

Teilchendetektoren in der Hochenergiephysik - Teil 2 -

Eva Sicking (CERN)

Deutsches Lehrerprogramm am CERN

4. Oktober 2017 – CERN, Genf, Schweiz



Übersicht - Teil 2

- 5 Halbleiterdetektoren
- 6 Szintillatoren
- 7 Kalorimeter
- 8 Teilchenidentifikation
- 9 Detektorsysteme
- 10 Zusammenfassung

Quellen - Teil 2

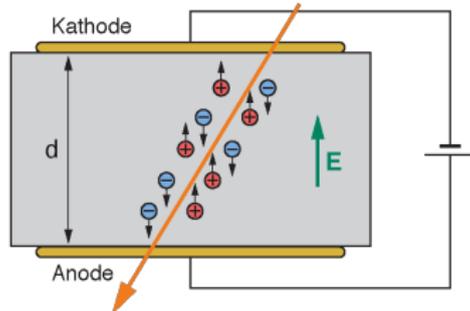
- Vorlesung von Manfred Krammer zu "Detektoren", 2009
- Vorlesung von Norber Wermes zu "Tracking and Tracking Detectors", 2016
- Vorlesung von Kristof Schmieden zu "Teilchendetektoren", Deutsches Lehrerprogramm CERN, 2016
- Vorlesung von Lucie Linssen und Fergus Wilson zu "Particle Detectors", 2015
- Vorlesung von Michael Hauschild zu "Teilchendetektoren", Deutsches Lehrerprogramm CERN, 2013
- Vortrag von Erika Garutti zu "Digital and analog SiPMs for HEP and medicine", 2015
- Cherekov: https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation
- CMS Silizim Tracker: <http://cds.cern.ch/record/1081122>
- ATLAS Event Display: <https://atlas.cern/>
- ALICE ITS dE/dx: <http://inspirehep.net/record/1249388>
- Szintillatoren: <http://www.satprnews.com/>, <http://www.tradekorea.com/>
- CALICE W-AHCAL: <http://inspirehep.net/record/1391507>
- CMS ECAL: <http://cms.web.cern.ch/news/crystal-calorimeter>
- CMS ECAL: <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=12030>
- CLICdp Status: <https://indico.cern.ch/event/577810/contributions/2451774/>
- CALICE Übersicht: <https://indico.cern.ch/event/563768/>
- LHCb RICH: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/30585>
- LHCb Cherekov: <https://cds.cern.ch/record/1495721/>
- ALICE HMPID: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900214005506>
- ALICE TOF: http://alicematters.web.cern.ch/?q=CL_PID2
- ALICE TRD: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900214005014>
- ATLAS: <http://atlasexperiment.org/photos/detector-site-underground.html>



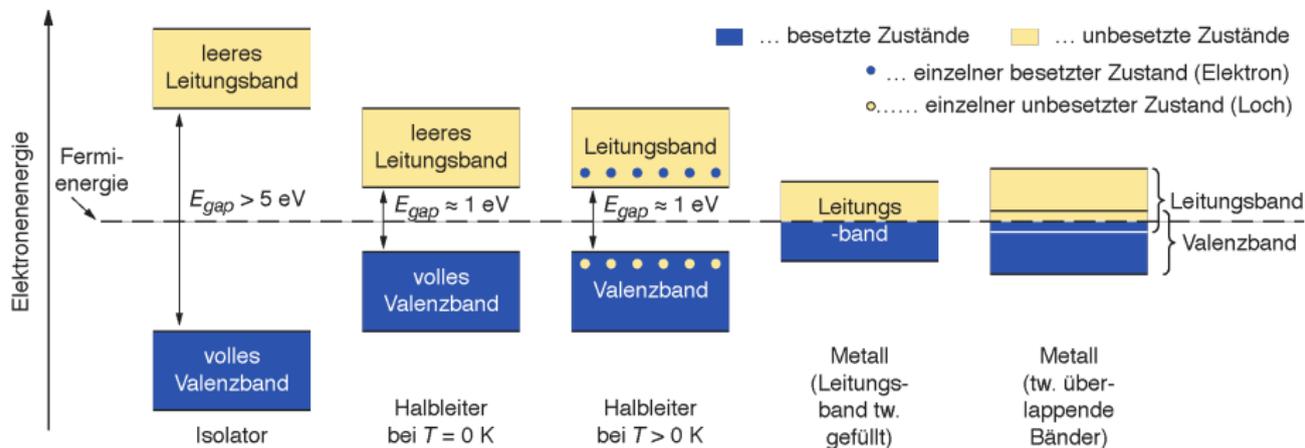
Halbleiterdetektoren

Detektionsprinzip eines Halbleiterdetektors

- Festkörperdetektoren haben viele höhere Dichte als Gas-Detektoren
- Hoher Energieverlust auf relativ kurzer Strecke
- Halbleiterdetektoren sind analog zu Gas-Ionisationskammern



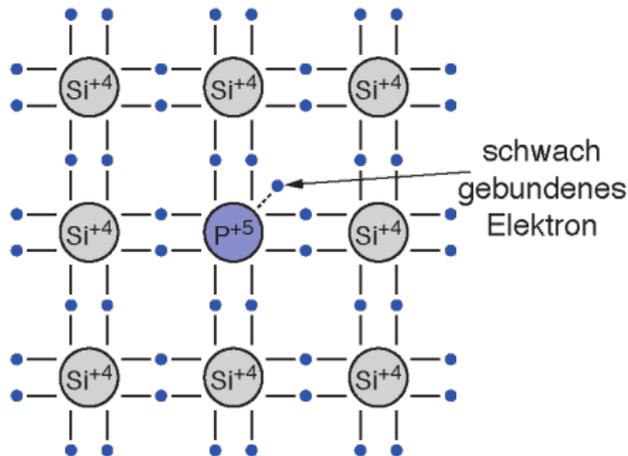
Bändermodell: Isolator - Halbleiter Metall



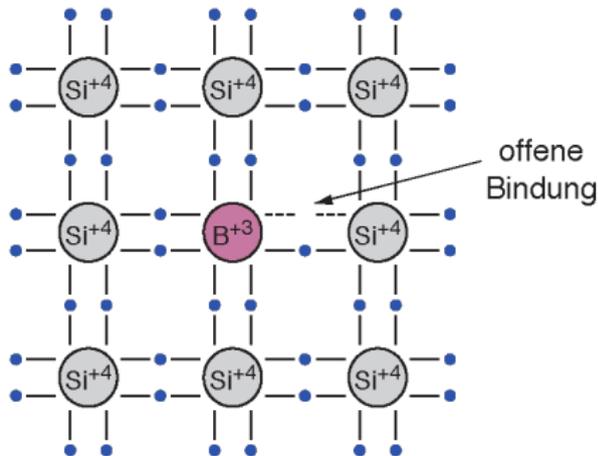
- Halbleiter: z.B. **Silizium**, Germanium, Diamant, GaAs, CdTe, ...

Dotiertes Silizium

Negativ dotiertes Silizium (n)

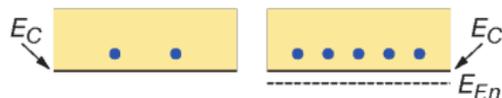
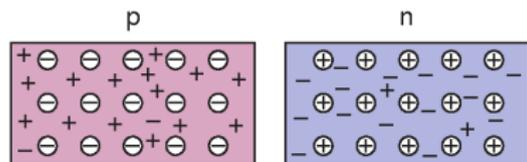


Positiv dotiertes Silizium (p)



- Silizium in 4. Gruppe des Periodensystems
- Silizium in Reinform hat Kristallform
- Bei niedriger Temperatur sind alle Elektronen gebunden → Nicht leitend
- Ersetze einige Siliziumatome im Gitter durch Atome aus den Nachbargruppen
- Scheinbar zu viele oder zu wenig Elektronen (= Löcher), aber elektrisch neutral

PN-Übergang

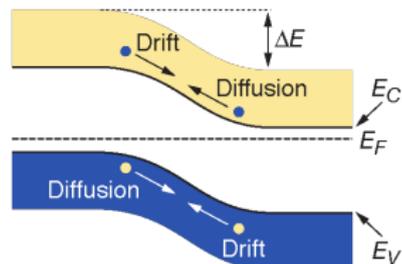
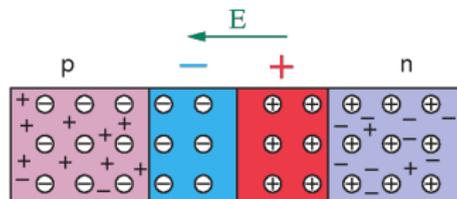


⊖ ... Akzeptorion

+ ... freies Loch

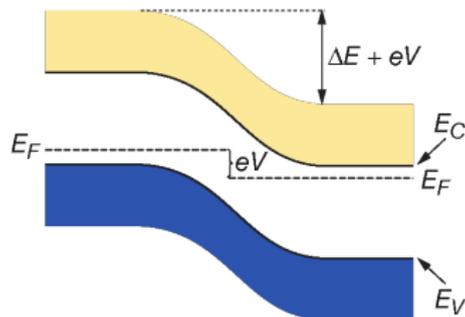
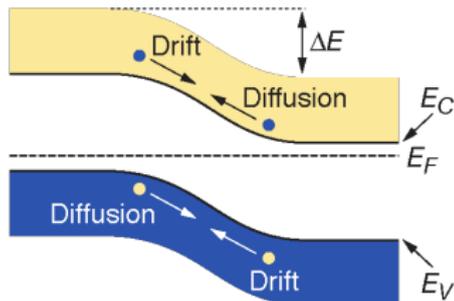
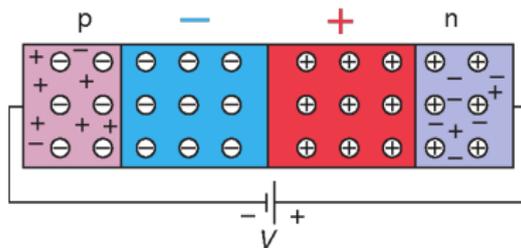
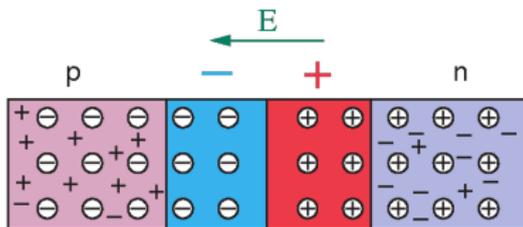
⊕ ... Donatorion

- ... Leitungselektron



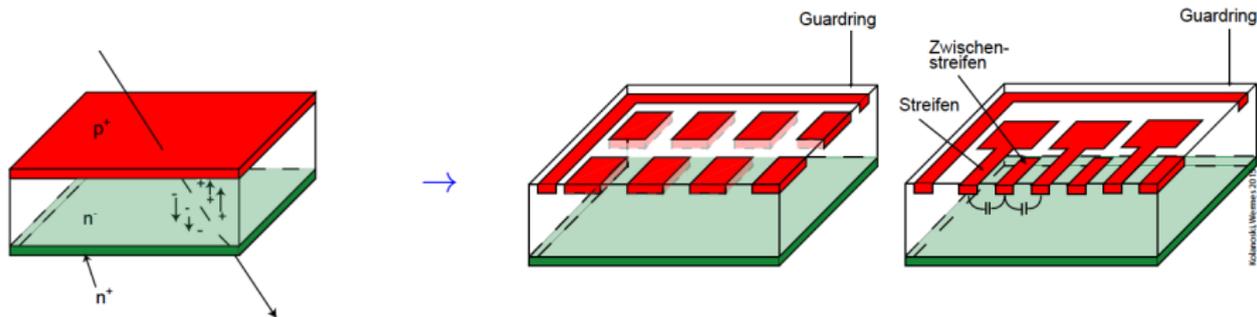
- Werden p- und n-dotiertes Silizium nebeneinander gebracht, ergibt sich eine Zone in der die Elektronen und Löcher rekombinieren
- Verarmungszone
- Ladungsungleichgewicht erzeugt elektrisches Feld in Verarmungszone

