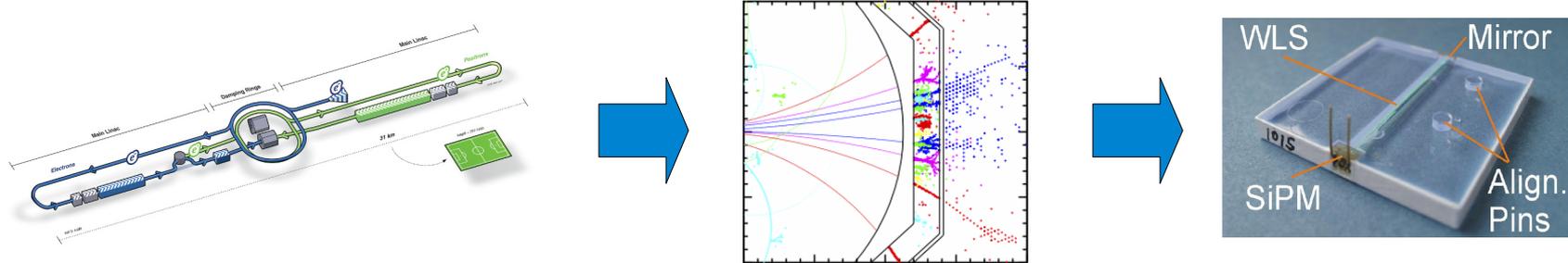


Entwicklung bildgebender hadronischer Kalorimeter für Particle-Flow-Algorithmen

oder: wie baue ich ein Kalorimeter, um damit möglichst wenig messen zu müssen



Katja Krüger (DESY)

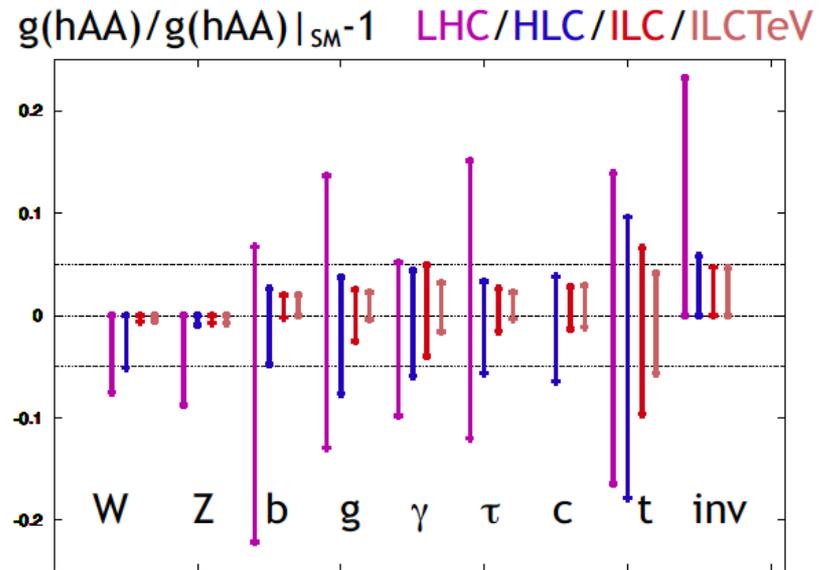
DPG Frühjahrstagung 2013

Dresden, 4.-8. März 2013

Physik am International Linear Collider

- > 4. Juli 2012: CMS und ATLAS entdecken ein neues Boson mit Masse $m \approx 125$ GeV, das die Erwartungen an das SM-Higgs-Boson erfüllt
- > aber: ist es wirklich **das SM-Higgs-Boson**?
⇒ ist die Kopplung an andere Teilchen proportional zu ihrer Masse?
- > ein e^+e^- Collider kann die Präzision dieser Messung entscheidend verbessern und so zwischen dem SM und anderen Modellen unterscheiden

außerdem: Suche nach BSM Physik, Messungen von W und Z Bosonen, top-Physik (s. P. Bechtle, Fr. 11:40)



aus: ILC DBD

- LHC:** 3000 fb^{-1} pp at $\sqrt{s} = 14$ TeV
- HLC:** + 250 fb^{-1} e^+e^- at $\sqrt{s} = 250$ GeV
- ILC:** + 500 fb^{-1} e^+e^- at $\sqrt{s} = 500$ GeV
- ILCTeV:** + 1000 fb^{-1} e^+e^- at $\sqrt{s} = 1$ TeV



Der International Linear Collider

- > e^+e^- Collider mit Schwerpunktsenergie bis zu $\sqrt{s} = 500$ GeV
Möglichkeit eines Upgrades auf $\sqrt{s} = 1$ TeV
- > 31 km lang, supraleitende Beschleunigungsstrecken
- > ausgereifte Technologie

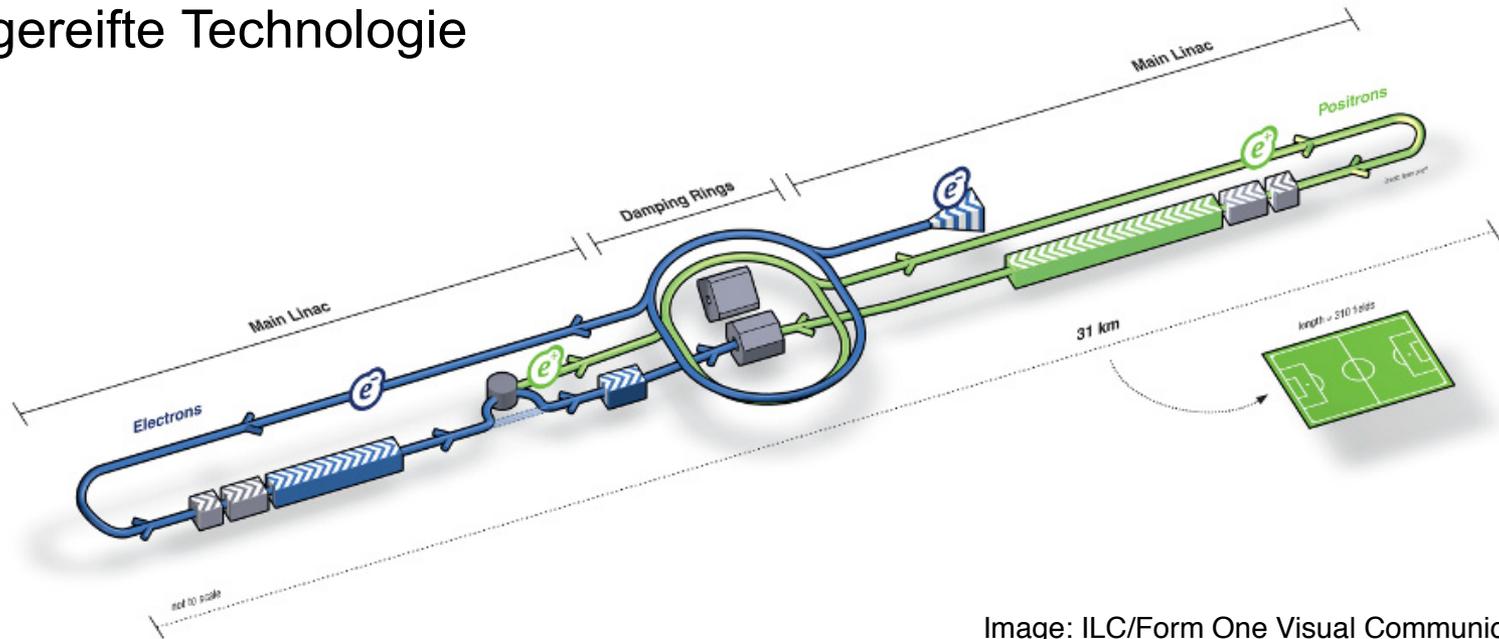
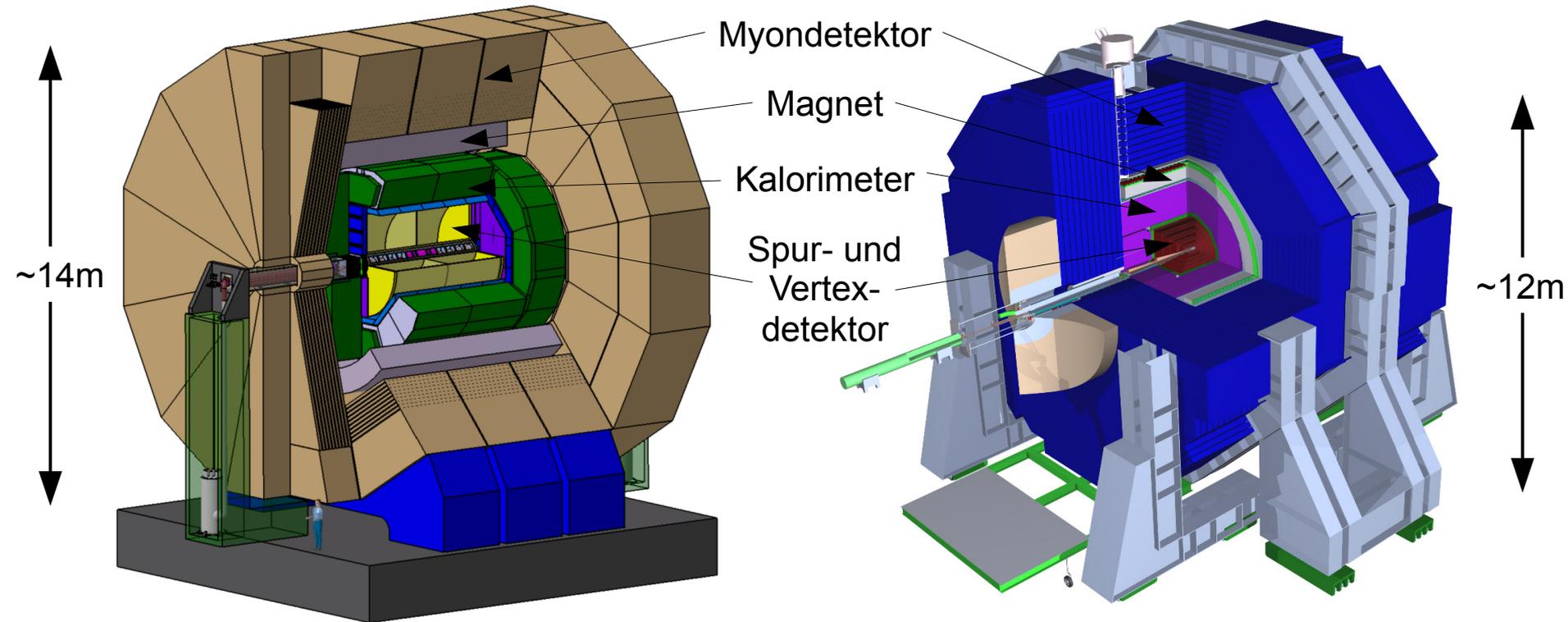


