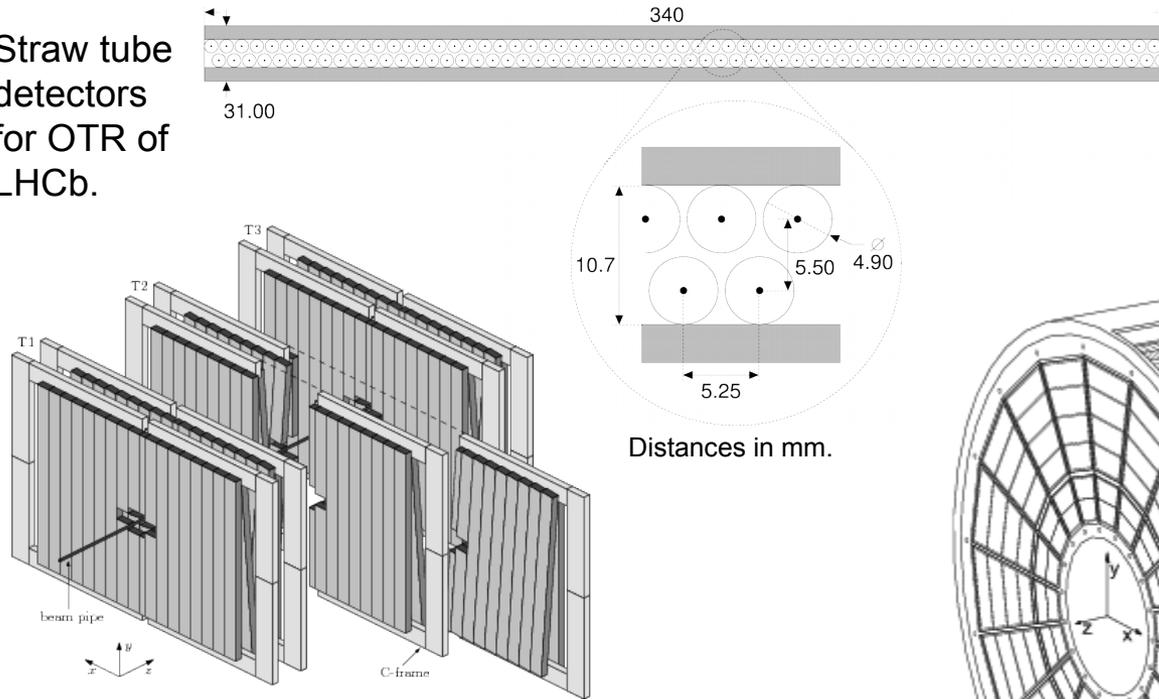
Time Projection Chamber (TPC) des ALICE Experiments



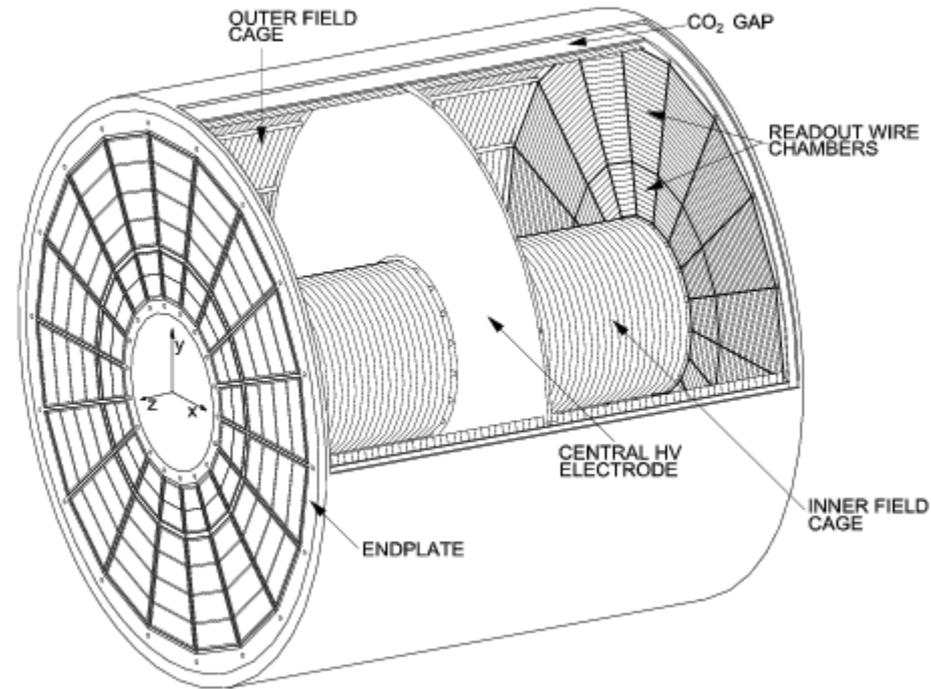
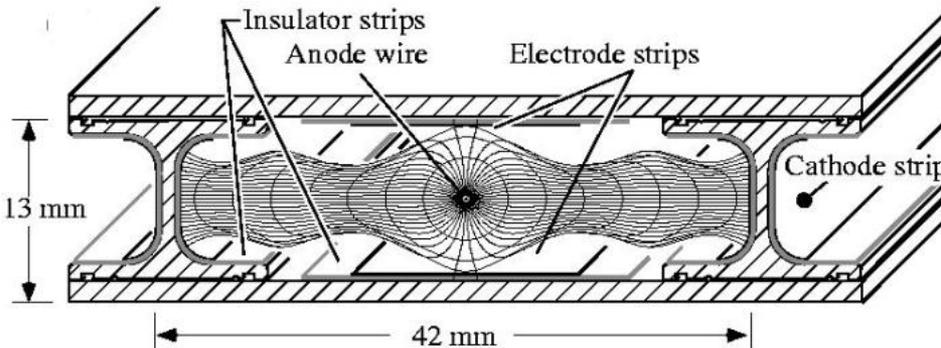
Pb+Pb @  $\sqrt{s}$  = 2.76 ATeV  
 2010-11-08 11:30:46  
 File : 1482  
 Run : 137124  
 Event : 0x0000000003BBE693

# Driftkammern in laufenden LHC Experimenten

Straw tube detectors for OTR of LHCb.



Drift chamber for muon system of CMS.



Time projection chamber as in use at ALICE:

# Gasgefüllte Spurdetektoren: Pro & Con

---

## Vorteile:

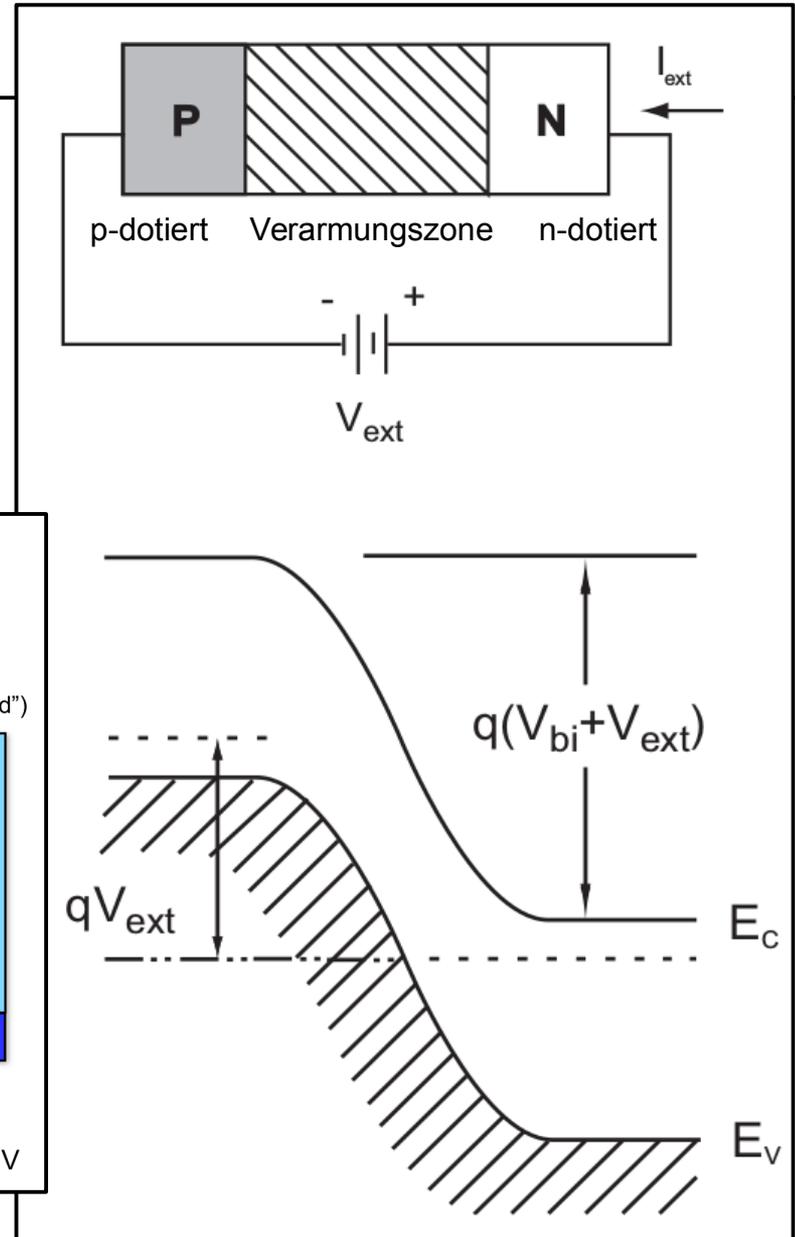
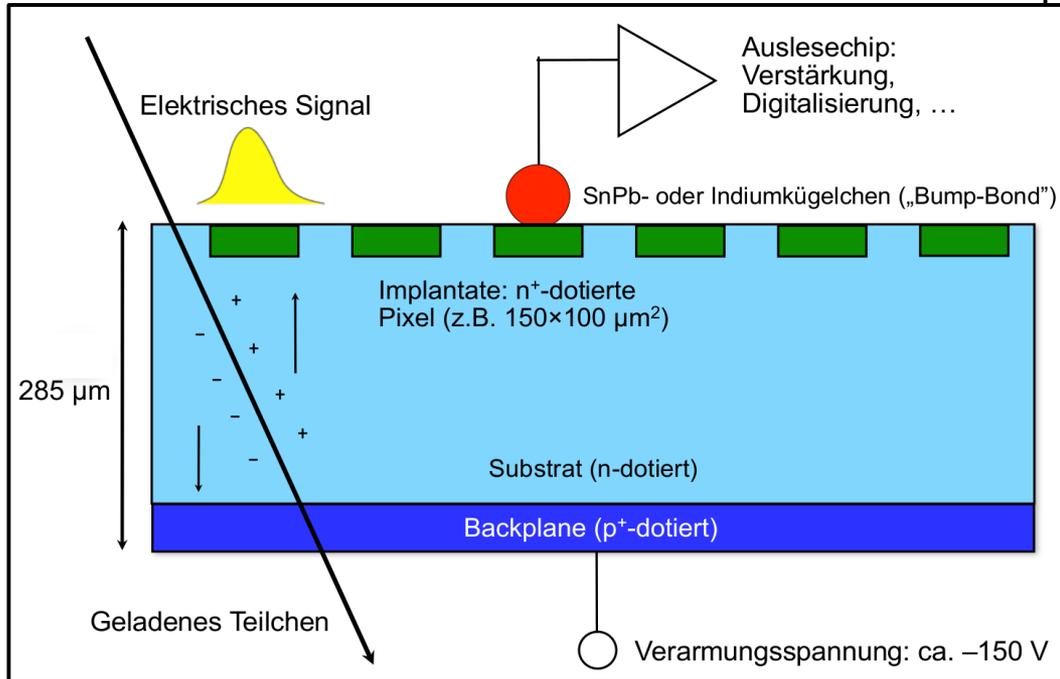
- Wenig Material ( $X_0 \rightarrow$  anschließende Energiemessung, Vielfachstreuung)
- Kostengünstig und i.a. verhältnismäßig einfach herzustellen
- Elegant, z.B. 3d-Information für TPC

