

# Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern II

PD Dr. Oliver Kortner

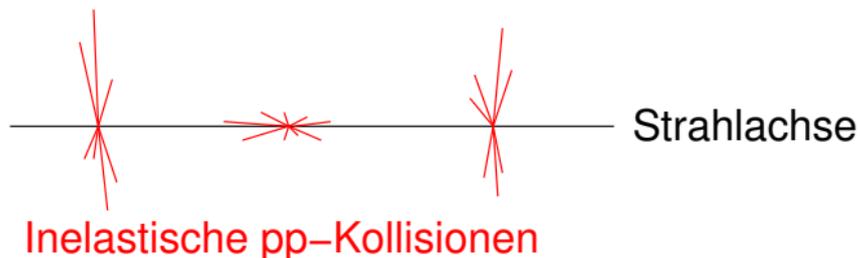
15.07.2022

$m_{e^\pm} \ll m_{\pi/\mu} \Rightarrow$  Energieverlust im Innendetektor nicht vernachlässigbar!

Zwei Effekte müssen berücksichtigt werden:

- Kontinuierlicher Energieverlust durch Synchrotronstrahlung.
- Diskreter, großer Energieverlust durch Bremsstrahlung nach Streuung an Atomkernen des Detektormaterials.

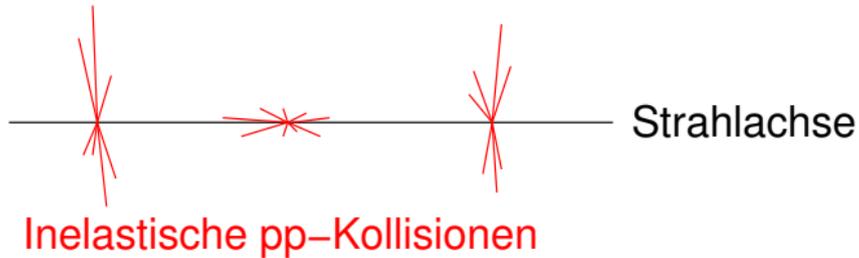
**Übliche Vorgehensweise.** Wenn Spuren, die mit dem Standardalgorithmus für Pionen rekonstruiert wurden, einem Cluster von Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter zugeordnet werden kann, werden diese Spuren nochmals unter der Annahme rekonstruiert, sie seien Elektronenspuren. Dabei werden bei der Treffersuche und im Spurmodell der kontinuierlichen und der diskreten Energieverlust berücksichtigt.



Position einer  $pp$ -Kollision: Primärvertexkandidat.

Bestimmung eines Primärvertexkandidaten

- Aufsammeln der rekonstruierten Teilchenspuren, die sich entlang der Strahlachse an einem bestimmten Punkt häufen.
- Bestimmung der genauen Vertexposition über die Methode der kleinsten Quadrate für den Abstand der Spuren vom Vertex.



## Auswahl des Primärvertex

In inelastischen  $pp$ -Kollisionen werden üblicherweise Spuren in kleinem Winkel zur Strahlachse erzeugt. Daher ist in diesen Kollisionen die Summe  $\Sigma$  der Transversalimpulsbeträge der rekonstruierten Teilchenspuren klein. Anders ist dies, wenn in einer Kollision ein schweres Teilchen erzeugt wurde. Die Transversalimpulse der Zerfallsprodukte dieses Teilchens sind dann groß. Man wählt daher als Primärvertex üblicherweise den Primärvertexkandidaten mit maximalen  $\Sigma$  aus.

## Vereinfacht beschrieben

$e^\pm$  = Innendetektor, die einem Cluster von Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter zugeordnet werden können.

## Eigenschaften des Clusters von Energiedepositionen

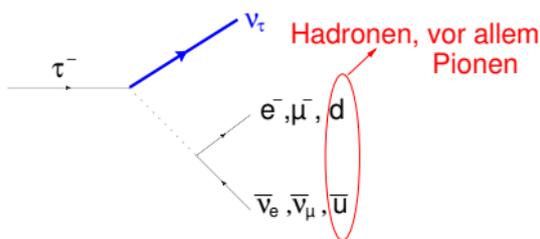
- Laterale Ausdehnung im Einklang mit Molièreradius.
- Longitudinale Ausdehnung auf das elektromagnetische Kalorimeter beschränkt und entsprechend der Länge eines elektromagnetischen Schauers der im Kalorimeter deponierten Energie.