Image: ILC/Form One Visual Communication

- > alternatives Konzept: CLIC, neuartige Technologie, bis zu $\sqrt{s} = 3$ TeV

Detektoren für den ILC

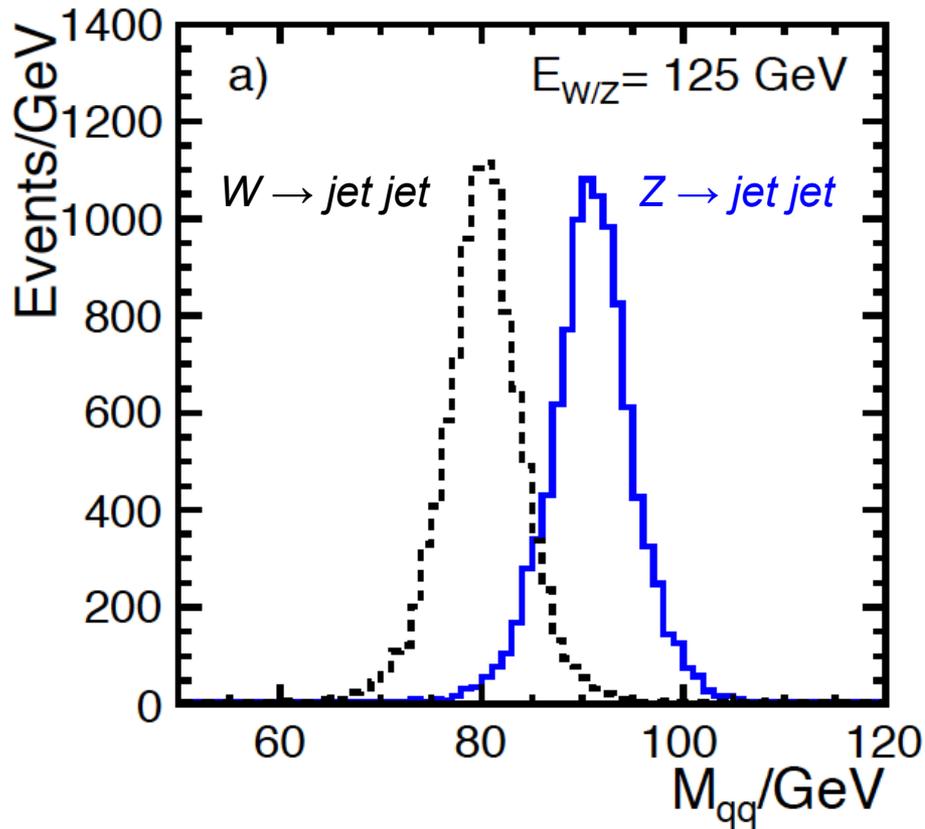
> 2 Konzepte für Detektoren am ILC: ILD und SiD



International **L**arge **D**etector

Silicon **D**etector

Rekonstruktion von Jets

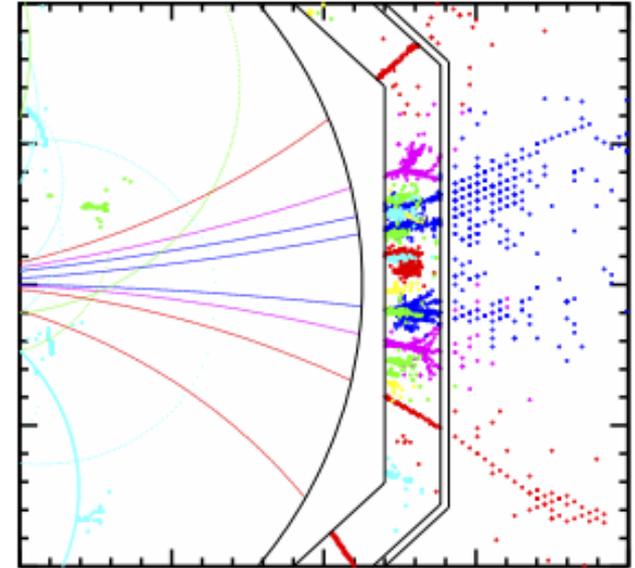


aus: M.A. Thomson, Nucl.Instrum.Meth. A611 (2009) 25

- > Ziel: Unterscheidung der Zerfälle $Z \rightarrow \text{jet jet}$ und $W \rightarrow \text{jet jet}$ anhand der rekonstruierten Masse
- > dafür benötigte Auflösung:
 $\sigma(E_{\text{jet}})/E_{\text{jet}} \approx 3\text{-}4\%$
für $E_{\text{jet}} \approx 40$ bis 500 GeV
- > “typisches” Kalorimeter allein:
 $\sigma(E_{\text{jet}})/E_{\text{jet}} \approx 60\%/\sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 2\%$
 $\Rightarrow \sigma(E_{\text{jet}})/E_{\text{jet}} \approx 10\%$ bei $E_{\text{jet}} = 50 \text{ GeV}$
- > vielversprechender Lösungsweg:
Particle
Flow
Algorithmen

Particle Flow Algorithmus

- > Idee:
benutze für jedes Teilchen im Jet
den Detektorteil, der die beste
Energieauflösung hat

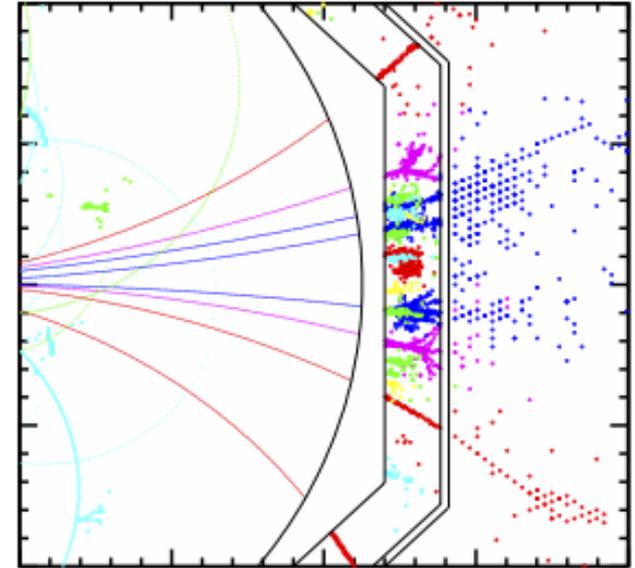


aus: M.A. Thomson,
Nucl.Instrum.Meth. A611 (2009) 25

- > „typischer“ Jet:
 - ~ 62% geladene Teilchen
 - ~ 27% Photonen
 - ~ 10% neutrale Hadronen
 - ~ 1% Neutrinos

Particle Flow Algorithmus

- > Idee:
benutze für jedes Teilchen im Jet
den Detektorteil, der die beste
Energieauflösung hat