## Probleme:

- Gasdichte des Detektors
- Überschläge (Schäden auf Anodenstruktur)
- Alterung unter radioaktiver Bestrahlung ( $\rightarrow$  sorgfältige Auswahl der Gase)
- Bei Drahtkammern: was passiert, wenn ein Draht reißt?

# Halbleiterdetektoren

- Detektionsprinzip: Halbleiterdiode in **Sperrrichtung** → starkes Feld zur Ladungstrennung
- Ortsmessung (z.B. bei LHC): 1d – Streifen, 2d – Pixel (Dimensionierung und Auslese)

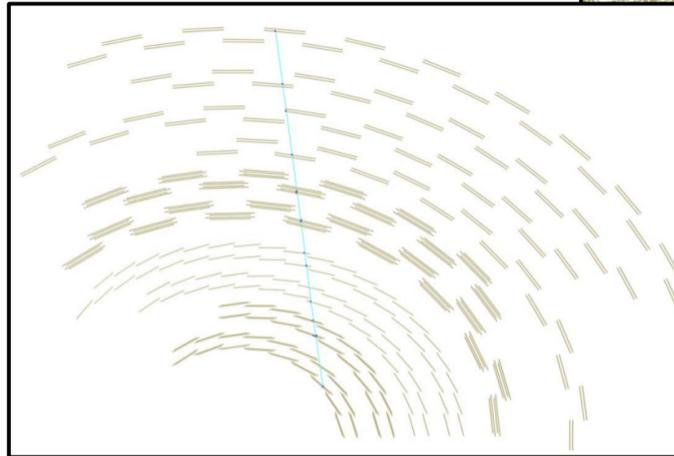
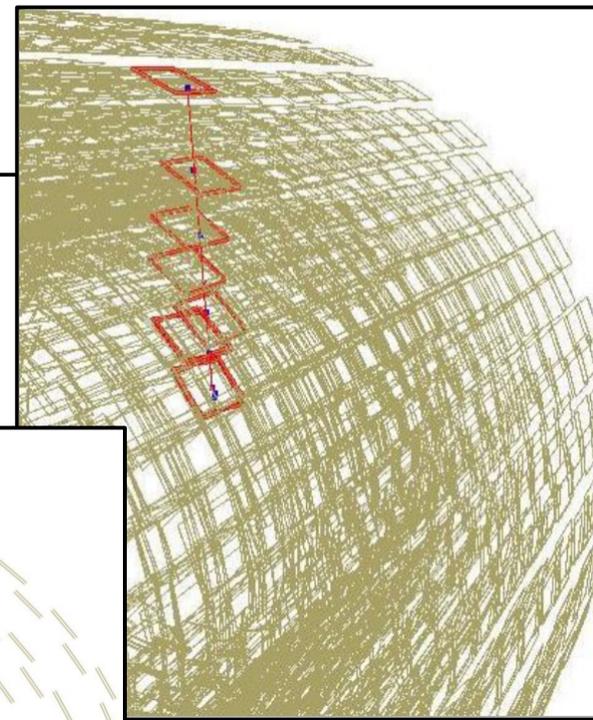


# Innerer Spurdetektor von CMS

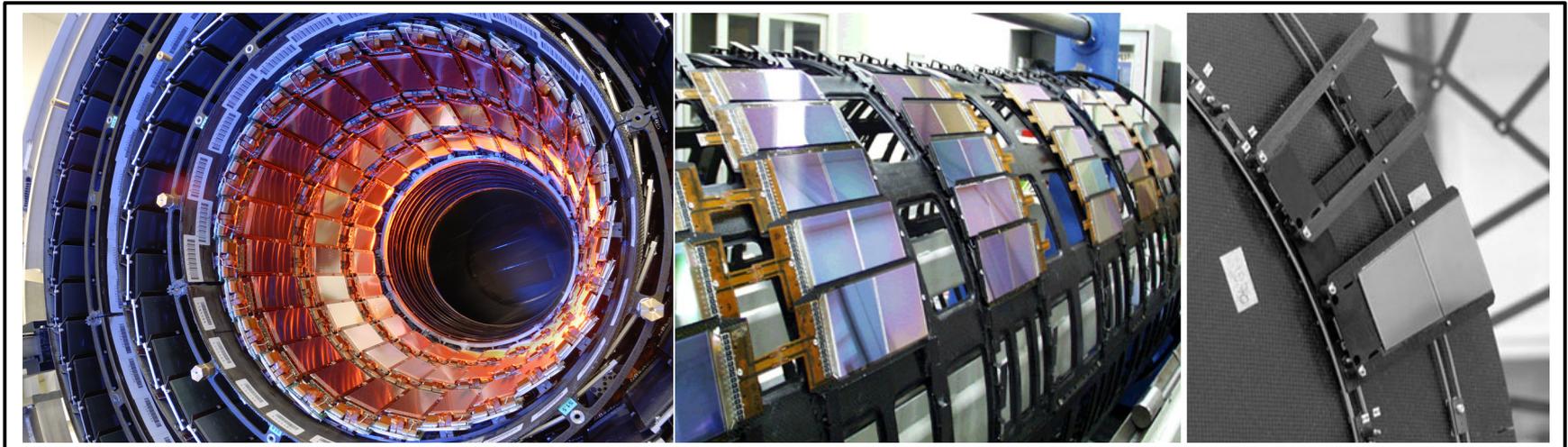
- 200 m<sup>2</sup> Siliziumdetektoren (größter Siliziumdetektor der Welt)
- Impulsaufösung für 10 GeV Spur (in 3.8 T supraleitenden Magnetfeld):

$$\Delta p/p = 0.5\%$$

(s. Übungsblatt 3)

