

# Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern II

PD Dr. Oliver Kortner

03.07.2020

## Rekonstruktion von $pp$ -Kollisionsereignissen

## Topologie eines $pp$ -Kollisionsereignisses



In einer Kollision erzeugbare Teilchen im Endzustand

## Leptonen

- Neutrinos: stabil, nur schwach geladen.  $\Rightarrow$  Keine Wechselwirkung, die zu einem messbaren elektrischen Signal in den Detektorkomponenten führt.
- Elektronen: stabil, elektrisch geladen.  $\Rightarrow$  Elektrische Signale in den Detektorkomponenten.
- Myonen: instabil, aber, da ultrarelativistisch, im Laborsystem so langlebig, dass sie nicht im Detektor zerfallen; elektrisch geladen.  $\Rightarrow$  Elektrische Signale in den Detektorkomponenten.
- $\tau$ -Leptonen: instabil.  $\Rightarrow$  Nur über ihre Zerfallsprodukte nachweisbar.

## Topologie eines $pp$ -Kollisionsereignisses

### Weitere in einer Kollision erzeugbare Teilchen im Endzustand

#### Hadronen

- In der elementaren Kollision entstehen zunächst Quarks und Gluonen. Wegen des Confinements sieht man nicht diese nicht, sondern sogenannte Jets aus Hadronen, die aus den Quarks und Gluonen entstanden sind.
- Besondere Rolle zweier Quarks:
  - b-Quarks bilden langlebige b-Hadronen, was die Identifizierung von b-Quarkjets ermöglicht.
  - t-Quarks sind so kurzlebig, dass sie keine Hadronen bilden können. Sie sind über ihren Zerfall  $t \rightarrow Wb$  nachweisbar.

#### Photonen

Photonen sind stabil. Sie sind zwar elektrisch neutral, können aber in Materie elektromagnetische Schauer erzeugen, die im Detektor nachgewiesen werden können.

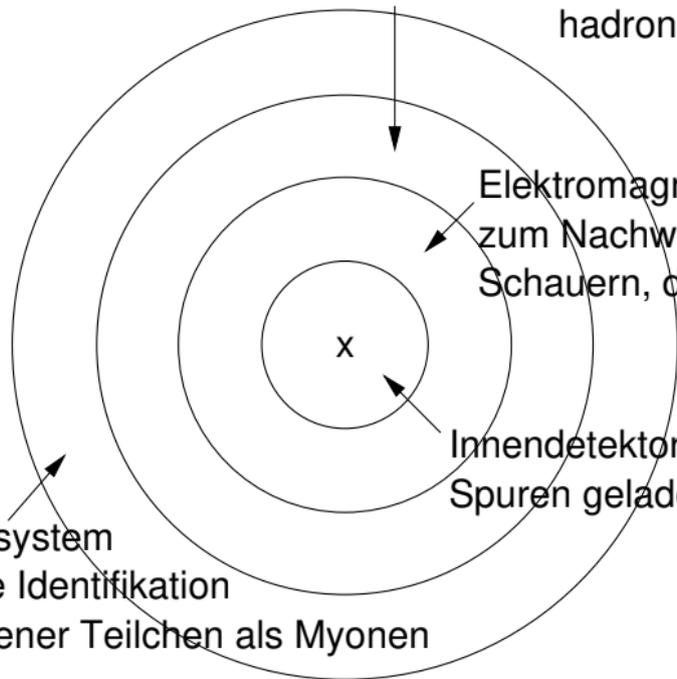
## Grundstruktur eines Teilchendetektors am Hadroncollider

Hadronkalorimeter zum Nachweis  
hadronischer Schauer

Elektromagnetisches Kalorimeter  
zum Nachweis von elektromagnetischen  
Schauern, die von  $e^\pm$  und  $\gamma$  stammen

Innendetektor zur Messung der  
Spuren geladener Teilchen

Myonsystem  
für die Identifikation  
geladener Teilchen als Myonen



## Rekonstruktion von Myonspuren im Innendetektor

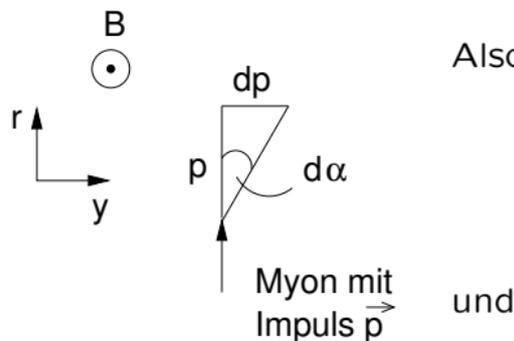
Rekonstruktion der Flugbahnen von Myonen im gewissen Sinne am einfachsten, weil der Energieverlust der Myonen im Innendetektor vernachlässigbar ist und die Flugbahn daher nur von folgenden Größen abhängt:

- $\vec{x}_0, \vec{p}$  am Wechselwirkungspunkt.
- Magnetfeld im Innendetektor.
- Vielfachstreuung im Innendetektor.