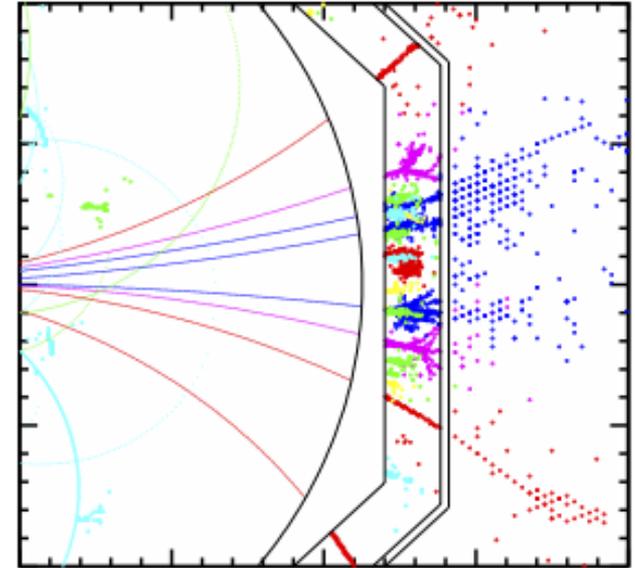


aus: M.A. Thomson,
Nucl.Instrum.Meth. A611 (2009) 25

- > „typischer“ Jet:
 - ~ 62% geladene Teilchen Spurkammer
 - ~ 27% Photonen EM Kalorimeter
 - ~ 10% neutrale Hadronen HAD Kalorimeter
 - ~~~ 1% Neutrinos~~

Particle Flow Algorithmus

- > Idee:
benutze für jedes Teilchen im Jet
den Detektorteil, der die beste
Energieauflösung hat



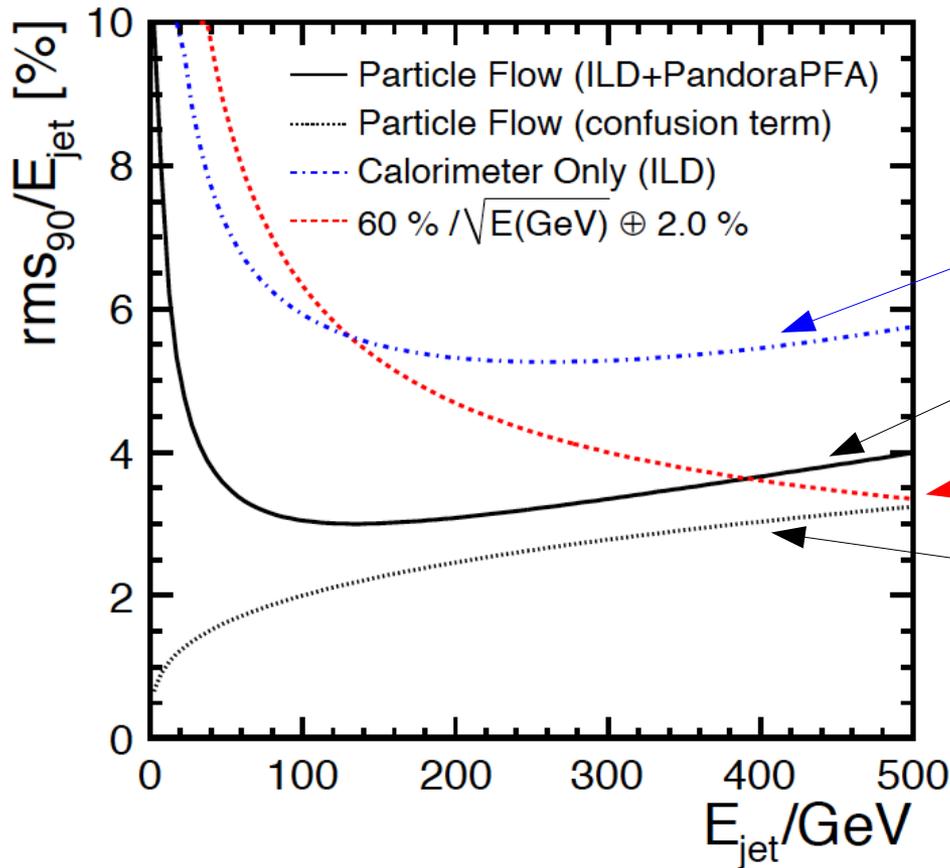
aus: M.A. Thomson,
Nucl.Instrum.Meth. A611 (2009) 25

- > „typischer“ Jet:
 - ~ 62% geladene Teilchen
 - ~ 27% Photonen
 - ~ 10% neutrale Hadronen
 - ~~~ 1% Neutrinos~~

Spurkammer
EM Kalorimeter
HAD Kalorimeter

$$\begin{aligned}(\sigma_{\text{jet}})^2 & \approx 0.62 (\sigma_{\text{tracks}})^2 \\ & + 0.27 (\sigma_{\text{ECAL}})^2 \\ & + 0.10 (\sigma_{\text{HCAL}})^2 \\ & + (\sigma_{\text{loss}})^2 + (\sigma_{\text{confusion}})^2\end{aligned}$$

Jetenergie-Auflösung



realistisches ILC Kalorimeter (ILD)

PFA

ideales traditionelles Kalorimeter

„Confusion“: falsche Zuordnung zwischen Spuren und Kalorimeter, dominiert PFA Auflösung bei großen Energien

- PFA ist Kalorimeter allein deutlich überlegen
- korrekte Zuordnung zwischen Spuren und Kalorimeter sehr wichtig!
⇒ “bildgebendes” Kalorimeter

Generelle Überlegungen

> Sandwich-Kalorimeter

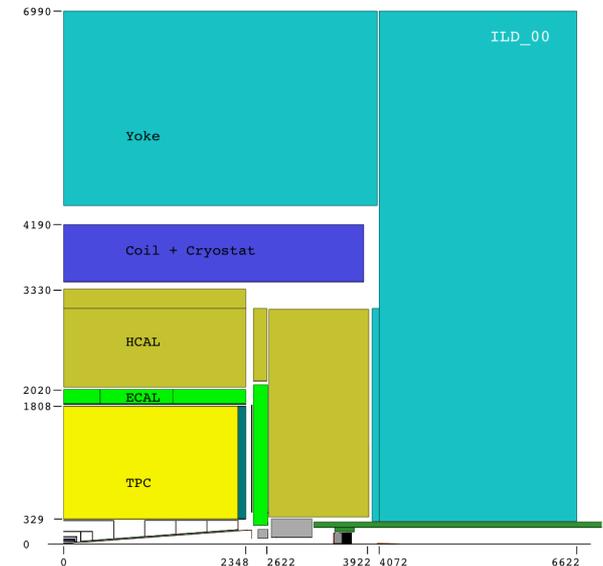
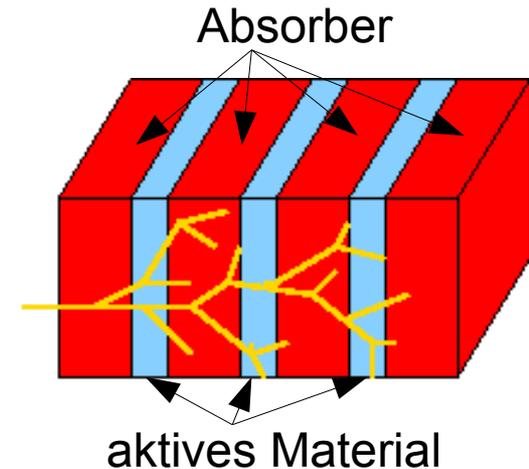
- Absorber: möglichst dichtes Material, kleine Strahlungslänge X_0 bzw. Wechselwirkungslänge λ_1
- aktive Lagen: “zählen” die Teilchen im Schauer

> ECAL:

- relativ klein, daher teurere Materialien möglich
- Absorber: Wolfram
- verschiedene Konzepte für die aktiven Lagen

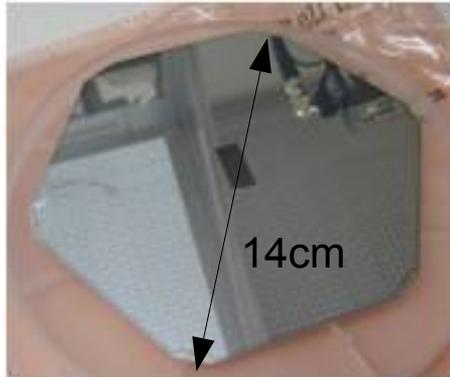
> HCAL:

- relativ großes Volumen, aber Kosten für den gesamten Detektor beinhalten auch den Magneten:
 - kompaktes Kalorimeter (teureres Material)
→ kleinerer (billigerer) Magnet
 - größeres Kalorimeter (billigeres Material)
→ größerer (teurerer) Magnet
- Basis: Stahl als Absorber, Wolfram als mögliche Alternative
- verschiedene Konzepte für die aktiven Lagen



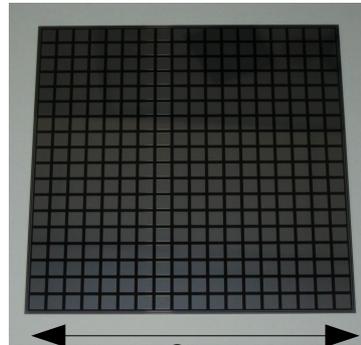
Elektromagnetisches Kalorimeter: aktives Material