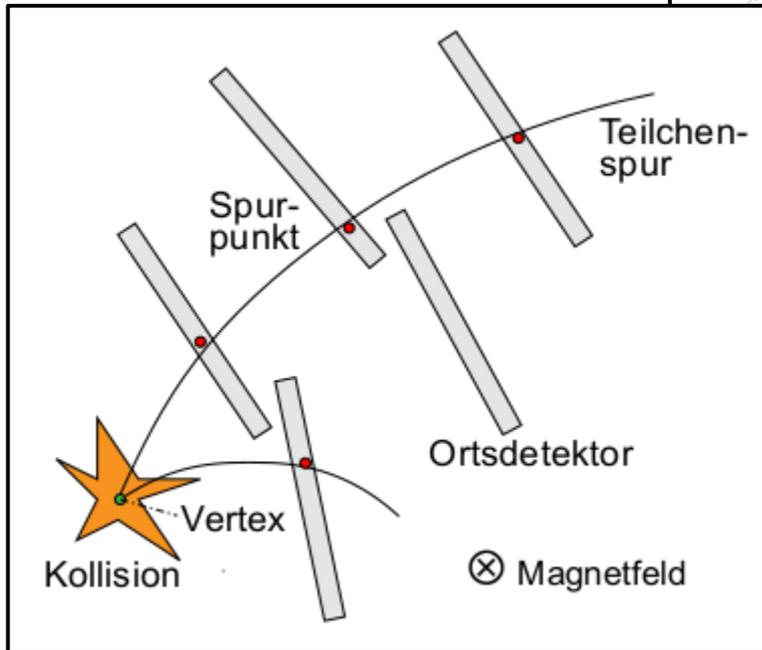
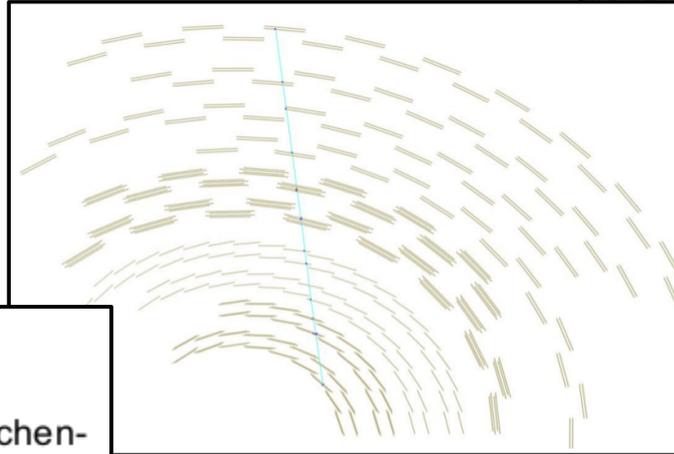
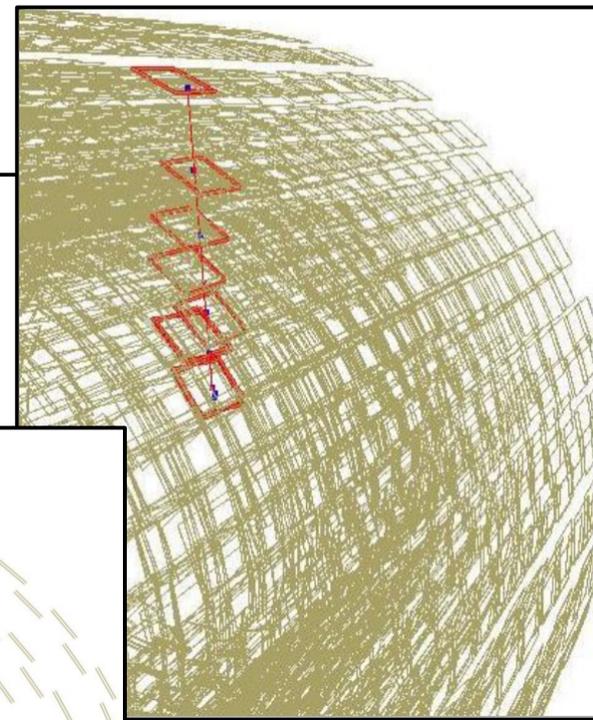


Impressionen des CMS Spurdetektors



# Spurrekonstruktion bei CMS

- 1d oder 2d Information aus jedem Siliziumdetektor den das Teilchen kreuzt (→ “hit”)
- Bis zu 13 Lagen von Siliziumdetektoren im Zentralbereich des Detektors
- Hohe Granularität → niedrige “occupancy”

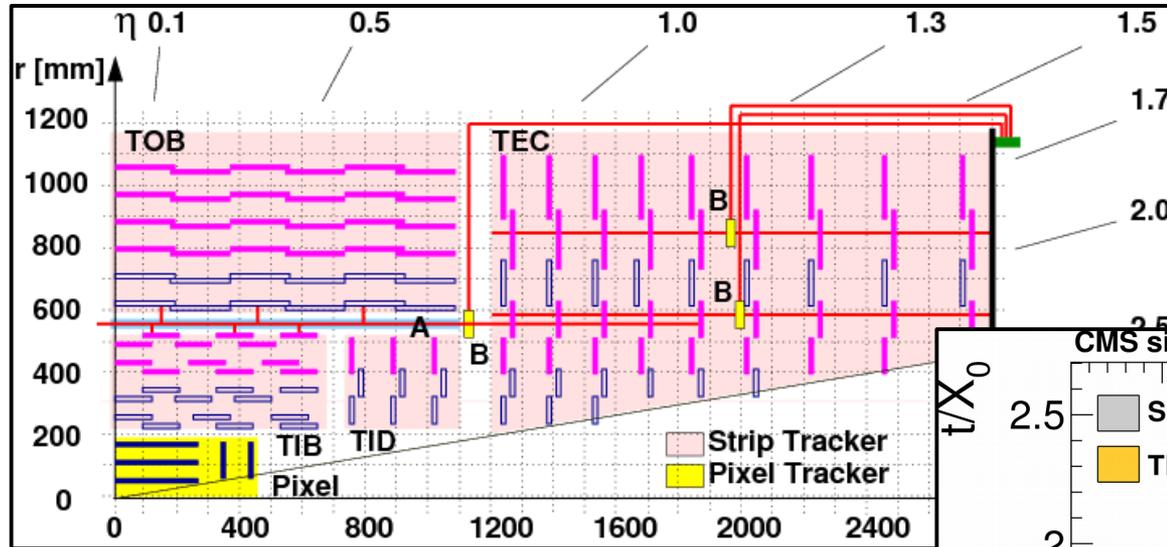


- **Patternerkennung:** liegen Spurpunkte auf gemeinsamer Helixbahn?
- **Anpassung Spurmodell** and rekonstruierte Spurpunkte:

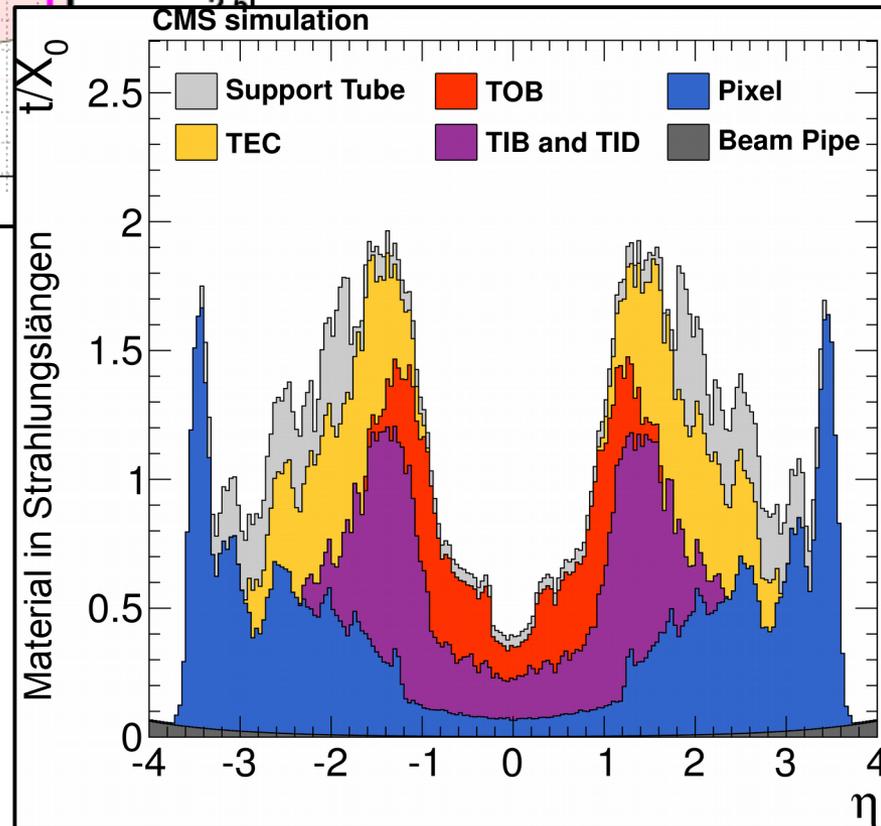
$$\chi^2 = \sum \frac{(x_{obs} - x_{exp})^2}{\sigma_x^2}$$

**Einfaches Modell:** Teilchen auf Helixbahn mit gegebenem Radius und Aufpunkt

# Frage der Beeinflussung – neu gestellt



- Beampipe im Wechselwirkungspunkt aus Beryllium, wenige hundert  $\mu\text{m}$  dick.
- Support Material: Kühlleitungen, Hochspannung, Ausleseelektronik, ...