PN-Übergang: Externe Spannung



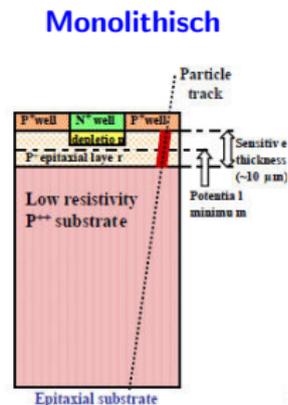
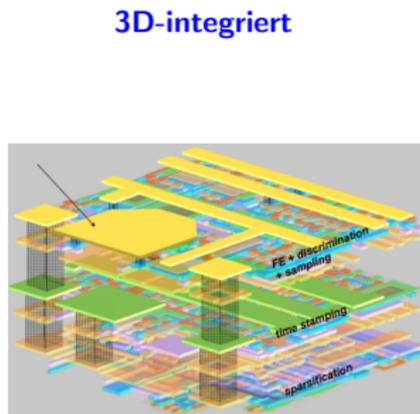
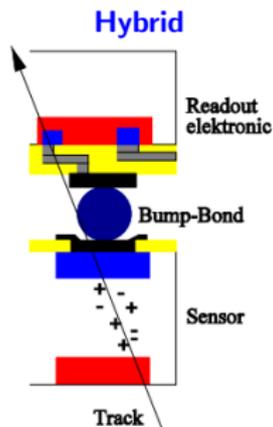
- Vergrößere Verarmungszone durch Anlegen externer Spannung in selbe Richtung

Segmentierung in Pixels/Strips



- Ein ionisierendes Teilchen regt beim Durchgang e^- (aus dem Valenzband ins Leitungsband) an und erzeugt so e^- -Loch-Paare
- e^- -Loch-Paare driften im elektrischen Feld zu den Elektroden und induzieren ein elektrisches Signal
- Segmentiert man die Elektrode, erreicht man hohe Ortsauflösung
- Kleine Strukturen von wenigen $10\ \mu\text{m}$ erreichbar; viel Erfahrung in Elektronikindustrie

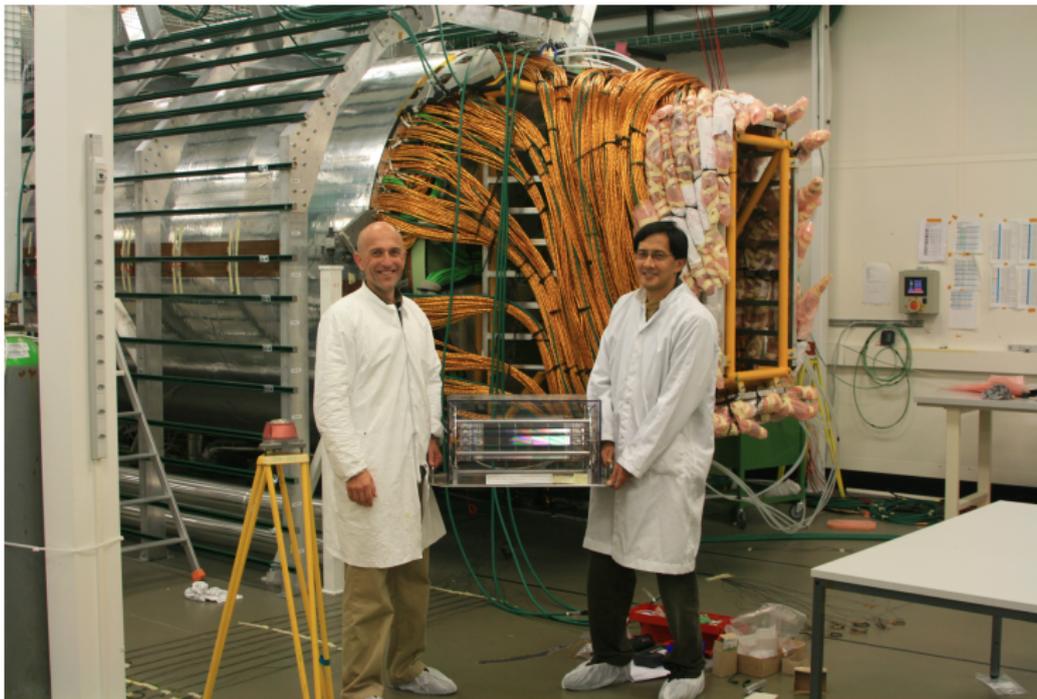
Auslese: Hybrid oder Monolithisch



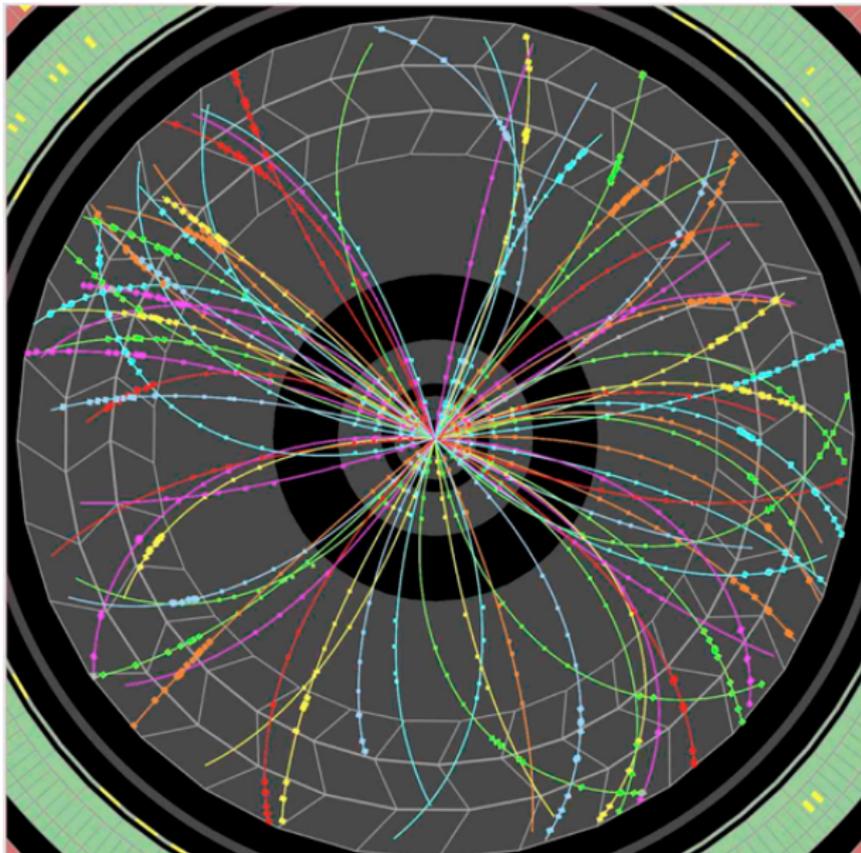
- Sehr aktiver Forschungsbereich
- Viele verschiedene Konzepte (Sensoren, Auslese)
- Pixelgrößen von wenigen $10\ \mu\text{m}$ → Gute Ortsauflösung
- Dicken von wenigen $100\ \mu\text{m}$ → Wenig Streuung

Beispiele: CMS versus OPAL

- Zwei Generationen von Silizium-Spurdetektoren
 - LEP: OPAL-Experiment $\rightarrow 1 \text{ m}^2$, vorne
 - LHC: CMS-Experiment $\rightarrow 200 \text{ m}^2$, im Hintergrund



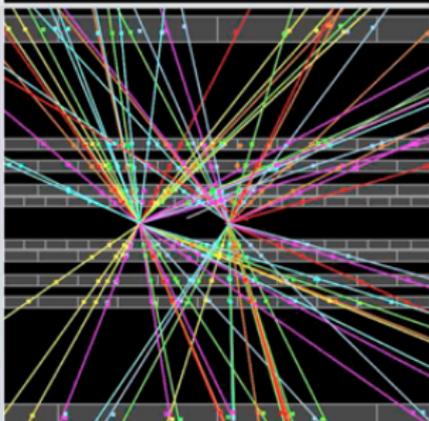
Beispiel: Spurrekonstruktion



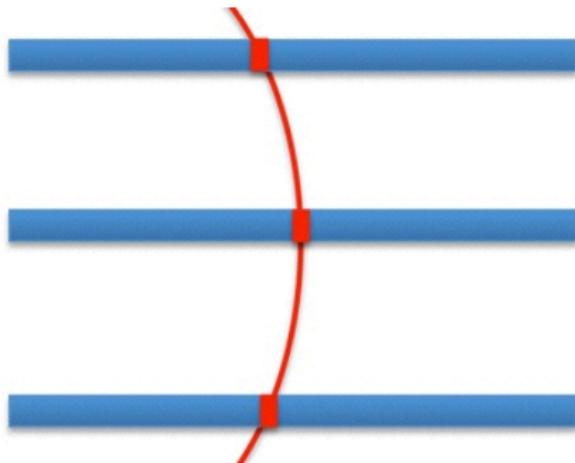
ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 265545, Event Number: 5720351

Date: 2015-05-21 10:39:54 CEST

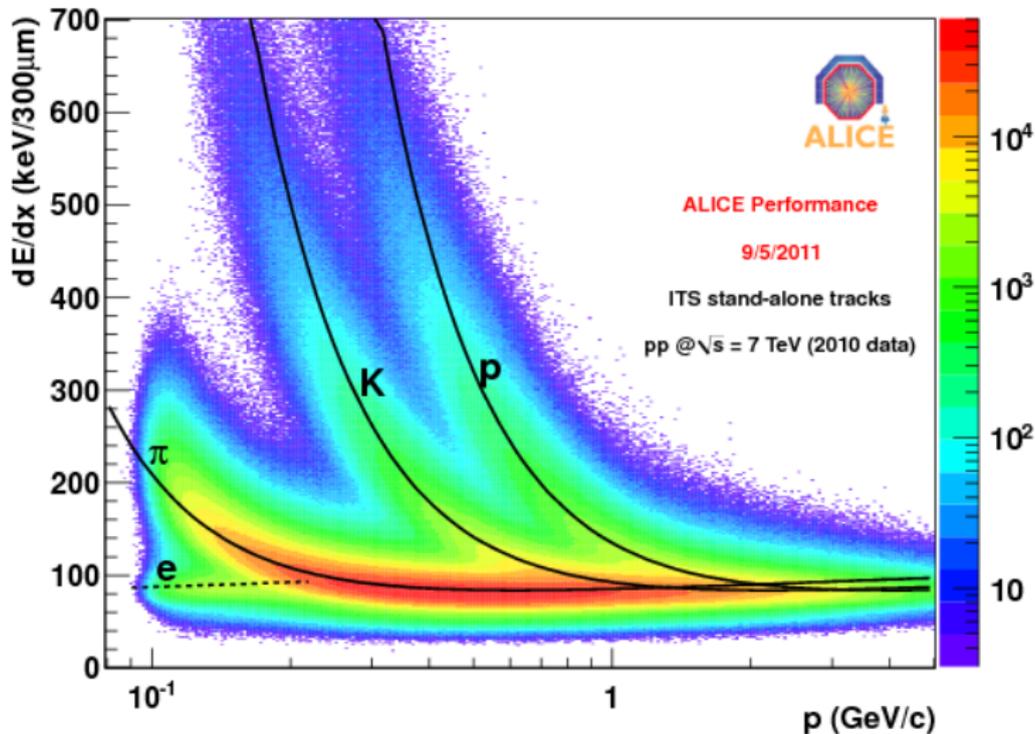


Beispiel: Impulsmessung



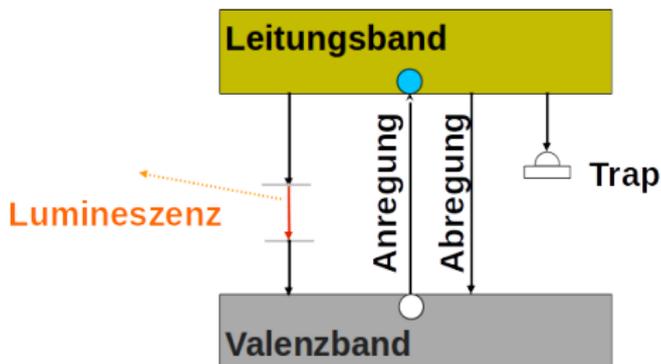
- Impuls $p = mv = \gamma m_0 v$
- Lorentzkraft: $F_L = Q \cdot [v \times B]$
- Zentripetalkraft: $F_Z = m \cdot v^2 / r$
- $F_L = F_Z \rightarrow p/r = Q \cdot B \rightarrow p = Q \cdot B \cdot r$
- Gute Impulsauflösung bei großen B und Detektorradien

