

Konzepte für Experimente an zukünftigen Hadroncollidern I

PD Dr. Oliver Kortner

25.01.2021

Begriffseinführung

Passives Medium: Material, in dem sich der Schauer entwickelt.

Aktives Medium: Material, in dem elektronisch registrierbare Signale der Schauerteilchen entstehen.

Zwei Kalorimetertypen

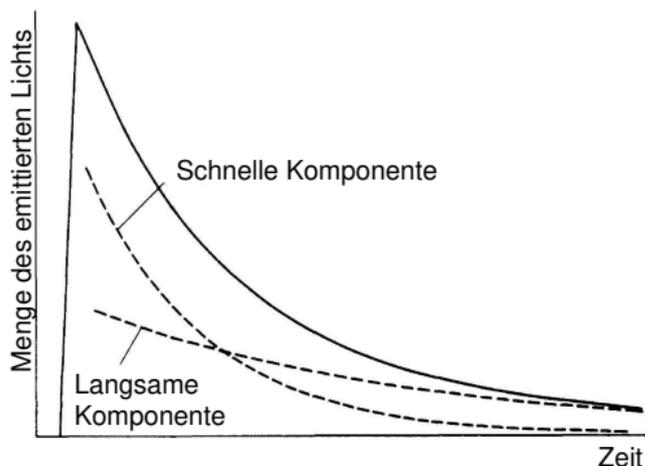
- Homogene Kalorimeter, bei denen das aktive Material auch die Rolle des passiven Materials erfüllt.
- Inhomogene Kalorimeter, auch Samplingkalorimeter genannt, bei denen sich aktives und passives Material abwechseln.

Hadronkalorimeter werden als inhomogene Kalorimeter ausgeführt, um ihre Größe zu begrenzen. Bei elektromagnetischen Kalorimetern kommen beide Typen zum Einsatz.

- Szintillationszähler sind wichtige Detektoren für den aktiven Teil eines Kalorimeters.
- In Szintillationszählern werden Materialien eingesetzt, die einen kleinen Lichtblitz aussenden, wenn sie von Teilchenstrahlung getroffen werden.
- **Wichtige Eigenschaften des Signals eines Szintillationszählers:**
 - Oberhalb eines gewissen Mindestenergiedeposition ist die **Menge des erzeugten Szintillationslichts** in guter Näherung **proportional zum Energieniederschlag**.
 - **Schnelle Reaktionszeit**, d.h. das Lichtsignal entsteht kurz nach der Energiedeposition.

Wiederholung: Zeitlicher Verlauf der Szintillation

- Szintillatoren sind **lumineszierende** Stoffe.
- Wenn die Lichtemission innerhalb 10 ns auftritt, spricht man von **Fluoreszenz**.
- Wenn die Lichtemission verzögert geschieht, spricht man von **Phosphoreszenz**.



- Der zeitliche Verlauf der Lichtemission kann durch die Überlagerung zweier Exponentialverteilungen angenähert werden:

$$N_{\gamma} = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_l}\right);$$

τ_s Zeitkonstante der schnellen Komponente.

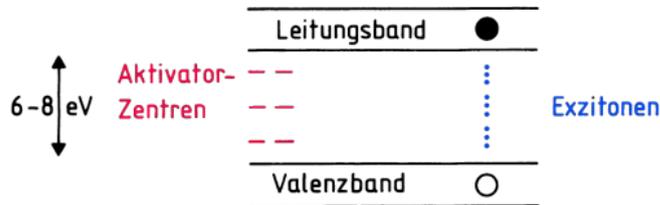
τ_l Zeitkonstante der langsamen Komponente.

Gute Szintillationszähler sollten die folgenden Eigenschaften erfüllen:

- Hohe Effizienz für die Umwandlung deponierter Energie in Szintillationslicht.
- Transparenz für das Szintillationslicht, um die Lichttransmission zu ermöglichen.
- Emission des Szintillationslichts in einem Wellenlängenbereich, für den es effiziente Lichtdetektoren gibt.
- Dominante schnelle Komponente mit kurzer Zeitkonstante τ_s .

- Anorganische Szintillatoren sind vor allem Kristalle von Alkalihaliden, denen kleine Menge sogenannter **Aktivatorzentren** beigemischt werden.
- Beispiele: NaI(Tl), CsI(Tl), $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, PbWO_4 .
- Viele anorganische Szintillatoren sind hygroskopisch, z.B. NaI, und müssen vor Feuchtigkeit geschützt werden.
- Nicht bzw. nur schwach hygroskopisch sind zum Beispiel CsI oder BGO.

Szintillationsmechanismus in anorganischen Szintillatoren

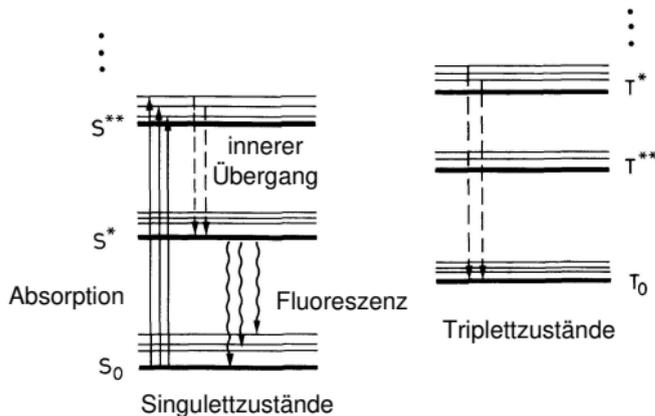


- Ionisierende Teilchenstrahlung kann Elektronen ins Leitungsband oder in Exzitonenbänder anregen.

