

Teilchendetektoren in der Hochenergiephysik - Teil 2 -

Eva Sicking (CERN)

Deutsches Lehrerprogramm am CERN
20. Oktober 2022 – CERN, Genf, Schweiz

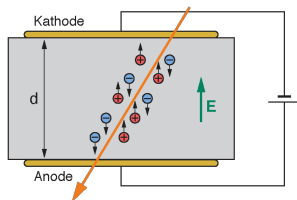


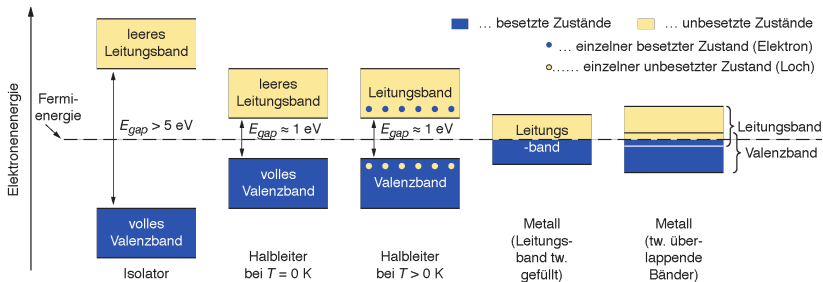
5. Halbleiterdetektoren
6. Szintillatoren
7. Kalorimeter
8. Teilchenidentifikation
9. Detektorsysteme
10. Zusammenfassung

- ▶ Vorlesung von Manfred Kramer 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>
- ▶ CMS HGCAL: <https://cds.cern.ch/record/2725040/> (thesis Thorben Quast)

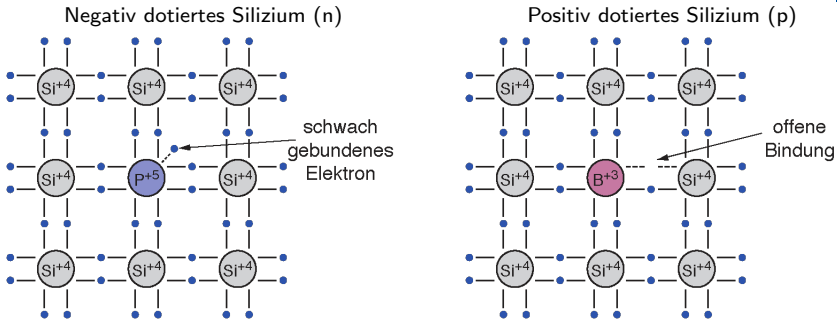
Halbleiterdetektoren

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

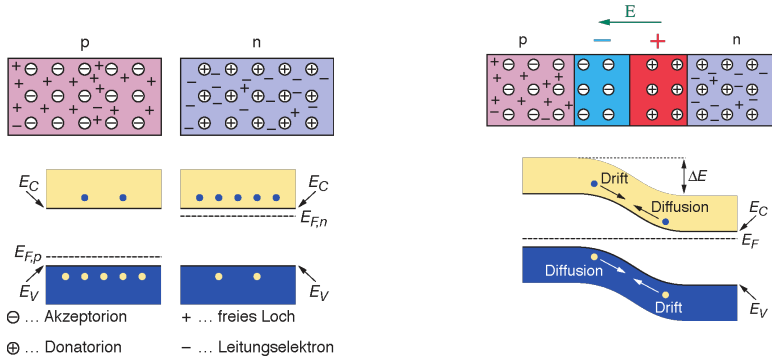




- ▶ Halbleiter: z.B. [Silizium](#), Germanium, Diamant, GaAs, CdTe, ...

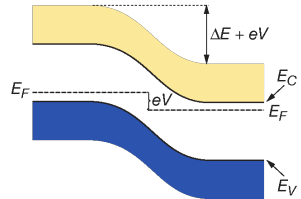
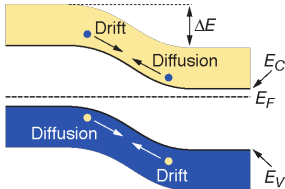
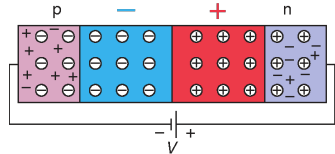
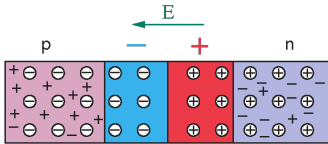


- ▶ Silizium in 4. Gruppe des Periodensystems
- ▶ Silizium in Reinform hat Kristallform
- ▶ Bei niedriger Temperatur sind alle Elektronen gebunden → Nicht leitend
- ▶ Ersetze einige Siliziumatome im Gitter durch Atome aus den Nachbargruppen, z.B. Bor oder Phosphor
- ▶ Scheinbar zu viele oder zu wenig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

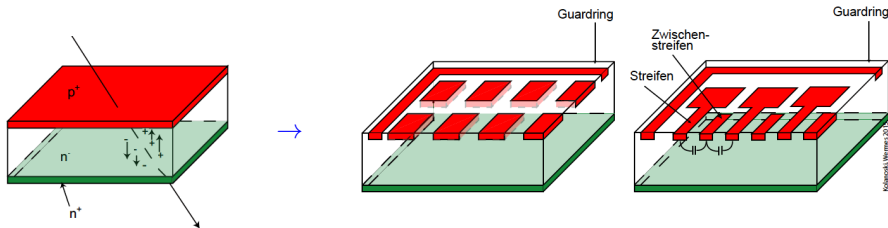


- ▶ Werden p- und n-dotiertes Silizium nebeneinander gebracht, ergibt sich eine Zone in der die Elektronen und Löcher rekombinieren
- Verarmungszone
- ▶ Ladungsungleichgewicht erzeugt elektrisches Feld in Verarmungszone