Beispiel: Energieverlust



Szintillatoren

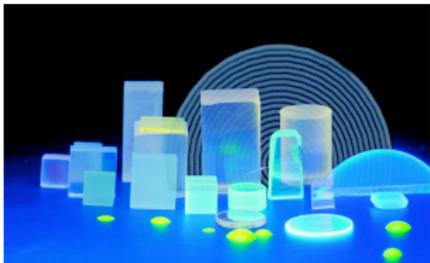
Szintillation: Einführung



- Szintillation: Emission von Photonen nach Anregung von Atomen oder Molekülen des szintillierenden Materials durch energiereiche Strahlung (400-1000 eV)
- Sehr komplexer Vorgang
 - Viele Zwischenniveaus
 - Strahlende und nicht strahlende Übergänge
 - Anregung von anderen Elektronen durch emittiertes Photon

Szintillation: Materialien

- Umwandlung von einem Bruchteil der Anregungsenergie in Licht
- Auslese z.B. mit Photomultipliertubes oder Silizium-Photomultipliern



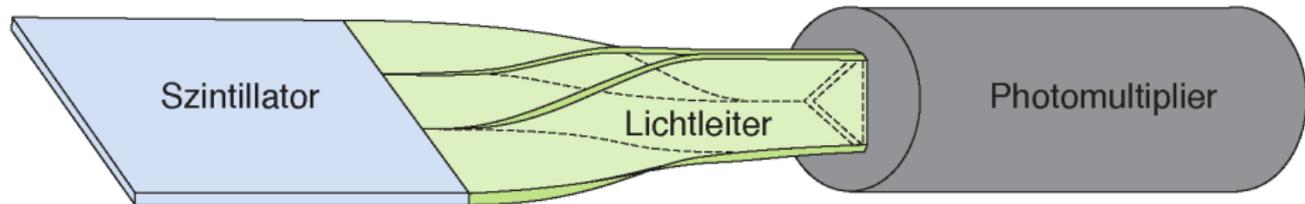
- Anorganische Kristalle

- NaI, PbWO_4 , BaF, ...
- Relativ langsam: 10-1000 ns Abklingzeit
- Hohe Dichte
- Wellenlänge: 300-500 nm
- z.T. hygroskopisch

- Plastiksintillator (organisch):

- Reichhaltige Auswahl
- Schnell: 1-10 ns Abklingzeit
- Geringe Dichte
- Wellenlänge: 300-400 nm
- Einfach zu bearbeiten, beliebige Formen

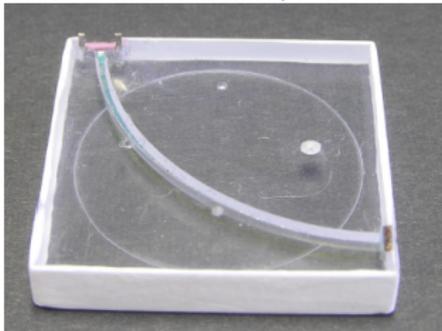
Szintillator mit PMT-Auslese



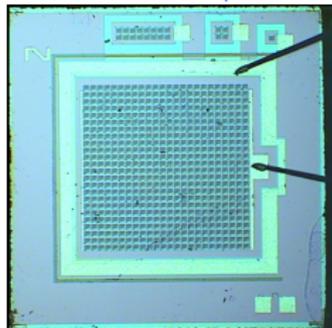


Szintillator mit SiPM-Auslese

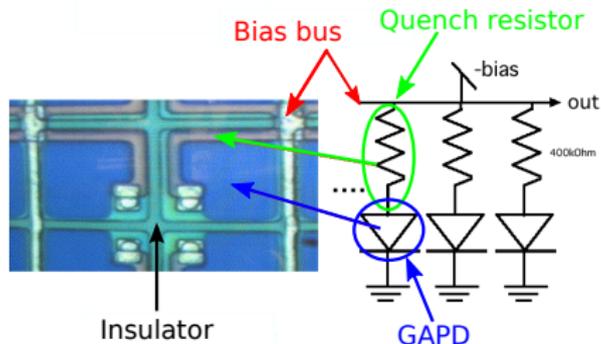
3 × 3 cm² Szint. + SiPM



1 × 1 mm² SiPM, 576 Pix.



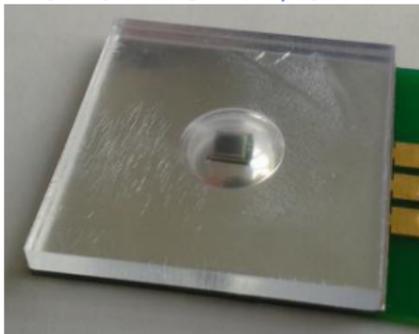
Komponenten im SiPM-Pixel und ihre Funktion



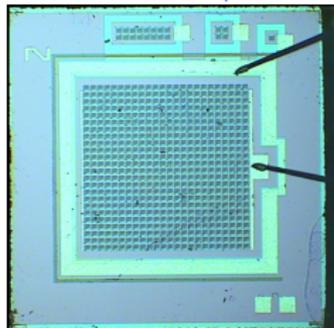
- “Silicon PhotoMultipliers” = SiPM
- Matrix von Photodioden im Geiger-Modus
- Ein Photon → Fotoelektrischen Effekt → Lawine von Elektronen ($10^5 - 10^7 e^-$)
- Lawine wird mit Quench-Widerständen abgebrochen
- Nachweis von einzelnen Photonen

Szintillator mit SiPM-Auslese

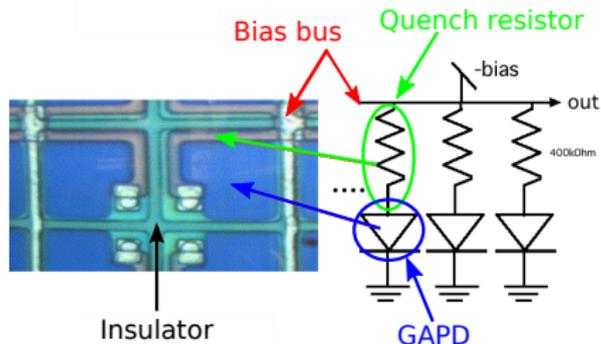
3 × 3 cm² Szint. + SiPM



1 × 1 mm² SiPM, 576 Pix.



Komponenten im SiPM-Pixel und ihre Funktion



- “Silicon PhotoMultipliers” = SiPM
- Matrix von Photodioden im Geiger-Modus
- Ein Photon → Fotoelektrischen Effekt → Lawine von Elektronen ($10^5 - 10^7 e^-$)
- Lawine wird mit Quench-Widerständen abgebrochen
- Nachweis von einzelnen Photonen

Kalorimeter

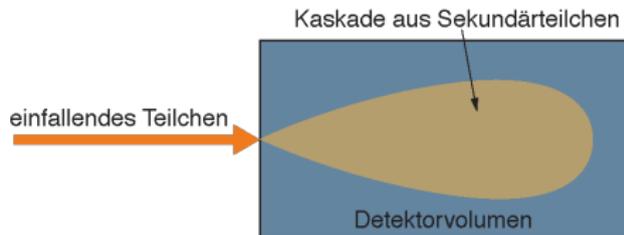
Kalorimeter: Konzept

- Ein Kalorimeter ist ein dichter Detektor, der ein zu messendes Teilchen vollständig absorbiert
- Das Teilchen erzeugt einen Schauer von Sekundärteilchen, die ihre Energie im Detektor deponieren
 - Wärme
 - Ionisation
 - Atomare-Anregung
 - Bremsstrahlung
 - Cherenkov-Licht
 - Szintillations-Licht
- Die Form des Schauers hängt vom Teilchen und seiner Energie ab
- Ideales Kalorimeter: $\text{Signal} \propto \text{deponierte Energie} \propto \text{Teilchenenergie}$

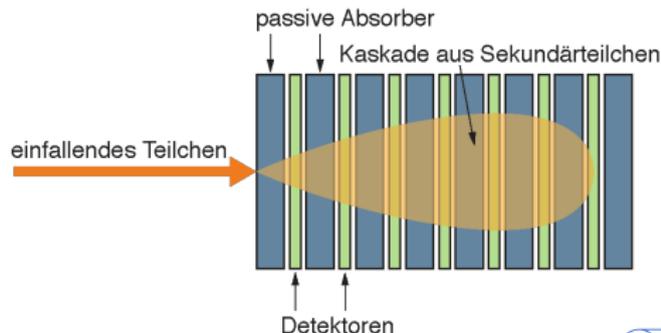
Kalorimeter: Konzept

- Ein Kalorimeter ist ein dichter Detektor, der ein zu messendes Teilchen vollständig absorbiert
- Das Teilchen erzeugt einen Schauer von Sekundärteilchen, die ihre Energie im Detektor deponieren
 - Wärme
 - Ionisation
 - Atomare-Anregung
 - Bremsstrahlung
 - Cherenkov-Licht
 - Szintillations-Licht
- Die Form des Schauers hängt vom Teilchen und seiner Energie ab
- Ideales Kalorimeter: $\text{Signal} \propto \text{deponierte Energie} \propto \text{Teilchenenergie}$

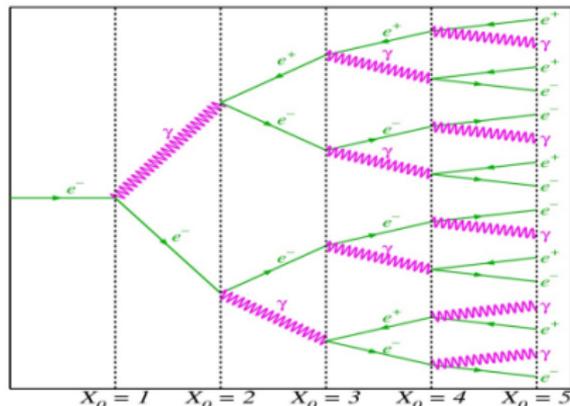
Homogenes Kalorimeter



Sampling-Kalorimeter



Kalorimeter: Elektromagnetischer Schauer



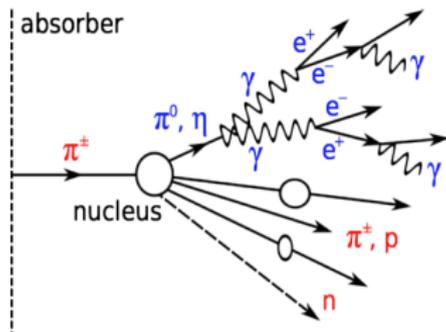
| | | | | | | |
|---------------------|-------|---------|---------|---------|----------|-----------------------|
| x | 0 | X_0 | $2X_0$ | $3X_0$ | $4X_0$ | |
| N | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 0 |
| $\langle E \rangle$ | E_0 | $E_0/2$ | $E_0/4$ | $E_0/8$ | $E_0/16$ | $\langle E_c \rangle$ |