Silizium



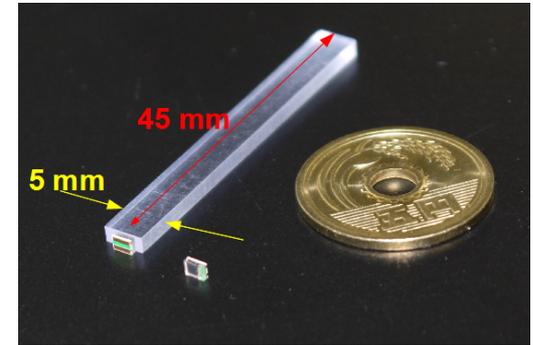
1024 pixel

Silizium

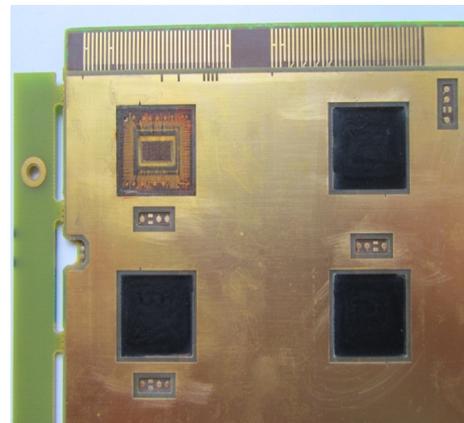


256 pixel

Szintillator



SiD



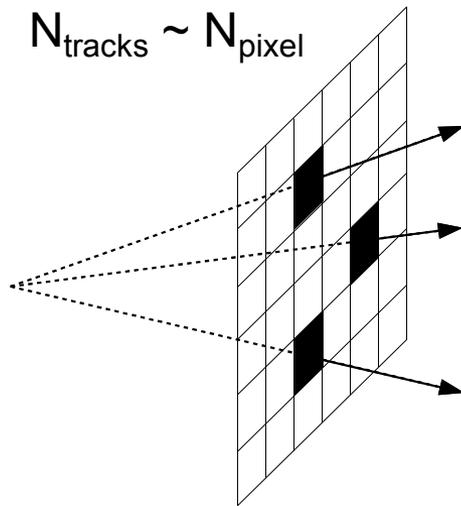
ILD



ILD
Alternative

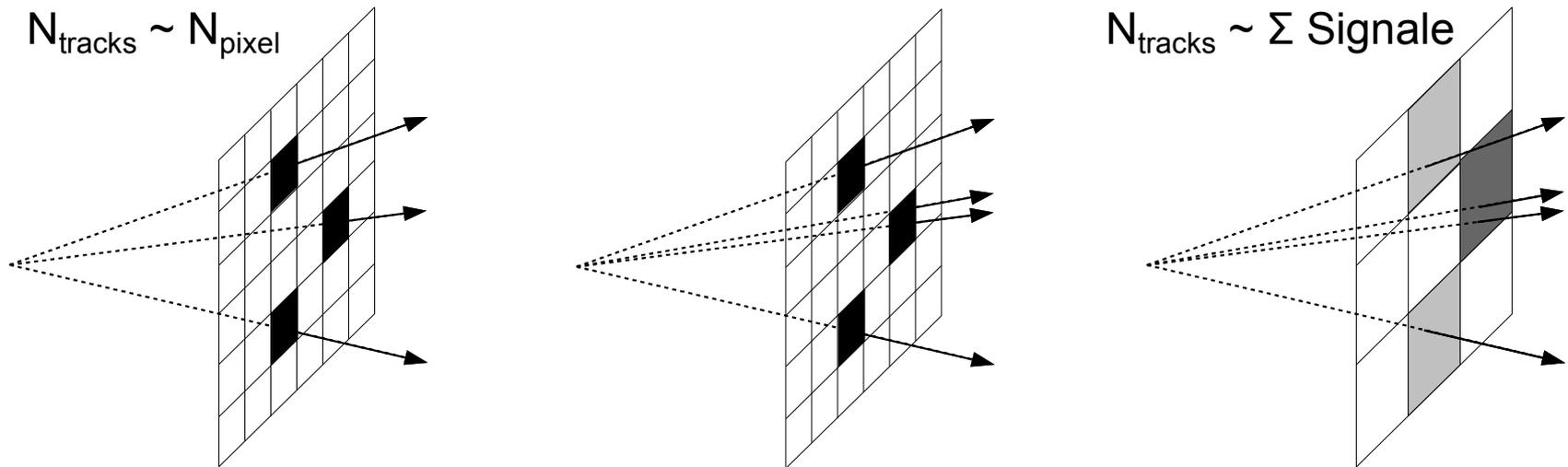
Hadronisches Kalorimeter: Konzepte

- > Digitales HCAL: zähle Anzahl von getroffenen Pixeln (aus/an)



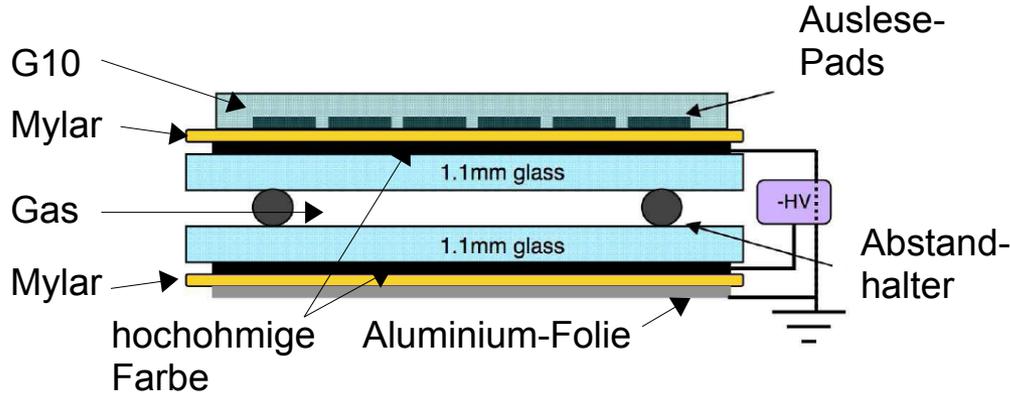
Hadronisches Kalorimeter: Konzepte

- > Digitales HCAL: zähle Anzahl von getroffenen Pixeln (aus/an)
- > Semi-Digitales HCAL: zusätzliche Information über Menge der Teilchen in einem Pixel durch 3 Schwellen (aus/normal/groß/sehr groß)
- > Analoges HCAL: summiere Signale in größeren Zellen

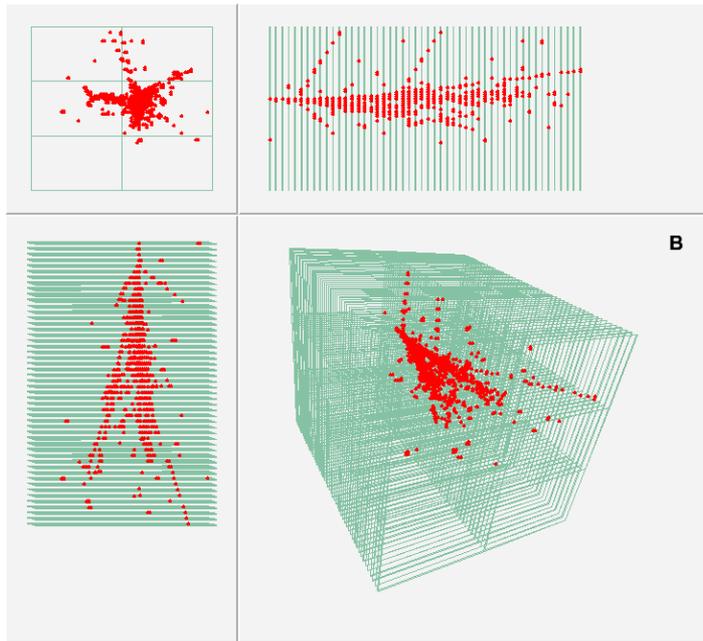


- > alle 3 Konzepte werden verfolgt und haben die prinzipielle Realisierbarkeit in “Physik-Prototypen” gezeigt

