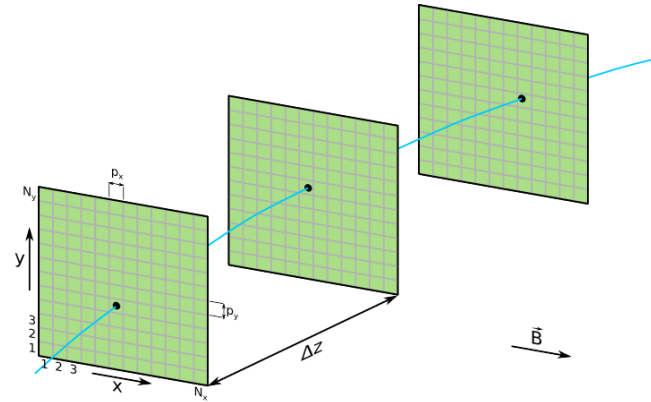


8.1 Impulsmessung mit einem Pixeldetektor (1 Punkt)

Ein Pixeldetektor ist ein Halbleiterdetektor, der pixelartig segmentiert ist. Die nachstehende Abbildung zeigt schematisch einen Pixeldetektor, bestehend aus drei Lagen:



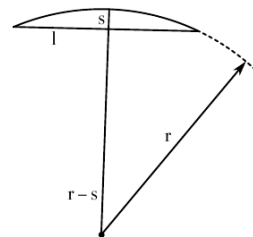
Der Abstand zwischen zwei Lagen möge jeweils $\Delta z = 10 \text{ cm}$ betragen und die Zellengrösse der einzelnen Pixel sei $p_x = p_y = 200 \mu\text{m}$. Der Detektor befinde sich in einem Magnetfeld von 1 T , das in positive x-Richtung zeigt. Die Messsignale fallen als lokale Koordinaten pro Ebene an. Eine gemessene Teilchenspur habe Treffer in den folgenden Koordinaten ergeben:

Lage	x	y
1	14	12
2	14	15
3	14	12

Die Punkte können durch einen Kreisabschnitt verbunden werden.

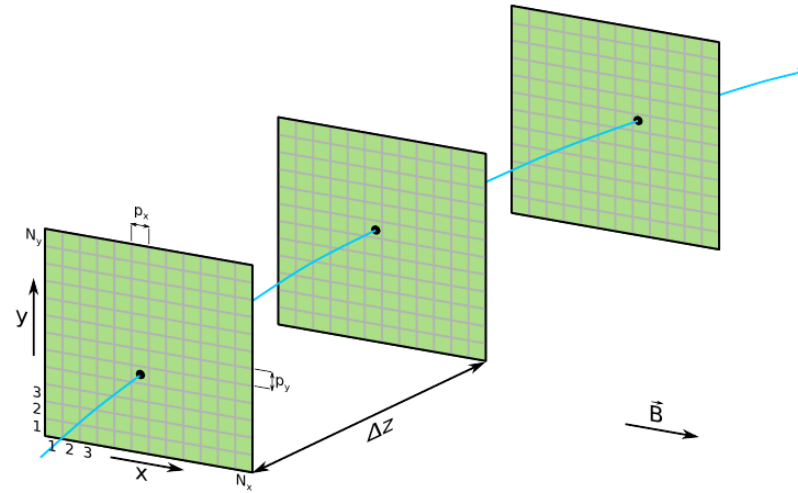
- Welches Vorzeichen hat die Ladung des auf der gemessenen Spur geflogenen Teilchens? Nehmen Sie an, dass das Teilchen genau eine Elementarladung trägt.
- Ermitteln Sie den Krümmungsradius der Teilchenbahn unter der Annahme, dass die einzelnen Pixel exakt in der Mitte der Zellen getroffen worden seien. Verwenden Sie dazu die sogenannte Sagitta-Methode, für die gemäß untenstehender Abbildung gilt:

$$r^2 = l^2 + (r - s)^2 \Rightarrow r = \frac{l^2 + s^2}{2s} = \frac{s}{2} + \frac{l^2}{2s}$$



8.1 Impulsmessung mit einem Pixeldetektor (1 Punkt)

Ein Pixeldetektor ist ein Halbleiterdetektor, der pixelartig segmentiert ist. Die nachstehende Abbildung zeigt schematisch einen Pixeldetektor, bestehend aus drei Lagen:



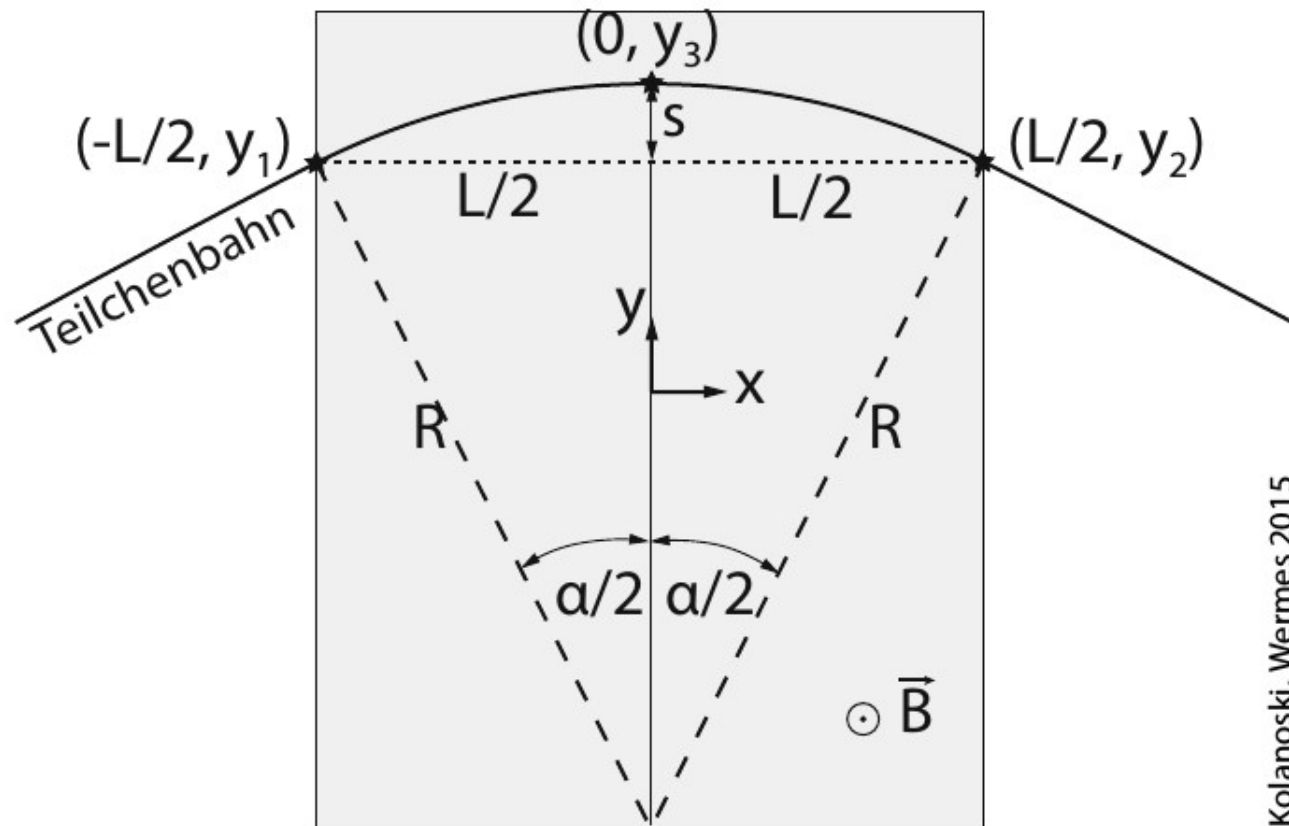
Der Abstand zwischen zwei Lagen möge jeweils $\Delta z = 10 \text{ cm}$ betragen und die Zellengröße der einzelnen Pixel sei $p_x = p_y = 200 \mu\text{m}$. Der Detektor befinde sich in einem Magnetfeld von 1 T , das in positive x -Richtung zeigt. Die Messsignale fallen als lokale Koordinaten pro Ebene an. Eine gemessene Teilchenspur habe Treffer in den folgenden Koordinaten ergeben:

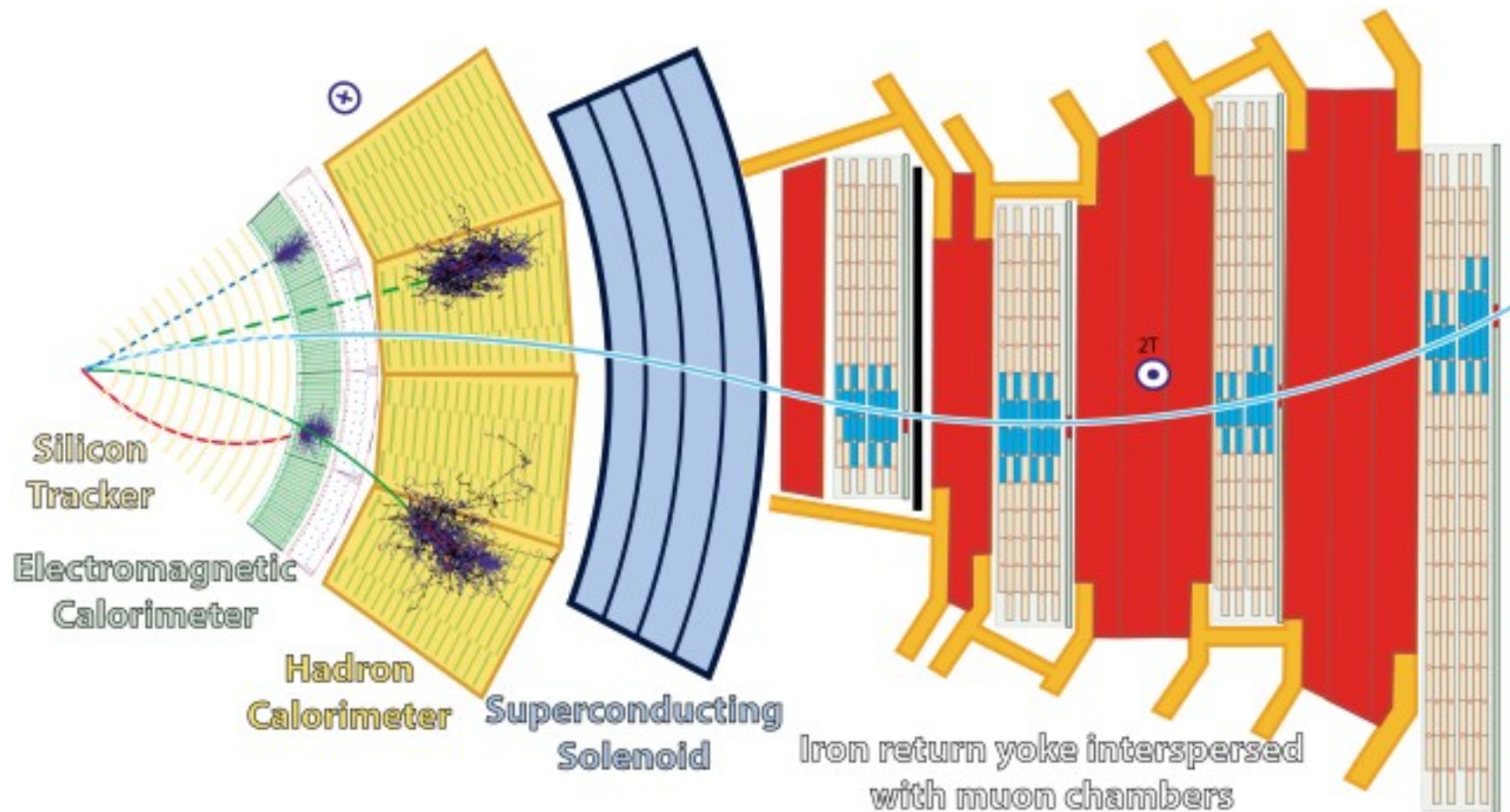
Lage	x	y
1	14	12
2	14	15
3	14	12

Die Punkte können durch einen Kreisabschnitt verbunden werden.

- Welches Vorzeichen hat die Ladung des auf der gemessenen Spur geflogenen Teilchens? Nehmen Sie an, dass das Teilchen genau eine Elementarladung trägt.
- Ermitteln Sie den Krümmungsradius der Teilchenbahn unter der Annahme, dass die einzelnen Pixel exakt in der Mitte der Zellen getroffen worden seien. Verwenden Sie dazu die sogenannte Sagitta-Methode, für die gemäß untenstehender Abbildung gilt:

$$r^2 = l^2 + (r - s)^2 \Rightarrow r = \frac{l^2 + s^2}{2s} = \frac{s}{2} + \frac{l^2}{2s}$$





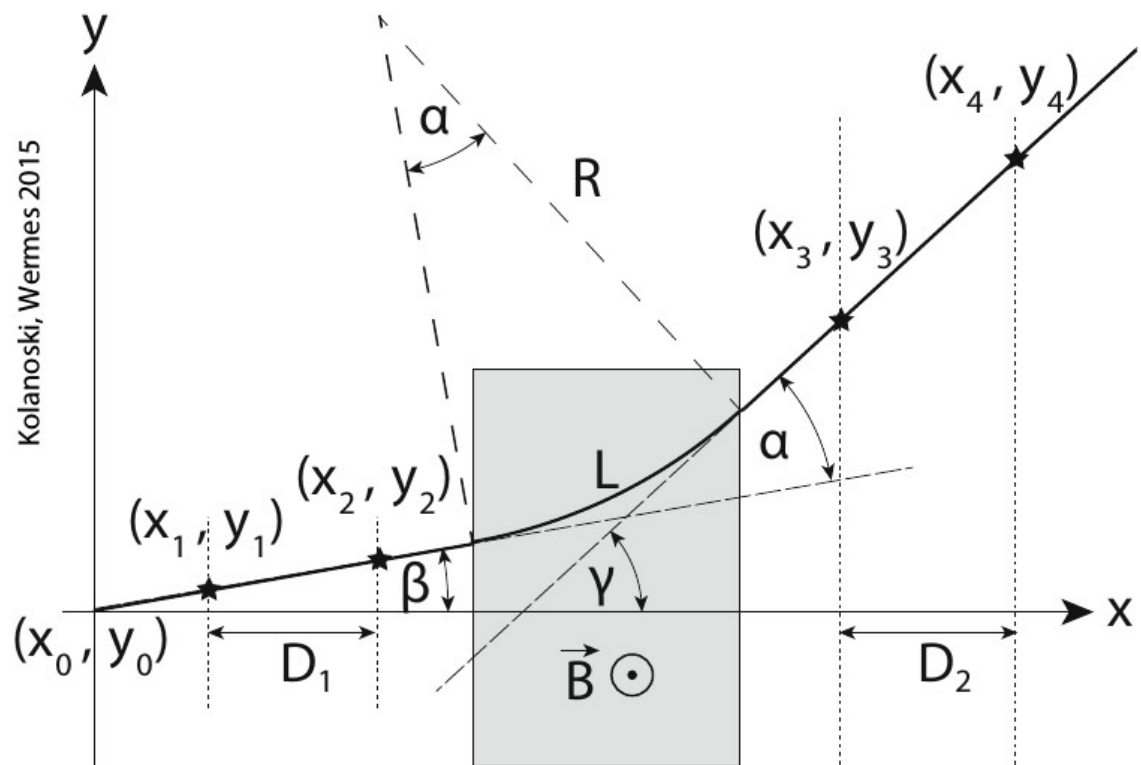
— Muon

— Electron

— Charged hadron (e.g. pion)