## Impulsbestimmung

- $\hat{p}$ , Flugrichtung des Elektrons bzw. Positrons, gleich der Richtung der Elektronenspur am Primärvertex.
- $E$ , Elektronenenergie, gleich der Energie es im Kalorimeter gemessenen Schauers. Grund: Energiemessung ( $\propto \frac{1}{\sqrt{E}}$ ) genauer als Impulsmessung im Innendetektor ( $\propto E$ ).

$\mu^\pm$  = Innendetektorspur, die sich bis ins Myonsystem erstreckt.

**Forderung.** In den Kalorimetern im Bereich des Myons deponierte Energie klein, das Myonen nur wenig Energie in Materie verlieren.



- $\nu_\tau$  unsichtbar.  $\Rightarrow E_\tau$  nicht messbar!

- Leptonischer Zerfall:

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \quad (18\%),$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \quad (17\%).$$

$\nu_\tau, \bar{\nu}_{e/\mu}$  unsichtbar.

$e^-, \mu^-$  sichtbar.

Zerfall über Ereignistopologie erkennbar.

- Sogenannte hadronische  $\tau$ -Zerfälle:

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 + \nu_\tau \quad (25\%),$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + 2\pi^0 + \nu_\tau \quad (9\%).$$

1 Pionspur, stark kollimierter Jet aus Kalorimeterclustern.

$$\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \nu_\tau \quad (9\%),$$

$$\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \pi^0 + \nu_\tau \quad (5\%).$$

3 Pionspuren (eine mit entgegengesetzter Ladung zu den anderen),  
stark kollimierter Jet aus Kalorimeterclustern.

- Bei den von uns betrachteten hohen Schwerpunktsenergien stoßen die Partonen der kollidierenden Protonen aneinander.
- $\parallel$  indiziere die Impulskomponente parallel zur Protonenstrahlachse,  $\perp$  die Impulskomponente senkrecht dazu. Dann gilt für die Summe der beiden Partonenimpulse

$$\begin{aligned}p_{1,\parallel} + p_{2,\parallel} &= x_1 \cdot p_{Proton} - x_2 \cdot p_{Proton} = (x_1 - x_2) \cdot \sqrt{s} \\p_{1,\perp} + p_{2,\perp} &= 0.\end{aligned}$$

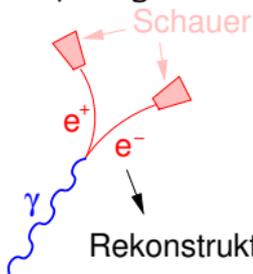
D.h. die Longitudinalimpulssumme schwankt von  $pp$ -Kollision zu  $p\bar{p}$ -Kollision, doch Transversalimpulssumme verschwindet immer.

- Hieraus ergibt sich, dass die Summe der Transversalimpulse aller Teilchen im Endzustand einer  $pp$ -Kollision auch verschwindet.
- Wenn Neutrinos (oder andere schwach wechselwirkende Teilchen) im Endzustand auftreten, kann sich dies in einer nichtverschwindenden Transversalimpulssumme äußern. Man spricht dann von **fehlendem Transversalimpuls** oder **fehlender Transversalenergie**.

Idealerweise  $\gamma$  = Cluster von Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter, die keiner Innendetektorspur zugeordnet werden kann.

- Eigenschaften des Clusters wie bei Elektronen und Positronen.
- Hauptuntergrund  $\pi \rightarrow \gamma\gamma$  unterdrückbar durch Forderung, dass der Photonenkandidat nicht innerhalb eines Jets liegt.
- Nicht vernachlässigbar bei Innendetektoren mit Halbleiterdetektoren: Konversion  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ .

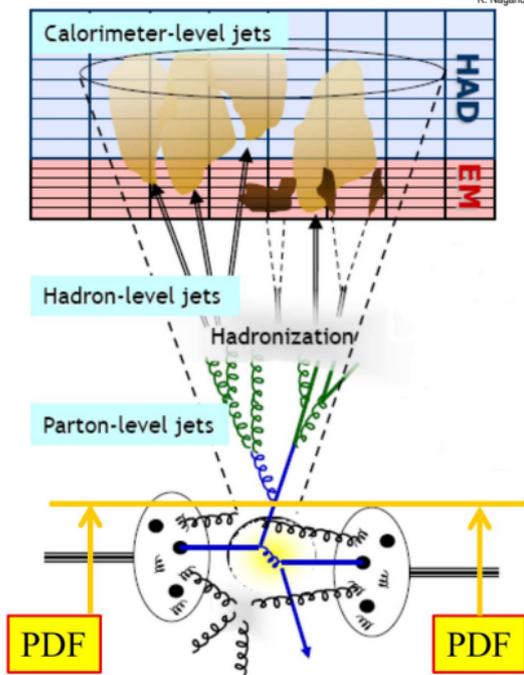
Topologie:



Rekonstruktion dieser Spuren nur möglich, wenn man Treffer von außen nach innen im Innendetektor sucht.

$e^+$ - und  $e^-$ -Spuren müssen einen gemeinsamen Vertex haben und als Elektronen und Positronen identifiziert worden sein.

K. Nagano



Quarks und Gluonen, die ursprünglich erzeugt werden, nicht direkt sichtbar, sondern die Bündel an Hadronen, die aus den ursprünglichen Quarks und Gluonen entstanden sind, die sogenannten **Jets**.

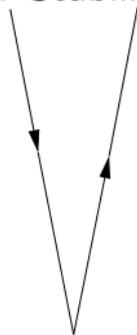
## Jetrekonstruktion auf verschiedenen Ebenen

- Theorie (auf Generatorebene): **Partonenjets**.
- Simulation: Jets aus den erzeugten Hadronen, sogenannte **Teilchenjets**.
- Detektor, Experiment: Jets aus den Signalen, die von den Hadronen erzeugt werden; z.B. Energiedepositionen in den Kalorimetern oder die gemessenen Teilchenspuren.

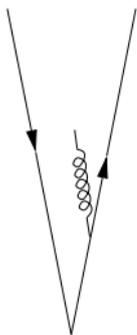
**Ziel:** Zuordnung der Detektorjets zu Partonenjets. Zuordnung der Partonenjets zu den ursprünglichen Quarks und Gluonen.

# Anforderungen an die Jetrekonstruktion

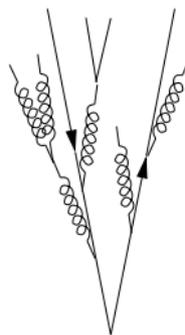
Ziel: Stabilität.



Partonen in führender  
Ordnung Störungstheorie (LO)



Partonen in NLO

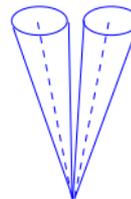
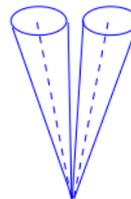
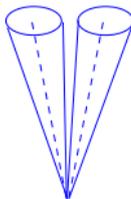
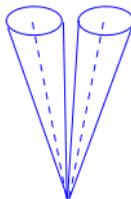