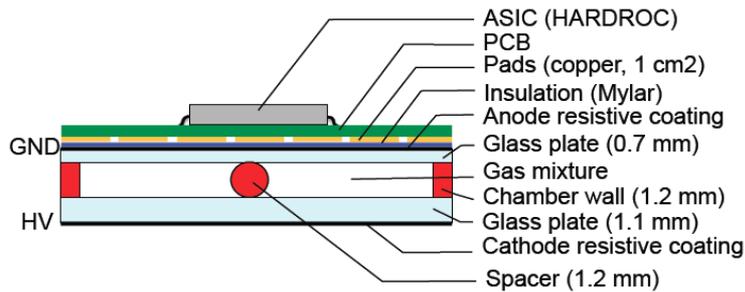
Digitales HCAL



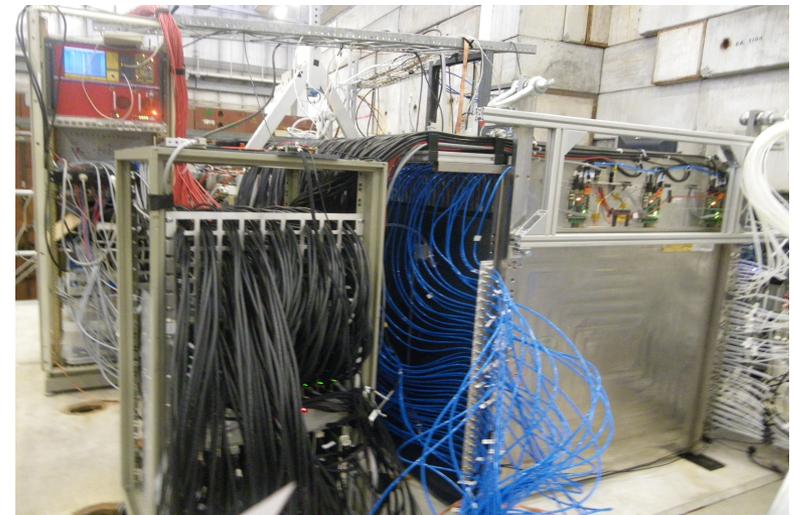
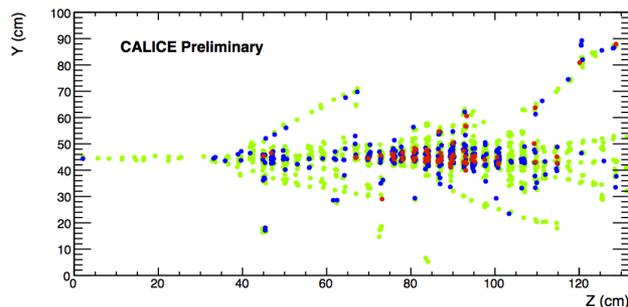
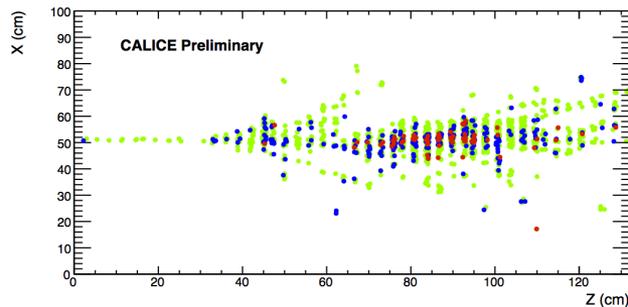
- > Resistive Plate Chamber: lokale Gasverstärkung zwischen 2 Glasplatten unter Hochspannung
- > $1 \times 1 \text{ cm}^2$ Auslese-Pads
- > Auslese: 1 bit (digital)
- > **SiD Basisdesign**



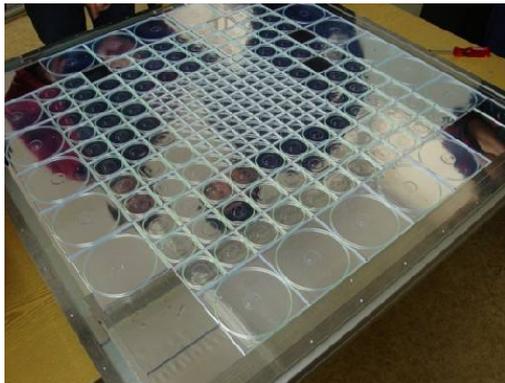
Semi-Digitales HCAL



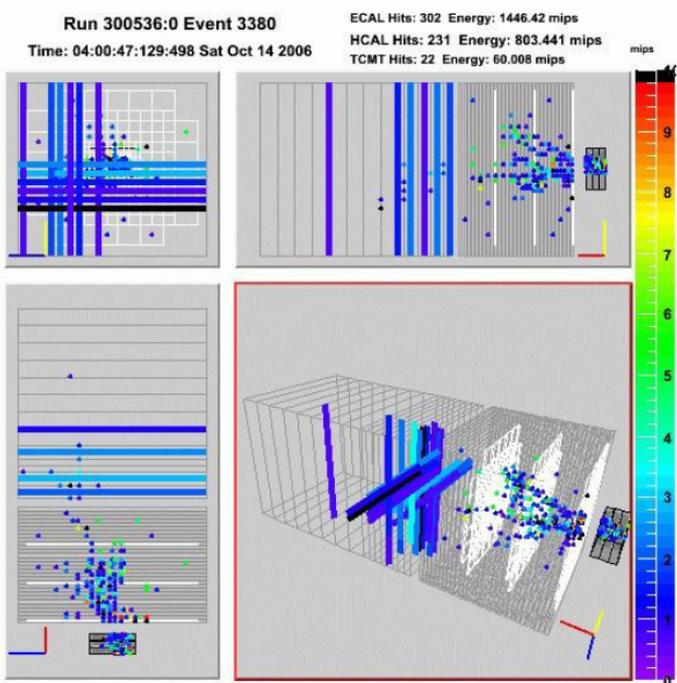
- Resistive Plate Chamber: lokale Gasverstärkung zwischen 2 Glasplatten unter Hochspannung
- 1*1 cm² Auslese-Pads
- Auslese: 2 bit (semi-digital)
- **SiD / ILD Alternative**



Analoges HCAL

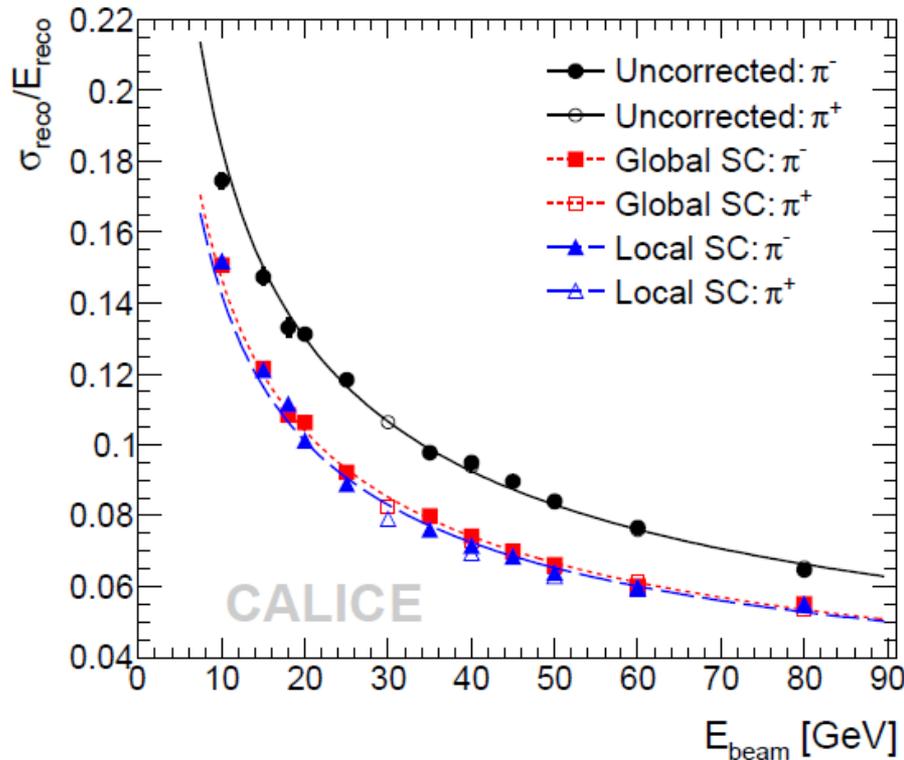


- Szintillator-Kacheln mit Wellenlängenschiebern, von SiPMs ausgelesen
- 3*3 cm² - 12*12 cm² Kacheln
- Auslese: 12 bit (analog)
- **ILD Basisdesign**



- > Teststrahlen liefern nur einzelne Teilchen, keine Jets
⇒ keine direkte Überprüfung der Energieauflösung für Jets möglich
- > trotzdem liefern Messungen mit Teststrahlen wichtige Informationen:
 - praktische Erfahrung mit einem (kleinen) Detektor
 - Kalibration des Detektors
 - **Energieauflösung für einzelne Hadronen** ist eine Komponente der Jet-Energieauflösung
 - **Vergleich von Hadronschauern in Daten und Simulation** (Geant4)
 - ⇒ Untersuchungen der Schauer-Substruktur
 - ⇒ Tests des Particle-Flow-Algorithmus mit überlagerten Ereignissen
 - ⇒ realistische Jet-Energieauflösung in der Simulation