- Strahlungslänge X_0 : Strecke, in der die Projektilenergie durch Strahlungsverluste um $1/e$ (=63%) kleiner wird

- Ein einfallendes e^\pm emittiert via Bremsstrahlung ein **Photon**
- Das erzeugte **Photon** erzeugt ein $e^+ e^-$ -Paar
- Rasch anwachsende Zahl von e^+ , e^- und γ bis E_c erreicht ist
- Ähnlicher Schauer für einfallendes Photon
- Kompakter Schauer

| Material | Strahlungslänge X_0 (cm) |
|----------|----------------------------|
| Luft | 30000 |
| Stahl | 1.76 |
| Blei | 0.56 |
| Uran | 0.33 |

Kalorimeter: Hadronischer Schauer



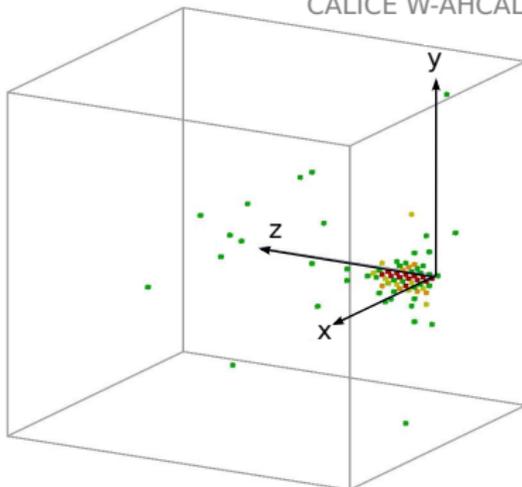
- Geladenes Hadron: Komplementäre Information zum Spurdetektor
 - **Neutrales Hadron: Einzige Möglichkeit der Messung**
 - Starke Interaktion hat kleineren Wirkungsquerschnitt
- Hadronenschauer haben höhere Eindringtiefe als elektromagnetische Schauer

- **Hadron** wechselwirkt über die starke Kraft mit Detektormaterial
 - Erzeugung von Mesonen und Baryonen, Spallation, Kernanregung, Kernspaltung
 - Produzierten Teilchen erzeugen weitere Schauerteilchen, verlieren Energie durch Ionisation und Anregung
 - Mesonen (zerfallen in Photonen) → Ausbildung von **elektromagnetischen Teil-Schauer** im **hadronischen Schauer**

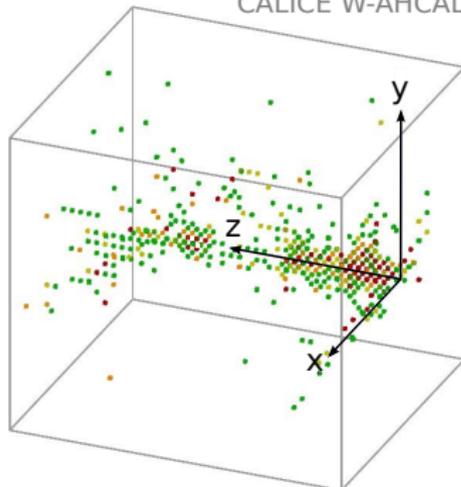
| Material | Absorptionslänge λ_a (cm) |
|----------|-----------------------------------|
| Luft | 75000 |
| Stahl | 16.8 |
| Blei | 17.6 |
| Uran | 11.0 |

Vergleich: Schauer-Tiefe

Schauer eines Positrons (15 GeV)
CALICE W-AHCAL

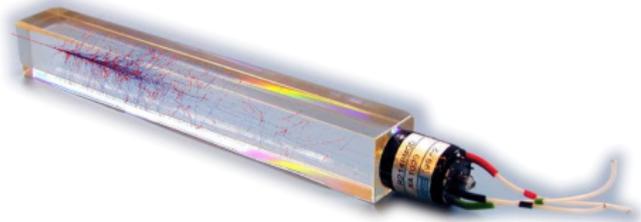
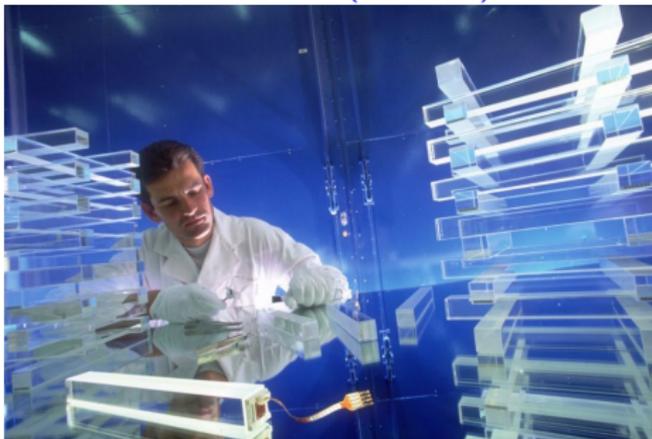


Schauer eines Pions (80 GeV)
CALICE W-AHCAL



Homogene Kalorimeter

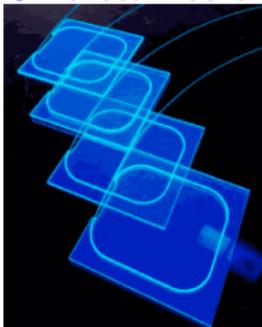
PbWO₄-Kristalle des CMS elektromagnetischen Kalorimeters (95% Blei)



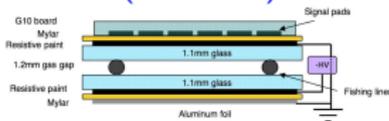
- Das Detektormaterial ist sowohl das passive Material, das Teilchen absorbiert, also auch das aktive Material, das Signal produziert
 - Kristalle
 - Bleiglas, PbWO₄
 - Flüssige Edelgase
- Solche Materialien werden fast ausschliesslich für elektromagnetische Kalorimeter verwendet
- Vorteil: Sehr gute Energieauflösung (der gesamte Schauer wird gemessen)
- Nachteil: Kosten, begrenzte Informationen zur Ausdehnung und Substruktur des Schauers

Aktiver Teil eines Sampling-Kalorimeters

CMS
Szintillator-Kachel

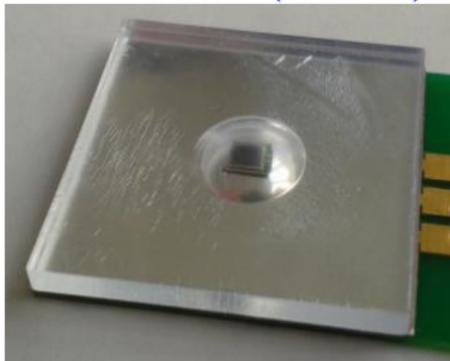


Resistive place chambers
($1 \times 1 \text{ cm}^2$)

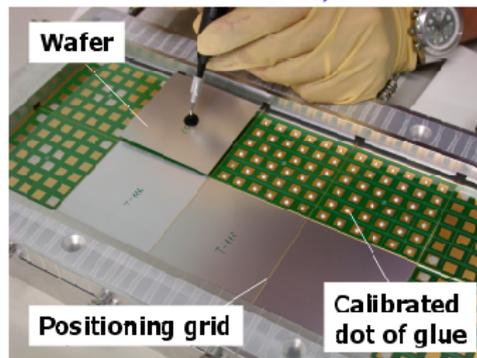


- Szintillatoren
 - Silizium-Sensoren
 - Flüssiges Edelgas
 - Gas-Detektoren
- Vorteil: geringere Kosten, mehr Information über Showerform
 - Nachteil: Nur ein Teil des Schauers wird gesampelt, schlechtere Energieauflösung

CALICE Szintillator-Kachel ($3 \times 3 \text{ cm}^2$) + SiPMs

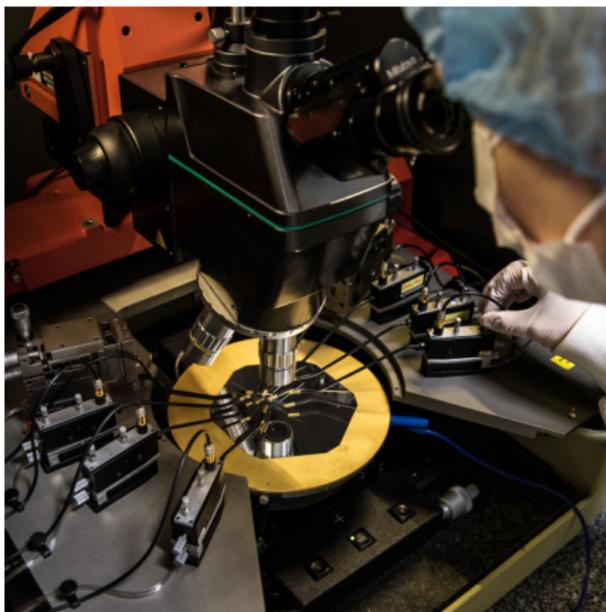


CALICE Silizium-Dioden ($1 \times 1 \text{ cm}^2$ in
 6×6 -Block)

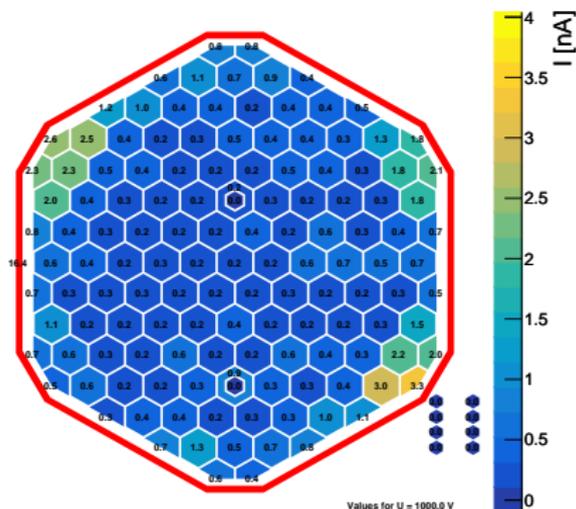


Beispiel: Testen von Siliziumsensoren

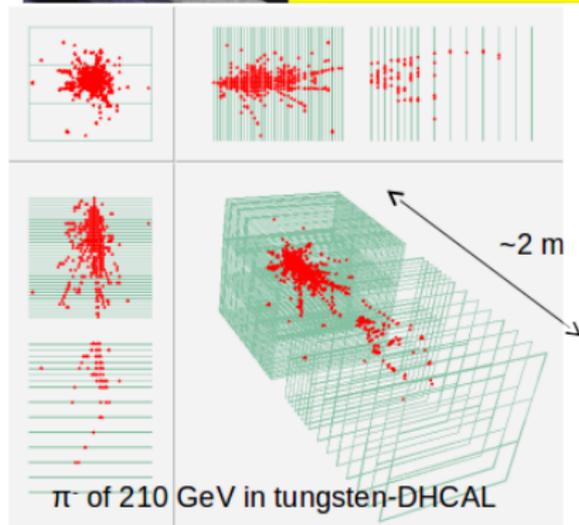
Probestation zum Testen von Siliziumsensoren
für das CMS-Kalorimeter-Upgrade