PN-Übergang: Externe Spannung



- ▶ Vergrößere Verarmungszone durch Anlegen externer Spannung in selbe Richtung

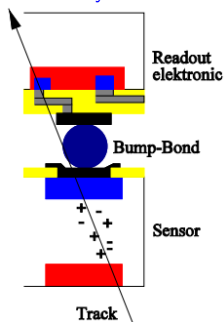


- ▶ Ein ionisierendes Teilchen regt beim Durchgang e^- (aus dem Valenzband ins Leitungsband) an und erzeugt so e^- -Loch-Paare
- ▶ e^- -Loch-Paare driften im elektrischen Feld zu den Elektroden und induzieren ein elektrisches Signal
- ▶ Segmentiert man die Elektrode, erreicht man hohe Ortsauflösungen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

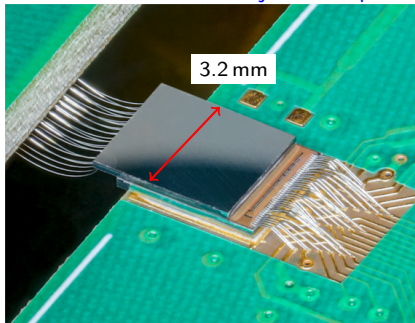
- ▶ Viele verschiedene Konzepte (Sensoren, Auslese)
- ▶ Pixelgrößen von wenigen $10\ \mu\text{m}$
- ▶ Dicken von wenigen $100\ \mu\text{m}$

→ Gute Ortsauflösung
→ Wenig Streuung

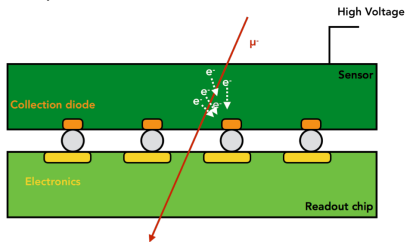
Ein Pixel eines Hybrid-Pixel-Detektors



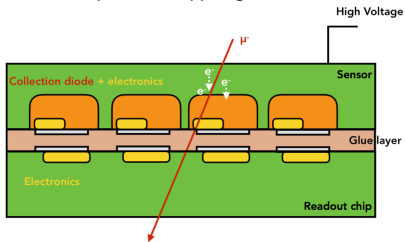
CLICpix Hybrid-Prototyp
mit 128×128 Pixeln von je $25 \times 25\ \mu\text{m}^2$



Hybrid: Planarer Si-Sensor + ASIC (65 nm)
Bump-Bonds

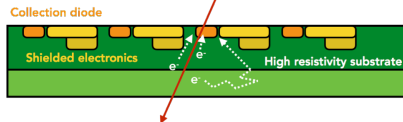


Hybrid: HV-CMOS-Sensor + ASIC (65 nm)
Kleber: Kapazitive Kopplung

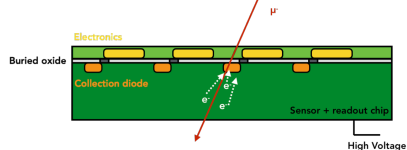


- ▶ Hybrid-Technologie:
interessant für kleine Pixelgrößen

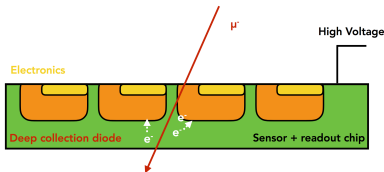
Monolithisch: "High-Resistivity CMOS"



Monolithisch: "Silicon on Insulator"



Monolithisch: "High-Voltage CMOS"