Die Rekonstruktion von Myonspuren wie von Teilchenspuren im Allgemeinen erfolgt in zwei miteinander verknüpften Schritten, der sogenannten **Mustererkennung**, bei der man die zur Teilchenspur gehörigen Trefferpunkt im Innendetektor sucht, und er sogenannten **Spurbestimmung**, bei der man den Verlauf der Flugbahn aus den in der Mustererkennung ausgewählten Trefferpunkten berechnet.

## Spurverlauf im Magnetfeld

$$d\alpha = \frac{dp}{p} = \frac{qvBdt}{p} = \frac{q}{p} B \underbrace{vdt}_{=ds=dr} = \frac{q}{p} B ds.$$



Also erhalten wir

$$\alpha(r) \approx \frac{q}{p} \int_{r_0}^r B(s) ds$$

und

$$y(r) = \int_{r_0}^r \alpha(r') dr' = \frac{q}{p} \int_{r_0}^r \int_{r_0}^{r'} B(s) ds dr'.$$

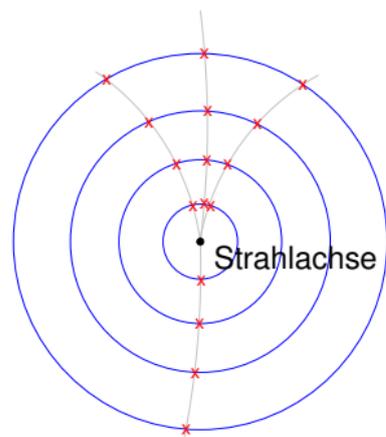
**Beispiel.**  $p = 1 \text{ GeV}$ .  $r_0 = 0$ .  $B = 2 \text{ T}$ .

$$\alpha(10 \text{ cm}) = 60 \text{ mrad}. \quad y(10 \text{ cm}) = 3 \text{ mm}.$$

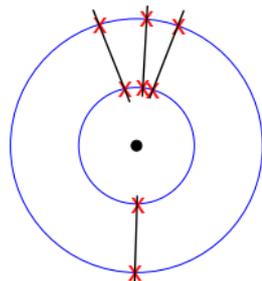
$$\alpha(1 \text{ m}) = 0,6 \text{ rad}. \quad y(1 \text{ m}) = 30 \text{ mm}.$$

## Ein mögliches Verfahren zur Mustererkennung

1. Betrachte alle Trefferpaare in Strahlnähe nacheinander. Die Geradenstücke müssen zum Wechselwirkungspunkt zeigen.



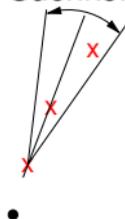
- Tatsächliche Flugbahn
- Detektorebene
- x Trefferpunkt



- Spurstück  
x nach Paarung  
x

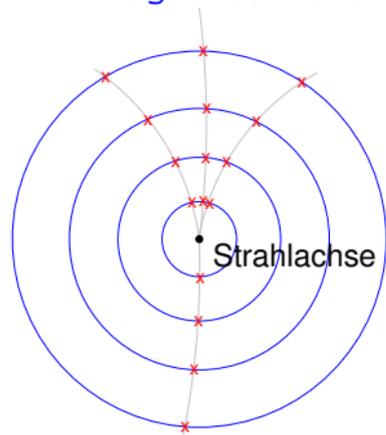
2. Suche nach Treffern in Suchkorridoren um die nach außen extrapolierten Spurstücke.

Suchkorridor



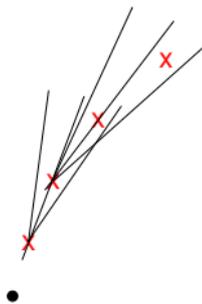
Die Größe des Suchkorridors bestimmt den kleinsten messbaren Impuls  $p$ .