Dunkelstrom einzelner Dioden auf einem
6-Zoll-Sensor bei 1000 V



Beispiel: Sampling-Kalorimeter



CALICE R&D

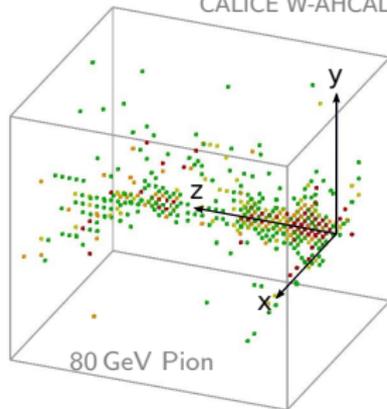


Hadronische Schauer: Hohe Granularität

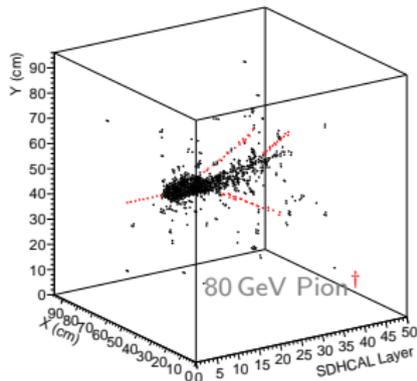
- Sampling-Kalorimeter erlauben Analyse von Schauerform und Sub-Struktur

Analoges HCAL

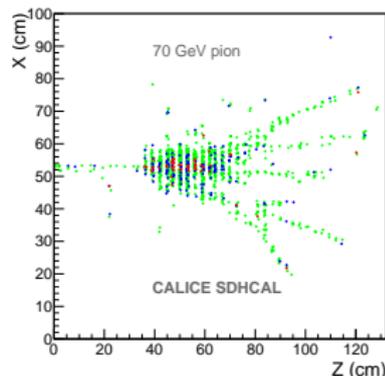
CALICE W-AHCAL



Digitales HCAL



Semi-digitales HCAL



- $3 \times 3 \text{ cm}^2$ Zellen,
analoge
Energieinformation pro
Zelle

- $1 \times 1 \text{ cm}^2$ Zellen,
zähle Zellen über Schwelle

† Hits von identifizierten Teilchen im Schauer

- $1 \times 1 \text{ cm}^2$ Zellen,
zähle Zellen über 3
Schwellen

Energiemessung

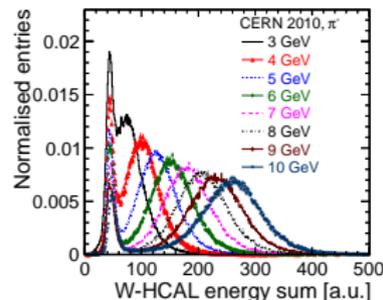
- Ideales, räumlich unbegrenztes, homogenes Kalorimeter: Energieauflösung $\frac{\sigma_E}{E}$ begrenzt durch statistische Fluktuationen der Schauerteilchenanzahl N

$$\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{\sigma_N}{N} \approx \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

- Maximal erzeugbare Anzahl an detektierbaren Teilchen

$$N_{\max} = E/\eta$$

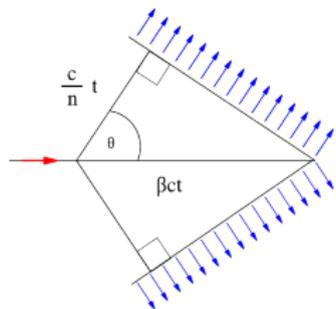
- η die Schwellwertenergie = minimale Energie zur Erzeugung eines detektierbaren Sekundarteilchens
 - Siliziumdetektoren: $\eta \approx 3.66 \text{ eV}$
 - Gasetektoren: $\eta \approx 30 \text{ eV}$
 - Plastikszintillatoren: $\eta \approx 100 \text{ eV}$
- Weitere Gründe für eine schlechtere Energieauflösung
 - Ineffizienzen bei Photonenmessung
 - Leakage
 - Fluktuationen im Schauer: Sampling, Landau, Spurlänge
 - Ungleichförmigkeiten, Kalibrationsfehler



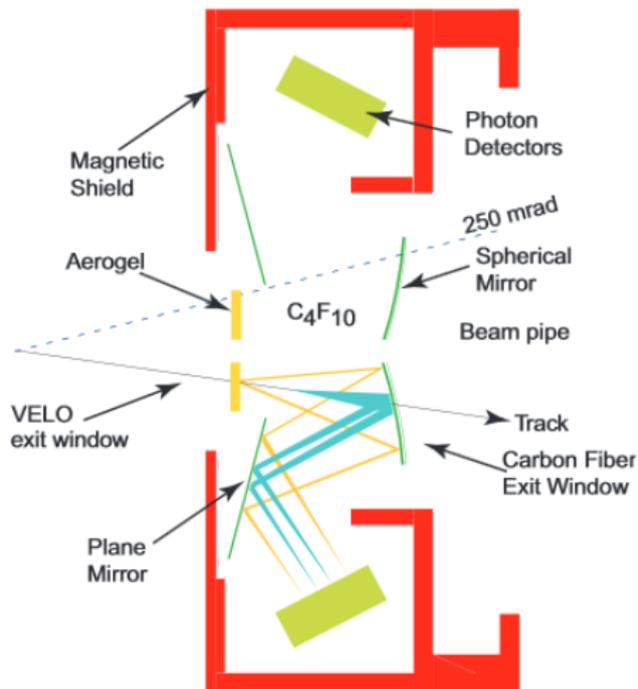
Weitere Detektoren zur Teilchenidentifikation



Cherenkov-Detektoren

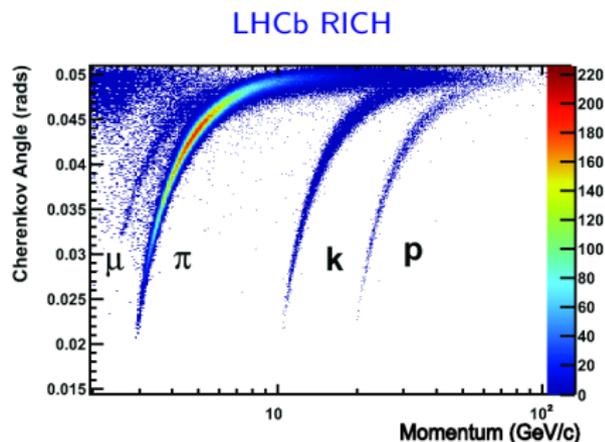
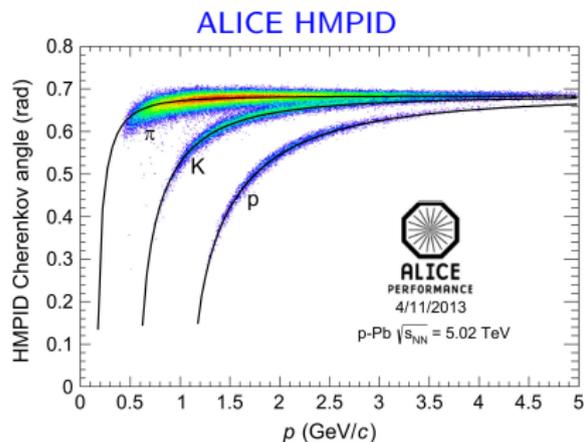


- Öffnungswinkel abhängig von Geschwindigkeit $\cos(\theta) = c/v$
 - Messung des Öffnungswinkels über Messung des Lichtkegelradius
 - Geschwindigkeitsmessung
 - Bestimmung der Masse



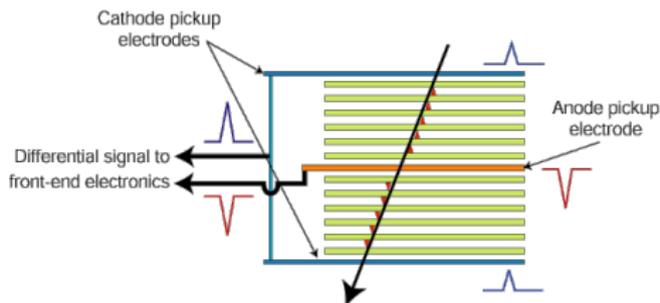
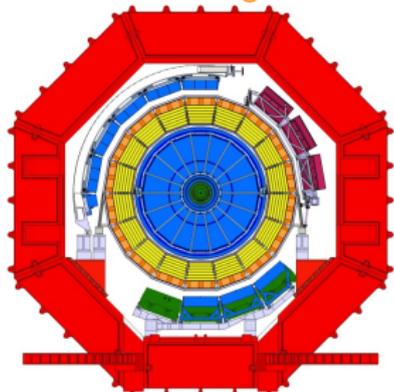
Cherenkov-Detektoren bei ALICE und LHCb

- Beispiel-Ergebnisse:
Unterscheidung von Teilchen über Cherenkov-Winkel bei ALICE und LHCb

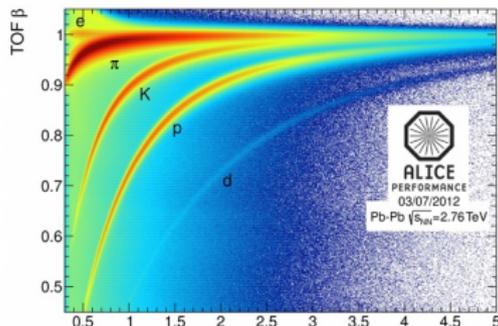


Flugzeitmessung: Beispiel ALICE TOF

ALICE Time-Of-Flight-Detektor



Flugzeitmessung: ALICE TOF



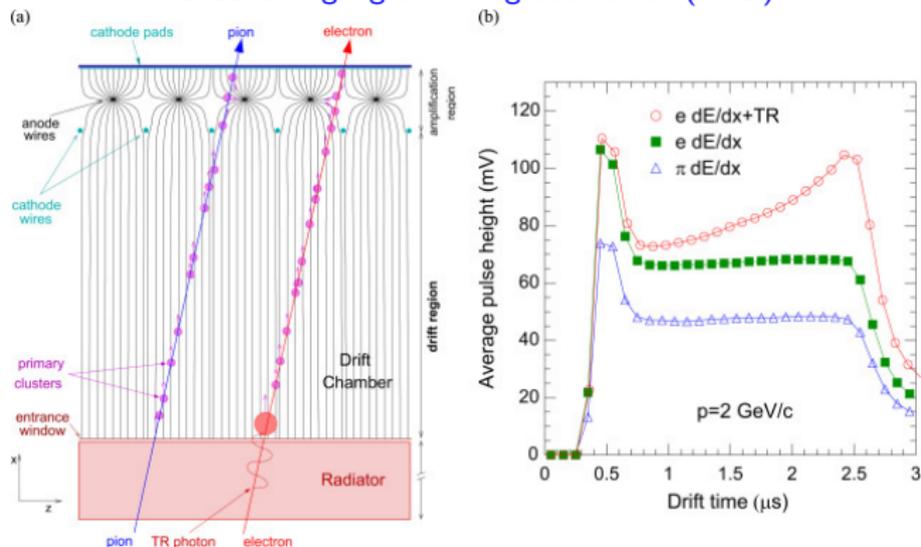
• ALICE TOF

- Widerstandsplattenkammern: Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC)
- Gas-Detektor
- Zwei Stapel aus je 6 Lagen
- Hochspannung zwischen Platten
- Akkurater Abstand von $250\ \mu\text{m}$ → Angelschnur
- Zeitauflösung von 85 ps
- Verwendung von RPCs zur Zeitmessung auch in ATLAS und CMS