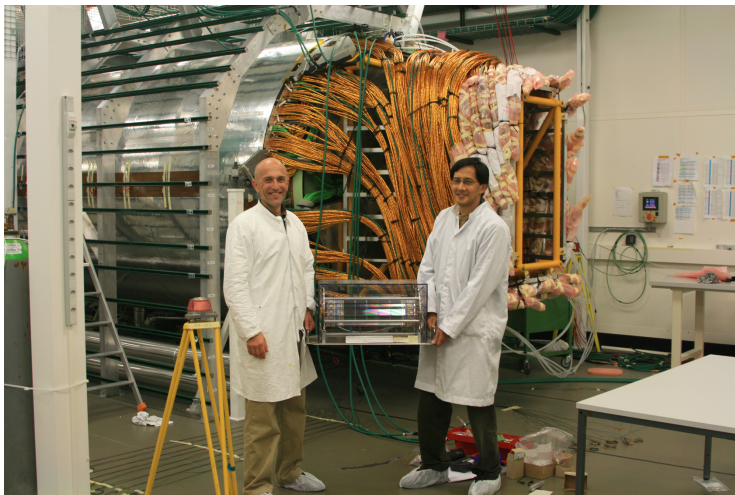


- ▶ Monolithische Technologie:
Interessant für große Flächen und geringe Dicken

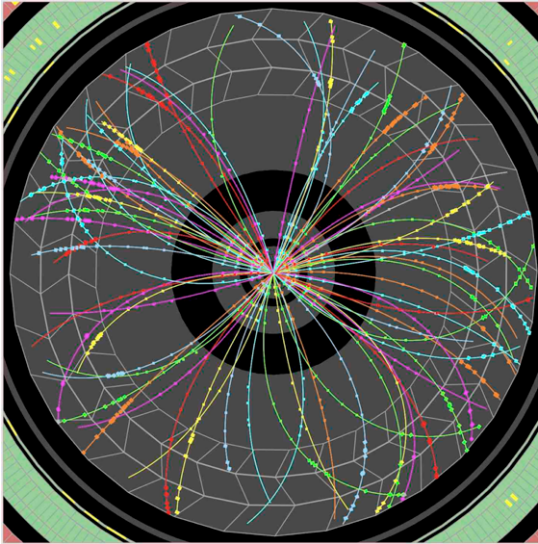
Beispiele: CMS versus OPAL




- ▶ Zwei Generationen von Silizium-basierten Spur-Detektoren
 - ▶ LEP: OPAL-Experiment → 1 m^2 , vorne
 - ▶ LHC: CMS-Experiment → 200 m^2 , hinten



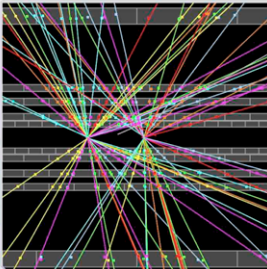
Beispiel: Spurrekonstruktion



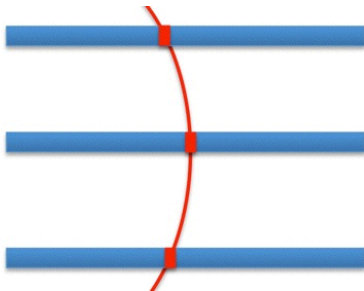
 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run Number: 265545, Event Number: 5720351

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

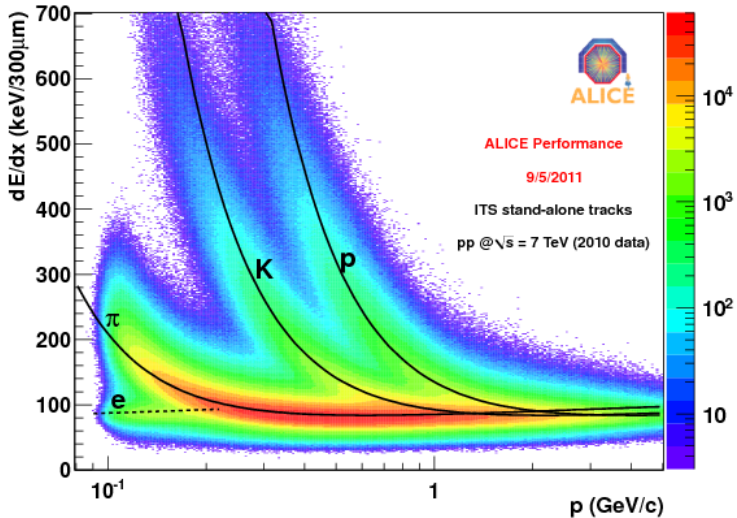


Beispiel: Impulsmessung

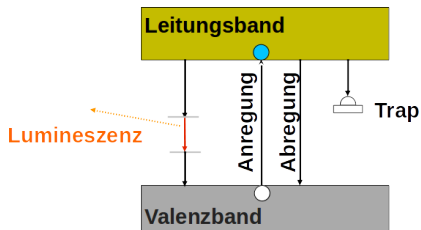


- ▶ Impuls $p = mv = \gamma m_0 v$
- ▶ Lorentzkraft: $F_L = Q \cdot [v \times B]$
- ▶ Zentripetalkraft: $F_Z = m \cdot v^2 / r$
- ▶ $F_L = F_Z \rightarrow p/r = Q \cdot B \rightarrow p = Q \cdot B \cdot r$
- ▶ Gute Impulsauflösung bei großen B und Detektorradien

Beispiel: Energieverlust

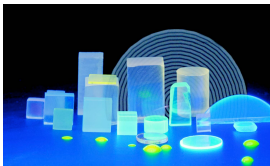


Szintillatoren

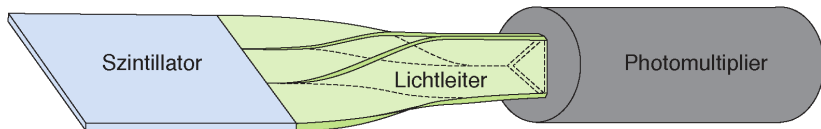


- ▶ Szintillation: Emission von Photonen nach Anregung von Atomen oder Molekülen des szintillierenden Materials durch energiereiche Strahlung (400-1000 eV)
- ▶ Sehr komplexer Vorgang
 - ▶ Viele Zwischenniveaus
 - ▶ Strahlende und nicht strahlende Übergänge
 - ▶ Anregung von anderen Elektronen durch emittiertes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

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



- ▶ Anorganische Kristalle
 - ▶ NaI, PbWO₄, 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



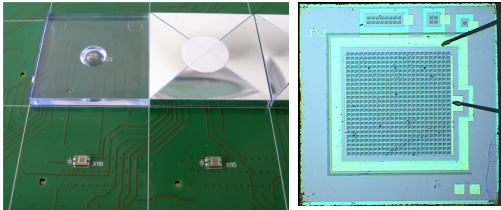


SCIENCEPHOTOLIBRARY

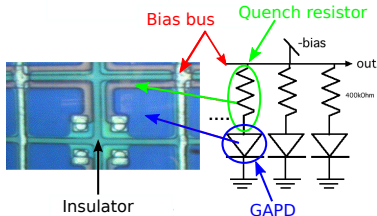
Szintillator mit SiPM-Auslese

3 × 3 cm² Szint. + SiPM
(mit 25 × 25 μm² Pixeln)