- Licht, das beim Übergang von Elektronen aus dem Leitungs- ins Valenzband ausgesendet wird, ist nicht im sichtbaren Bereich.
- Sichtbares Licht wird emittiert bei Übergängen von Niveaus der Aktivatorzentren.
- Frei Löcher oder Löcher von Exzitonen können Aktivatoratome ionisieren. Wenn nun ein Elektron auf diese Atom trifft, kann es ein angeregtes Aktivatorniveau belegen und in den Grundzustand durch Emission sichtbaren Lichts zurückfallen.

- Organische Szintillatoren sind aromatische Kohlenwasserstoffe, die gebundene oder kondensierte Benzolringstrukturen enthalten.
- Organische Szintillatoren zeichnen sich durch kurze Zeitkonstanten im Nanosekundenbereich aus.
- Das Szintillationslicht kommt von Übergängen freier Valenzelektronen in den π -Orbitalen der Moleküle.

Szintillationsmechanismus in organischen Szintillatoren



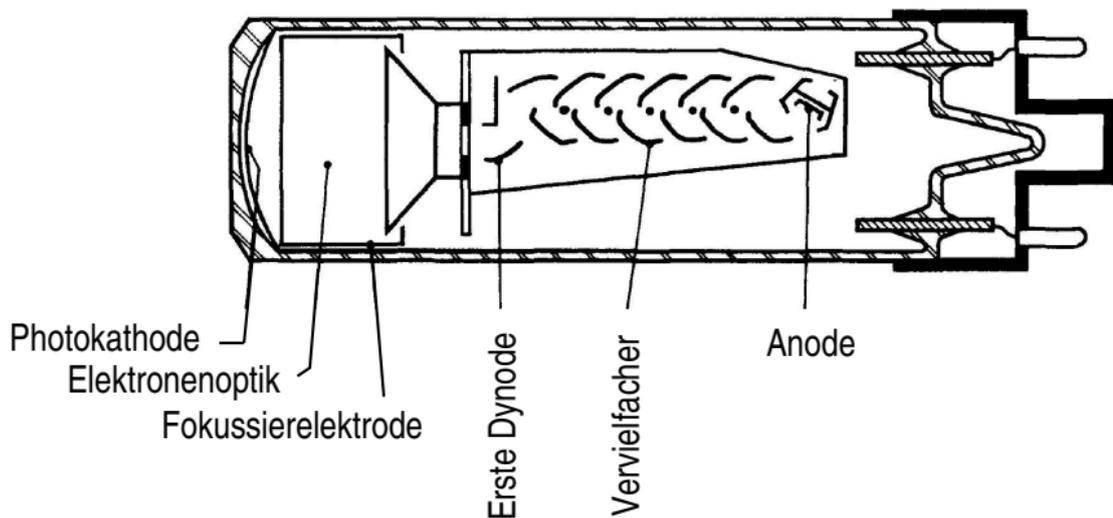
- Anregung der Elektronenenergie- und Vibrationsniveaus durch die ionisierende Teilchenstrahlung.
 - Innerhalb <10 ps strahlungsloser Übergang von der Singulettanregung S^{**} in S^* .
 - Große Wahrscheinlichkeit für eines Strahlungsübergangs von S^* in ein tiefergelegenes Vibrationsniveau.
- ⇒ Transparenz für ausgesendetes Licht, da das Vibrationsniveau über dem Grundzustand S_0 liegt.

- Ähnliche innere Übergänge von den angeregten Tripletzuständen.
- $T_0 \rightarrow S_0$ wegen Auswahlregeln unterdrückt.
- $T_0 + T_0 \rightarrow S^* + S_0 + \text{Phononen}$, danach Emission von Szintillationslicht wie oben.

- Plastikszintillatoren sind in einem festen Plastik gelöste organische Szintillatoren.
- Häufig benutztes Plastik: Polyvinyltoluen, Polyphenylbenzol, Polystyren.
- Gebräuchliche Szintillatoren:
 - p-Terphenyl ($C_{18}H_{14}$).
 - PDB ($C_{20}H_{14}N_2O$).
 - PPO ($C_{15}H_{11}NO$).

Wiederholung: Photovervielfacher

- Zum Nachweis des Szintillationslicht werden meistens Photovervielfacherröhren eingesetzt.
- Allerdings benötigen sie viel Platz und können nur bedingt in großen Magnetfeldern betrieben werden, so dass in einigen Experimenten durch Avalanchphotodioden oder Siliziumphotovervielfacher ersetzt werden. Aus Zeitgründen werden wir diese neueren Vervielfacher nicht besprechen.
- Schematische Darstellung eines Photovervielfachers

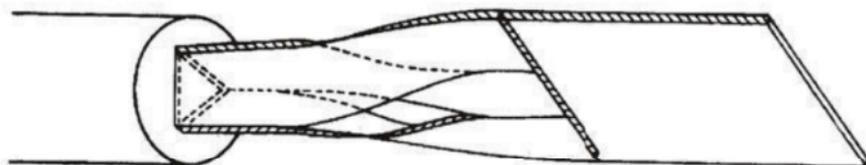


Wiederholung: Typischer Aufbau eines Szintillationszählers

Photomultiplier

Lichtleiter

Szintillator



- Auch flüssiges Argon wird in Kalorimetersn als aktives Medium eingesetzt.
- Im flüssigen Zustand ist das Edelgas so dicht, dass die geladenen Schauerteilchen viele Elektronen durch Ionisation freisetzen können.
- Um diese Elektronen einzufangen, schließt man das flüssige Argon zwischen zwei Elektroden ein, die auf Hochspannung zum Ladungseinsammeln gesetzt werden.