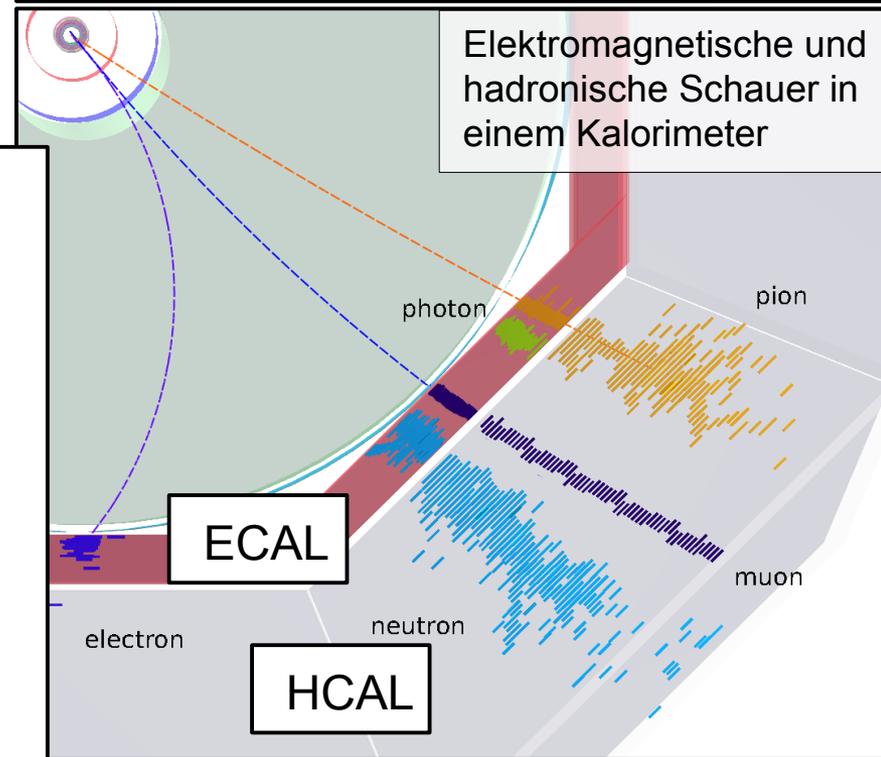
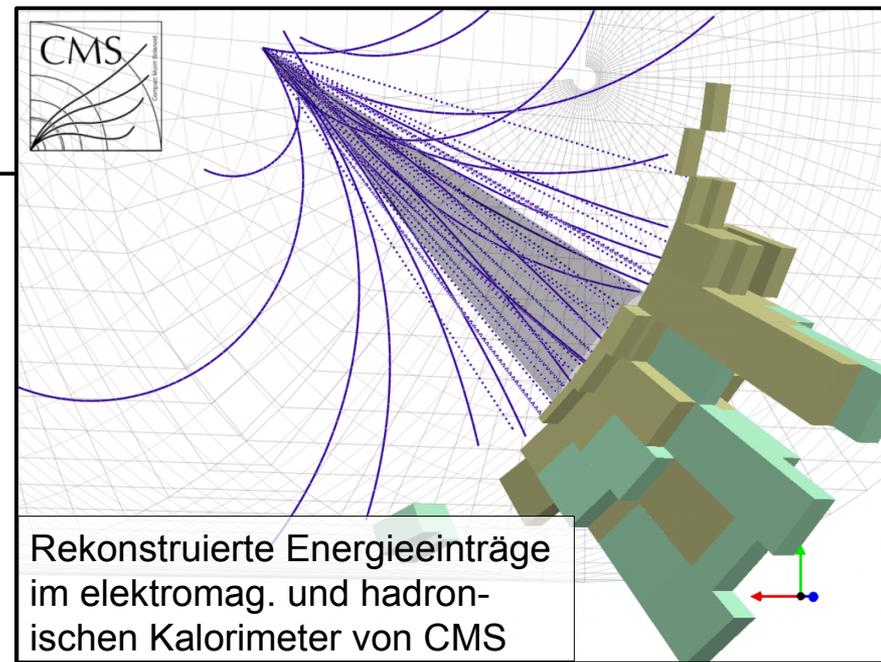


# Kalorimeter

- Schließt sich i.a. an Spurdetektor an
- **Energiemessung** aller erzeugten (und nachweisbaren) Teilchen:
  - Energieverlust durch Ionisation
  - Sammlung von Szintillationslicht
  - Elektromagnetische und hadronische Schauer

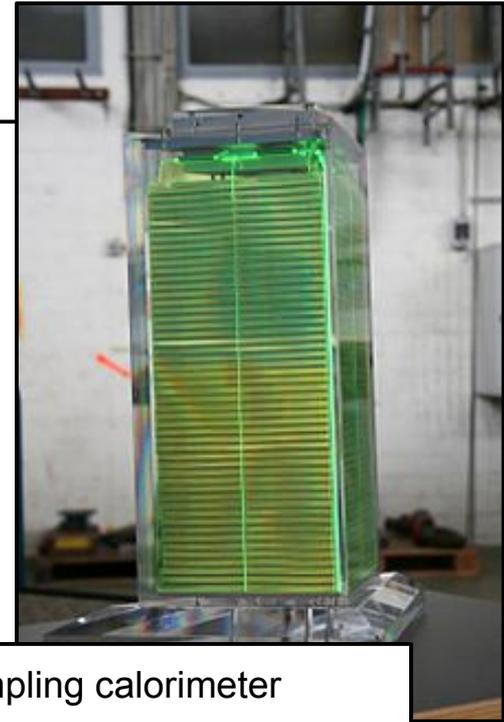
## Wichtigste Eigenschaften:

- Hohe Energieauflösung
- Dick genug, um das Teilchen vollständig im aktiven Material zu stoppen
- Linearität ( $2 \cdot 10 \text{ GeV} = 20 \text{ GeV}$ )
- Kompensation ( $\rightarrow$  Energiemessung gleich für Hadronen und Elektronen)

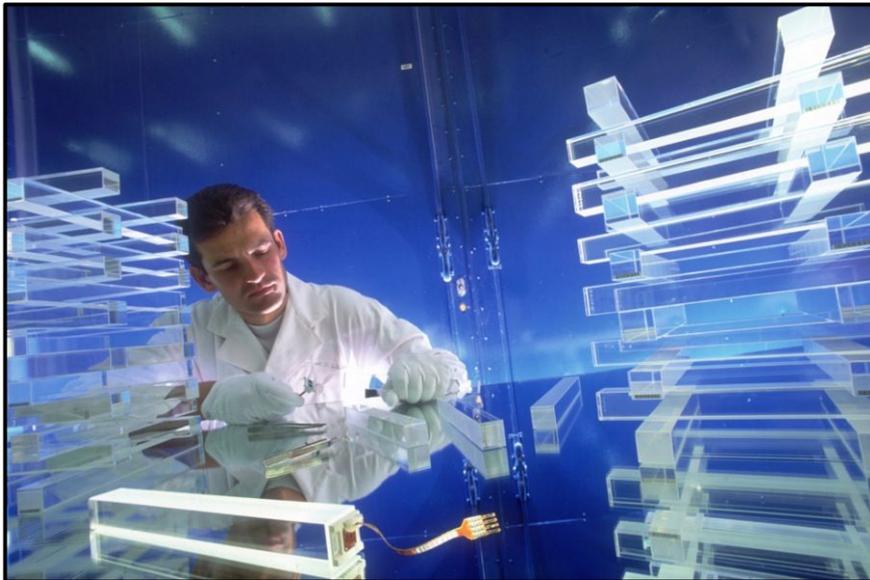


# Kalorimetertypen

- Bessere Energieauflösung:  
**homogene Kalorimeter** (z.B. aus Einkristallen möglichst schwerer Szintillatoren, hohe Kernladungszahl, wie z.B. bei Bleiglas, Haushaltsbeispiel NaCl)
- Bessere stopping power:  
**sampling calorimeter** (mit dichten Absorberplatten hinterlegt)



PbWO<sub>4</sub> Einkristalle für CMS ECAL



ATLAS Pb-LAr sampling calorimeter  
( $\approx 100 e's$  per cm)



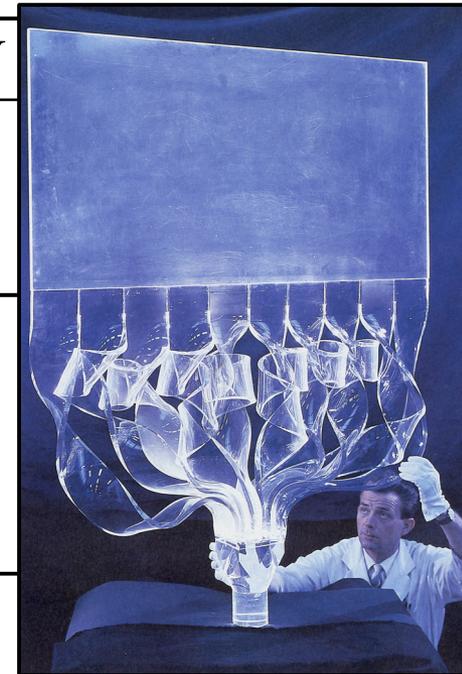
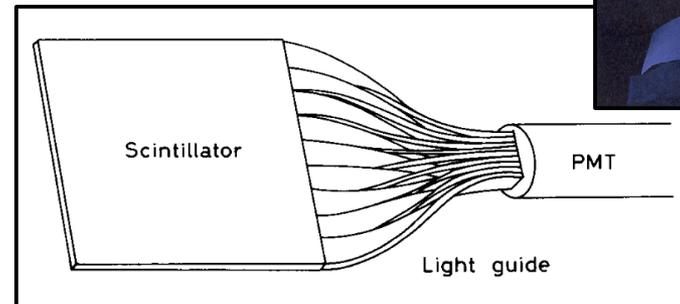
Energiemessung durch Ionisation