Übergangsstrahlungsdetektoren

ALICE Übergangsstrahlungsdetektoren (TRD)



- Interesse an Elektronen in großem Pionuntergrund
- Elektronen haben höheres $\gamma = E/E_0$ als Pionen
- Nur sie erzeugen Übergangsstrahlung beim Durchgang durch Radiator
- Diese hochenergetischen Photonen (Röntgen) können das Gas zusätzlich ionisieren
- Signal kann verwendet werden um Elektronen und Pionen zu unterscheiden

Detektorsysteme

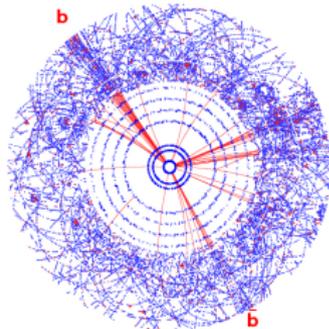


Anforderung an LHC-Detektoren

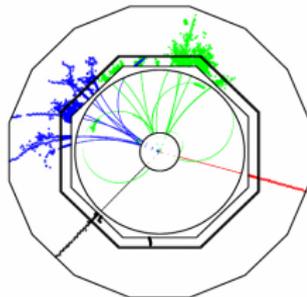
- Kollisionen bei höchsten Energien
 - Gute Impulsauflösung bis hin zur TeV Skala
- Hohe Luminosität (große Kollisionsrate)
 - Schnelle Detektoren (nur 25 ns zwischen den Kollisionen)
- Große Teilchendichte
 - Hohe Granularität, ausreichend kleine Detektorelemente
- Hohes Strahlungsniveau (viele stark wechselwirkende Teilchen)
 - Strahlung hauptsächlich durch die Kollisionsteilchen
 - Strahlenharte Detektoren und Elektronik (Lebensdauer 10+ Jahre)
- Große Kollaborationen
 - O(3000) Physikers jeweils in ATLAS und CMS
 - Kommunikation, soziologische Aspekte
 - Viele Meetings, Telefon- und Videokonferenzen

Anforderung an zukünftige $e^+ e^-$ -Detektoren

$H \rightarrow b\bar{b}$ @ LHC



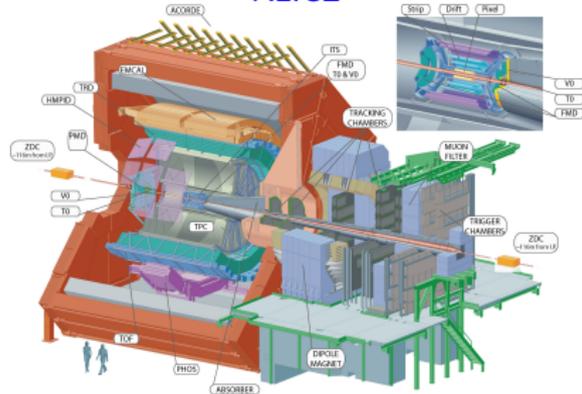
$ZH \rightarrow \mu^+\mu^-b\bar{b}$ @ e^+e^- colliders



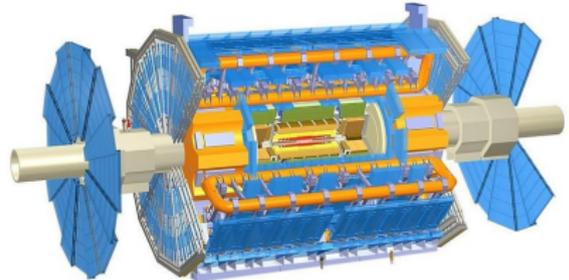
- Detektor für zukünftige $e^+ e^-$ Beschleuniger, z.B. CLIC, ILC, FCC-ee, CEPC
 - Weniger Strahlung:
 - Detektoren müssen weniger strahlenhart sein
 - Hochpräzisionsmessung:
 - Vertex- und Spurendetektoren mit sehr wenig Material
 - Hochgranulare Kalorimeter

LHC-Detektoren

ALICE



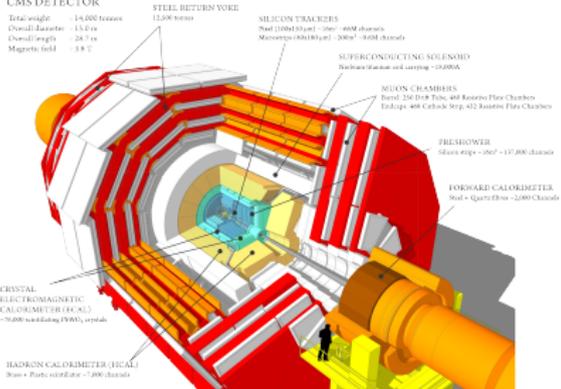
ATLAS



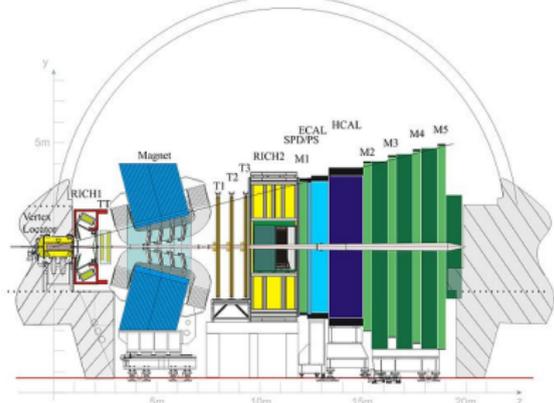
CMS

CMS DETECTOR

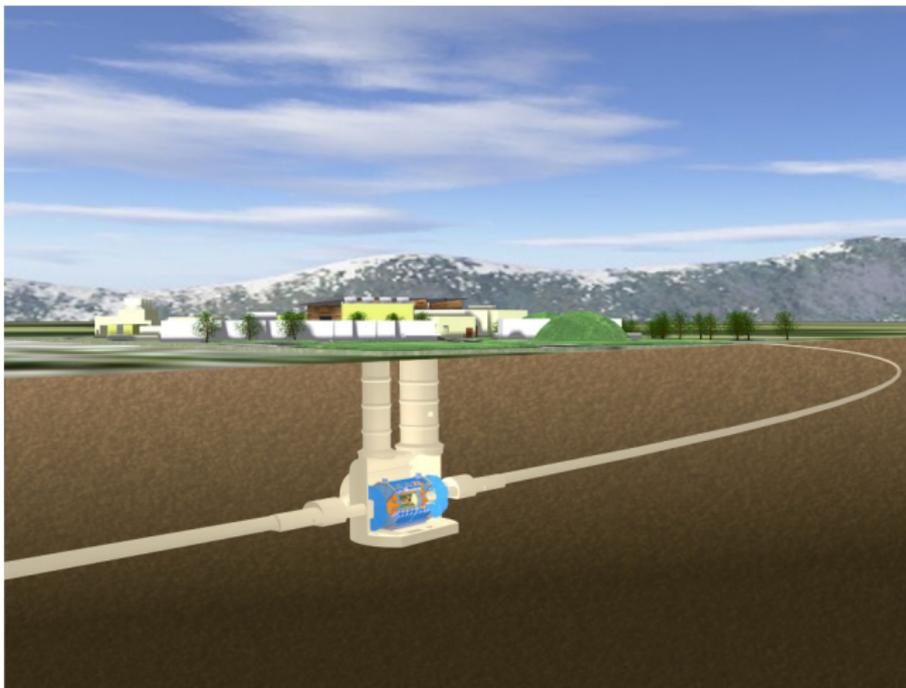
Total weight: 14,000 tonnes
 Overall diameter: 13.0 m
 Overall length: 28.7 m
 Magnetic field: 3.8 T