Partonenschauer

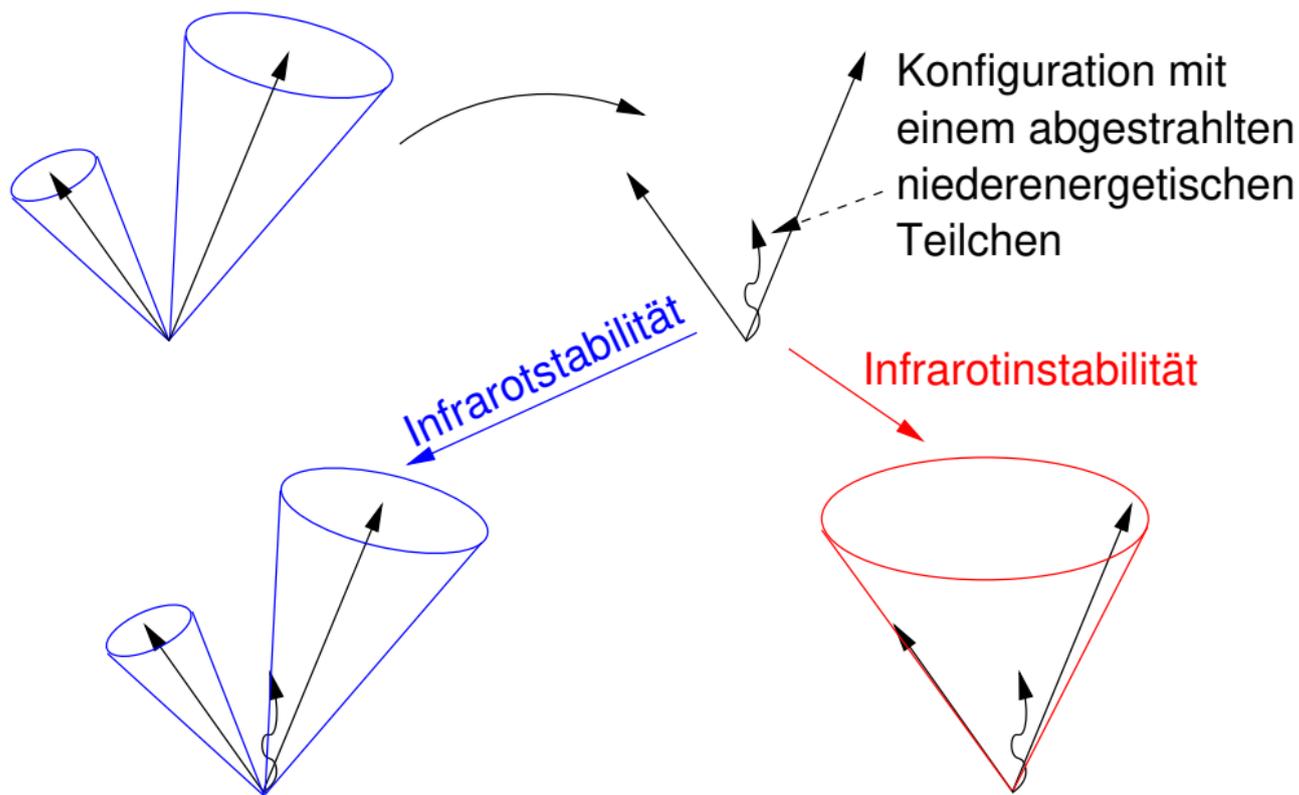


Hadronen

## Jets

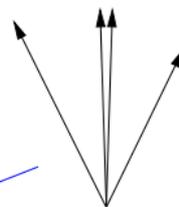
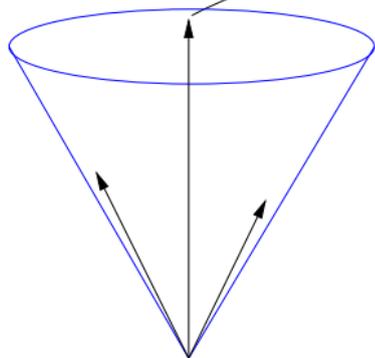


Die Definition eines Jets ist grundsätzlich mehrdeutig und hängt vom Jetalgorithmus ab. Wichtig ist, dass sich die Jetdefinition unter gewissen Änderungen der Topologie nicht ändert.