# Kalorimeterauslese im Fall von Szintillatoren

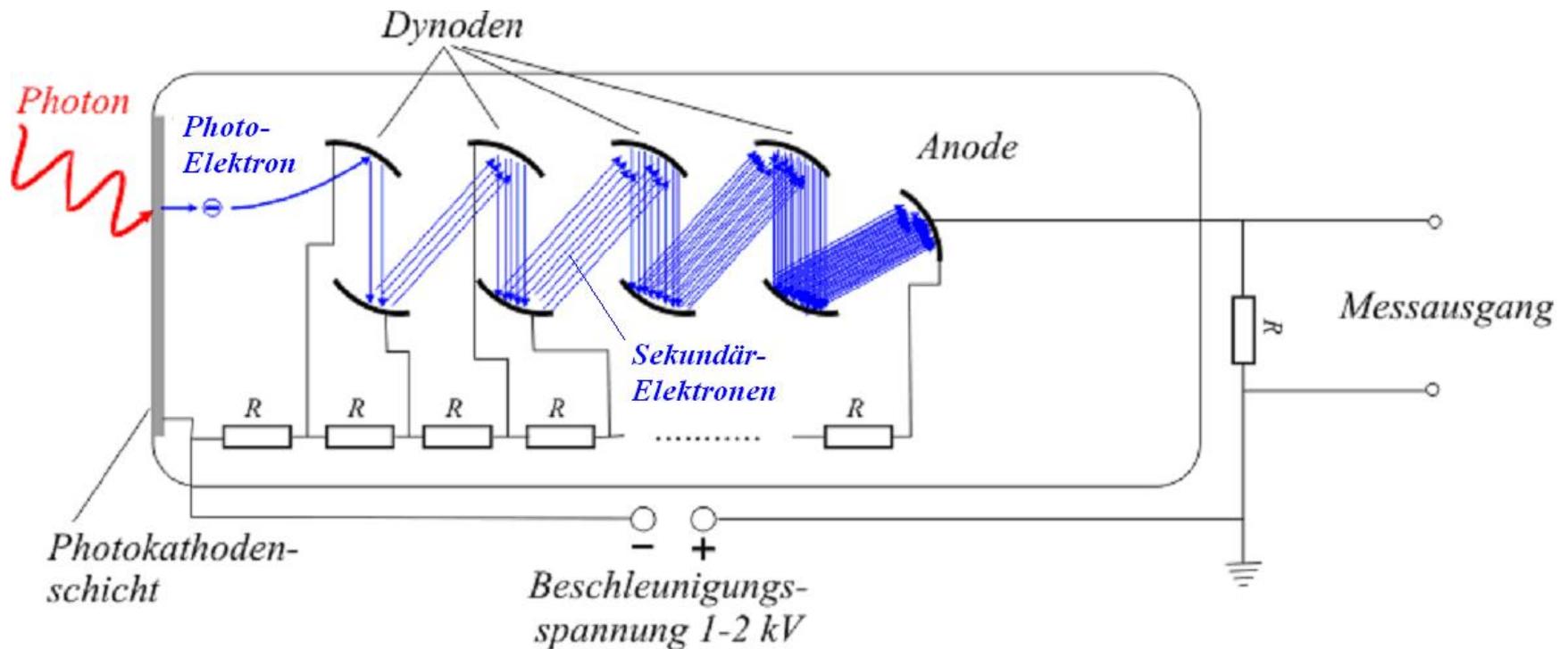
- Nutzte Anregungszustände die durch Atomgitter propagieren können und nach (möglichst kurzer) Abklingzeit Licht emittieren (→ Farbzentren)
- Typische anorganische Szintillatoren:

	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\lambda_{max}$ [nm]	decay time [ $\mu$ s]	$N_\gamma$ /MeV
NaI	3.7	303	0.06	$8 \cdot 10^4$
CsI	4.5	565	1	$1.1 \cdot 10^4$
PbWO <sub>4</sub>	8.3	420	0.006	$2 \cdot 10^2$

- Weiterleitung des emittierten Lichtes durch Lichtleiter an Photomultiplier (PM)
- PM: 20% Quanteneffizienz, Signalverstärkung  $\mathcal{O}(10^8)$



# Funktion eines Photomultipliers

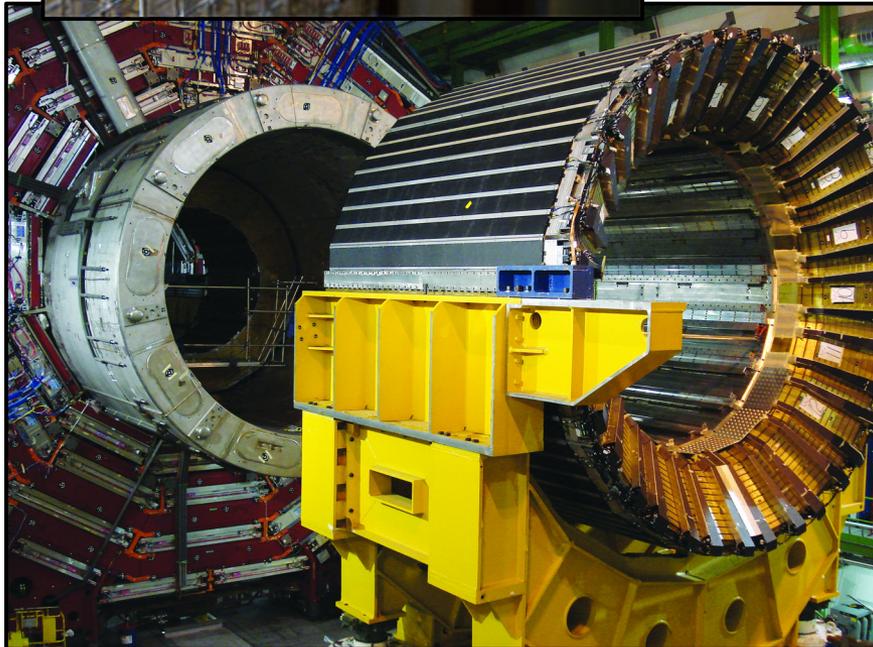
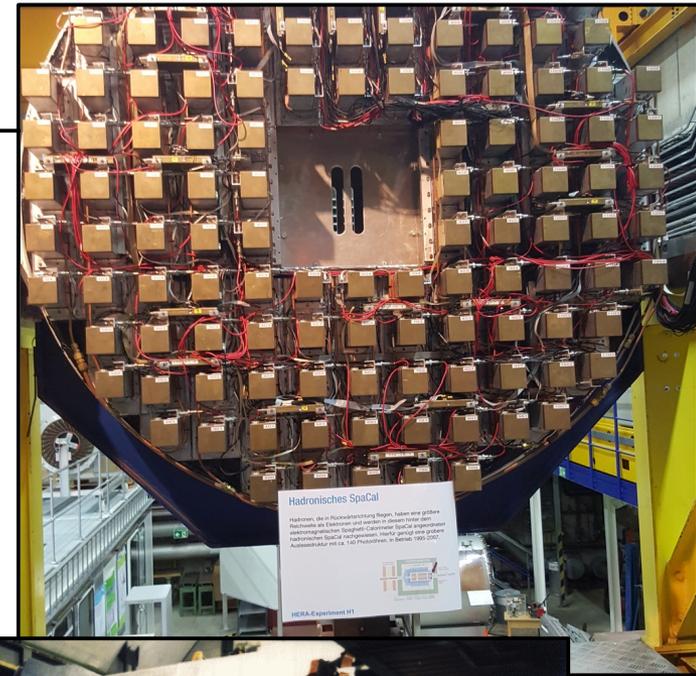