- Hadronkalorimeter sind Samplingkalorimeter.
- Wahl des passiven Mediums so, dass λ_A nicht zu verschieden von X_0 ist, damit sich die hadronischen und elektromagnetischen Komponenten ähnlich entwickeln.
- Gutes Absorbermaterial: Eisen ($X_0=1,8$ cm, $\lambda_A=17$ cm).
- Alternativer Ansatz: Kompensierendes Kalorimeter.
Wahl von Absorbermaterialien mit hoher Ordnungszahl (Uran, Blei, Wolfram), um die Signalausbeute für die elektromagnetische Komponente gegenüber der hadronischen zu dämpfen.

Kalorimetersignale von Elektronen und Hadronen

- Signal eines Pions:

$$S(\pi) = (f_{em} \cdot \epsilon_{em} + f_h \cdot \epsilon_h) \cdot E,$$

(ϵ : Nachweiseffizienz).

- Signal eines Elektrons:

$$S(e) = \epsilon_{em} \cdot E$$

- $\frac{e}{p}$ -Verhältnis:

$$\frac{S(e)}{S(\pi)} = \frac{\epsilon_{em} \cdot E}{(f_{em} \cdot \epsilon_{em} + f_h \cdot \epsilon_h) \cdot E} = \frac{\frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h}}{1 - f_{em} \left(1 - \frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h}\right)},$$

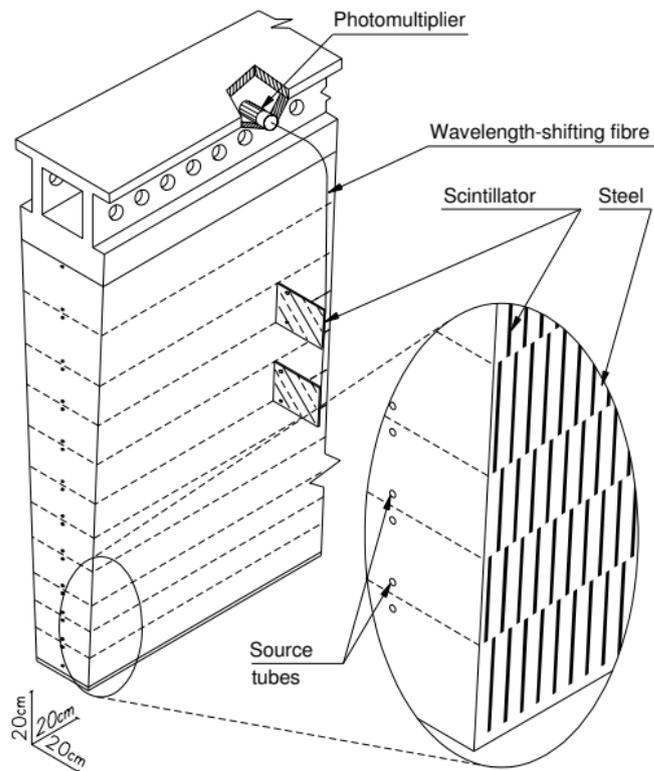
also $\frac{S(e)}{S(\pi)} = 1$, wenn $\epsilon_{em} = \epsilon_h$.

- **Energieauflösung:**

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \left(\frac{\epsilon_{em}}{\epsilon_h} \right);$$

$a \sim 50\%$, also viel größer als bei einem elektromagnetischen Kalorimeter.