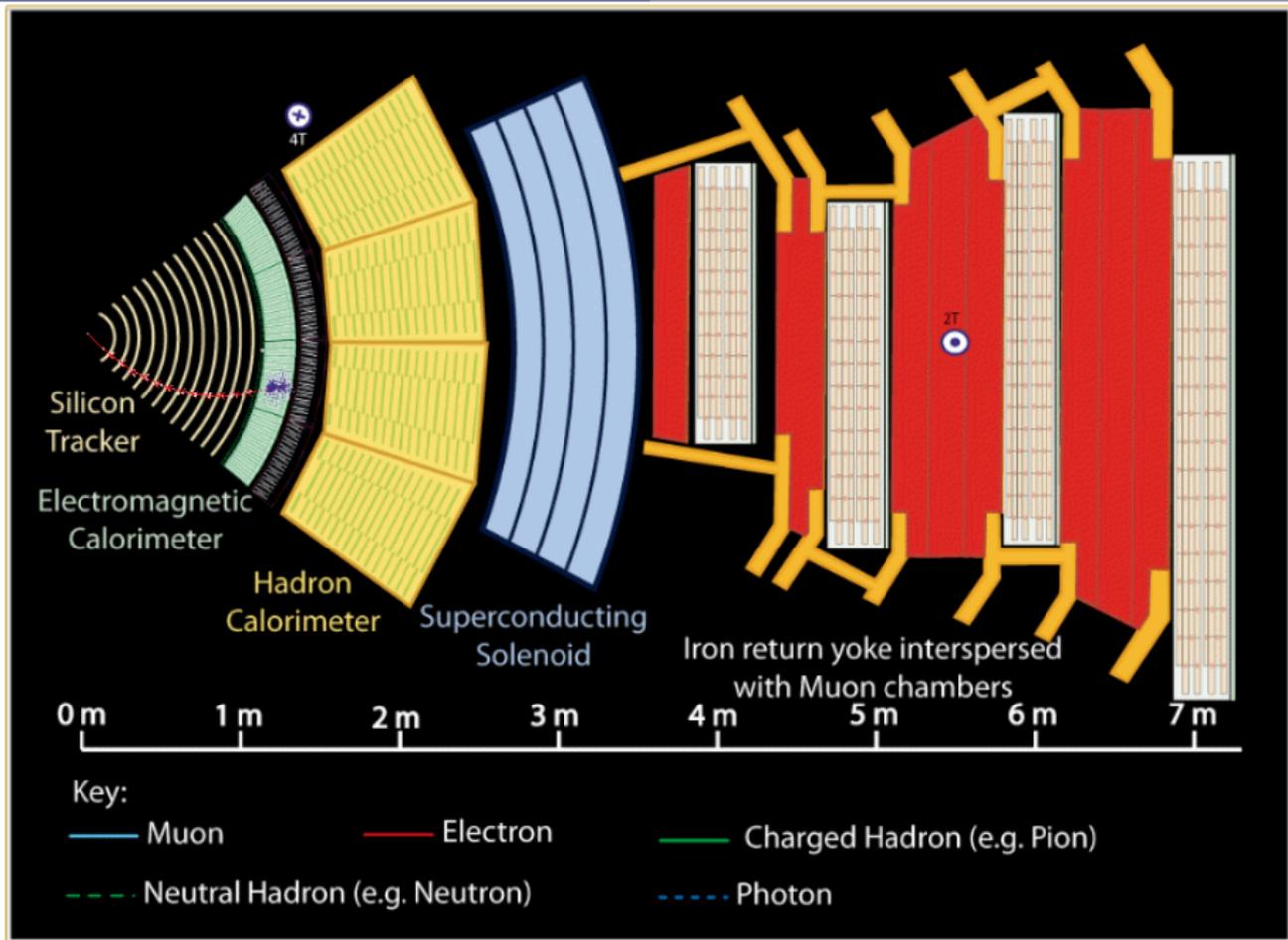
LHCb

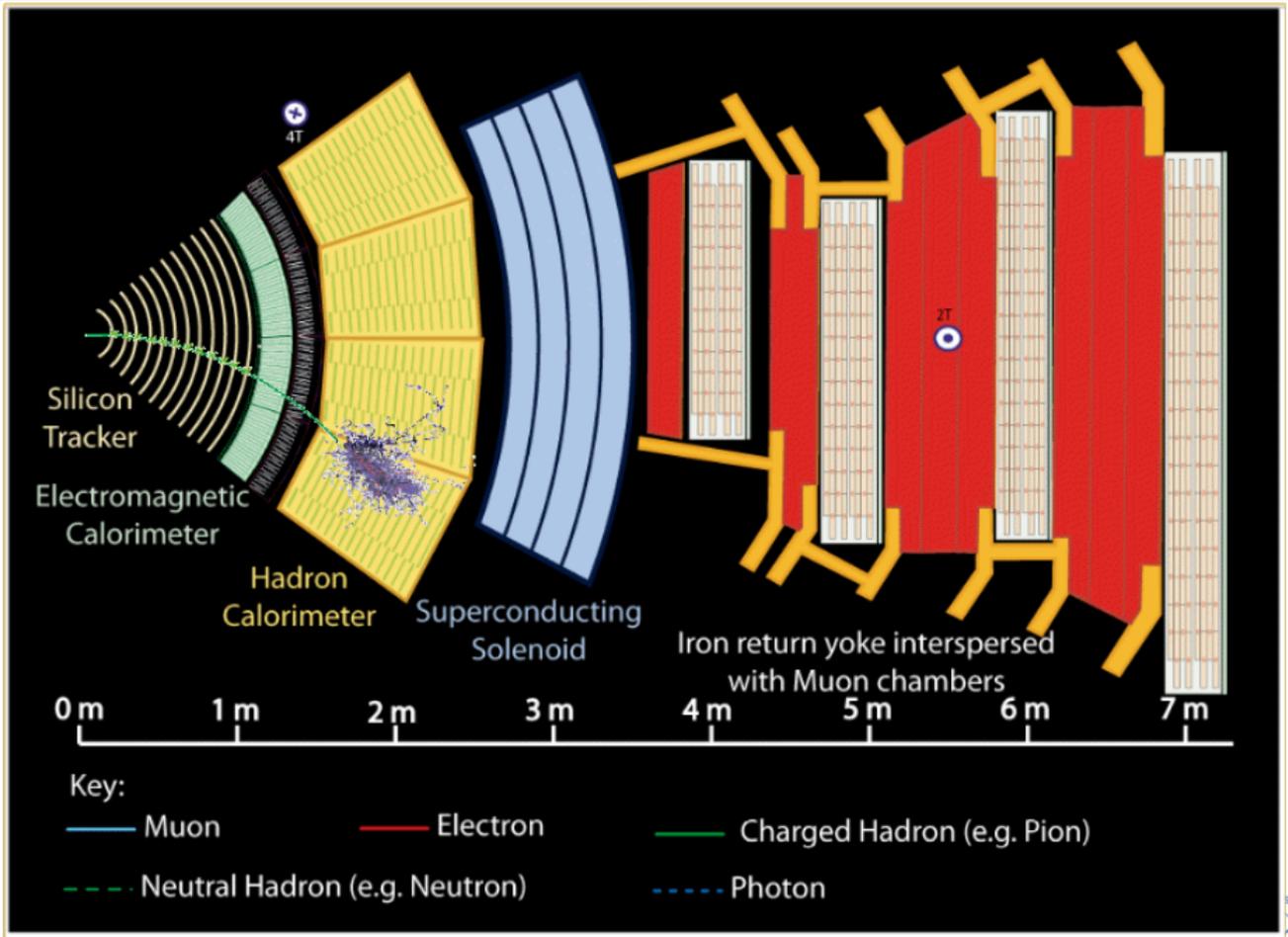


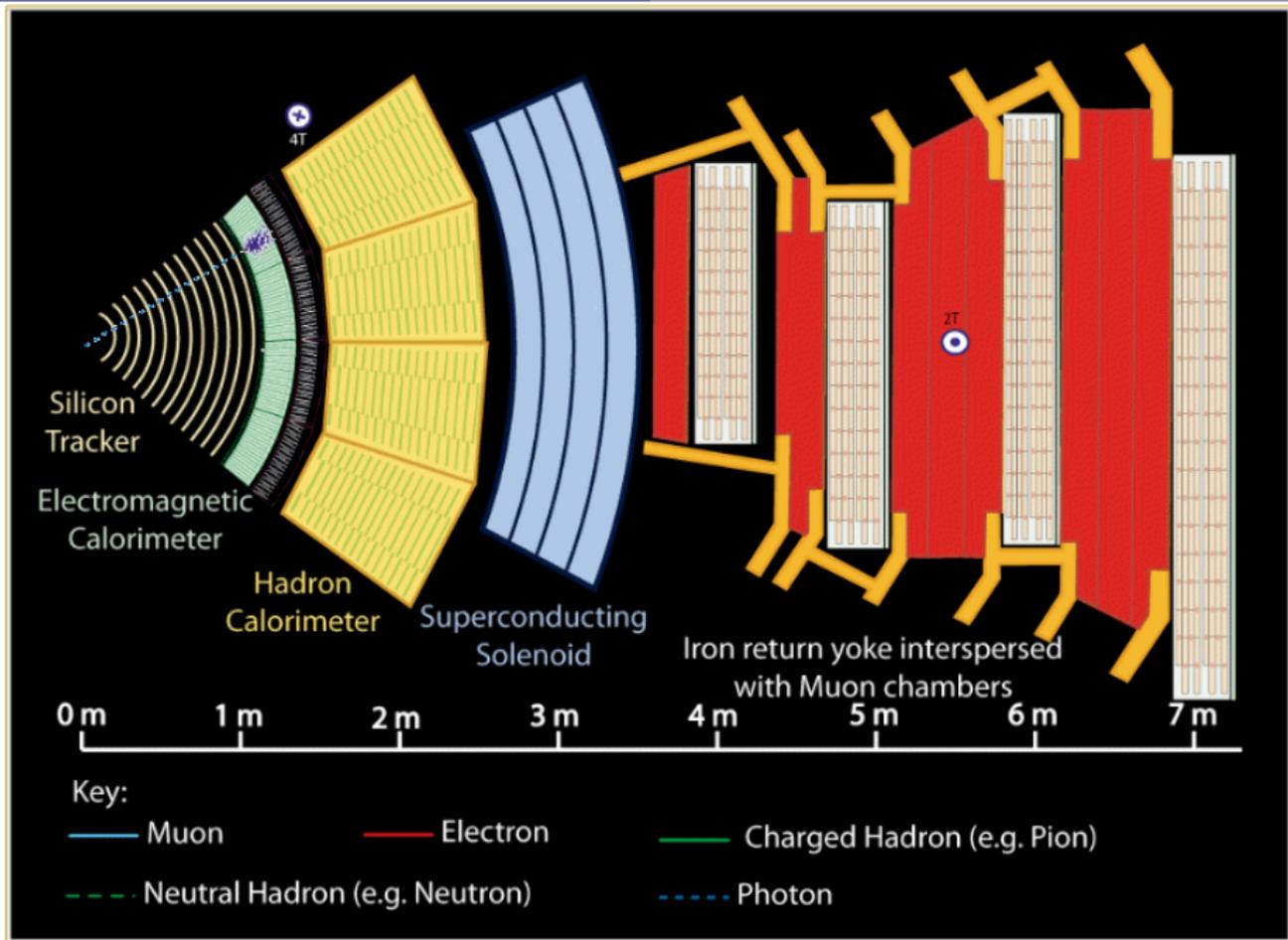
Untergrund:ATLAS

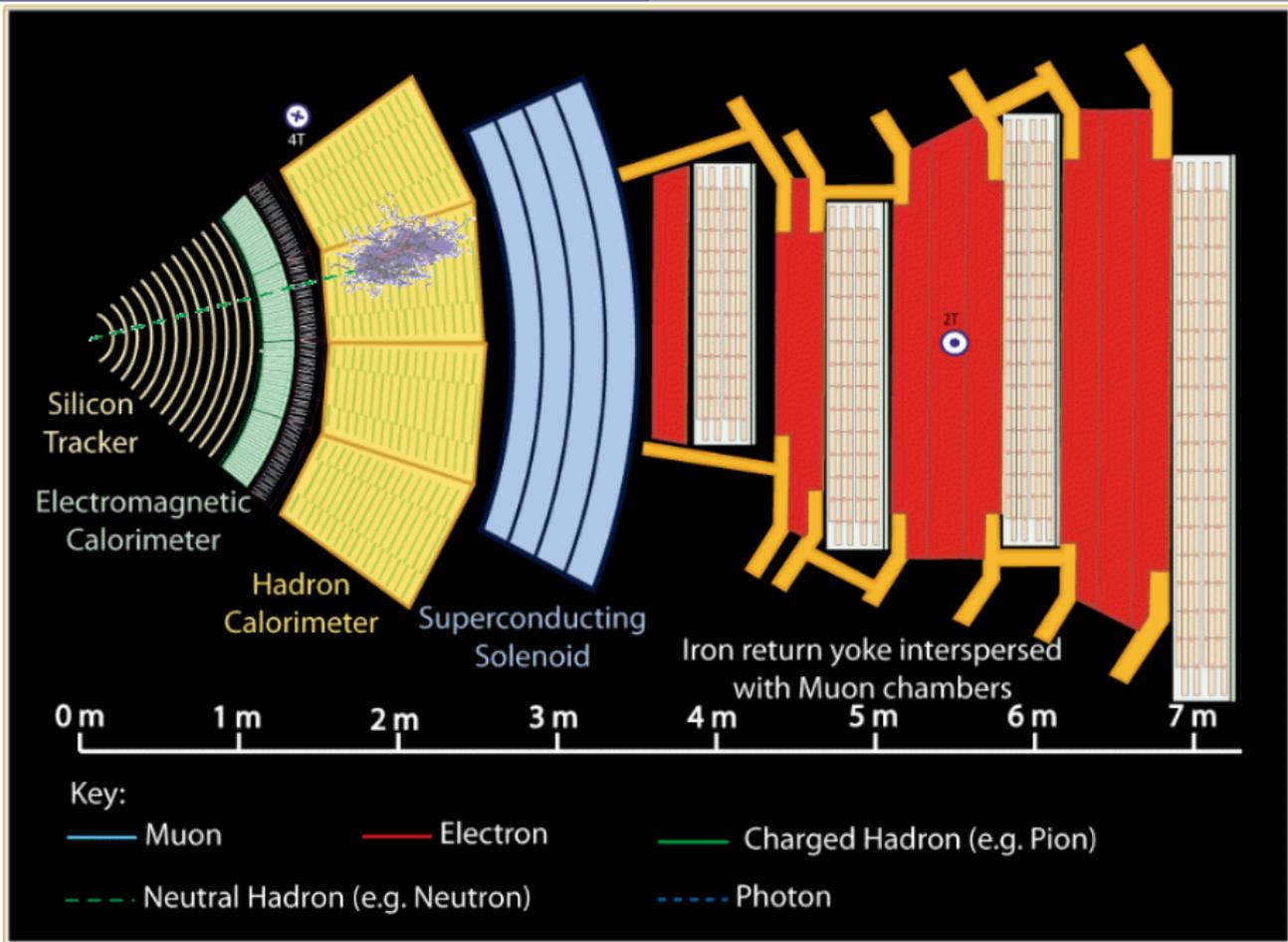


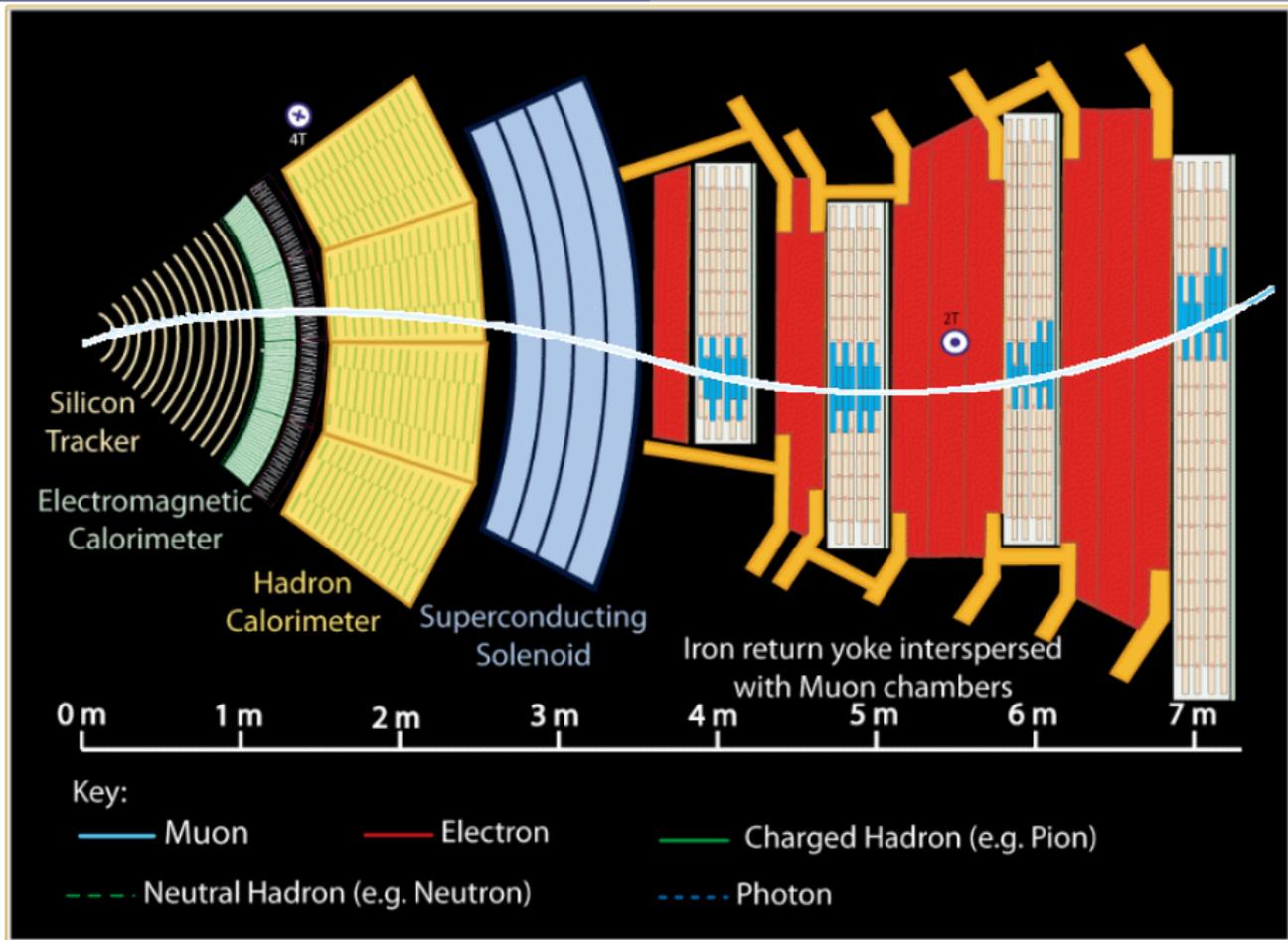
- Große Kaverne ~ 100 m unter der Erde
- Schächte für Material, Aufzug, Treppen
- Stabile Gesteinsschicht entlang des ganzen LHCs, Abschirmung von Strahlung



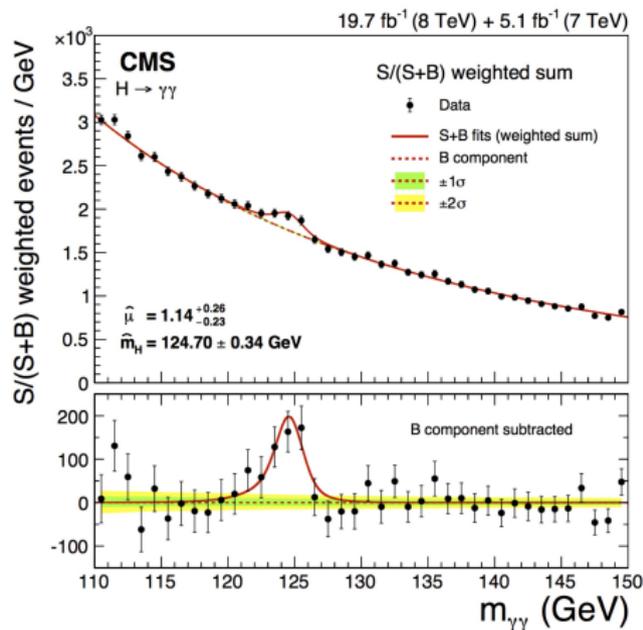
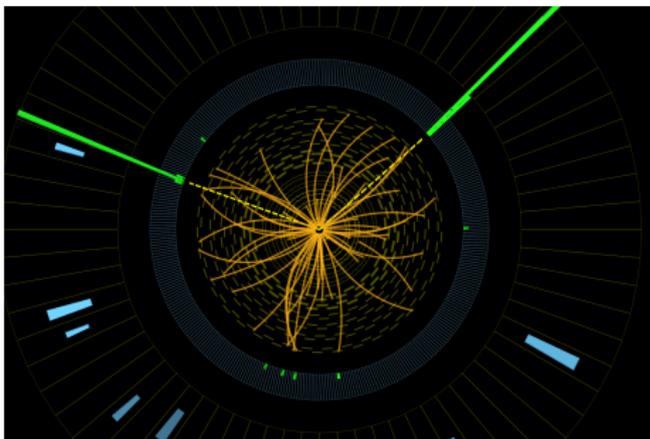








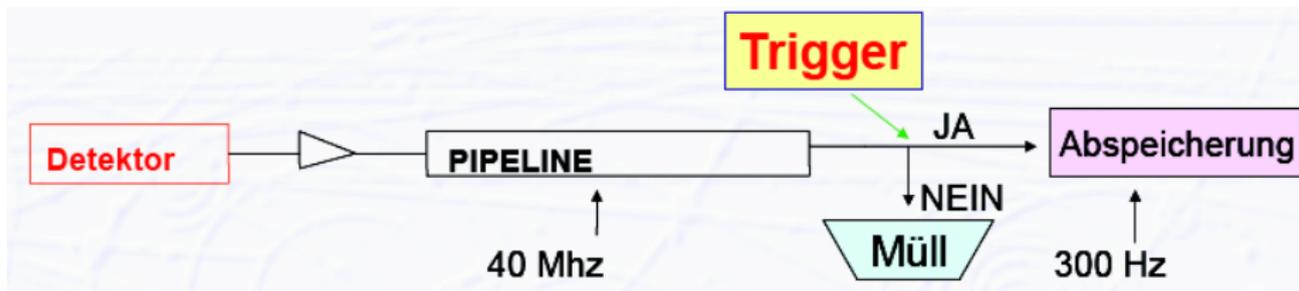
Beispiel: $H \rightarrow \gamma\gamma$



- Rekonstruiere kurzlebige Higgsteilchen über Zerfallsprodukte, hier 2 Photonen
- Kombiniere alle gemessenen Photonen miteinander
- Peak auf Untergrund → Higgs-Messung
- Higgs-Masse = 125 GeV

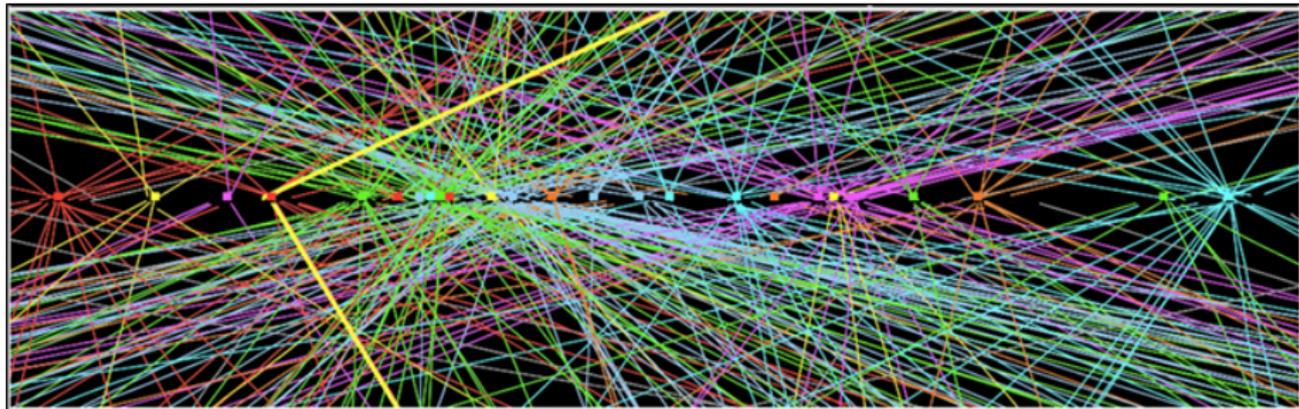
Trigger: Beispiel ATLAS

- Kollisionsrate: 40 MHz mit ~ 20 überlappenden Kollisionen (10^9 Koll./s)
 - Mögliche Aufzeichnungsrate: ~ 300 Kollisionen/s (~ 450 MB/s)
- Hocheffizienter Trigger (schnelle Auswahl) nötig
 - Rohdaten (1 PB/s) werden bis zur Trigger-Entscheidung in Pipeline gespeichert



- Zukunft: Trend zur Echtzeitrekonstruktion