- - - Neutral hadron (e.g. neutron)

. . . Photon



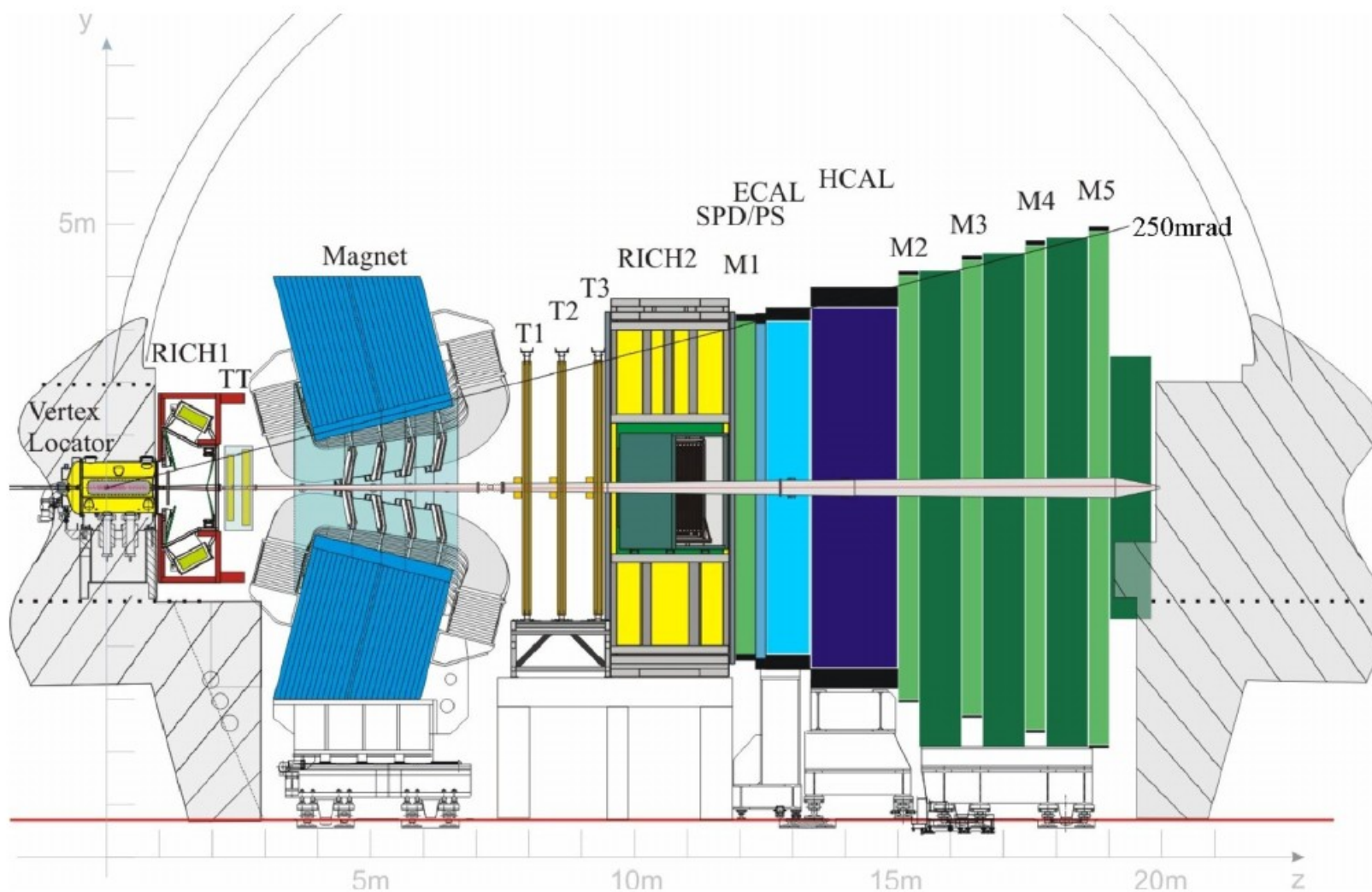
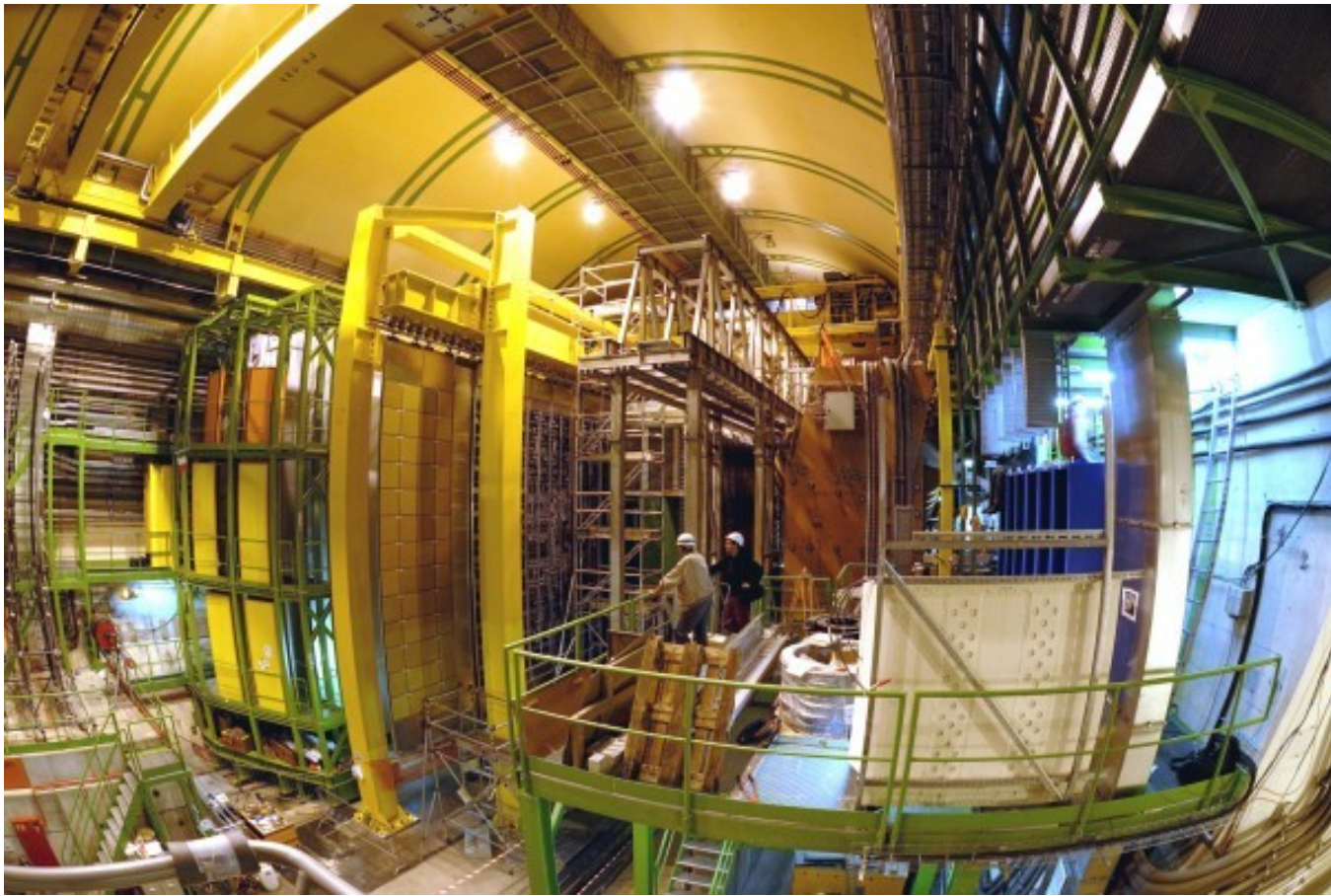