- PM: 20% Quanteneffizienz,  
Signalverstärkung  $\mathcal{O}(10^8)$

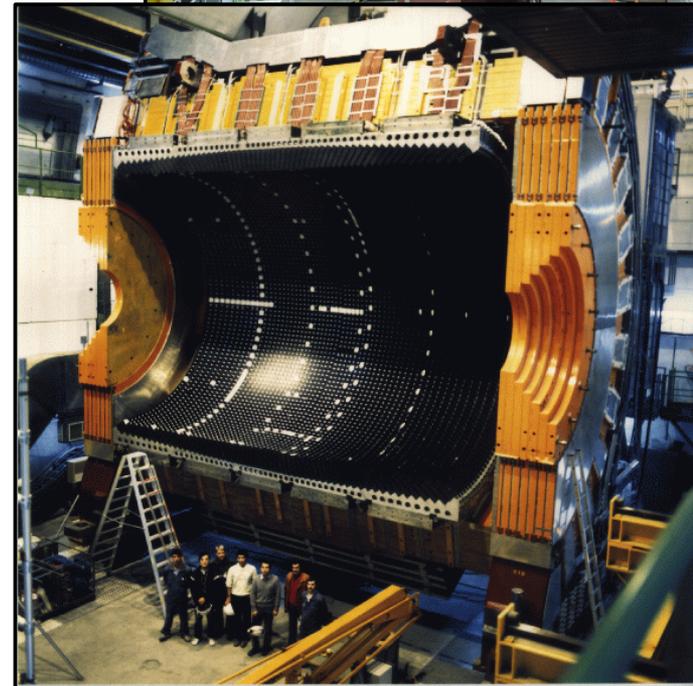
# Beispiele von Kalorimetern



Bleiwolframat Einkristalle des CMS ECAL



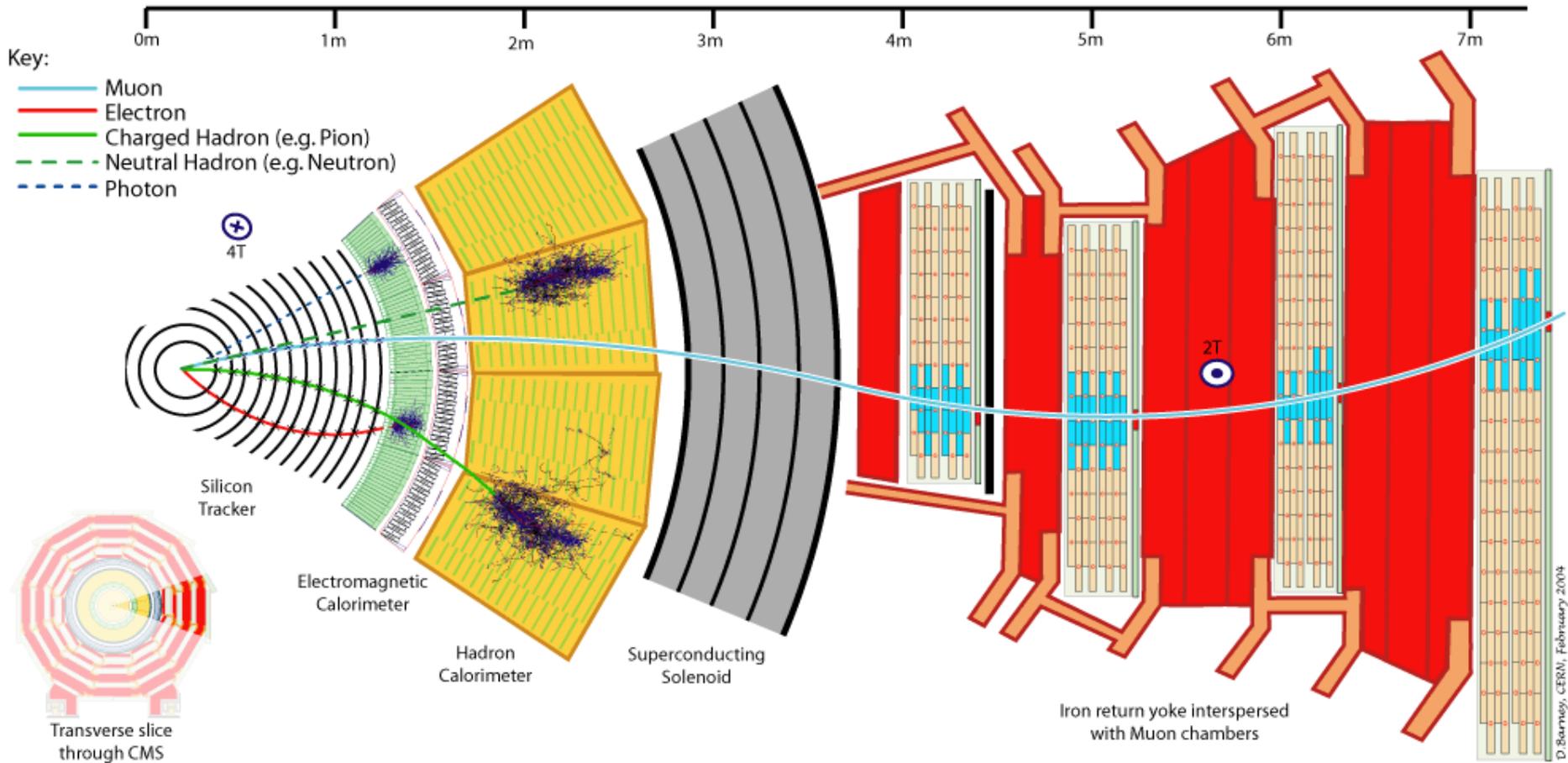
CMS HCAL brass-scintillator sampling calorimeter



ECAL von OPAL aus Pb-Glas Einkristallen

# Teilchennachweis bei CMS

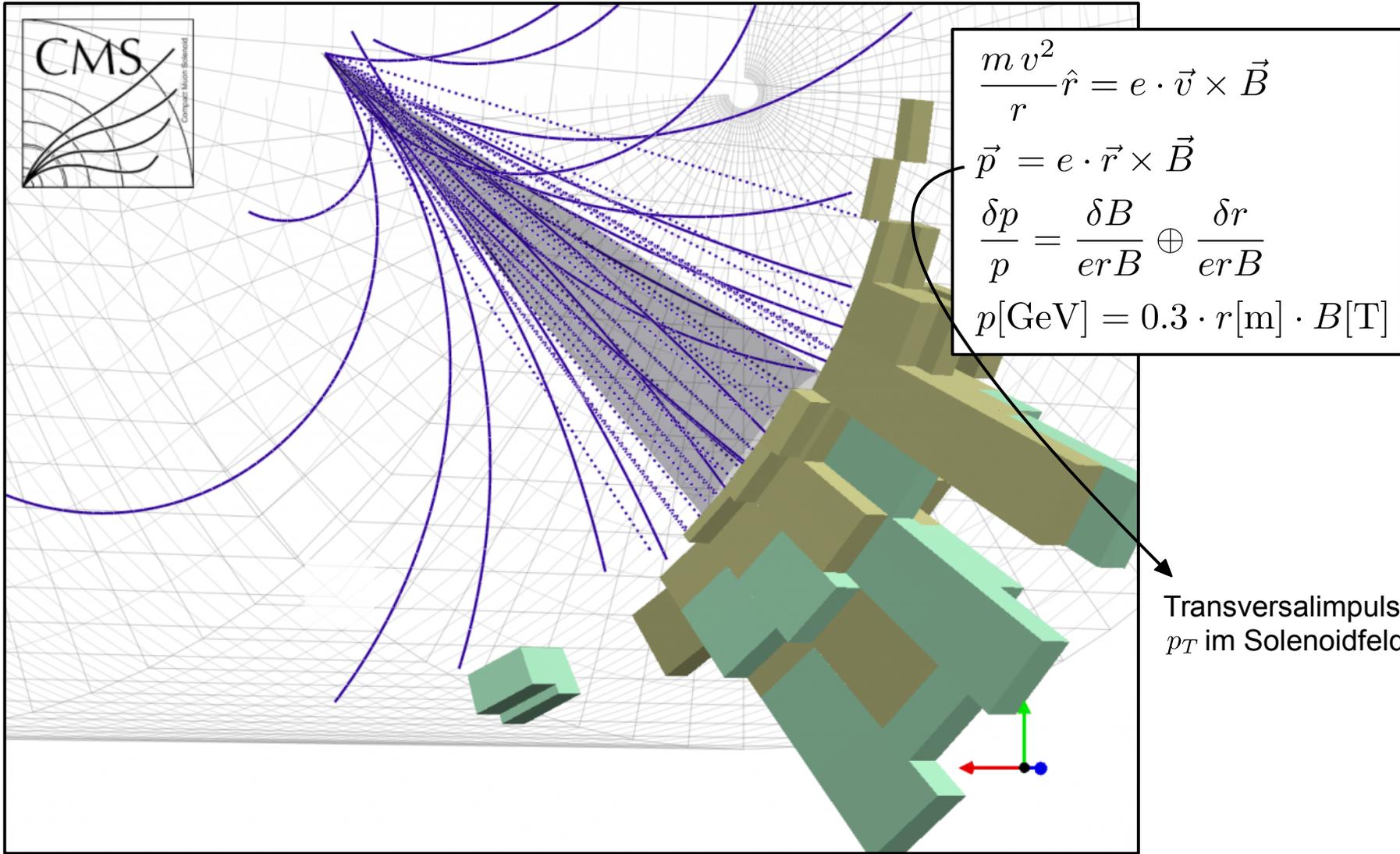
- Putting things together...



- Schlüsselanforderungen:** optimale Impuls- und Energiebestimmung, möglichst alle erzeugten Teilchen in aktivem Detektormaterial stoppen

# Erinnerung: Impulsbestimmung aus rekonstruierter Spur

- Spurdetektoren in Magnetfeldern erlauben Impulsbestimmung: üblicherweise Solenoid-, manchmal auch Toroidfelder

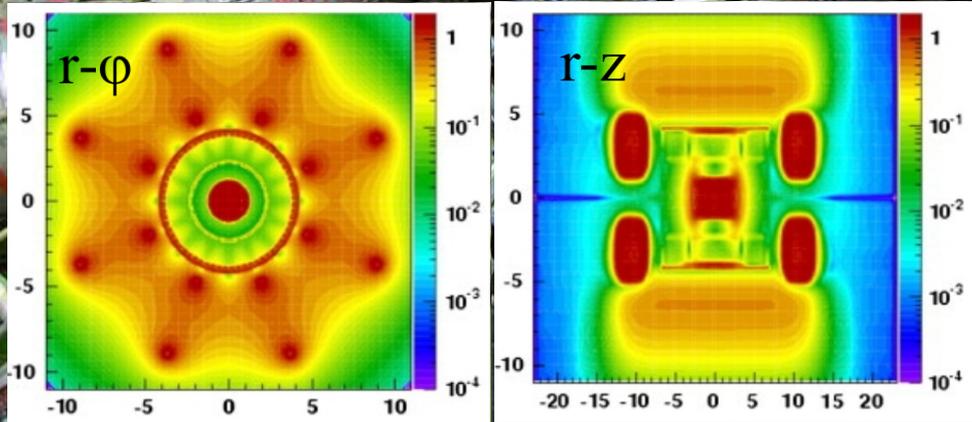


# **Kapitel 2.5: Detektorsysteme in der Teilchenphysik**

# The Large Scale Solution (ATLAS)

- Magnet field (solenoid): 2.6 T (inside calorimeter)
- Magnet field (toroid):  $\sim 4$  T (outside calorimeter)
- Tracker: Si/multi-wire chambers
- ECAL/HCAL: LAr (varying granularity)

Magnet Field:



- Length : 45 m
- Diameter : 22 m
- Weight : 7'000 t

# The Compact Solution (CMS)

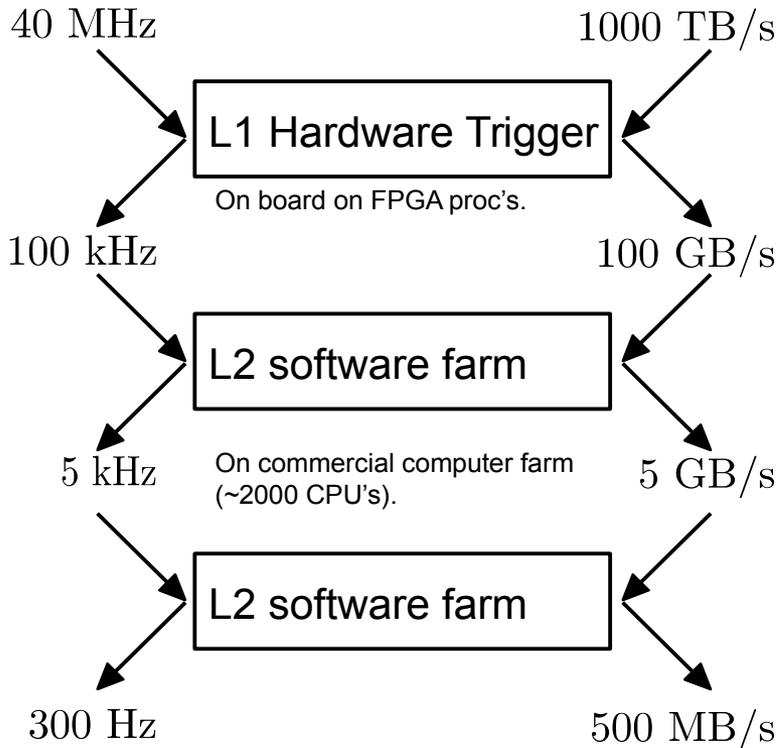
- Magnet field: 3.8 T (outside calorimeter)
- Tracker: Si ( $\delta p/p = 0.5\%$  for a 10 GeV track)
- ECAL:  $\text{PbWO}_4$  ( $\delta E/E = 1\%$  for a 30 GeV  $e/\gamma$ ,  $X_0 = 28$ )
- HCAL: Sampling (brass scintillator,  $\delta E/E = 10\%$  for a 100 GeV  $\pi^{+/-}$ ,  $\lambda_i = 10$ )

- Length : 21 m
- Diameter : 16 m
- Weight : 12'500 t

# Deadtime free readout

- Achieve deadtime free readout by sophisticated data acquisition.

## Layered trigger system:



HLT paths with too high rate can be *prescaled* ( $prescale=2 \rightarrow$  only any second event recorded).

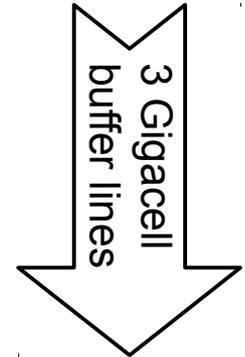
## Requirements (e.g. CMS):

- ~100 million detector cells.
  - 40 MHz event rate.
  - 10 – 12 bits/cell.
- $\rightarrow$  ~1000 TByte/s raw data (most of this data is not of interest).

- App. high  $p_T$  electron.
- App. high  $p_T$  muon
- Decisions within  $\mathcal{O}(ns)$ .
- Regional readout of tracker and CALO e.g. to check isolation.
- Decisions within  $\mathcal{O}(\mu s)$ .
- Nearly full event reconstruction.
- Decisions within  $\mathcal{O}(ms)$ .

Detector granularity available for trigger readout.

Each decision buys the system more time to take a closer look.

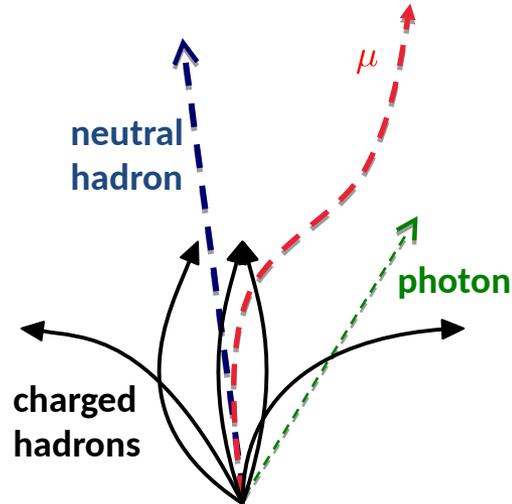


Keep all detector information till trigger decision is reached.

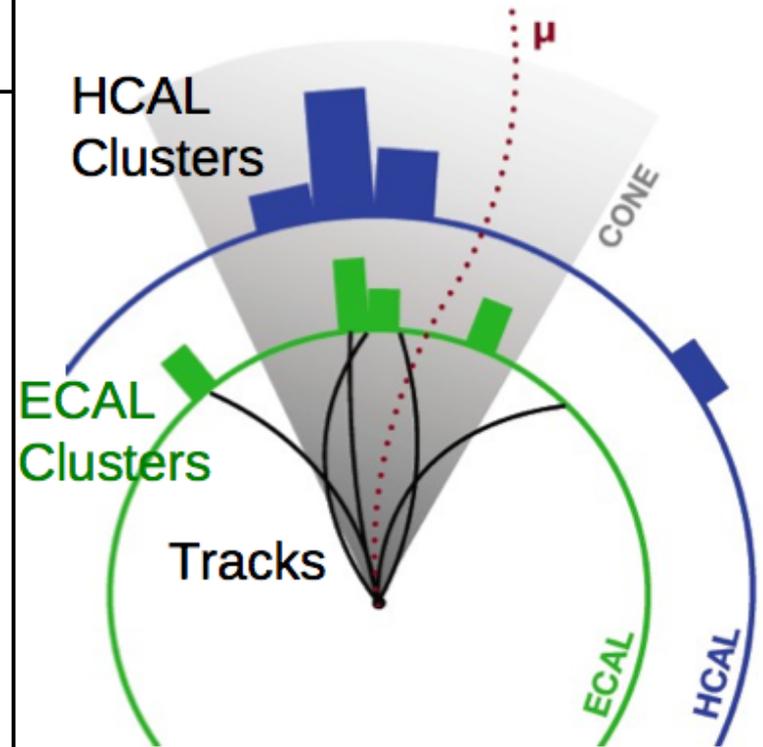
- $\mathcal{O}(10)$  L1-keep decisions.
- $\mathcal{O}(100)$  HLT trigger bits.

# High level object reconstruction

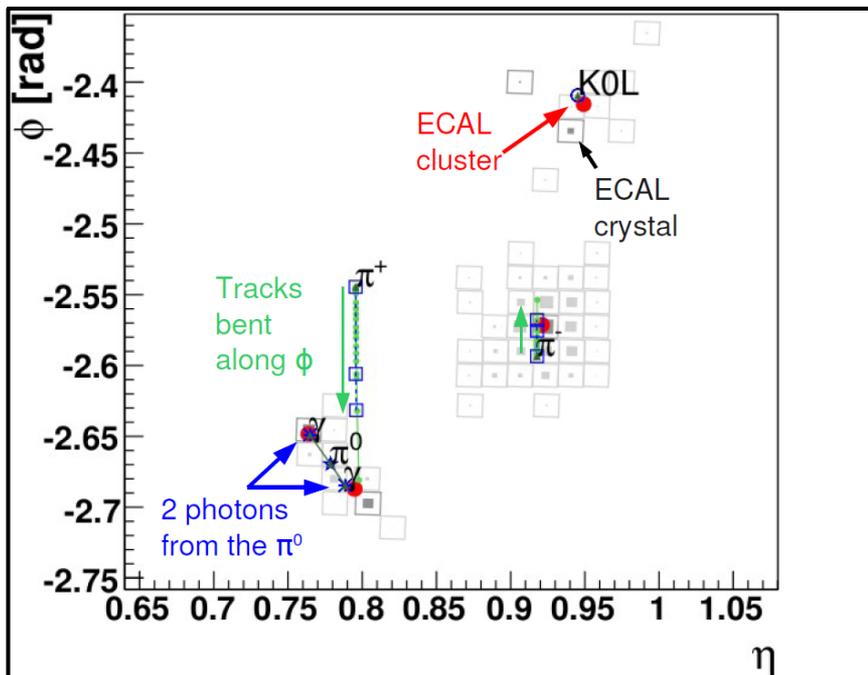
- Combine all energy deposits in detector to a unique event description ( $\rightarrow$  stable particle level).