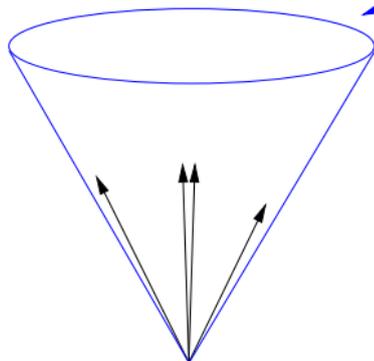


# Kollinearitätsstabilität

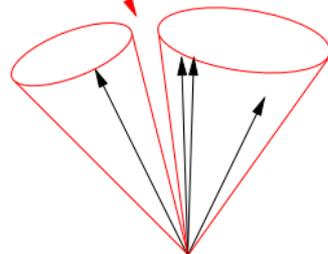
Ersetzen eines Teilchens durch  
zwei kollineare Teilchen



Kollinearitätsstabilität



Kollinearitätsinstabilität



**Ziel:** Unempfindlichkeit auf Detektoreigenschaften.

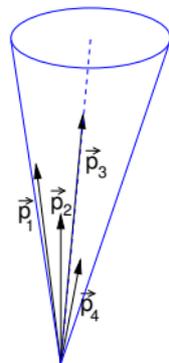
**Konkret**

- Unabhängigkeit der Jetrekonstruktionseffizienz von der Detektortechnologie.
- Möglichst kleiner Einfluss der Orts- und Energieauflösung des Detektors auf die Jetkinematik.
- Geringe Empfindlichkeit auf Detektorrauschen, insbesondere die Energieskala einer Jets. Die Jetenergie soll sich nicht verschieben, wenn sich das Rauschniveau des Detektors ändert.
- Geringe Empfindlichkeit auf die Anzahl der inelastischen Kollisionen in einem Ereignis.
- Geringe Empfindlichkeit auf Beiträge vom Protonenrest in einer harten Partonenkollision. Man spricht auch oft vom Beitrag des zugrunde liegenden Ereignisses.

**Weitere wichtige Eigenschaften:** Leichte Eichung der Jetenergiemessung; hohe Jetrekonstruktionseffizienz; Fähigkeit, benachbarte Jets zu trennen.

## Kegelalgorithmen

Suche nach Kegeln um einen Startpunkt, in dem sich die zu sammelnden Objekte befinden, z.B.



Ursprünglich weit verbreitet, da experimentell einfach umzusetzen.  
Schwierig, Infrarot- und Kollinearitätsstabilität zu erreichen.

## Clusterbildung durch sukzessive Rekombination

Idee, die Fragmentierung und Hadronisierung rückgängig zu machen.  
Verwendung sogenannter Protojets, die durch sukzessive Paarung zu einem Jet kombiniert werden.

- Definition eines Maßes  $d_{ab}$  für den Abstand zweier „Teilchen“  $a$  und  $b$ .
- Kombinationsalgorithmus
  - Berechnung von  $d_{ab}$  für alle Teilchenpaare zur Bestimmung des minimalen Abstands  $d_{min}$ .
  - Wenn  $d_{min}$  unter einem gewählten Schwellenwert  $d_S$  fällt, Kombination von  $a$  und  $b$  zu einem Teilchen.
  - Wenn  $d_{min} > d_S$  ist, ist  $a$  ein Jet und wird aus der Liste der zu paarenden Teilchen entfernt.
  - Wiederholung des Verfahrens, bis  $d_{ab} > d_S$  für alle Paare  $(a, b)$  ist.

Das Abstandsmaß bestimmt die geometrische Gestalt des Jets.

# Der Anti- $k_T$ -Algorithmus

Am LHC verwendeter Algorithmus: **Anti- $k_T$ -Algorithmus**.

$p_{T,a}$ : Transversalimpuls des Teilchens  $a$ .

$d_{ab}$

$$d_{ab} := \min \left( \frac{1}{p_{T,a}}, \frac{1}{p_{T,b}} \right) \cdot \frac{\Delta_{ab}^2}{R^2}. \quad \Delta_{ab}^2 := (y_a - y_b)^2 + (\phi_a - \phi_b)^2.$$

$R$ : gewählter Radiusparameter.  $y$ : Rapidität.  $\phi$ : Azimut.

$d_{a,B} := \frac{1}{p_{T,a}}$ : Maß für den Abstand zum Protonenstrahl, wird als  $d_S$  verwendet.