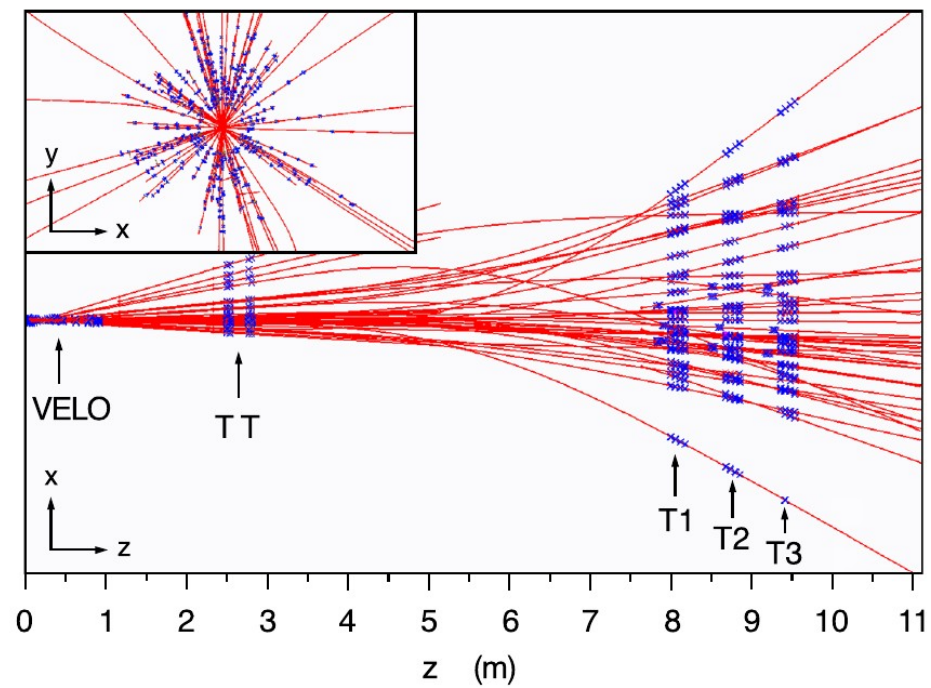
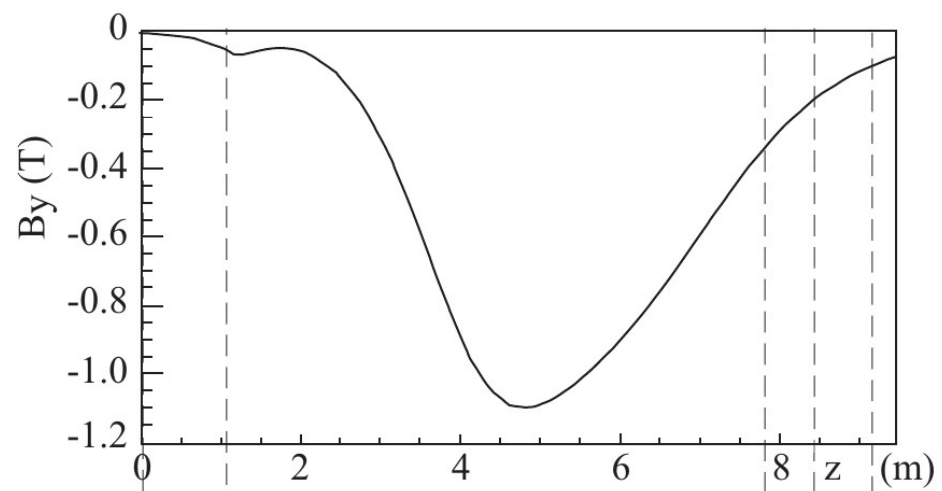
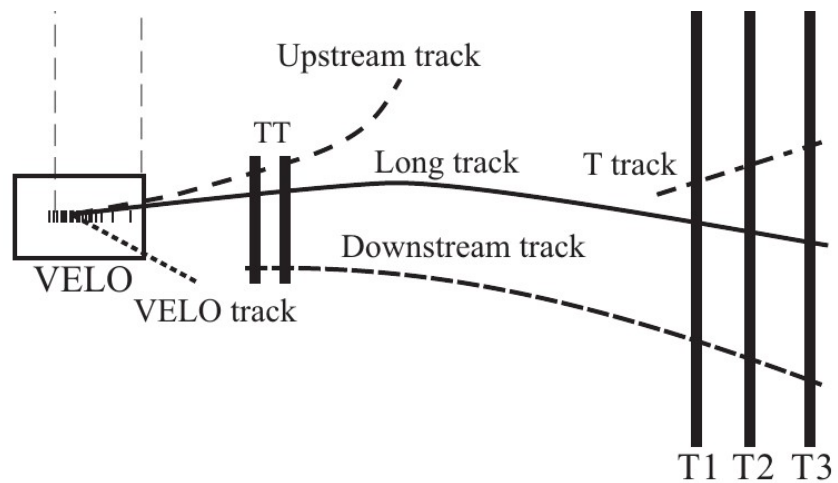
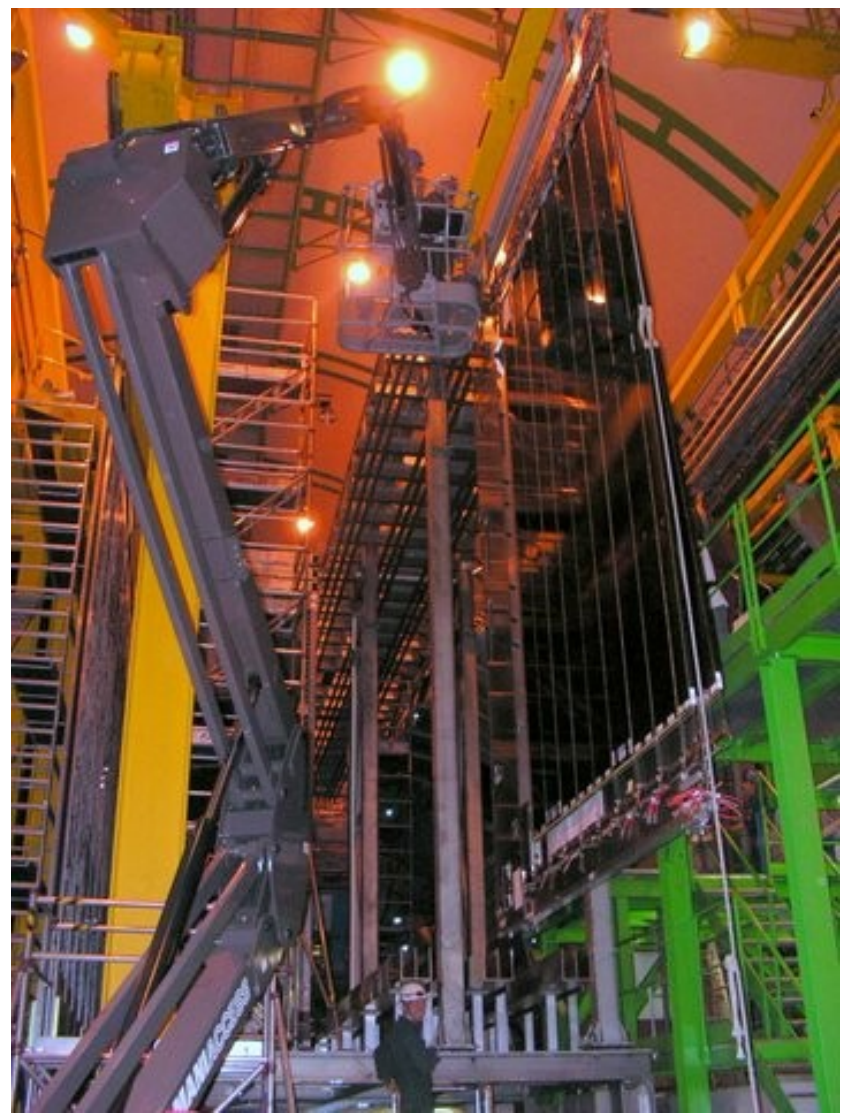