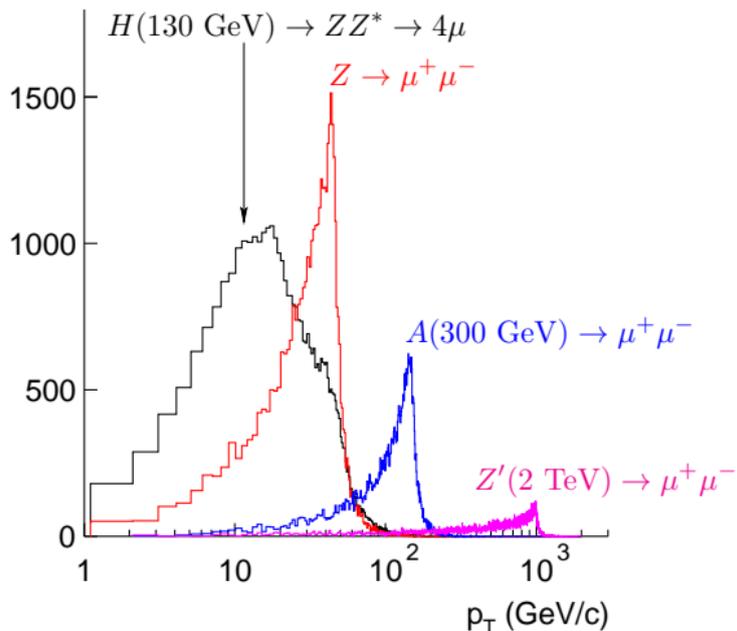
Beispiel: ATLAS-Hadronziegelkalorimeter



Myonidentifikation an Hadroncolliderexperimenten

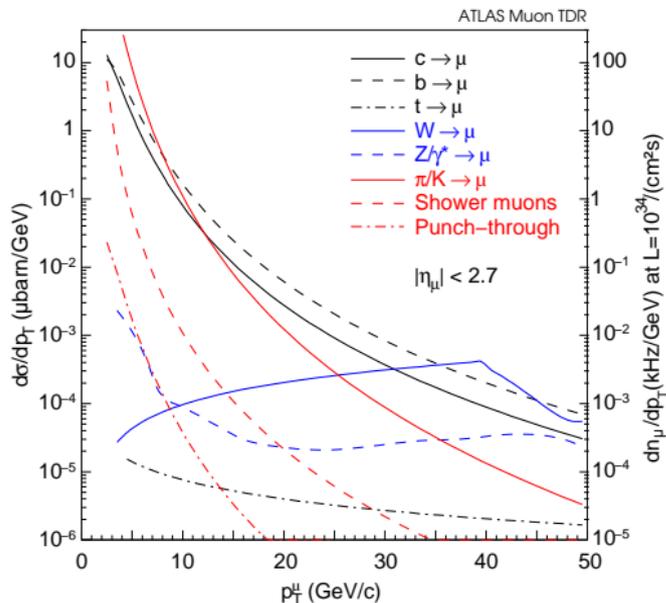
- Myonen sind die einzigen geladenen primären Kollisionsprodukte, die nicht im Kalorimeter absorbiert werden.
- Saubere Signatur für Endzustände mit Myonen.
- Beispielprozesse mit Myonen im Endzustand:
 - $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu\mu\ell\ell$,
 - $A \rightarrow \mu\mu$,
 - $Z' \rightarrow \mu\mu$.
 - Guter Myonnachweis ist sehr wichtig für die Durchführung des Physikprogramms an Hadroncollidern.

Charakteristische Myonspektren



Effizienter Myonnachweis über ein großes Impulsintervall erforderlich.

Inklusive Wirkungsquerschnitte



Myonnachweisaufgaben

- Nachweis von Myonen aus c -, b -, t -, W -, and Z/γ -Zerfällen.
- Aussondern von Myonen aus π/K -Zerfällen, Myonen aus Hadronschauern und niederenergetischen Hadronen, die aus den Kalorimetern ins Myonsystem entweichen.

Myonnachweiskonzept

Ziel

Reduzierung des
hadronischen punch-throughs

Unterdrückung von Myonen
aus π/K -Zerfällen im Fluge

Unterdrückung von
Schauermyonen

Lösung

Myonsystem außerhalb
der Kalorimeter

p_T -Messung im
Myonsystem mit $\frac{\Delta p_t}{p_t} \lesssim 10\%$
+ Forderung einer guten Übereinstimmung mit der Spurmessung im Innendetektor

Wie $\pi/K \rightarrow \mu$ + Forderung nach einem kleinen Energieniederschlag in den Kalorimetern

Die Myonsysteme des ATLAS- und CMS-Experiments

Energieverlust in den Kalorimetern

- Energieverlust ~ 3 GeV mit $\lesssim 20\%$ Schwankung.
- Größere Schwankungen können mit den Kalorimetern gemessen werden.

→ Vernachlässigbare Einfluss auf $\frac{\Delta p_t}{p_t}$ for $p_t \gtrsim 10$ GeV/c.

Vielfachstreuung (VS) in den Kalorimetern

- Vernachlässigbar für ATLAS: $\frac{\Delta p_t}{p_t}|_{VS} \sim 10^{-3}$.

Vielfachstreuung und Magnetfeldintegral im Myonsystem

- $\frac{\Delta p_t}{p_t} \propto \frac{\sqrt{\text{Material im Myonsystem } [X_0]}}{\int B dl}$.

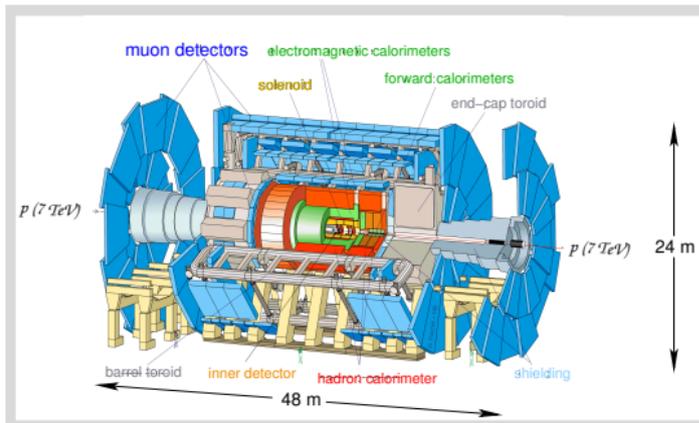
Ortsauflösung der Myonkammern:

- Ortsauflösung σ der Myonkammern begrenzt $\frac{\Delta p_t}{p_t}$ bei hohem $p_T \sim 1$ TeV/c.
- $\frac{\Delta p_t}{p_t} \propto \sigma$ für $p_T \sim 1$ TeV/c.

