Massenhypothese

Nachdem wir nun über den Aufbau des LHCb-Detektors im einführenden Vortrag gesprochen haben, wollen wir die Informationen nutzen und die Masse von Teilchen abschätzen (sog. Massenhypothese), aus dieser anschließend Mutterteilchen rekonstruiert werden können. Wir wollen den ersten Teil vollführen, dazu vereinfachen wir den Detektor als zweidimensional und nehmen an, dass die Kalorimeter sehr exakt die Energie bestimmen können (s. Abb. 1). Dies hat den Vorteil, dass die RICH-Subdetektoren vernachlässigt werden können. Der Magnet wird als homogen mit einer magnetischen Flussdichte von $B = 0.4\,\mathrm{T}$ angenommen. Ferner sei die Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 299792458\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ und die Elementarladung $e = 1.602176634 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$.

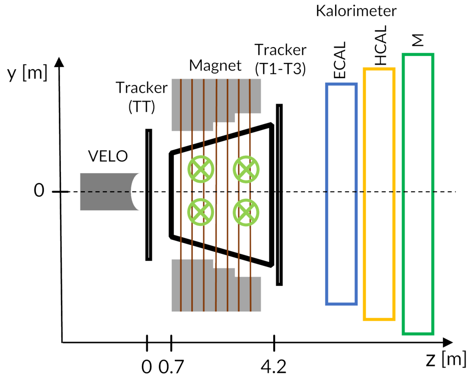

Abbildung 1: Vereinfachter LHCb-Detektor

Messdaten

Die nachstehende Tabelle beinhaltet die Daten eines Zerfalls, welcher das Triggersystem aktiviert und als womöglich spannend identifiziert hat. Außerdem sehen Sie einen Ausschnitt des um den Kollisionspunkt befindlichen Vertex Locators (VELO), bei welchem die Reaktionsprodukte mit hintereinander angeordneten Siliciummodulen interagieren und sich so Spuren dieser und Ursprungspunkte sekundärer Zerfälle identifizieren lassen:

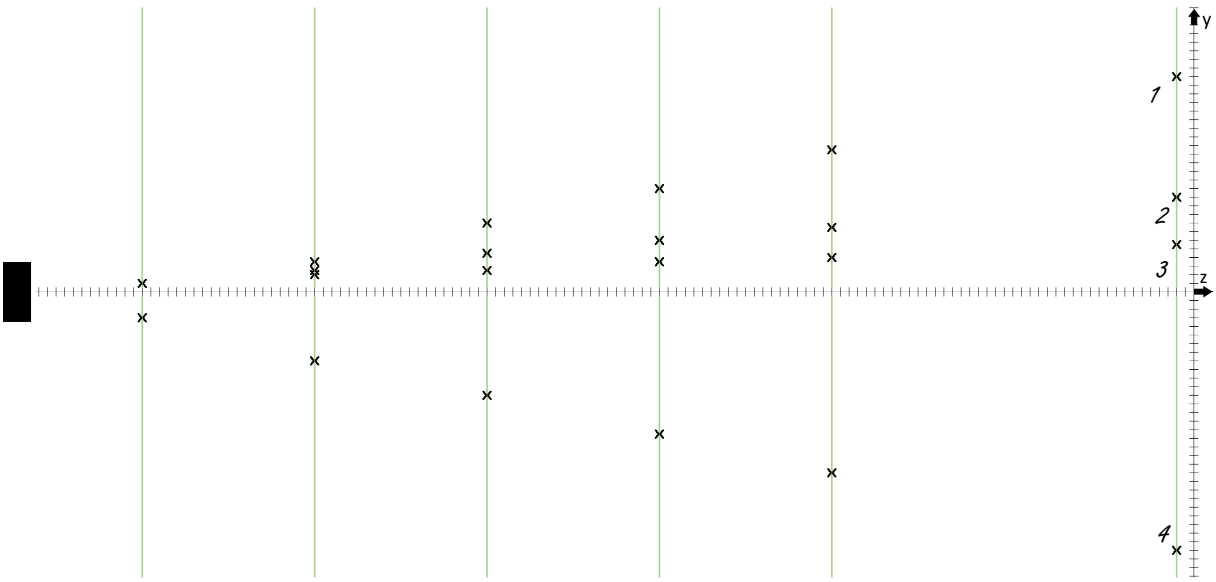

Abbildung 2: Seitliche Ansicht der Ereignisse an den Siliciummodulen (grün) des VELOs, welcher um den Kollisionspunkt (schwarzer Block) angeordnet ist. Hieraus lassen sich Ursprungsorte von weiteren Zerfällen und Winkel von Spuren relativ zur x-Achse bestimmen.

Tabelle 1: Datentabelle über das Ereignis. Angegeben für die Spuren die Orte im Trackersystem vor (TT) und nach (T1-T3) dem Magnetfeld. Die im Elektromagnetischen Kaloriemeter (ECAL) deponierte Energie sowie jene im Hadronischen Kaloriemeter (HCAL) sind zu einer Gesamtenergie verrechnet worden. Außerdem die Angabe, ob das Myonensystem (M) getriggert wurde.