Zoom: 1 × 1 mm² SiPM
mit 576 Pixeln



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

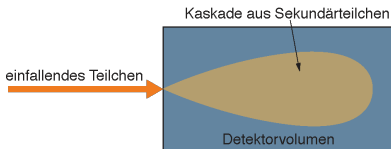
Kalorimeter

Kalorimeter: Konzept

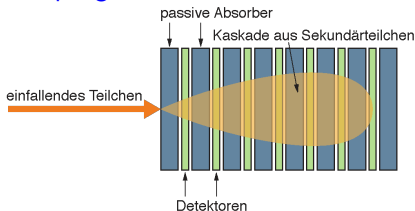
- ▶ Ein Kalorimeter ist ein dichter Detektor, der ein zu messendes Teilchen vollständig absorbiert
- ▶ Das Teilchen erzeugt einen Schauer von Sekundärteilchen, die ihre Energie im Detektor deponieren
 - ▶ Wärme
 - ▶ Ionisation
 - ▶ Atomare-Anregung
 - ▶ Bremsstrahlung
 - ▶ Cherenkov-Licht
 - ▶ Szintillations-Licht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

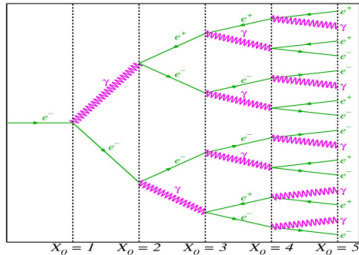
- ▶ Ein Kalorimeter ist ein dichter Detektor, der ein zu messendes Teilchen vollständig absorbiert
- ▶ Das Teilchen erzeugt einen Schauer von Sekundärteilchen, die ihre Energie im Detektor deponieren
 - ▶ Wärme
 - ▶ Ionisation
 - ▶ Atomare-Anregung
 - ▶ Bremsstrahlung
 - ▶ Cherenkov-Licht
 - ▶ Szintillations-Licht
- ▶ 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





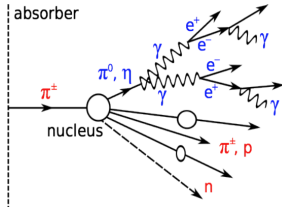
- ▶ Ein einfallendes e^\pm emittiert via Bremsstrahlung ein **Photon**
- ▶ Das erzeugte **Photon** erzeugt ein $e^+ e^-$ -Paar
- ▶ Rasch anwachsende Zahl von e^+ , e^- und γ bis E_c erreicht ist
- ▶ Ähnlicher Schauer für einfallendes Photon

- ▶ Kompakter Schauer

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

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

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



- ▶ 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

Energiemessung

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

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

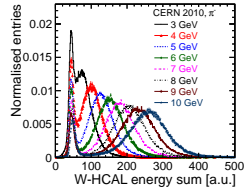
- ▶ Maximal erzeugbare Anzahl an detektierbaren Teilchen

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

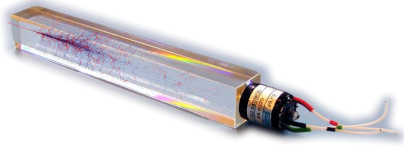
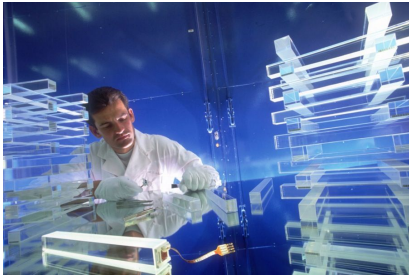
- ▶ η die Schwellwertenergie = minimale Energie zur Erzeugung eines detektierbaren Sekundarteilchens
 - ▶ Siliziumdetektoren: $\eta \approx 3.66 \text{ eV}$
 - ▶ Gasetektoren: $\eta \approx 30 \text{ eV}$
 - ▶ Plastikszintillatoren: $\eta \approx 100 \text{ eV}$

- ▶ Weitere Gründe für eine schlechtere Energieaufösung

- ▶ Ineffizienzen bei Photonenmessung
- ▶ Leakage, Fluktuationen im Schauer: Sampling, Landau, Spurlänge
- ▶ Ungleichförmigkeiten, Kalibrationsfehler



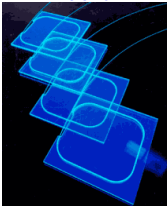
PbWO₄-Kristalle des CMS
elektromagnetischen Kalorimeters
(95% Blei)



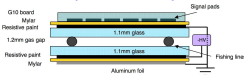
- ▶ Das Detektormaterial ist sowohl das passive Material, das Teilchen absorbiert, also auch das aktive Material, das Signal produziert
 - ▶ Kristalle
 - ▶ Bleiglas, PbWO₄
 - ▶ Flüssige Edelgase
- ▶ Solche Materialien werden fast ausschliesslich für elektromagnetische Kalorimeter verwendet
- ▶ Vorteil: 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



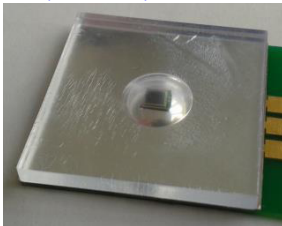
Resistive place chambers
($1 \times 1 \text{ cm}^2$)



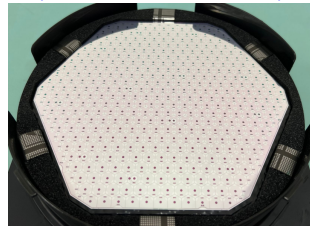
- ▶ Szintillatoren
- ▶ Silizium-Sensoren
- ▶ Flüssiges Edelgas
- ▶ Gas-Detektoren