Die Myonsystem von ATLAS und CMS

Zwei Konzepte für die Myonsysteme

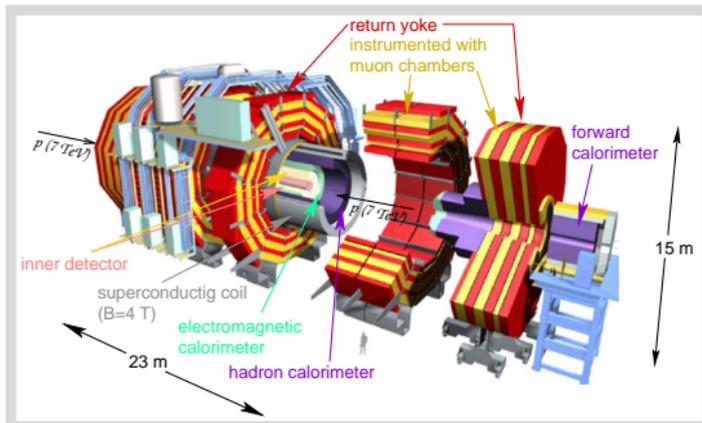
ATLAS



- Schwerpunkt auf vom Innendetektor unabhängiger Impulsmessung.

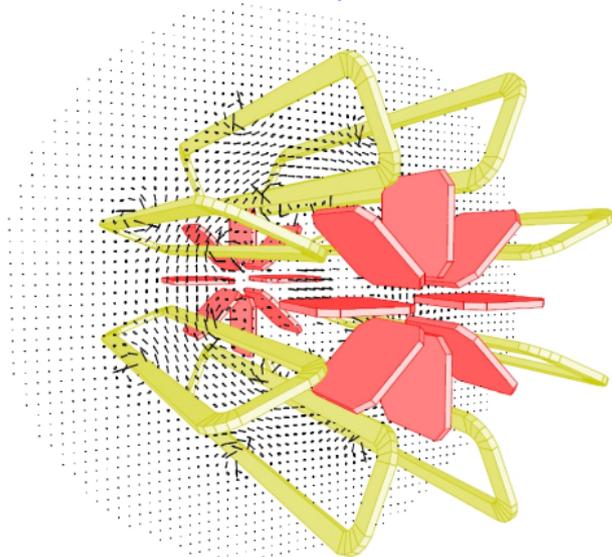
→ Luftspulentoroidmagnet → Minimierung der Vielfachstreuung.

CMS



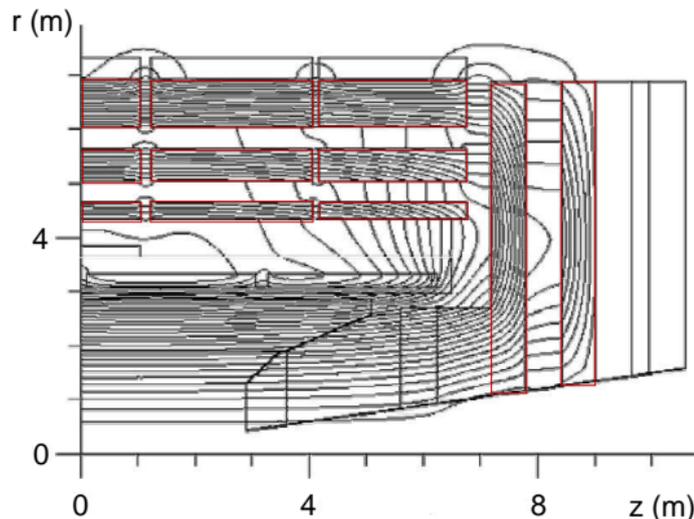
- Schwerpunkt auf großem $\int B dl$ im Innendetektor und kompakter Bauweise.
- Instrumentiertes Eisenrückflussjoch des Solenoidmagneten für ein großes Magnetfeldintegral.

ATLAS: Luftspulentoroid



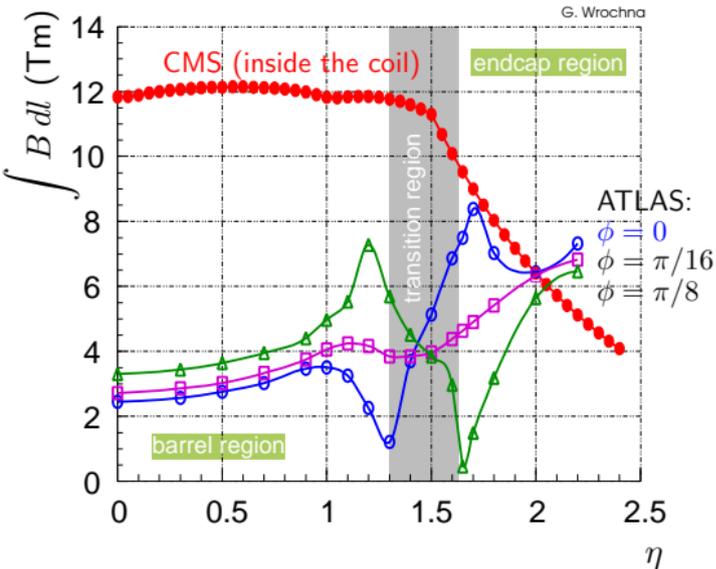
- Keine starke Begrenzung von $\frac{\Delta p_t}{p_t}$ durch VS.
- Genaue Magnetfeldmessung möglich.
- Gleichförmiges $\frac{\Delta p_t}{p_t}$ unabhängig von η .

CMS: Eisenrückflussjoch des Solenoiden



- Gleichförmiges Magnetfeld im Zentralbereich.
- Großes Magnetfeldintegral.
- Starke Begrenzung von $\frac{\Delta p_t}{p_t}$ durch VS.
- η -abhängiges $\frac{\Delta p_t}{p_t}$.