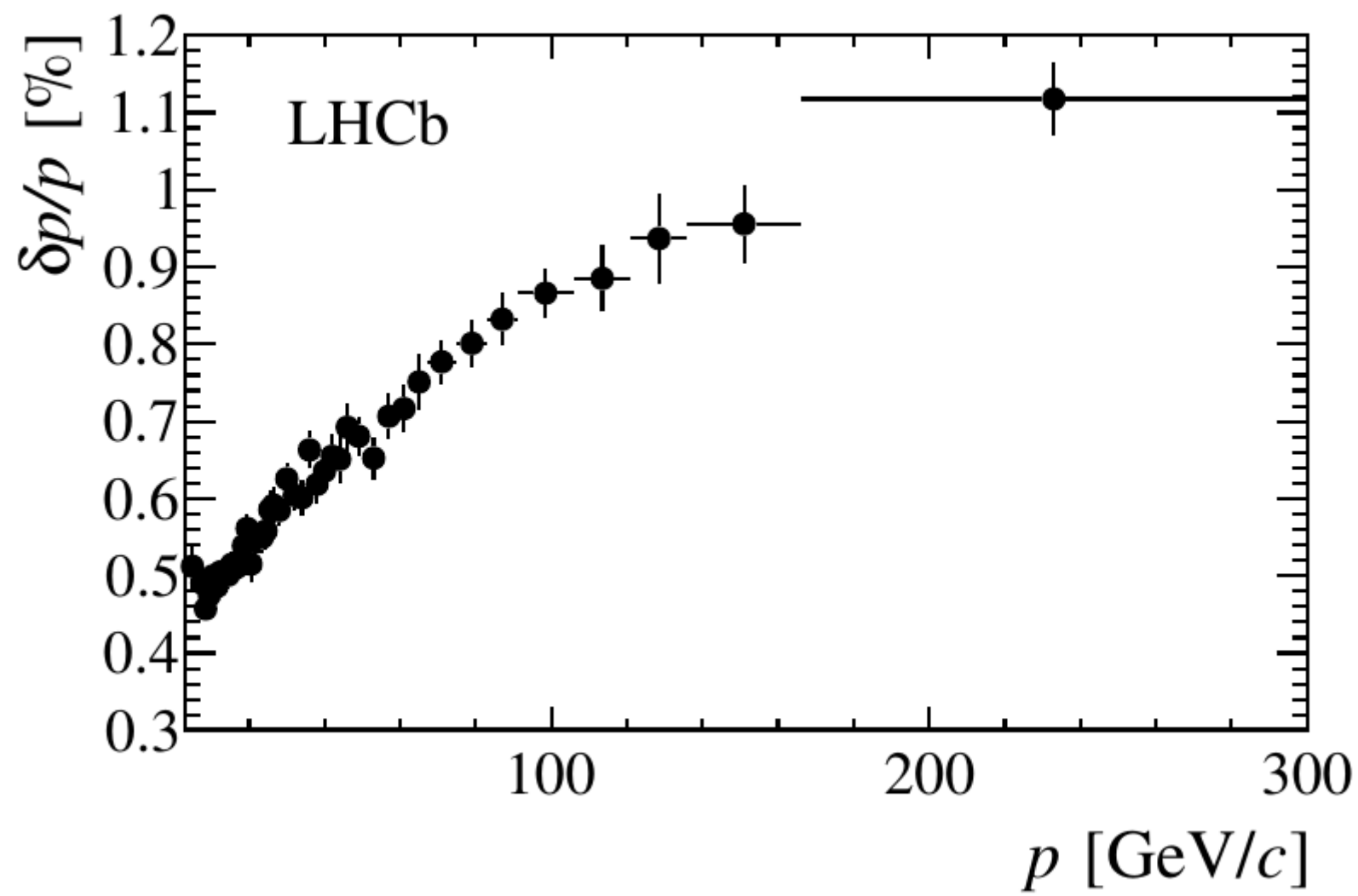
Figure 1: View of the LHCb detector [23](#).











8.2 Kalorimetrie (1 Punkt)

Die Energie geladener und auch nicht-geladener Teilchen kann mit Hilfe zweier Typen von Kalorimetern gemessen werden. Im sog. elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL) erzeugen einfallende Photonen und Elektronen einen elektromagnetischen Schauer. Im zweiten Typ deponieren die Teilchen ihre Energie über einen hadronischen Schauer; solch einen Detektor nennt man entsprechend hadronisches Kalorimeter (HCAL).

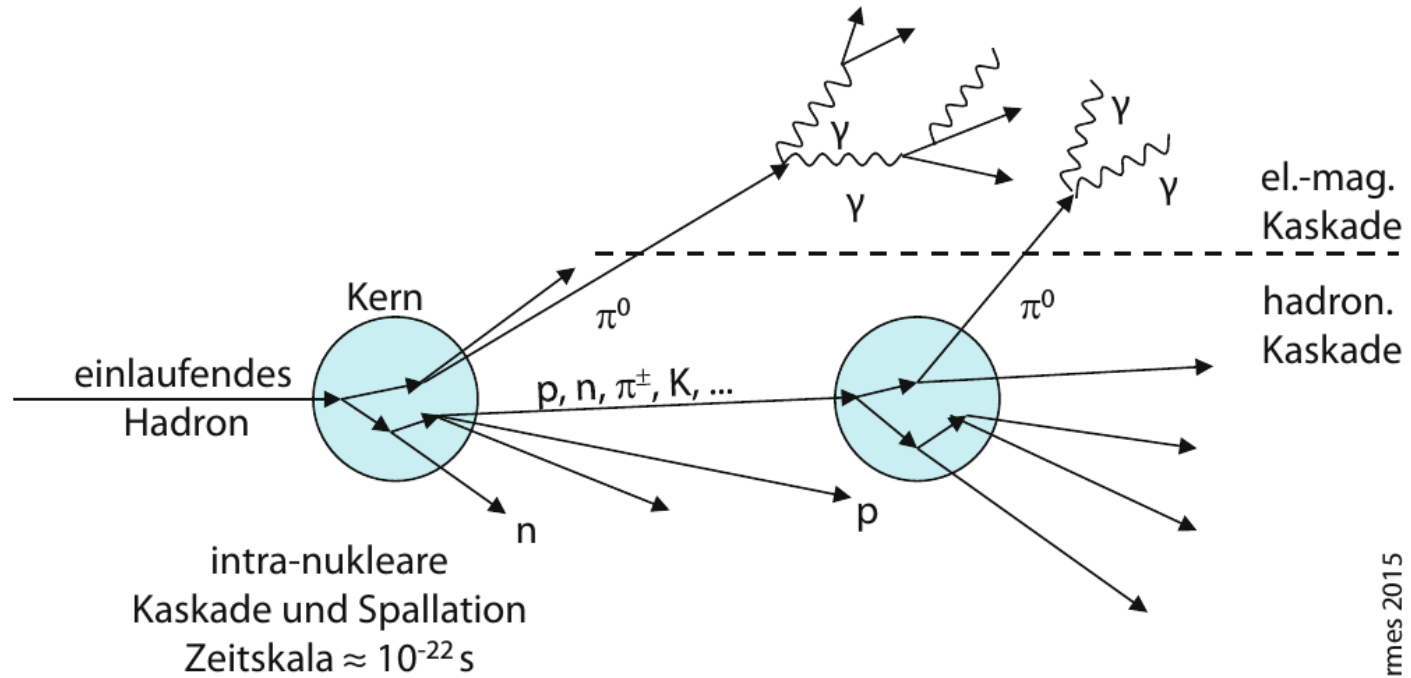
- a) Wie unterscheiden sich elektromagnetische von hadronischen Schauern?
- b) Sei E_c die Energie, bei der Bremsstrahlung und Ionisation gleich stark zum Energieverlust von Elektronen beitragen. Ein einfaches Modell für einen elektromagnetischen Schauer macht folgende Annahmen:
 - (i) Jedes Elektron und Positron mit $E > E_c$ legt eine Strahlungslänge X_0 zurück und gibt die Hälfte seiner Energie an ein Bremsstrahlungsphoton ab.
 - (ii) Jedes Photon mit $E_\gamma > E_c$ legt X_0 zurück und erzeugt dann ein e^+e^- Paar, wobei seine Energie gleichmäßig aufgeteilt wird.
 - (iii) Elektronen (Positronen) mit $E < E_c$ werden gestoppt und verlieren ihre Energie durch Stöße. Dadurch werden u.a. Szintillationsphotonen erzeugt, die im Detektor nachgewiesen werden.
 - (iv) Für $E > E_c$ wird Ionisation vernachlässigt.