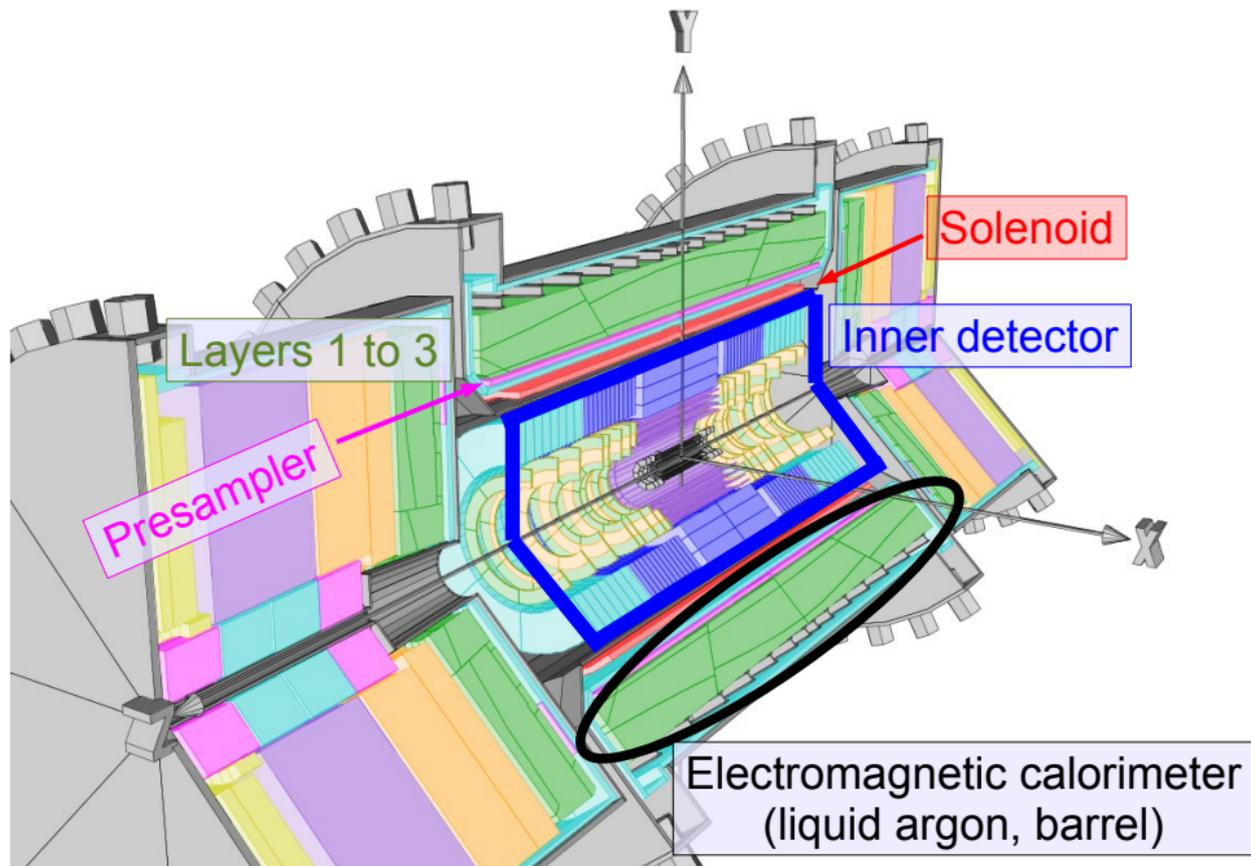
## Eigenschaften

- Zuerst Paarung hochenergetischer Teilchen, danach Paarung hochenergetischer Teilchen mit niederenergetischen Teilchen. Paarung zweier niederenergetischer Teilchen unterdrückt.
- Jets enthalten wenigstens ein hochenergetisches Teilchen.
- Jets ähneln Kegeljets.
- Algorithmus gewährleistet Infrarot- und Kollinearitätsstabilität und ist unempfindlich auf das zugrunde liegende Ereignis und die Anzahl der inelastischen  $pp$ -Kollisionen in einem Ereignis.