Pileup



Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Aufgabe von Teilchendetektoren
 - Vermessen einer Teilchenwechselwirkung mit möglichst hoher Effizienz und Vollständigkeit: Impuls + Energie aller Teilchen, Teilchenidentität
- Impulsmessung (Spurdetektor)
 - Innerste Detektorlagen, Spurpunkte entlang der Teilchenbahn
 - Gas-basierte und Silizium-Halbleiterdetektoren
 - Impulsmessung über Krümmung im Magnetfeld
 - Myondetektoren als äusserte Detektorlage
- Energiemessung (Kalorimeter)
 - Schweres Detektormaterial, Bildung und Nachweis eines Teilchenschauers
 - Elektromagnetisches Kalorimeter: Elektronen, Positronen, Photonen
 - Hadron-Kalorimeter: Hadronen z.B. Pionen, Kaonen, Protonen, Neutronen
 - Homogenes Kalorimeter: gute Energieauflösung
 - Sampling Kalorimeter: Schauerprofil und -position
- LHC-Detektoren
 - Unterschiedliche, komplementäre Detektorkonzepte
 - Sehr hohe Primärdatenrate, benötigt effizienten Trigger zur Filterung
- Zukünftige Detektoren, z.B. für CLIC ($e^+ e^-$)
 - Präzisionsmessung → Leichter Tracker, hochgranulare Kalorimeter
 - Geringere Anforderungen an Strahlenhärte