Wie hängt die maximale Eindringtiefe des Schauers ins Kalorimeter von der Energie der einfallenden Elektronen ab?

- c) Nun treffen Elektronen der Energie E auf das Kalorimeter. Wie hängt die Energieauflösung $\Delta E/E$ von der Energie der einfallenden Elektronen ab? Nehmen Sie an, dass die Anzahl der detektierten Szintillationsphotonen proportional zur einfallenden Elektronenenergie ist.

Hinweis: Betrachten Sie statistische Fluktuationen in der Anzahl der detektierten Szintillationsphotonen.

Hochenergie-Kaskade



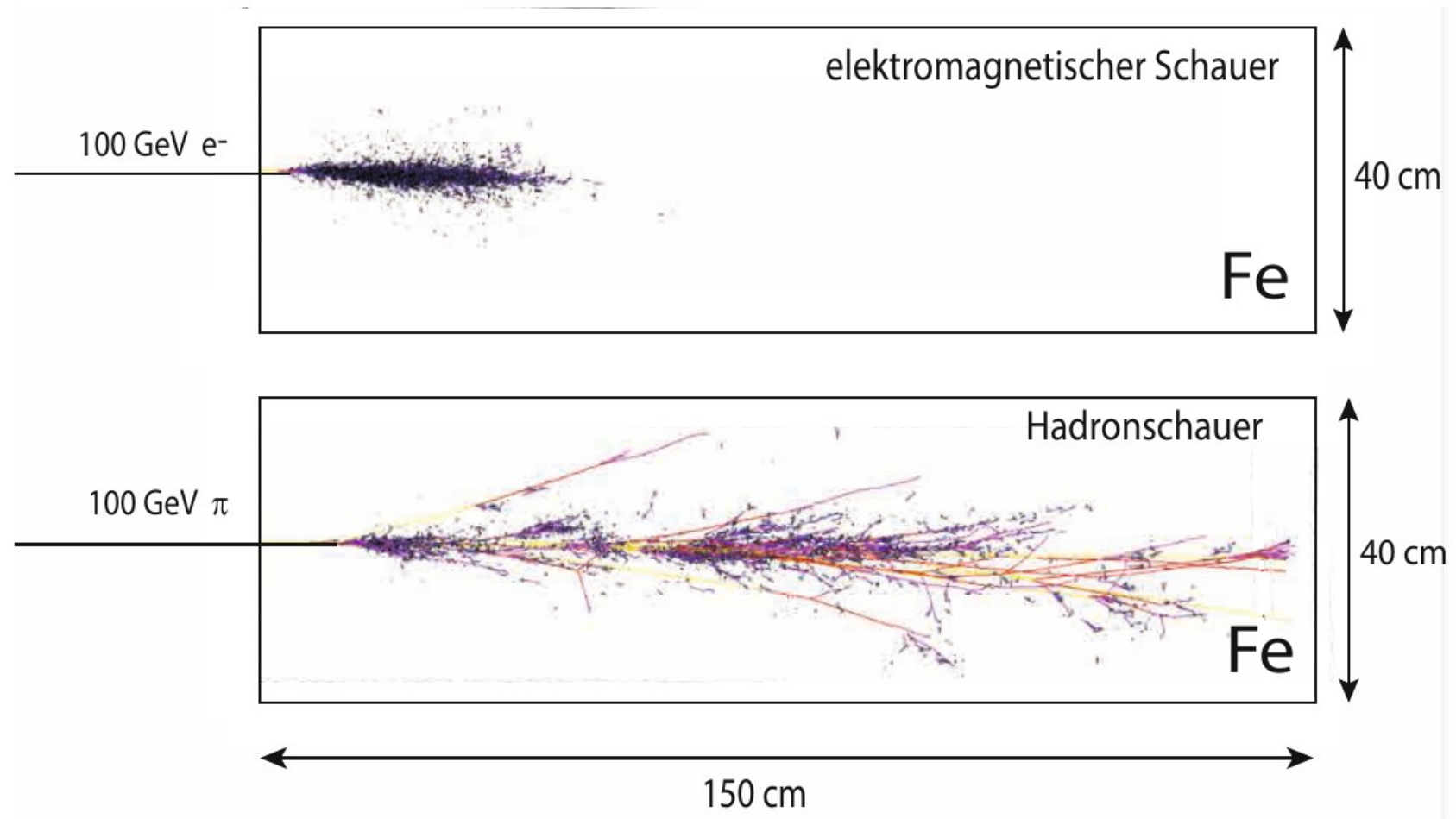
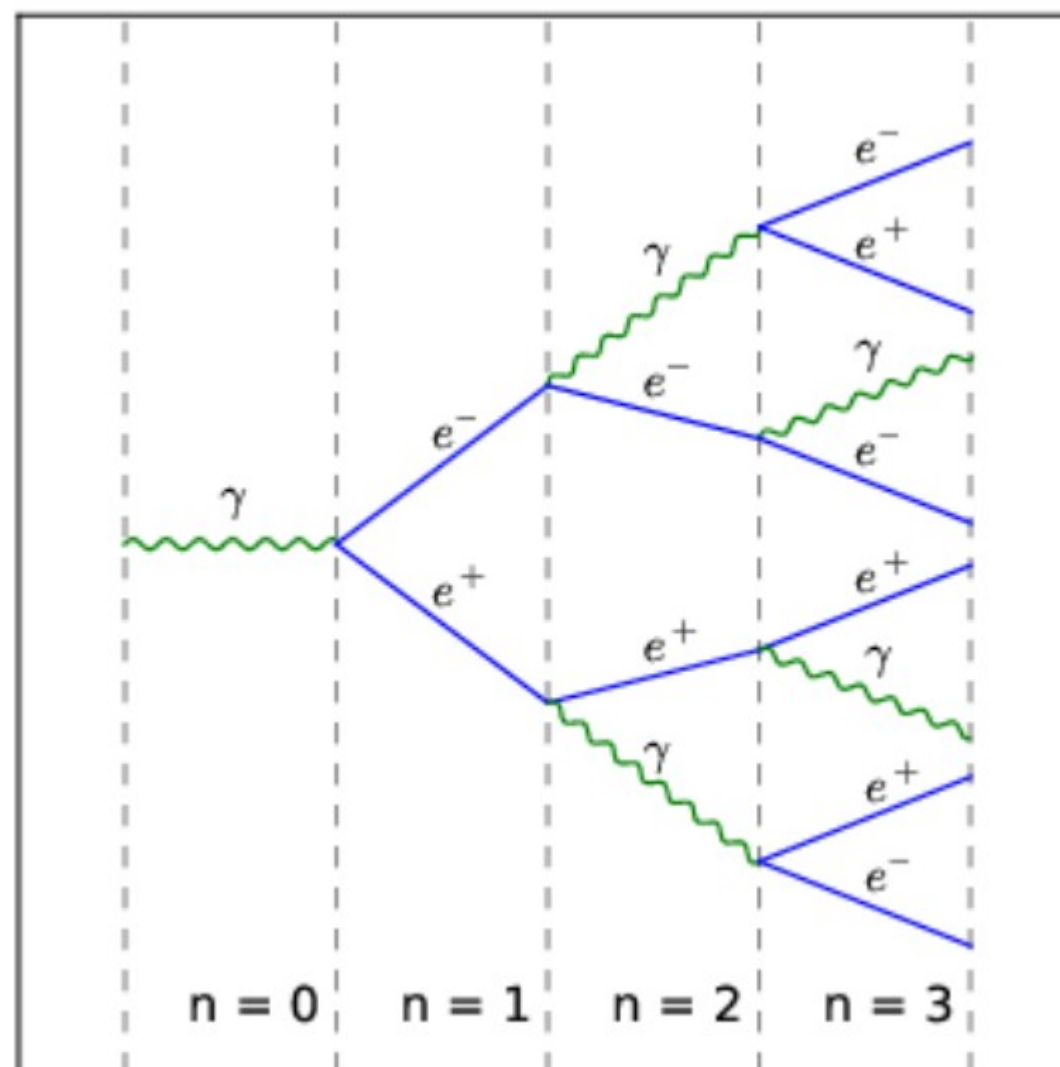