Spur	TT	T1-3	ECAL	HCAL	M
	y/m	y/m	E/GeV	E/GeV	
1	0.72769	2.89240	0.0461	0.3727	Leer
2	0.30505	0.83866	0.4902	3.9661	Leer
3	0.12215	-0.02320	0.3072	2.2530	Leer
4	-0.78733	-1.93223	0.4791	3.5142	Leer

Platz für Notizen und Zeichnungen

Bestimmung der Massen

Bevor Sie losrechnen, theoretisieren wir erst einmal die stattfindende Physik:

Aufgabe 1: Betrachten Sie die Daten. Welche Informationen können aus den Messpunkten im VELO gezogen werden? In welchem Zusammenhang stehen diese mit den Punkten, die der erste Tracker (TT) angibt? *Falls Sie einen gedanklichen Impuls wünschen, können Sie unauffällig eine vorne liegende Hilfekarte zu Rate ziehen: Hilfekarte 1* (**H1**)

Tipp: Wenn Sie neue Informationen herausfinden, können Sie die Tabelle oben erweitern.

Aufgabe 2: Wie kann man die Einheit MeV in die SI-Einheit Joule umrechnen? (**H2**)

Aufgabe 3:
a) Überlegen Sie sich eine Methode um den Impuls eines *geladenen* Teilchens zu bestimmen, wenn es ein Magnetfeld quert (s. Abb. 1). Welche Kräfte wirken, in welche Richtung?
b) Welchen Einfluss hat die elektrische Ladung? Welche Ladungen erwarten Sie in diesem Experiment?

Sie wissen also nun welche Kräfte wirken und wie der Impuls bestimmt werden könnte. Nun haben Sie außerdem durch die Kalorimeter Energien angegeben.

> **Aufgabe 4:** Anhand welcher fundamentalen Beziehung kann man aus Impuls und Energie eine Masse bestimmen? (**H3**)
> Falls Sie die Formeln nicht auswendig wissen, nutzen Sie Hilfekarte **H4** oder fragen Sie das allwissende Internet. Es ist schließlich auch eine Erfindung des CERNs! (**H4**)

Die Theorie hinter dieser Massenhypothese haben Sie hiermit erarbeitet! Nun müssten wir uns mathematischen Konzepten bedienen, um die Rechnung auch durchführen zu können. Da Sie hier nicht bei einer Mathematik-Veranstalltung sind, haben wir bereits einen armen Studenten beauftragt, das geometrische Problem zu lösen!

Neben den Punkten, welche in der Datentabelle eingetragen sind, beachten Sie außerdem das Koordinatensystem in Abbildung 1. Die Mittelpunkskoordinaten der Kreisbahn, auf welchem die Teilchen im Magnetfeld fliegen, sind gegeben durch:

$$z_M = \frac{(G_y - B_y)\tan\alpha \cdot m + B_z m - G_z \cdot \tan\alpha}{m - \tan\alpha} \tag{1}$$

$$y_M = -\frac{z_M - B_x}{\tan\alpha} + B_y \tag{2}$$

Der Radius kann dann bestimmt werden über

$$R = \sqrt{(B_z - z_M)^2 + (B_y - y_M)^2} \ . \tag{3}$$

Dabei ist B_z die z-Koordinate des Eingangspunkts des Magnetfeldes: $B_z = 0.7\,\mathrm{m}$ (s. Abb. 1), α der Winkel welchen Sie im VELO bestimmt haben, sowie

$$\begin{aligned} B_y &= \tan\alpha \cdot B_z + y_{TT} \quad , \\ G_y &= \frac{y_{T1-T3} + B_y}{2} \quad , \\ G_z &= \frac{z_{T1-T3} + B_z}{2} \quad , \\ m &= \frac{y_{T1-T3} - B_y}{z_{T1-T3} - B_z} \quad . \end{aligned}$$

Aufgabe 5: Berechnen Sie beispielhaft den Radius des Kreises im Magnetfeld für die Spur, welche Ihrer Gruppennummer entspricht. Setzen Sie dazu in die Formeln ein.

Aufgabe 6: Berechnen Sie analog der vorherigen Aufgaben den Impuls und dann die Ruhemasse des Teilchens, welches sich hinter Ihrer Gruppennummer verbirgt. Man kann nun analog der Umrechnung der Energie in GeV, die Masse in MeV/c^2 angeben.

Zusatzaufgabe: Sie möchten in Ihrer Garage einen Teilchenbeschleuniger für Elektronen bauen und finden eine 5 V Batterie in Ihrem alten Physikbaukasten. Wie viele solcher Batterien müsste man in Reihe schalten, um eine ähnlich hohe elektrische Energie wie die oben genannten Einträge im Kalorimenter zu erhalten?

Zusatzaufgabe: Welchen Vorteil hat es, dass wir hier nur geladene Teilchen betrachten?

Königsaufgabe: Leiten Sie die Formeln (1) und (2) her! Überlegen Sie sich, wie man ausgehend vom im VELO bestimmten Winkel einer Teilchenspur und den beiden Punkten des Trackers den Mittelpunkt des Kreises bestimmen kann. Nehmen Sie an, dass der Magnet ausschließlich im angegebenen Intervall wirkt und die Tracker T1-T3 unmittelbar an den Magneten anschließen.
Tipp: Diese Aufgabe ist herausfordernd. Es ist sehr ratsam sich von den Hilfekarten inspirieren zu lassen! (**H5-7**)
Hier eine erste Hilfestellung:

Bis zum Magneten kann die Bahn des Teilchens als linear, also durch eine Funktion mit Steigung m und Ordinatenabschnitt b über $f(x) = m \cdot x + b$ beschrieben werden. Die Bahn im Magnetfeld ist eine Kreisbahn. Man kann einen Kreis mit Radius R und Mittelpunktskoordinaten (x_0,y_0) parametrisieren durch:

$$(z - z_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad . \tag{4}$$

Für eine Normale einer linearen Funktion, an der Stelle $z = a$ gilt

$$f_N(z)|_a = -\frac{z-a}{m} + f(z) \quad . \tag{5}$$