Energieauflösung für einzelne Hadronen

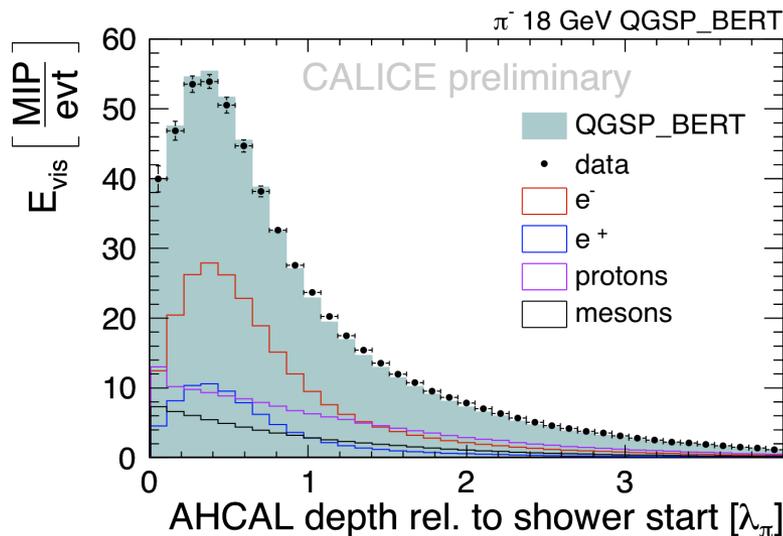
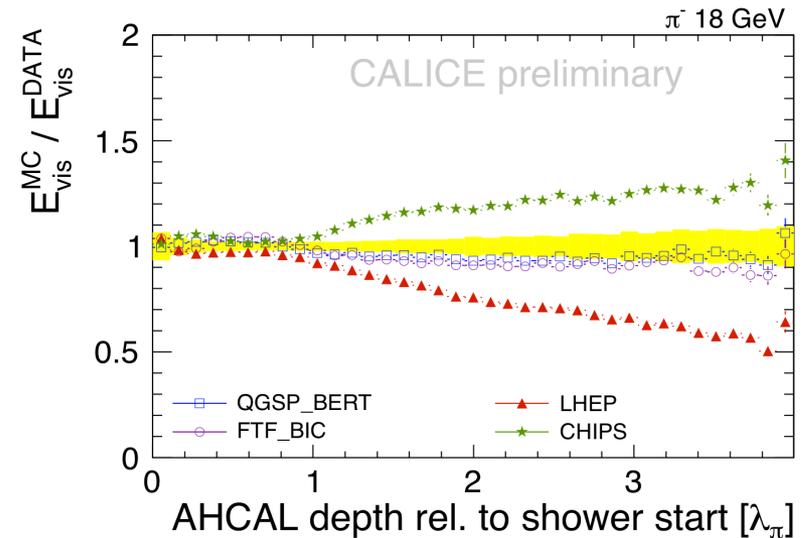
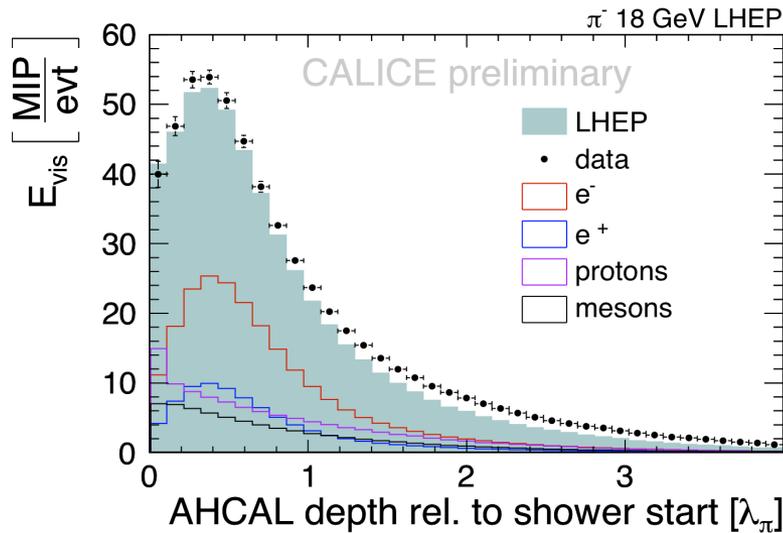


- > Software-Kompensation (SC):
 - nicht-kompensierende Kalorimeter reagieren unterschiedlich auf elektromagnetische und hadronische Schauer
 - hadronische Schauer haben elektromagnetische Subschauer
 - verwende unterschiedliche Gewichte in der Rekonstruktion für elektromagnetischen und hadronische Subschauer

> Messung der Energieauflösung für geladene Pionen bei unterschiedlichen Strahlenergien mit dem AHCAL Physikprototypen

> $45\%/\sqrt{E}$ für den stochastischen Term erreichbar, konstanter Term 1.8%

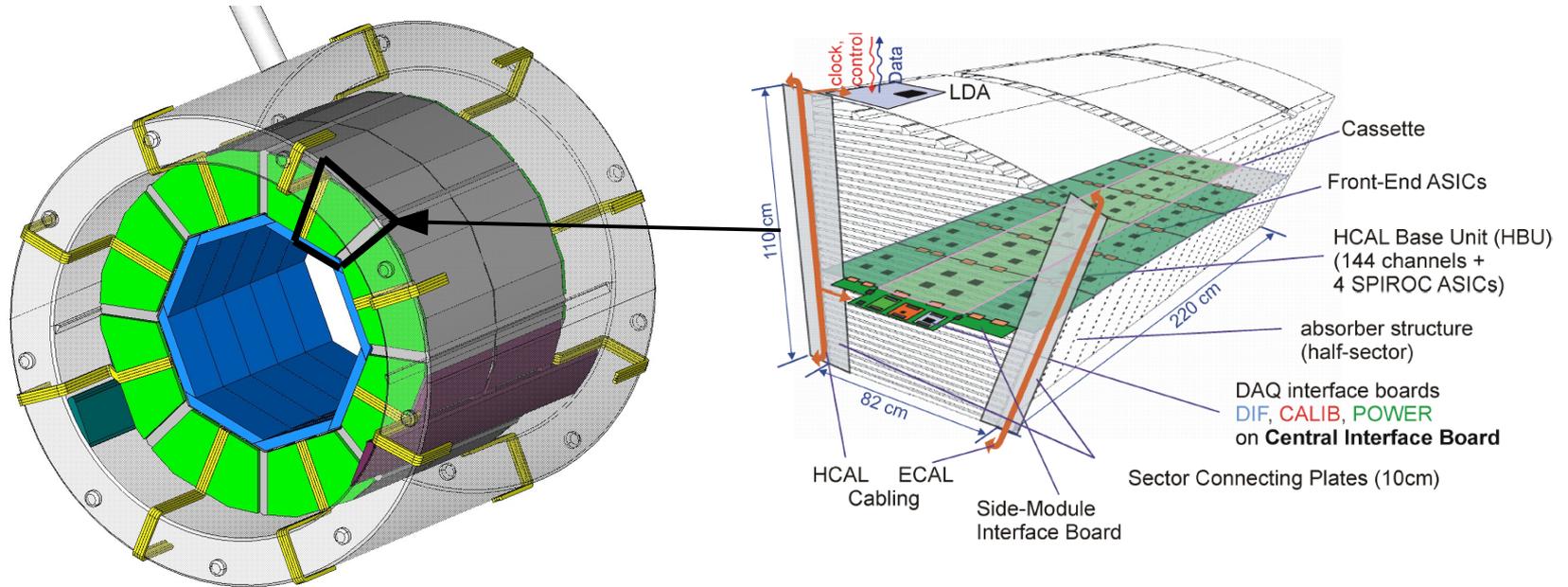
Vergleich von Hadronschauern in Daten und Simulation



- > Vergleich der longitudinalen Schauerentwicklung für 18 GeV π^-
- > unterschiedliche Modelle, z.B.:
 - LHEP: Parametrisierung alter Messungen
 - QGSP_BERT: Kombination von Physik-motivierten Modellen
- > gute Beschreibung durch aktuelle Modelle

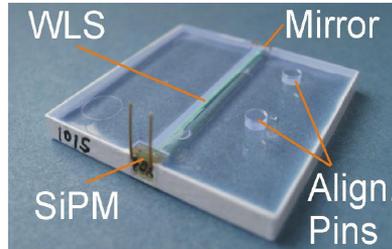
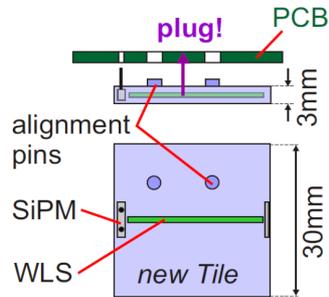
AHCAL: Vom Physics zum Engineering Prototyp

- Ziel: Entwicklung eines Prototyps, der so als Teil des Kalorimeters eines ILC-Detektors gebaut werden könnte („engineering prototype“)

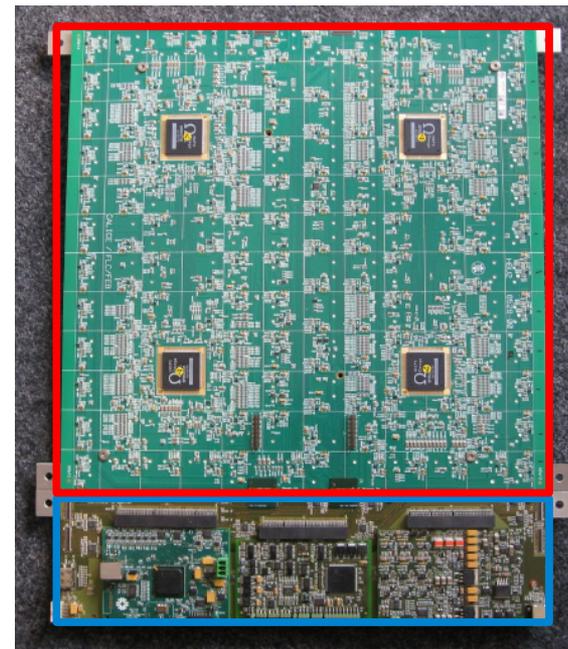


- Geometrie: oktagonale Form, 2 Ringe entlang der Strahlachse
- Barrel + Endcaps: 8 Millionen Auslesekanäle
- möglichst kompakt, wenige Detektorbereiche ohne aktive Lagen:
 - in die Lagen integrierte Elektronik
 - keine aktive Kühlung