Vergleich der Magnetfeldintegrale



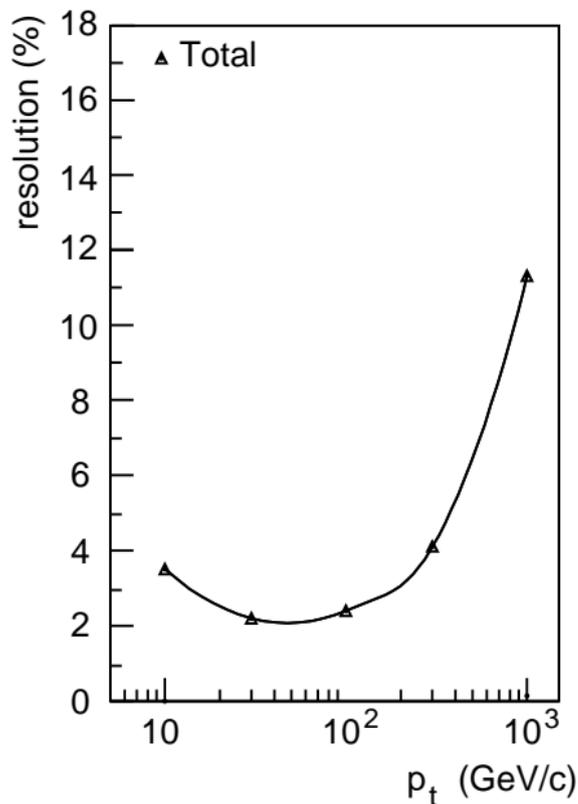
Zentralbereich: $\approx 5 \times$ größeres
Feldintegral bei CMS,
aber ≈ 14 -mal mehr
Vielfachstreuung.

$\rightarrow \approx 3 \times$ schlechtere p_T -Auflösung
bei CMS.

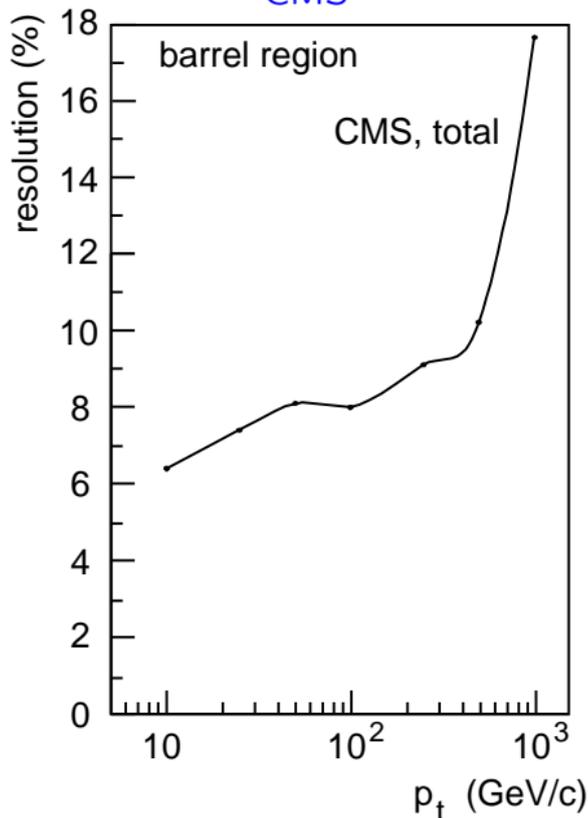
Endkappen: Ähnliche Feldintegrale,
 ≈ 10 -mal mehr Vielfachstreuung
bei CMS.

$\rightarrow \approx 5 \times$ schlechtere p_T -Auflösung
bei CMS.

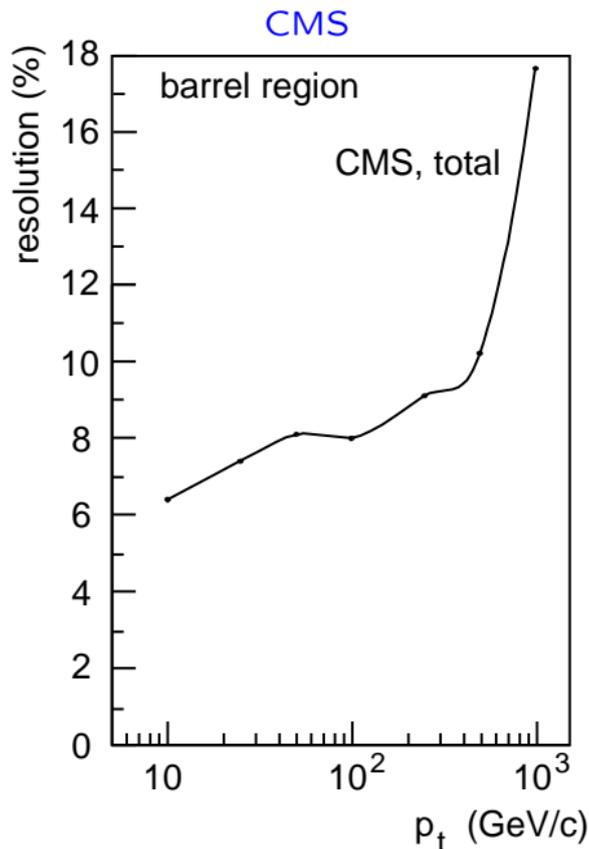
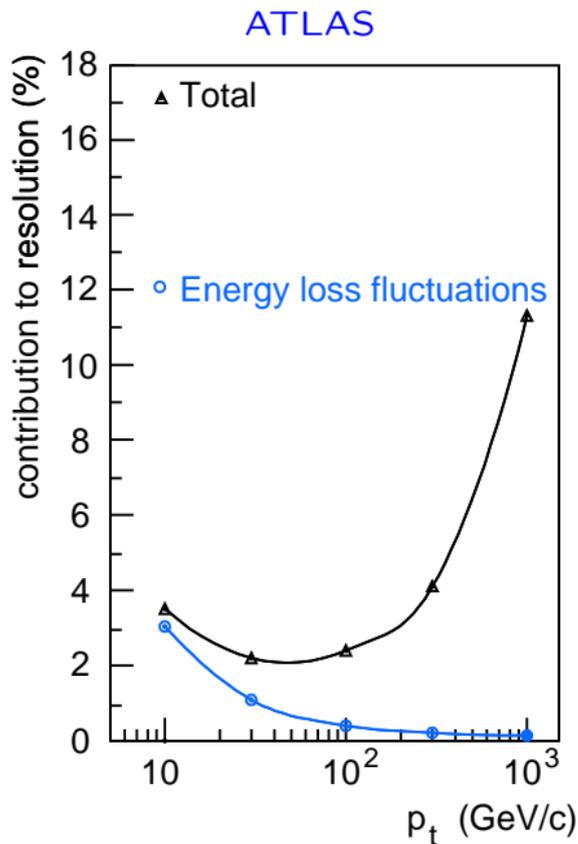
ATLAS