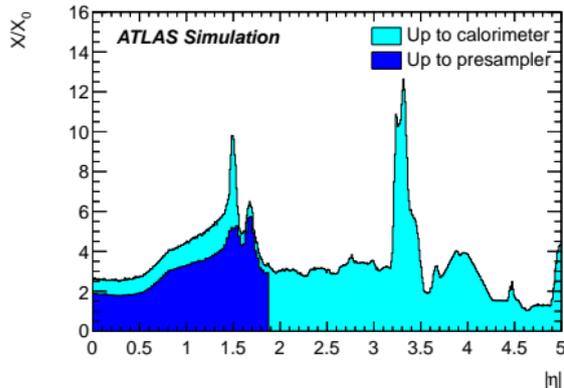
- Jets, die aus  $b$  – *Quarks* entstehen, enthalten wenigstens ein  $b$ -Hadron.
- $b$ -Hadronen sind langlebig. Sie zerfallen in einem gewissen Abstand vom Primärvertex innerhalb des Jets.
- Durch Rekonstruktion dieses Zerfallsvertex, des sogenannten Sekundärvertex, kann man  $b$ -Jets identifizieren.

- Das Verhalten der verschiedenen Rekonstruktions- und Identifikationsverfahren (Spurrekonstruktion, Kalorimeterclusterrekonstruktion, Elektronenidentifikation, Jetrekonstruktion usw.) muss mit Hilfe experimenteller Methoden überprüft werden.
- Beispiele solcher Größen:
  - Rekonstruktions- bzw. Identifikationseffizienz.
  - Fehlrekonstruktions- bzw. Fehlidentifikationswahrscheinlichkeit.
  - Energie- bzw. Impulsskala.
  - Enerige- bzw. Impulsauflösung.
- Im folgenden werden wir uns als Beispiel die Eichung der  $e/\gamma$ -Energieskala ansehen.

# Innendetektor und e.m. Kalorimeter zum $e/\gamma$ -Nachweis



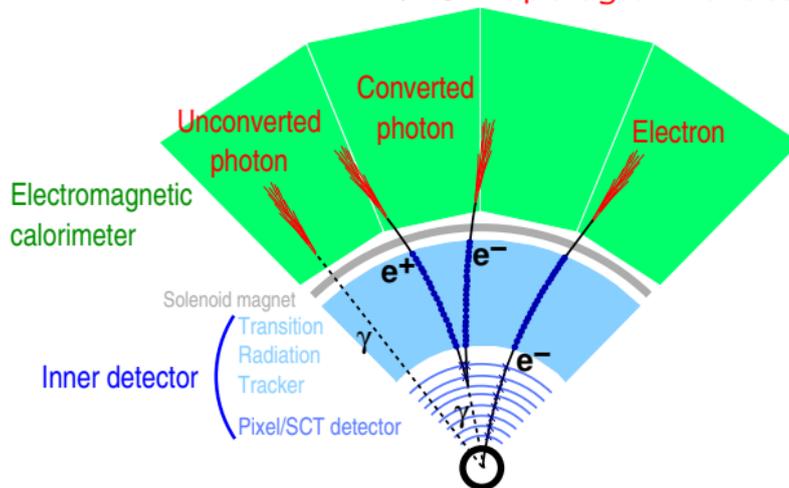
# Elektronen- und Photonenrekonstruktion



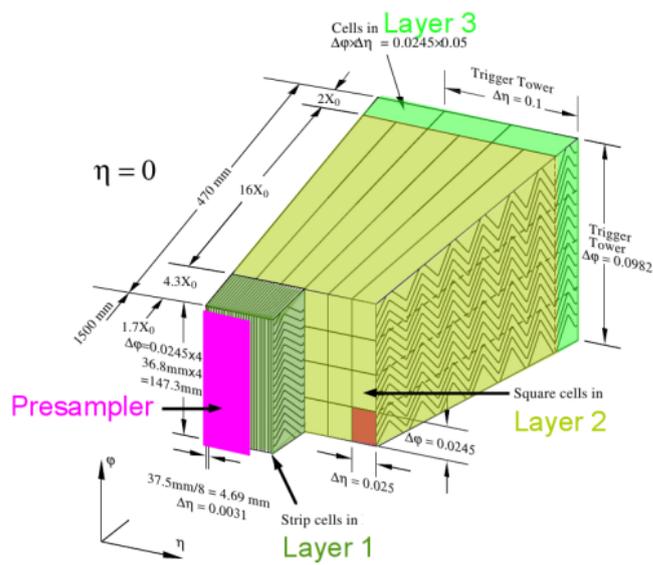
- Viel Material vor dem elektromagnetischen Kalorimeter ( $\sim 2X_0$ ).