## Ein mögliches Verfahren zur Mustererkennung



- Tatsächliche Flugbahn
- Detektorebene
- x Trefferpunkt

3. Fahre mit der Extrapolation bis zur äußersten Messebene des Innendetektors fort.



Zwei Möglichkeiten:

- (a) Größe des Suchkorridors konstant.
- (b) Größe des Suchkorridors abhängig vom Verlauf der bisher gefundenen Treffer.

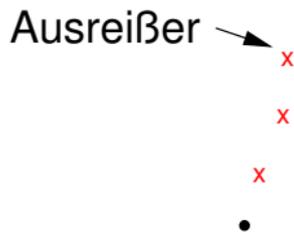
## Spurbestimmung

Man betrachtet nun alle Trefferansammlungen nacheinander, die man während der Mustererkennung gefunden hat.

Idealfall: Nur ein Treffer in jeder Detektorlage, keine Ausreißer.



Situation mit sogenannten Ausreißern



Situation mit mehr als einem Treffer in einer Lage



## Spurbestimmung im Idealfall

- x
  - o Trefferkoordinaten:  $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n$ .
- x
  - o Positionsunsicherheiten:  $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ .
- x
  - o Unsicherheiten in den Detektorpositionen, sogenannte Alignierungsunsicherheiten, führen zu nichtverschwindenden Nichtdiagonalelementen in der Kovarianzmatrix  $Cov(x_k, x_\ell)$
- - o Berücksichtigung des Einflusses der Vielfachstreuung durch Einführung von Streuzentren, in denen die Flugbahn einen Knick machen darf.
  - o Spurfunktion:  $\vec{y}_k = \vec{y}_k(\frac{q}{p}, \vec{x}_0, \hat{\vec{p}})$ .
  - o Bestimmung von  $\frac{q}{p}$ ,  $\vec{x}_0$  und  $\hat{\vec{p}}$  über die Methode der kleinsten Quadrate:

$$Q^2 = \sum_{k,\ell=1}^n (\vec{x}_k - \vec{y}_k)^t Cov(\vec{x}_k, \vec{x}_\ell) (\vec{x}_\ell - \vec{y}_\ell).$$

## Behandlung von Ausreißern und Mehrdeutigkeiten

### Behandlung von Ausreißern

Möglichkeit 1. Iteratives Verfahren: Spurbestimmung mit Ausreißern.

Dann Ermitteln von Ausreißern von dieser Spur. Danach Wiederholung der Spurbestimmung ohne die so gefundenen Ausreißer.

Möglichkeit 2.  $\sigma_k = \bar{\sigma}_k$  für  $|\vec{x}_k - \vec{y}_k| < \delta$ ,  $\sigma_k \rightarrow \infty$  für  $|\vec{x}_k - \vec{y}_k| \geq \delta$ . Damit wird der Beitrag der Ausreißer zu  $Q^2$  vernachlässigbar klein.

### Behandlung von Mehrdeutigkeiten

$\sigma_k = \sigma(|\vec{x}_k - \vec{y}_k|)$  wie oben und Mitnahme aller Treffer.

Oder Spurbestimmung mit den vorhandenen möglichen

Trefferkombination und Auswahl der Spur mit dem kleinsten  $Q^2$ .

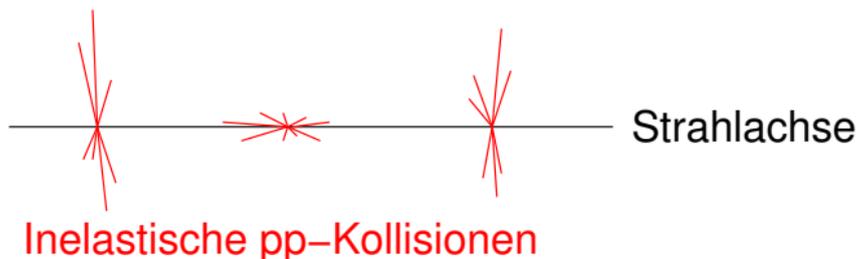
## Rekonstruktion von Pionspuren im Innendetektor

- $m_{\pi^\pm} \approx m_{\mu^\pm} \Rightarrow$  Pionspuren sind Myonspuren sehr ähnlich.
- $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$ -Zerfälle sind wegen der Zeitdilatation im Laborsystem sehr selten. Da aber so viel  $\pi^\pm$  in  $pp$ -Kollisionen erzeugt werden, kommt es mit nicht zu vernachlässigender Häufigkeit vor, dass ein geladenes Pion noch innerhalb des Innendetektors zerfällt. Im Zerfallspunkt macht dann die Spur einen Knick.
- Die Größe dieses Knicks muss man zumindest bei der Größe der Treffersuchkorridore berücksichtigen.