AHCAL: Auf dem Weg zum Engineering Prototyp



- > $3 \times 3 \times 0.3 \text{ cm}^3$ Szintillator-Kacheln mit Wellenlängenschieber, ausgelesen mit SiPMs
- > **H**CAL **B**ase **U**nit: Basis-Einheit, $36 \times 36 \text{ cm}^2$, 144 Kacheln, 4 Auslese-Chips
- > **C**entral **I**nterface **B**oard: Spannungsversorgung, Auslese und Kalibration für eine Lage (bis zu 18 HBUs)

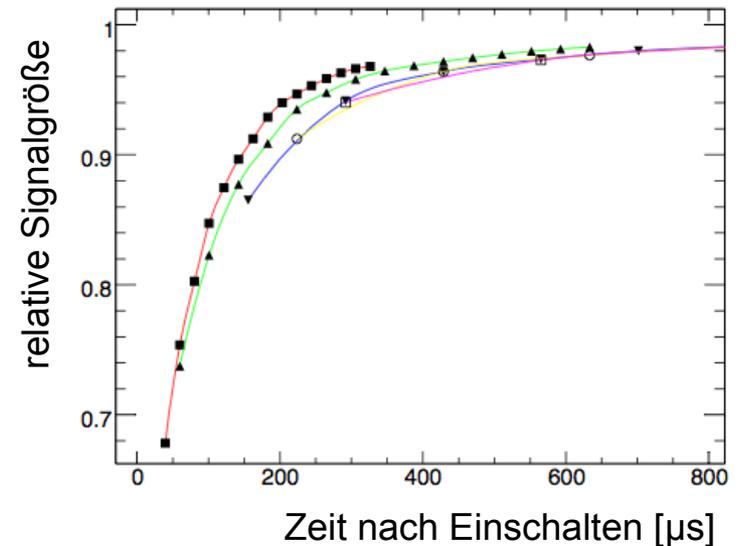
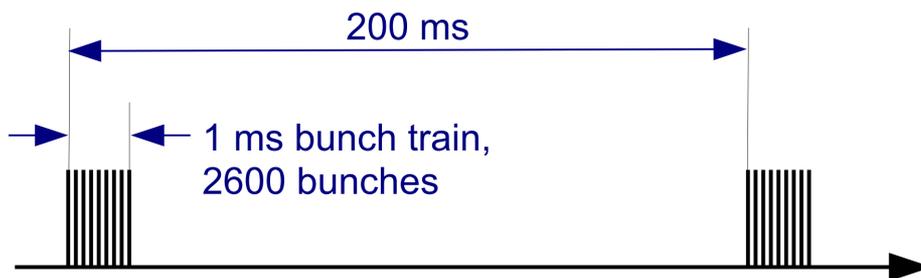


HBU

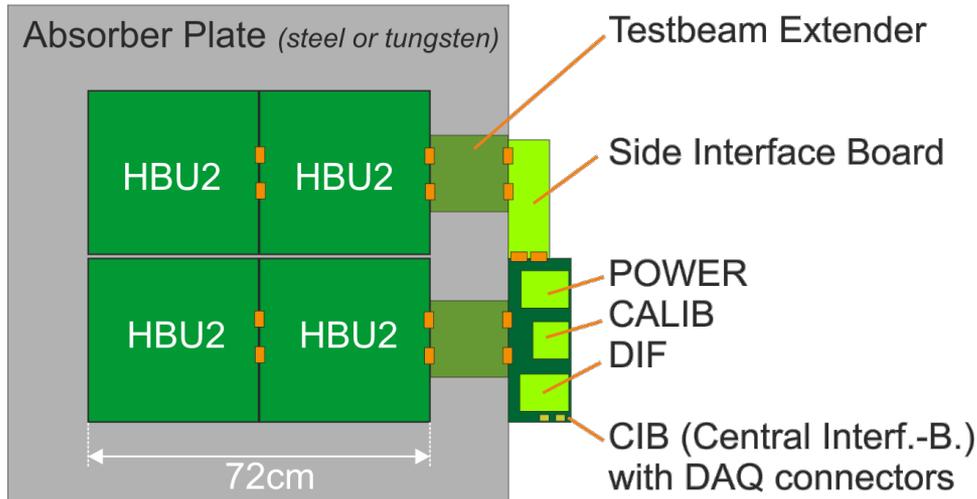
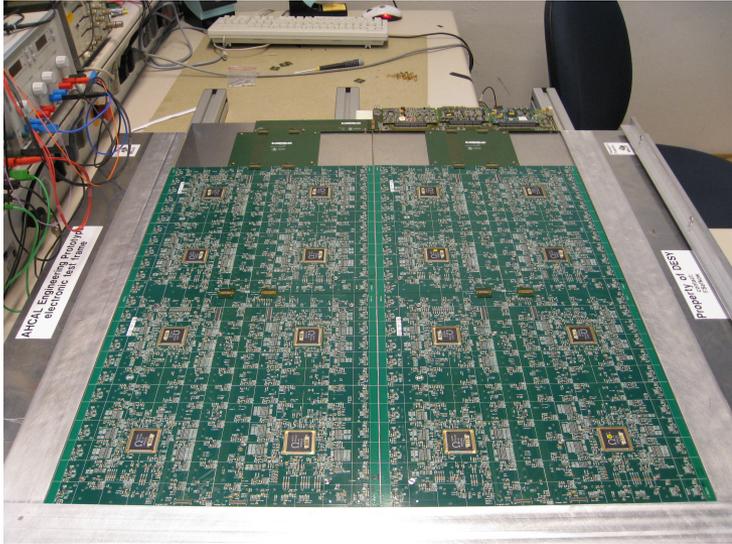
CIB

AHCAL: Optimierung des Energieverbrauchs

- Ziel: Bau eines Kalorimeters ohne aktive Kühlung
- Wärme der im Detektor integrierten Elektronik kann nicht einfach abgeführt werden
- energiesparende Elektronik: maximaler Verbrauch 40 $\mu\text{W}/\text{Kanal}$
 - Berücksichtigung beim Design der Auslese-Elektronik, z.B. bei den im HBU integrierten Auslese-Chips
 - Ausnutzen der geplanten Zeitstruktur der Strahlen beim ILC („power pulsing“)

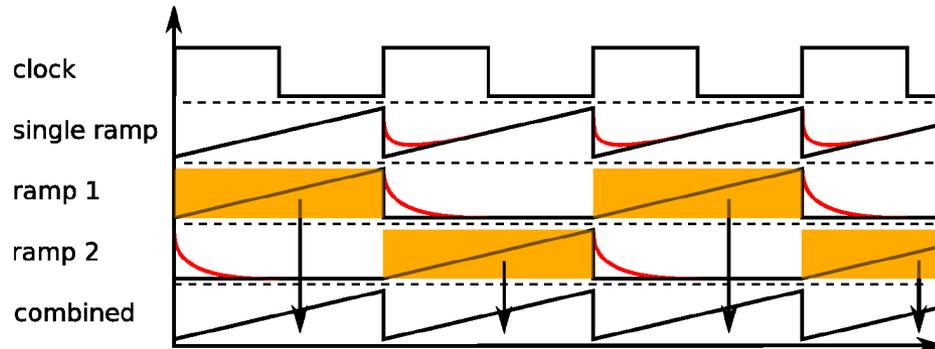


AHCAL: 4 HBU Lage

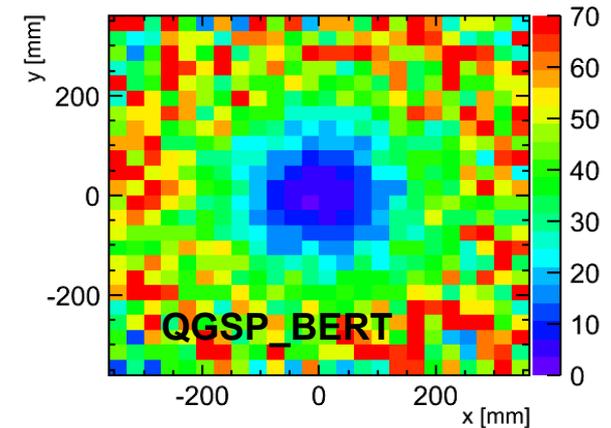


- > gegenwärtige Konfiguration des Engineering Prototyps
- > kleinste Konfiguration, um Zusammenspiel von mehreren HBUs hinter- und nebeneinander in einer Lage zu testen
- > 576 Auslesekanäle: erste Schritte zu automatisierten Prozeduren notwendig
- > Messungen im Elektronen-Strahl am DESY und Pionen-Strahl am CERN
 - praktische Erfahrung sammeln
 - Untersuchung der **zeitlichen Entwicklung von Hadronschauern**

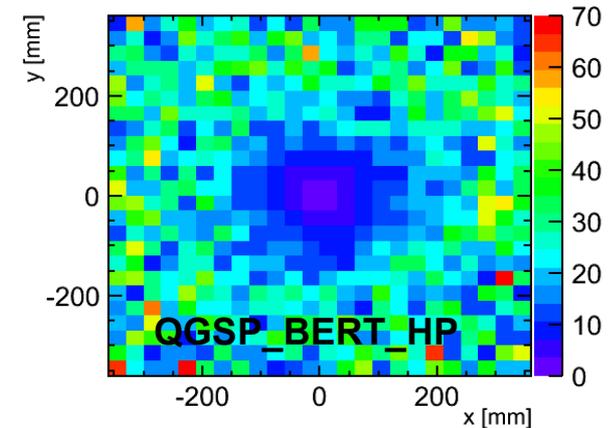
AHCAL: Zeit-Messung



mittlerer Zeitpunkt [ns]