⇒ Nichtvernachlässigbare Wahrscheinlichkeit für  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ -Konversionen vor dem Kalorimeter.

⇒ 3 Topologien zu betrachten:



# Eichung der $e/\gamma$ -Energieskala



1. Zelleneichung mit Testpulsen.

2. Abgleich der verschiedenen Kalorimeterlagen

- Kein Myonenergieverlust vor dem ECAL.
- ⇒ Abgleich der Lagen 1 bis 3 mit Myonen aus  $Z$ -Zerfällen.
- Relative Eichung des Presamplers mit Elektronen in Abhängigkeit der longitudinalen Schauerentwicklung im ECAL.

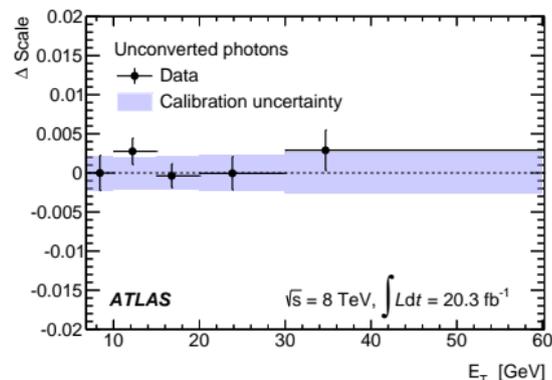
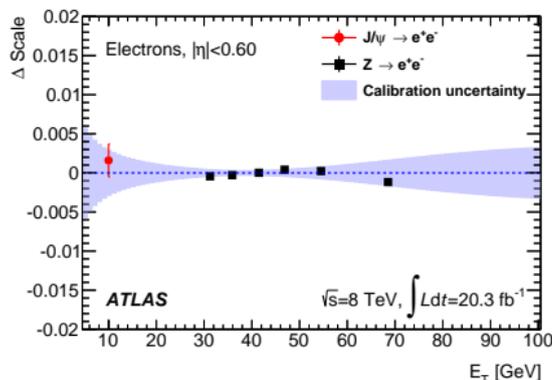
3. Bestimmung des Materialmenge vor dem elektromagn. Kalorimeter

- Messung des Material zwischen dem Presampler und der ersten Lage mit unkonvertierten  $\gamma$ s in Abhängigkeit der longitudinalen Schauerentwicklung.
- Gesamtmaterial vor dem Presampler wird aus dem Unterschied der longitudinalen Schauerprofile von Elektronen und unkonvertierten Photonen extrahiert.

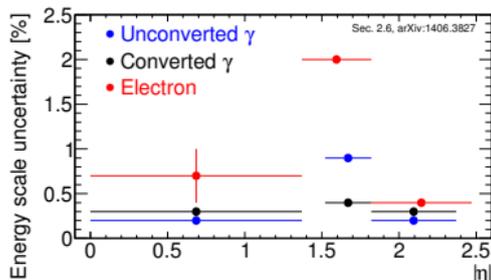
4. Globale Kalorimeterenergieanpassung mit  $Z \rightarrow e^+ e^-$ -Zerfällen.

## Überprüfung der $e/\gamma$ -Energieskala

- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  empfindlich auf die  $e^\pm$ -Energieskala für  $E_T \sim 7 \dots 35$  GeV.
- $Z \rightarrow \ell^+\ell^-\gamma$  empfindlich auf Photonenenergieskala für  $E_T \sim 30$  GeV.



## Gesamtunsicherheit der Energieskala



## Hauptquellen der Unsicherheiten

- Nichtlinearität der Energiemessung auf Zelleniveau:  $\sim 0.1\%$ .
- Abgleich der Kalorimeterlagen:  $\sim 0.1\%$ .
- Material vor dem Kalorimeter:  $0.1 \dots 0.3\%$ .