- ▶ Vorteil: geringere Kosten, mehr Information über Showerform
- ▶ Nachteil: Nur ein Teil des Schauers wird gesampelt, schlechtere Energieauflösung

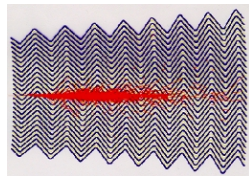
CALICE/CMS HGCAL Szintillator-Kachel
($3 \times 3 \text{ cm}^2$) + SiPMs



CMS HGCAL Silizium-Sensor
(0.5 cm^2 auf 20 cm -Wafer)



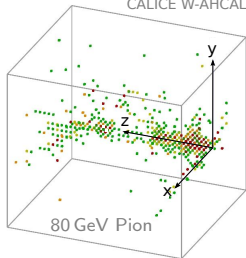
Beispiel: Sampling-Kalorimeter am LHC



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

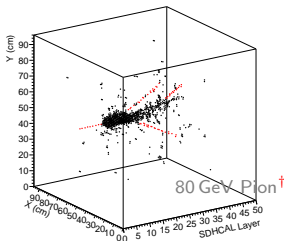
Analoges HCAL

CALICE W-AHCAL



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

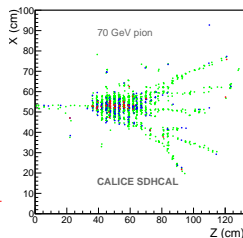
Digitales HCAL



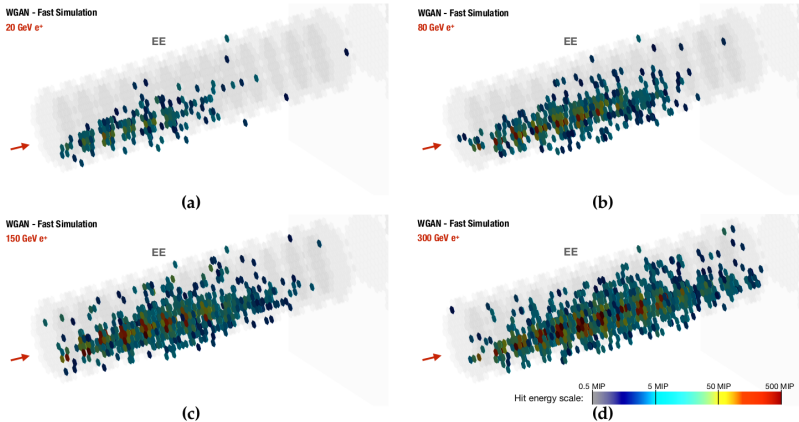
- ▶ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ Zellen, zähle Zellen über Schwelle

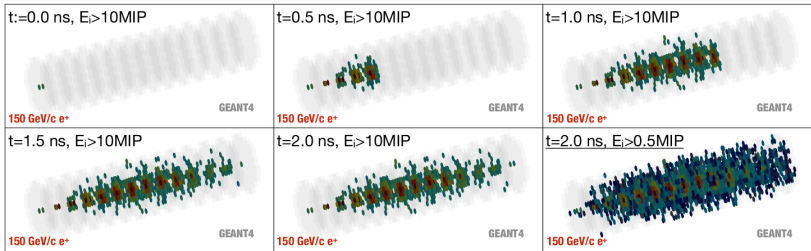
† Hits von identifizierten Teilchen im Schauer

Semi-digitales HCAL

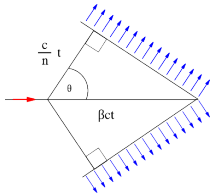


- ▶ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ Zellen, zähle Zellen über 3 Schwellen

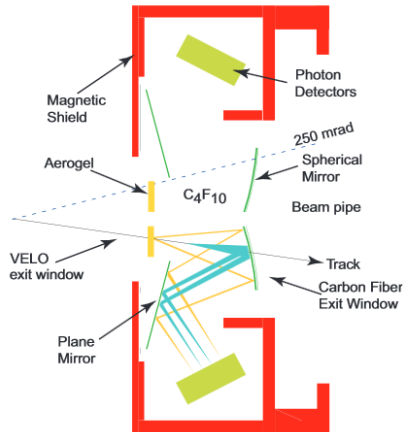




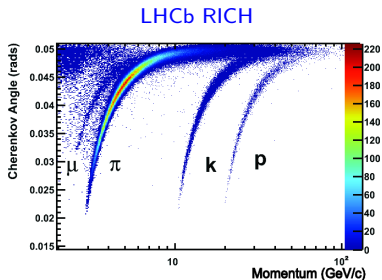
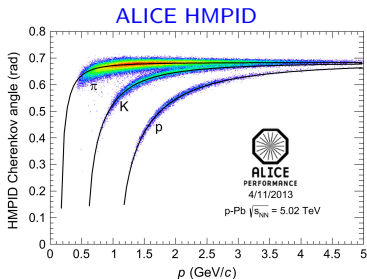
Weitere Detektoren zur Teilchenidentifikation