## Particle Flow:

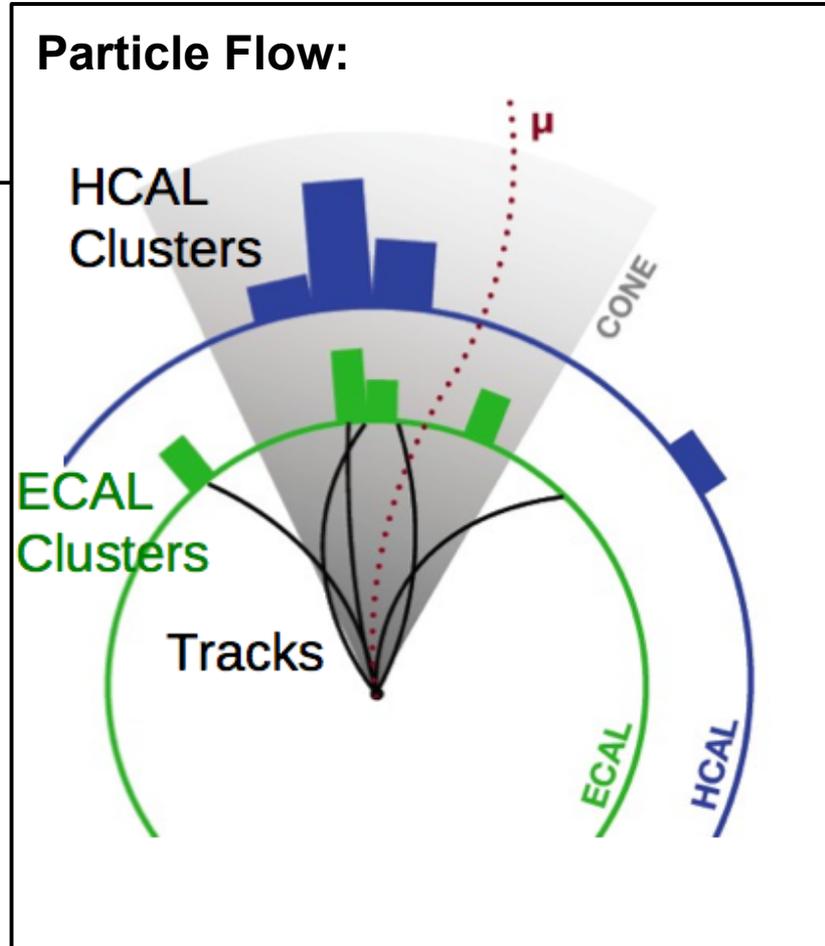
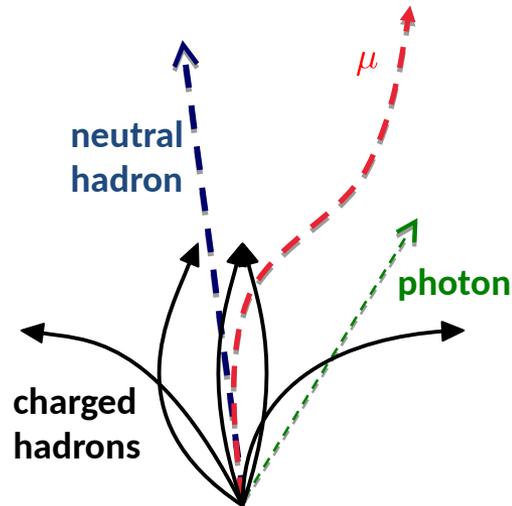


- Unambiguous list of stable particles: muons, electrons, photons, charged & neutral hadrons.

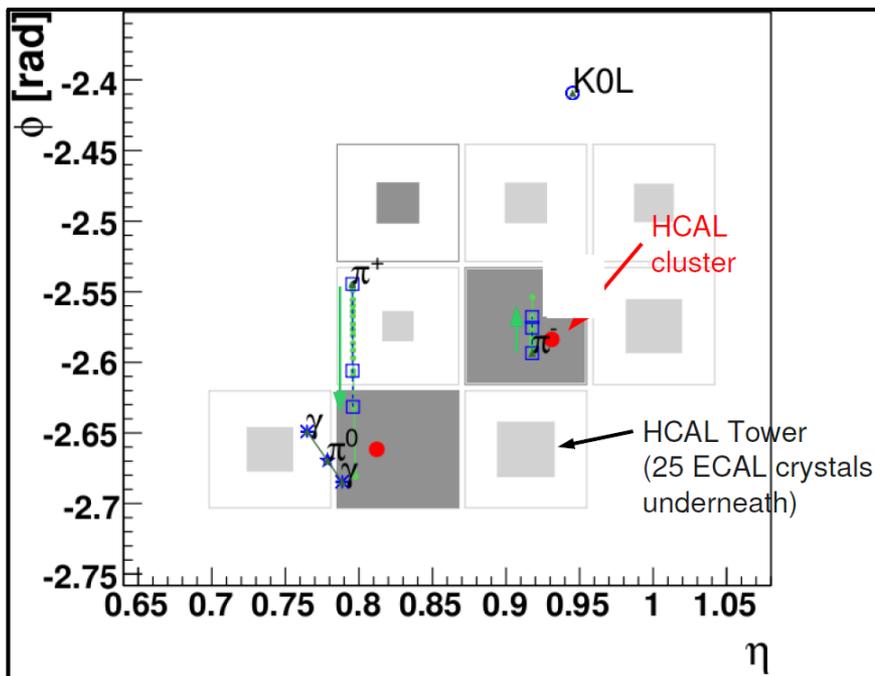


# High level object reconstruction

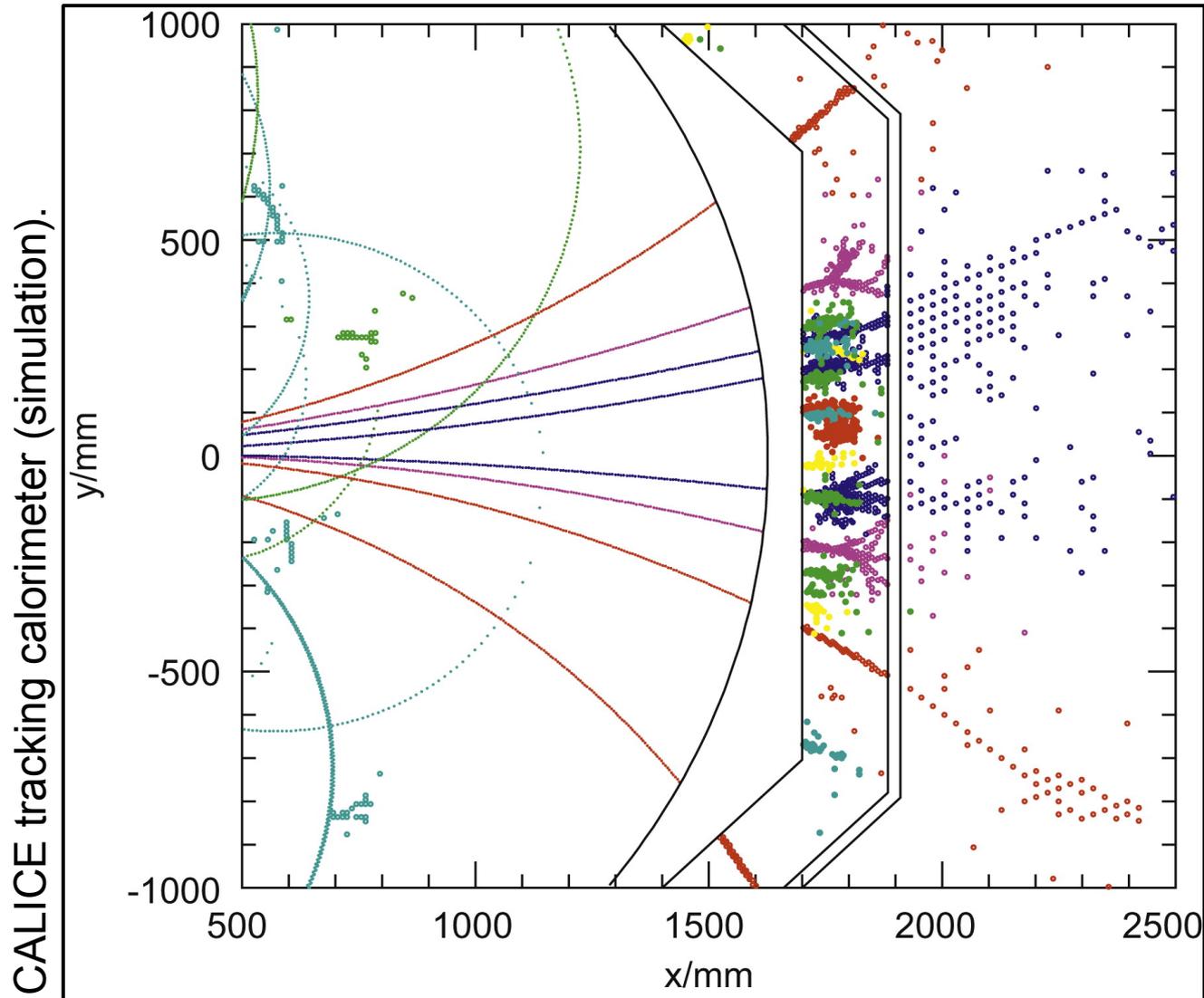
- Combine all energy deposits in detector to a unique event description ( $\rightarrow$  stable particle level).



- Unambiguous list of stable particles: muons, electrons, photons, charged & neutral hadrons.



# Particle flow of the future



## Prerequisites:

- Excellent separation of neutral & charged hadrons ( $\rightarrow \vec{B} \cdot R_{calo}$ ).
- Minimal material in front of CALO.
- High granularity CALO.



# Gliederung der Vorlesung

KW-17	<b>1 Einführung</b>
	1.1 Organisation der Vorlesung
	1.2 Übersicht und Literatur
	1.3 Geschichte
	1.4 Einheiten und Einheitssysteme
	1.5 Relativistische Kinematik
1.6 Streuexperimente	
KW-18	<b>2 Experimentelle Methoden</b>
	2.1 Nachweis geladener Teilchen in Materie
	2.2 Wechselwirkung von Elektron und Photon mit Materie
	2.3 Hadronische Wechselwirkungen und Materie
	2.4 Detektionstechniken
	2.5 Detektorsysteme in der Teilchenphysik
2.6 Beschleuniger in der Teilchenphysik	
KW-20	<b>3 Struktur der Materie</b>
	3.1 Kernradien und Formfaktoren
	3.2 Struktur der Nukleonen
3.3 Fundamentaler Aufbau der Materie und ihre Wechselwirkungen	