Abb. 15.10 Simulation von Schauern in einem Eisenblock, wobei ein Elektron und ein Pion bei der gleichen Energie von 100 GeV verglichen werden. Autor: Sven Menke.

Material	X_0 [cm]	λ_{WW} [cm]
C	19	39
Plastik	35	70 - 80
Fe	1.8	16.8
Pb	0.6	17.6
U	0.3	11



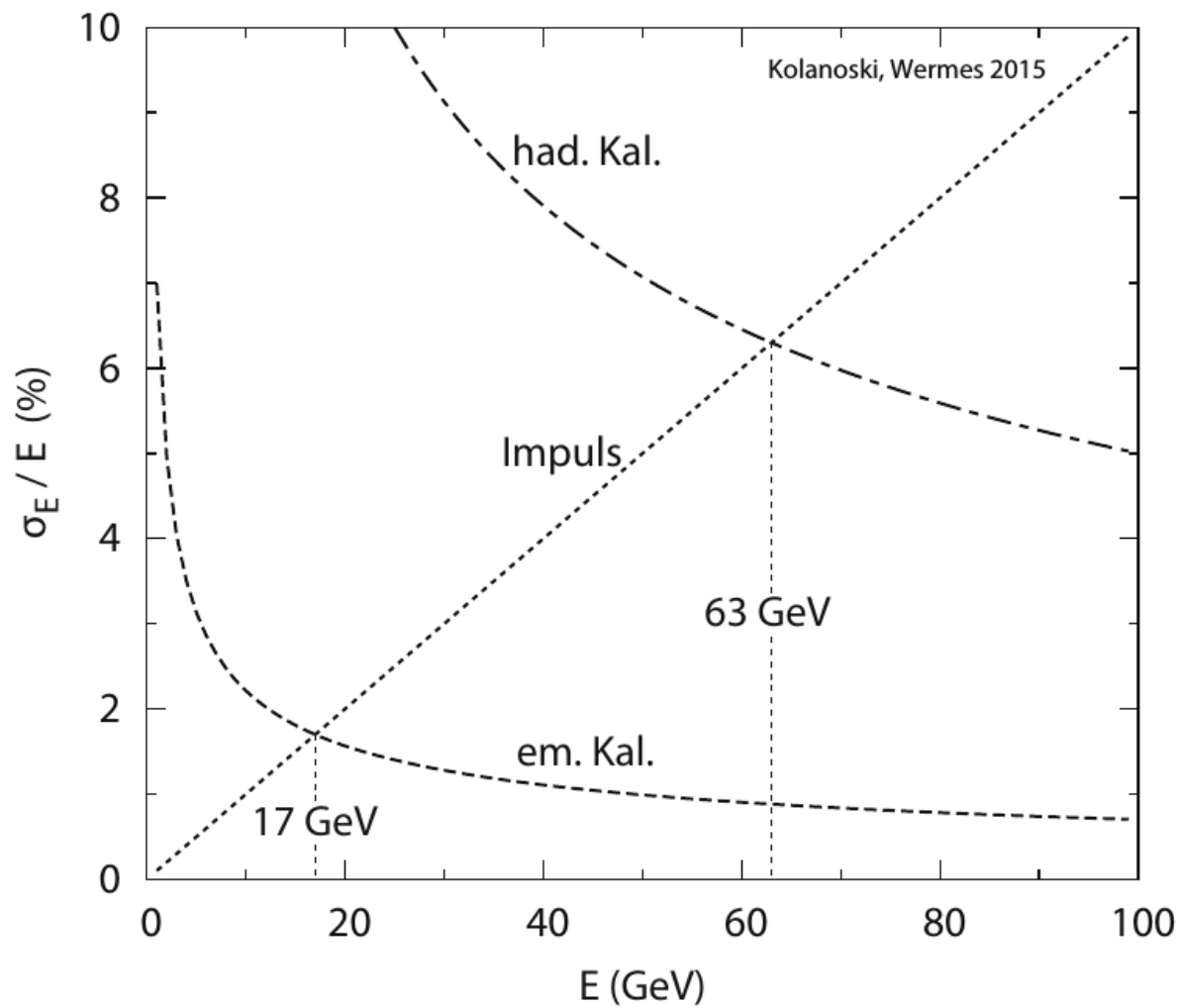
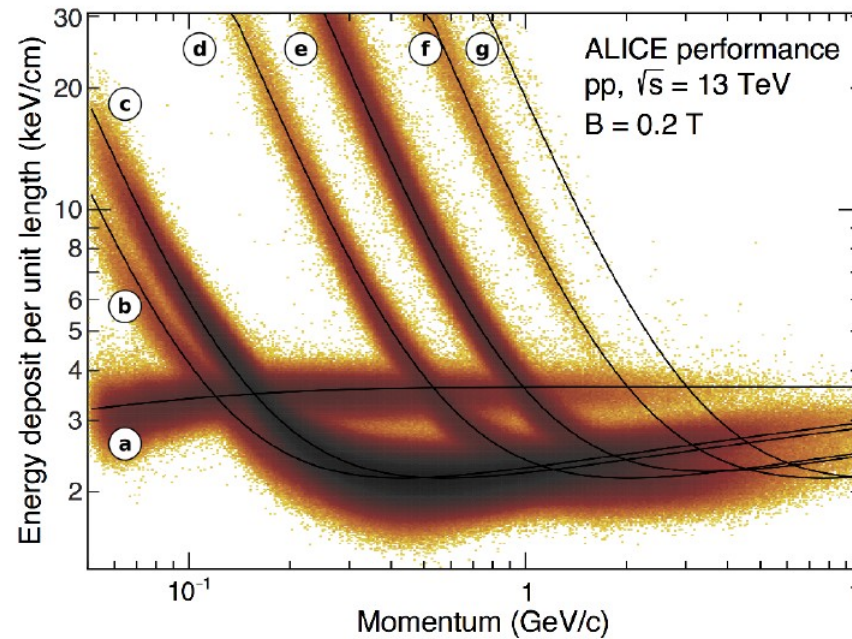