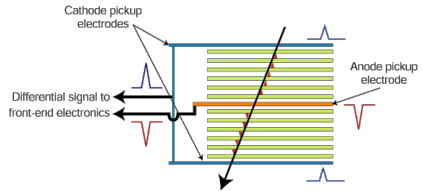
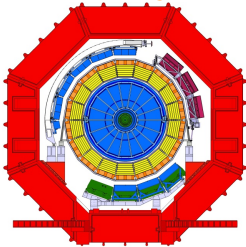
- ▶ Öffnungswinkel abhängig von Geschwindigkeit $\cos(\theta) = c/v$
 - ▶ Messung des Öffnungswinkels über Messung des Lichtkegelradius
 - Geschwindigkeitsmessung
 - Bestimmung der Masse



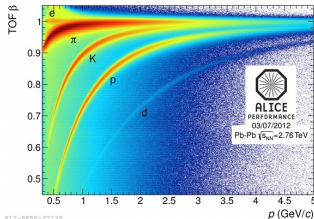
- ▶ Beispiel-Ergebnisse:
Unterscheidung von Teilchen über Cherenkov-Winkel bei ALICE und LHCb



ALICE Time-Of-Flight-Detektor



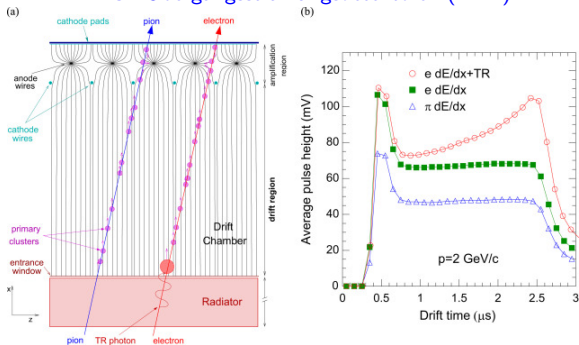
Flugzeitmessung: ALICE TOF



▶ ALICE TOF

- ▶ Widerstandsplattenkammern: Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC)
 - ▶ Gas-Detektor
 - ▶ Zwei Stapel aus je 6 Lagen
 - ▶ Hochspannung zwischen Platten
 - ▶ Akkurater Abstrand von 250 μm \rightarrow Angelschnur
 - ▶ Zeitauflösung von 85 ps
- ▶ Verwendung von RPCs zur Zeitmessung auch in ATLAS und CMS

ALICE Übergangsstrahlungsdetektoren (TRD)

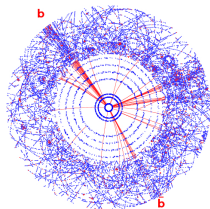


- ▶ Interesse an Elektronen in großem Pionuntergrund
- ▶ Elektronen haben höheres $\gamma = E/E_0$ als Pionen
- ▶ Nur sie erzeugen Übergangsstrahlung beim Durchgang durch Radiator
- ▶ Diese hochenergetischen Photonen (Röntgen) können das Gas zusätzlich ionisieren
- ▶ Signal kann verwendet werden um Elektronen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

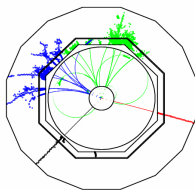
Detektorsysteme

- ▶ 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

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

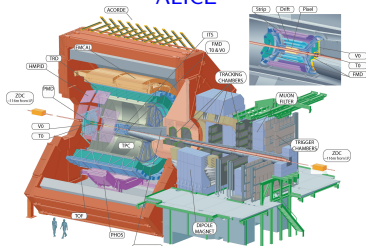


$ZH \rightarrow \mu^+\mu^-b\bar{b}$ @ e^+e^- colliders

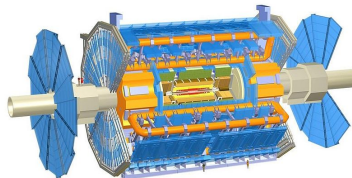


- ▶ Detektor für zukünftige $e^+ e^-$ Beschleuniger, z.B. CLIC, ILC, FCC-ee, CEPC
 - ▶ Weniger Strahlung:
 - ▶ Detektoren müssen weniger strahlenhart sein
 - ▶ Hochpräzisionsmessung:
 - ▶ Vertex- und Spurendetektoren mit sehr wenig Material
 - ▶ Hochgranulare Kalorimeter