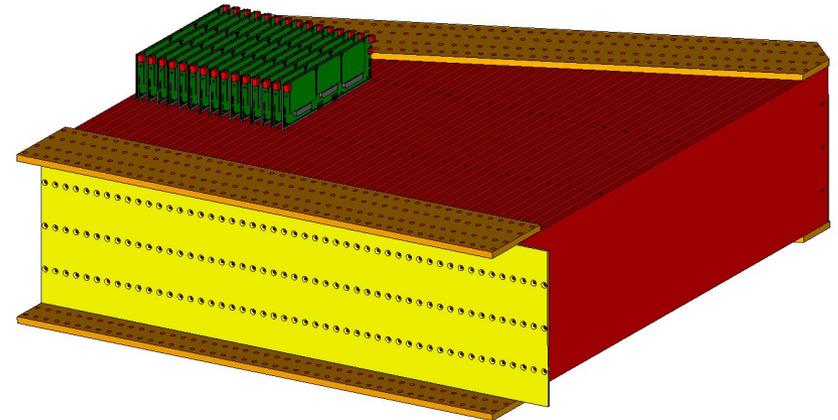


- > Messprinzip: **Time-to-Digital Converter**
- > Zeitpunkt der Energiedeposition kann bei der Zuordnung zu Spuren helfen und Untergrund unterdrücken
- > Hadronschauer werden durch verschiedene Prozesse hervorgerufen (EM Komponente, Streuung an und in Kernen, Anregungen von Kernen), die unterschiedlich schnell ablaufen \Rightarrow Zeitmessung bringt Erkenntnisse zur Schauerzusammensetzung



Zusammenfassung und Ausblick

- Detektoren für den ILC erfordern spannende neue Konzepte
 - Optimierung für Particle Flow Algorithmen
- bildgebende Kalorimeter
 - essentiell für exzellente Jet-Energie-Messung
 - zuvor unerreichte Granularität
 - Prototypen erlauben schon jetzt detailliertere Untersuchungen hadronischer Schauer
 - technologische Herausforderung u.a. durch die riesige Anzahl Auslesekanäle
- nächste Schritte für das AHCAL:
 - 2013: mehrlagiger Prototyp
 - 201?: 1m³ Engineering Prototyp
 - 20??: ILC und ILD



Am AHCAL beteiligte Institute

Google



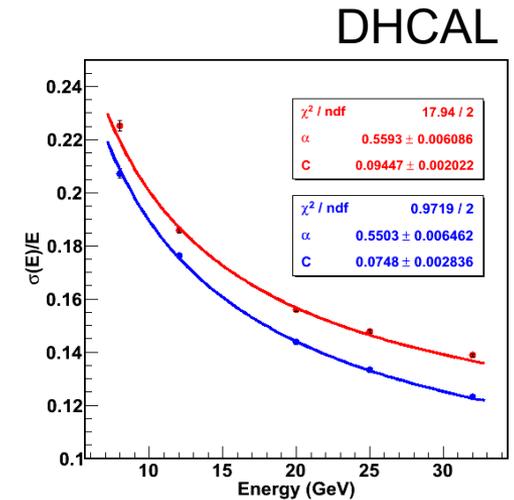
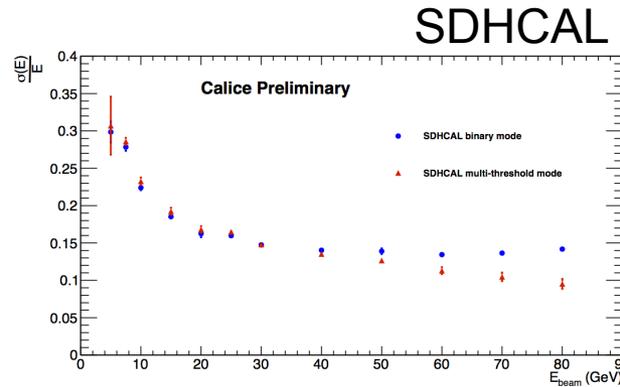
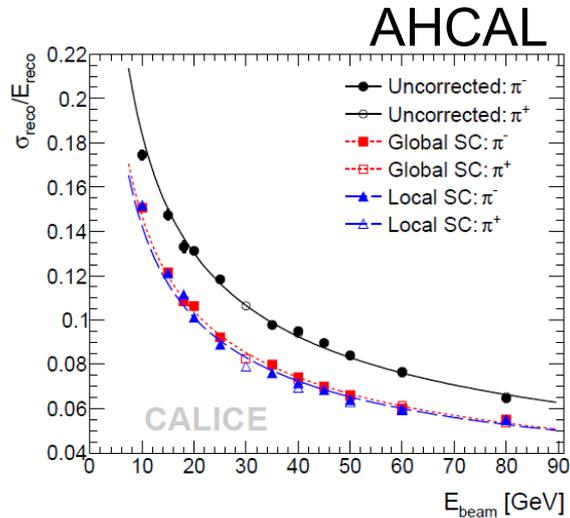
The AHCAL in CALICE

- DESY: steel structures, electronics and integration, test beam support, software, project management
- Hamburg: SiPMs and tile optimisation, test beam and commissioning w/ DESY
- Heidelberg: high gain ASICs, SiPM mass tests and characterisation
- MPI Munich: SiPM development, tile optimisation, cassettes, tungsten timing
- Wuppertal: embedded LED electronics and test stands
- Mainz: DAQ central components and AHCAL data concentrator
- Omega@LLR: SPIROC ASICs
- CERN: tungsten absorber, testbeam and Geant4 support
- ITEP: tiles and SiPMs, test bench characterisation
- Dubna: power supplies and distribution
- Prague: fibre based LED system
- NIU: alternative SiPM coupling, DAQ interface
- Bergen: calibration studies
- Matsumoto, Japan: scintillator strip alternative, photosensors





Energieauflösung für einzelne Hadronen



Software Compensation verbessert
stochastischen Term:
 $58\%/\sqrt{E} \rightarrow 45\%/\sqrt{E}$

Messung mit
1 or **3** Schwellen

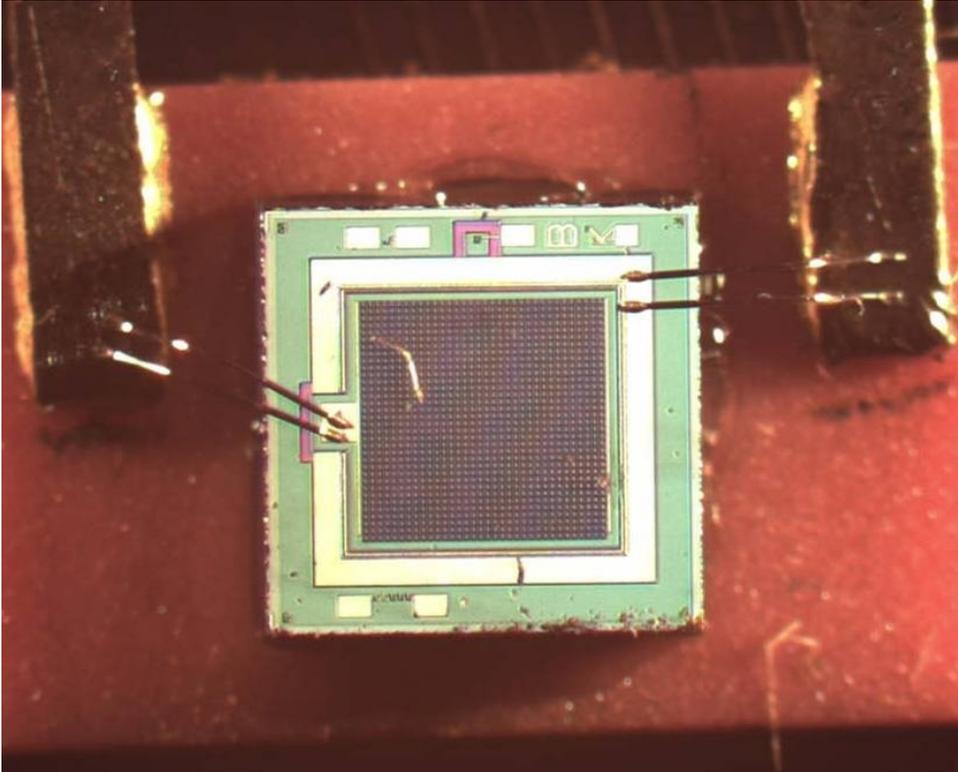
3 Schwellen verbessern
Auflösung bei großen
Energien

Nicht-Linearität korrigiert

mit und **ohne** Schnitt
auf Containment

Stochastischer
Term: $55\%/\sqrt{E}$

Nicht-Linearität nicht
korrigiert



- > in Pixel unterteilt
- > im Geiger-Modus betriebene Avalanche-Photodioden
- > kann einzelne Photonen nachweisen
- > Verstärkung ca. 10^6
- > kann in Magnetfeldern betrieben werden