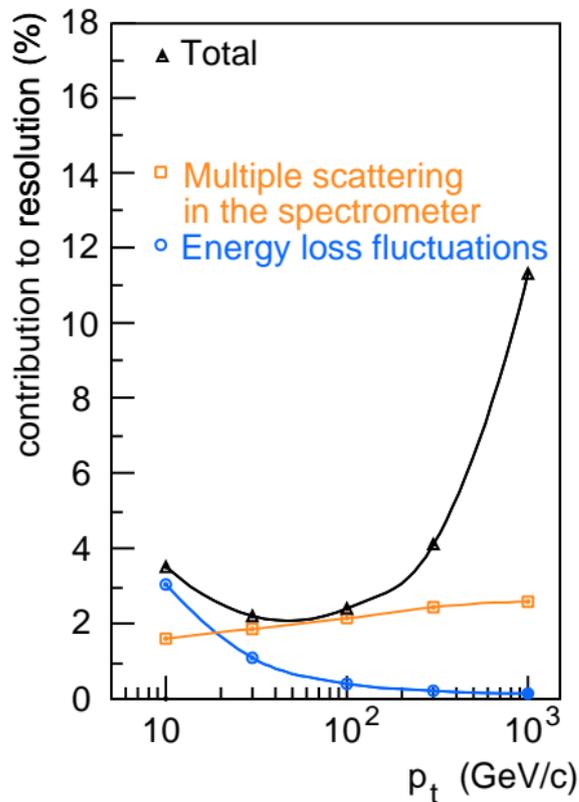
CMS



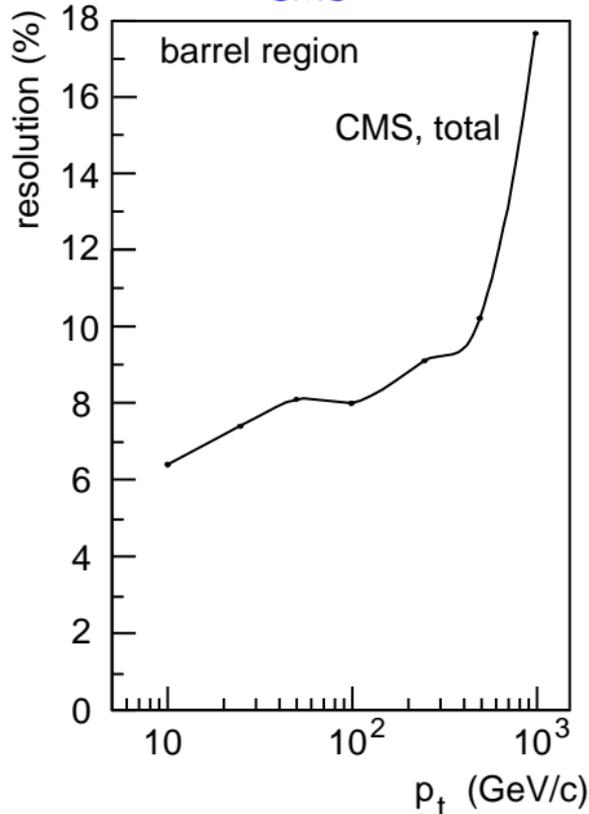
Impulsauflösung im Myonsystem



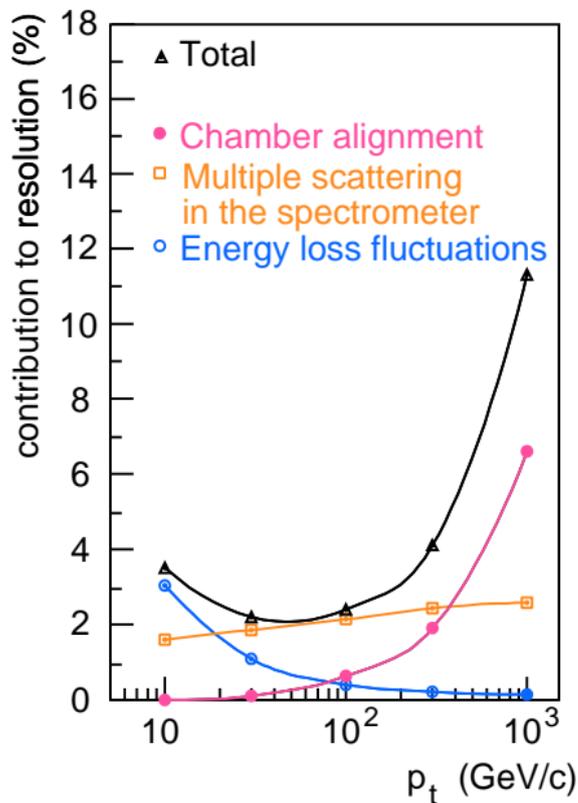