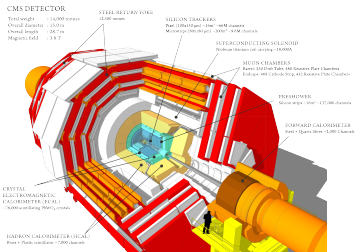
ALICE



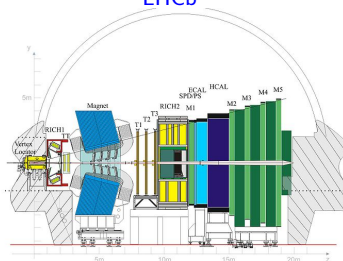
ATLAS

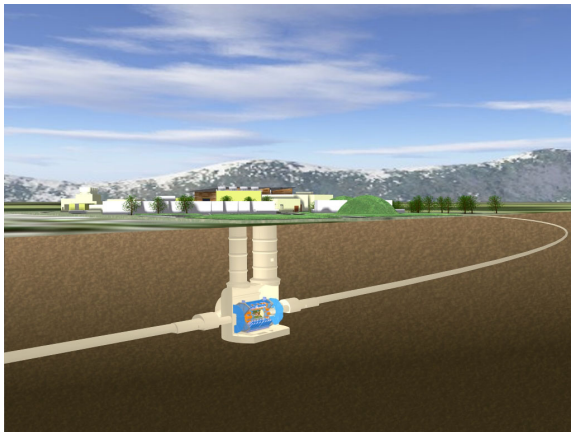


CMS

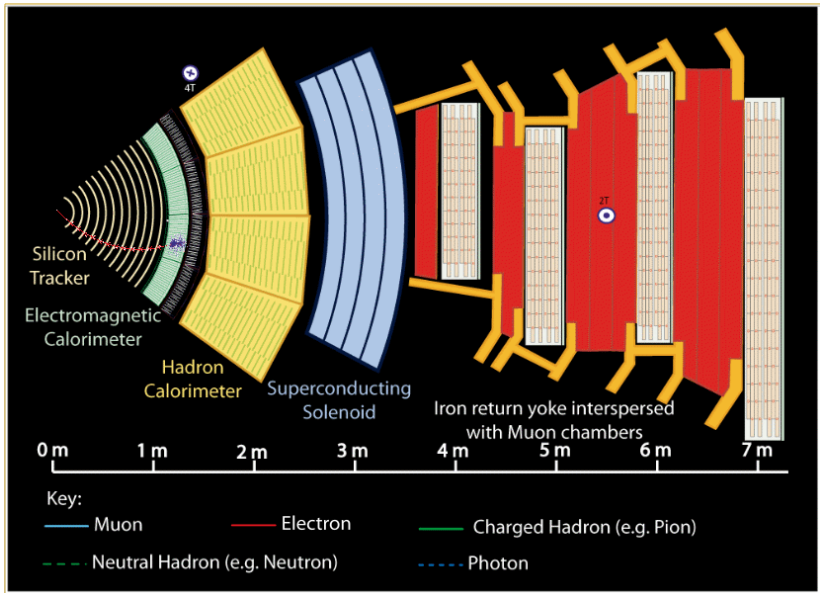


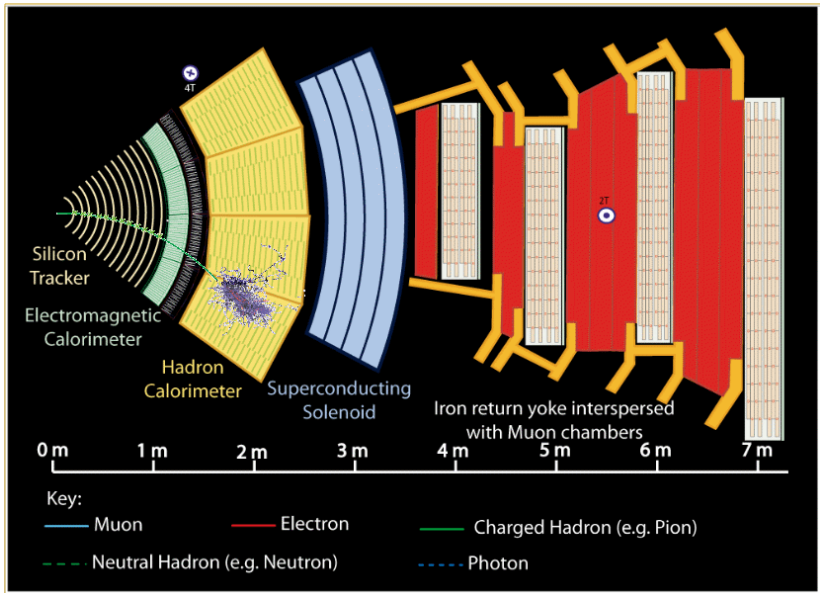
LHCb

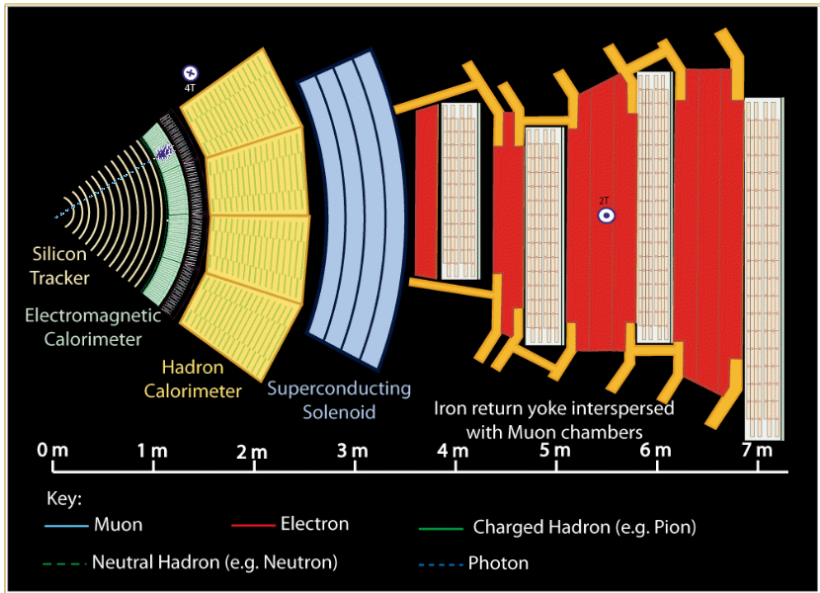


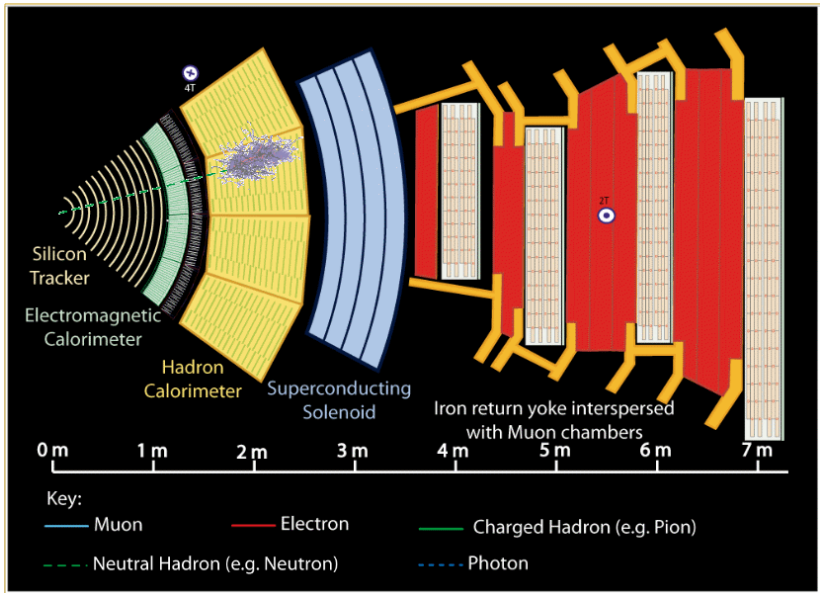


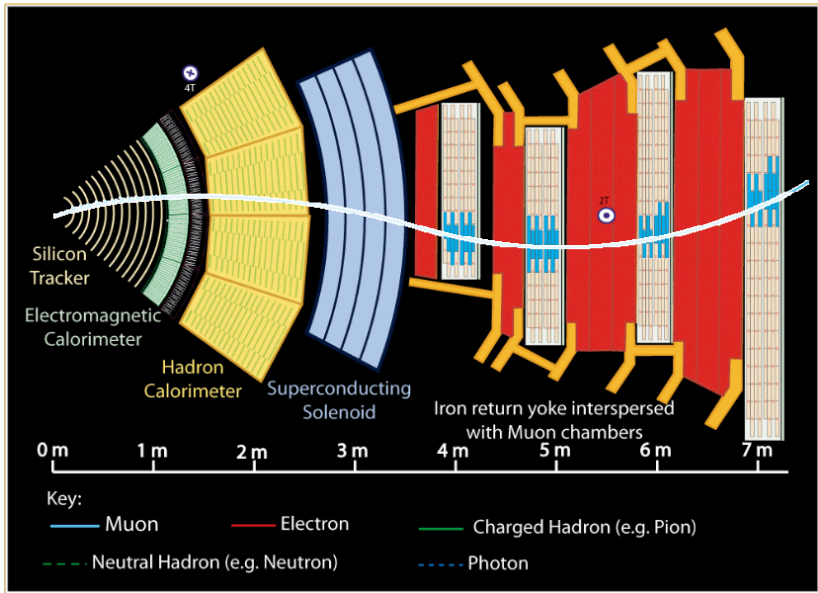
- ▶ Große Kaverne ~ 100 m unter der Erde
- ▶ Schächte für Material, Aufzug, Treppen
- ▶ Stabile Gesteinsschicht entlang des ganzen LHCs, Abschirmung von Strahlung