$m_{e^\pm} \ll m_{\pi/\mu}$ .  $\Rightarrow$  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.

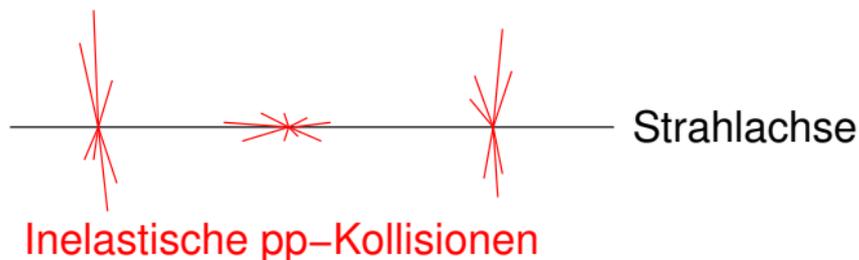
**Übliche Vorgehensweise.** Wenn Spuren, die mit dem Standardalgorithmus für Pionen rekonstruiert wurden, einem Cluster von Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter zugeordnet werden kann, werden diese Spuren nochmals unter der Annahme rekonstruiert, sie seien Elektronenspuren. Dabei werden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

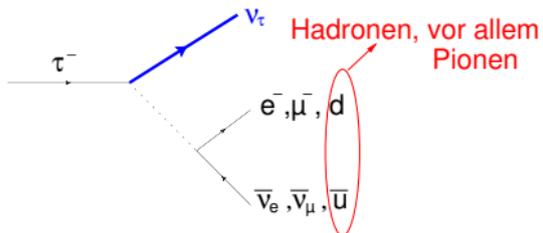
## Impulsbestimmung

- $\hat{p}$ , 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.

# Identifikation von $\tau$ -Leptonen



- $\nu_\tau$  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.

Unterschiede zu Quark- und Gluonjets:

- Kleine Multiplizität geladener Teilchen.
- Kollimierte Jets.

- 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

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

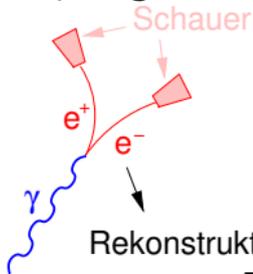
D.h. die Longitudinalimpulssumme schwankt von  $pp$ -Kollision zu  $pp$ -Kollision, doch Transversalimpulssumme verschwindet immer.

- 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.

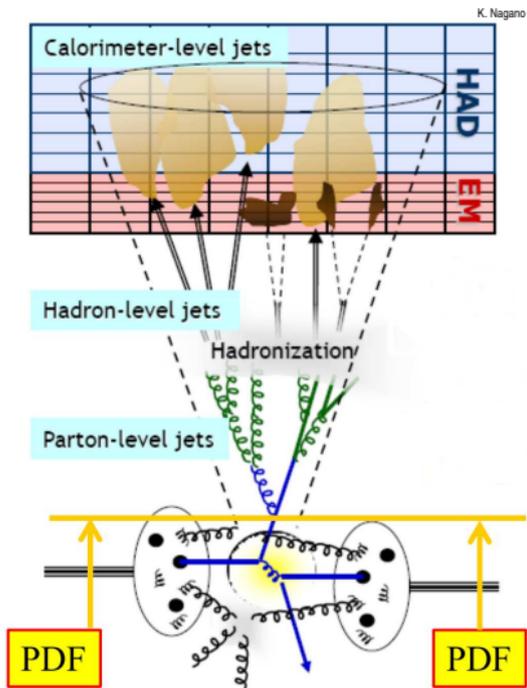
- Eigenschaften des Clusters wie bei Elektronen und Positronen.
- Hauptuntergrund  $\pi \rightarrow \gamma\gamma$  unterdrückbar durch Forderung, dass der Photonenkandidat nicht innerhalb eines Jets liegt.
- Nicht vernachlässigbar bei Innendetektoren mit Halbleiterdetektoren: Konversion  $\gamma \rightarrow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

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.



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.