Abb. 15.1 Vergleich von typischen Energieauflösungen in einem Detektor: In dem Beispiel wurden die Energieauflösungen in elektromagnetischen und in hadronischen Kalorimetern zu $\sigma_E^{em}/E = 7\%/\sqrt{E}$ beziehungsweise $\sigma_E^{had}/E = 50\%/\sqrt{E}$ angenommen. Für die Energiebestimmung durch eine Impulsmessung wurde eine Impulsauflösung von $\sigma_p/p = 0.1\% p$ angenommen. Damit wird die Energiebestimmung durch eine kalorimetrische Messung jeweils bei 17 GeV und 63 GeV besser als durch eine Impulsmessung.

8.3 Teilchenidentifikation in einer TPC (1 Punkt)

Eine Zeitprojektionskammer (Time Projection Chamber, TPC) ist ein Gasdetektor, bei dem die Teilchen das Gas ionisieren und die freigesetzten Elektronen über weite Strecken zu einer Auslekammer driften. Die Driftzeit ist dabei ein Maß für den Abstand der ursprünglichen Teilchenspur von der Auslekammer (Zeitprojektion). Neben der Driftzeit wird auch die Ladung, die ein Maß für den Energieverlust der Teilchen ist, gemessen. Das Diagramm zeigt Messungen des Energieverlusts von geladenen Teilchen im Gasvolumen der TPC des ALICE Experiments am LHC.



Die vom Teilchen im Gas pro Wegstrecke deponierte Energie dE/dx ist gegen den Impuls aufgetragen (beachten Sie die doppelt-logarithmische Darstellung des Diagramms). Es sind mehrere Klassen von Teilchen erkennbar.

- (i) Ordnen Sie die mit (a) bis (g) bezeichneten Klassen den folgenden Teilchenarten zu: Myonen, Protonen, Kaonen, Deuteronen (Atomkerne des Deuteriums, bestehend aus einem Proton und einem Neutron), Pionen, Elektronen, Tritium-Kerne (bestehend aus einem Proton und zwei Neutronen). Begründen Sie Ihre Zuordnung.
- (ii) Die Steigungen der Kurven b) bis g) im jeweils steilsten Abschnitt sind auffällig ähnlich. Schätzen Sie den Wert der Steigung ab. Woher kommt dieser Wert? Diskutieren Sie.

Die vom Teilchen im Gas pro Wegstrecke deponierte Energie dE/dx ist gegen den Impuls aufgetragen (beachten Sie die doppelt-logarithmische Darstellung des Diagramms). Es sind mehrere Klassen von Teilchen erkennbar.

- (i) Ordnen Sie die mit (a) bis (g) bezeichneten Klassen den folgenden Teilchenarten zu: Myonen, Protonen, Kaonen, Deuteronen (Atomkerne des Deuteriums, bestehend aus einem Proton und einem Neutron), Pionen, Elektronen, Tritium-Kerne (bestehend aus einem Proton und zwei Neutronen). Begründen Sie Ihre Zuordnung.
- (ii) Die Steigungen der Kurven b) bis g) im jeweils steilsten Abschnitt sind auffällig ähnlich. Schätzen Sie den Wert der Steigung ab. Woher kommt dieser Wert? Diskutieren Sie.

33.2.3. *Stopping power at intermediate energies :*

The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles is well-described by the “Bethe equation,”

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] . \quad (33.5)$$

Die vom Teilchen im Gas pro Wegstrecke deponierte Energie dE/dx ist gegen den Impuls aufgetragen (beachten Sie die doppelt-logarithmische Darstellung des Diagramms). Es sind mehrere Klassen von Teilchen erkennbar.

- (i) Ordnen Sie die mit (a) bis (g) bezeichneten Klassen den folgenden Teilchenarten zu: Myonen, Protonen, Kaonen, Deuteronen (Atomkerne des Deuteriums, bestehend aus einem Proton und einem Neutron), Pionen, Elektronen, Tritium-Kerne (bestehend aus einem Proton und zwei Neutronen). Begründen Sie Ihre Zuordnung.
- (ii) Die Steigungen der Kurven b) bis g) im jeweils steilsten Abschnitt sind auffällig ähnlich. Schätzen Sie den Wert der Steigung ab. Woher kommt dieser Wert? Diskutieren Sie.

33.2.3. *Stopping power at intermediate energies :*

The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles is well-described by the “Bethe equation,”

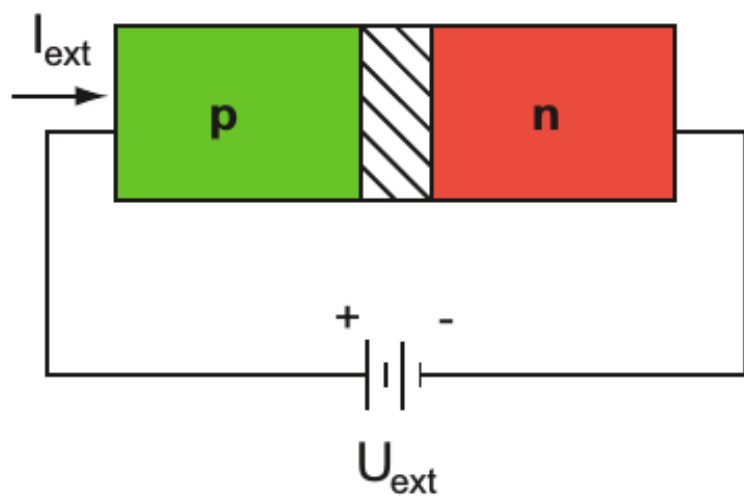
$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] . \quad (33.5)$$

$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ (Coefficient for dE/dx)	$0.307\,075 \text{ MeV mol}^{-1} \text{ cm}^2$
--	--

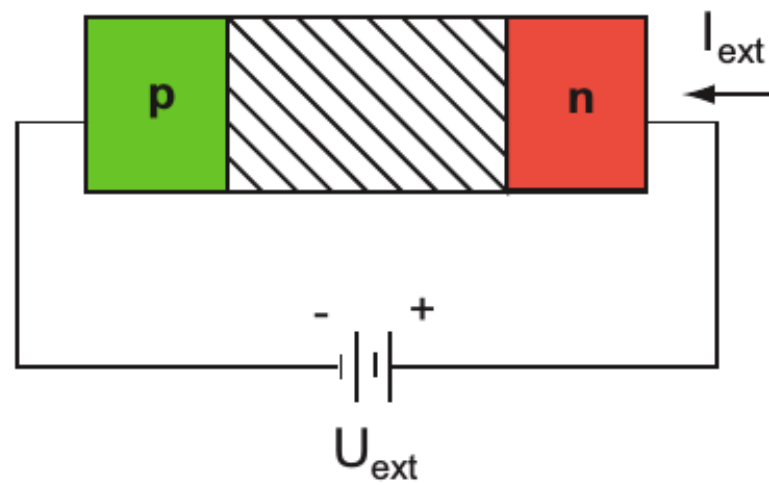
a)



b)



c)



Kolanoski, Wermes 2015