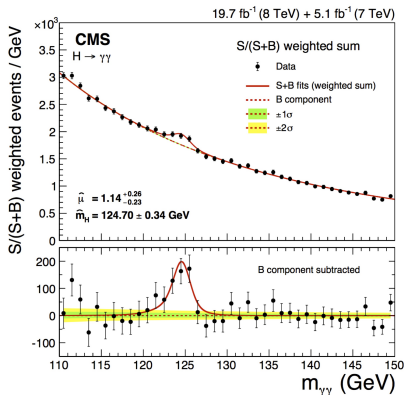
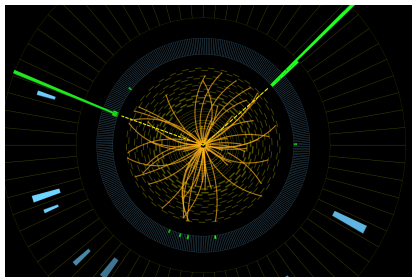






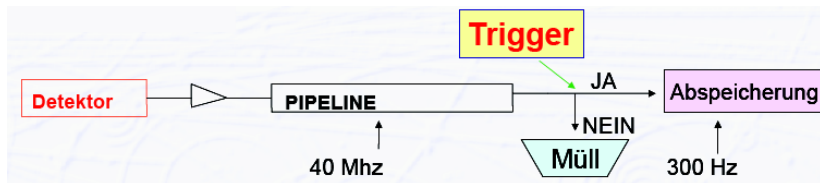


Beispiel: $H \rightarrow \gamma\gamma$

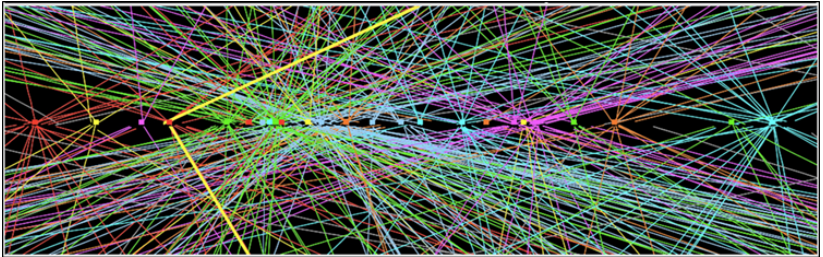


- ▶ Rekonstruiere kurzlebige Higgsteilchen über Zerfallsprodukte, hier 2 Photonen
- ▶ Kombiniere alle gemessenen Photonen miteinander
- ▶ Peak auf Untergrund → Higgs-Messung
- ▶ Higgs-Masse = 125 GeV

- ▶ 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



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