ATLAS



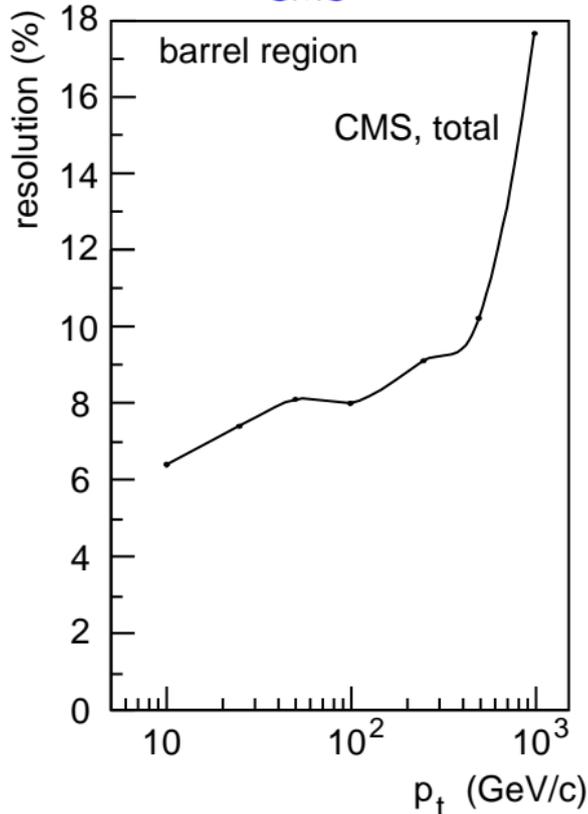
CMS



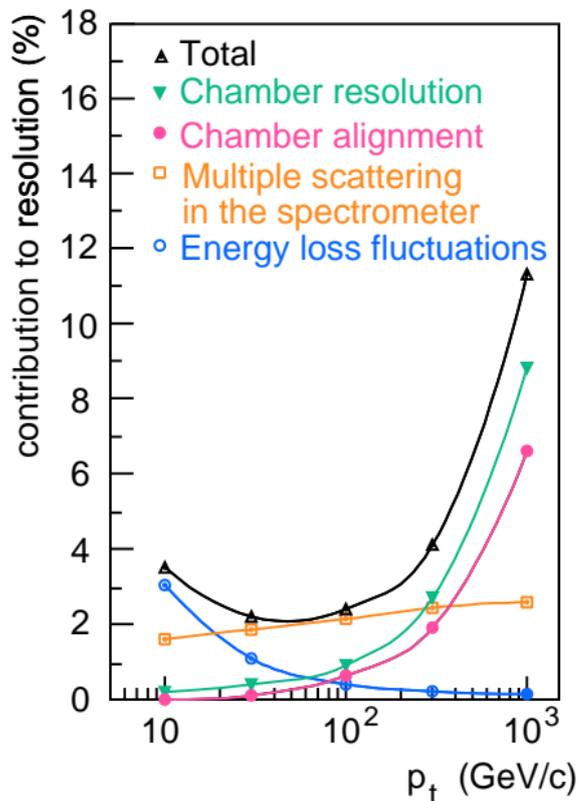
ATLAS



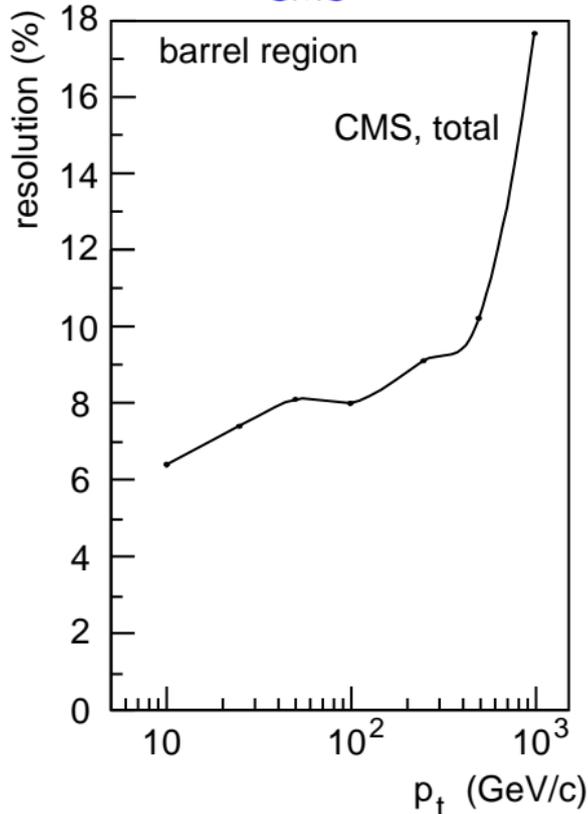
CMS



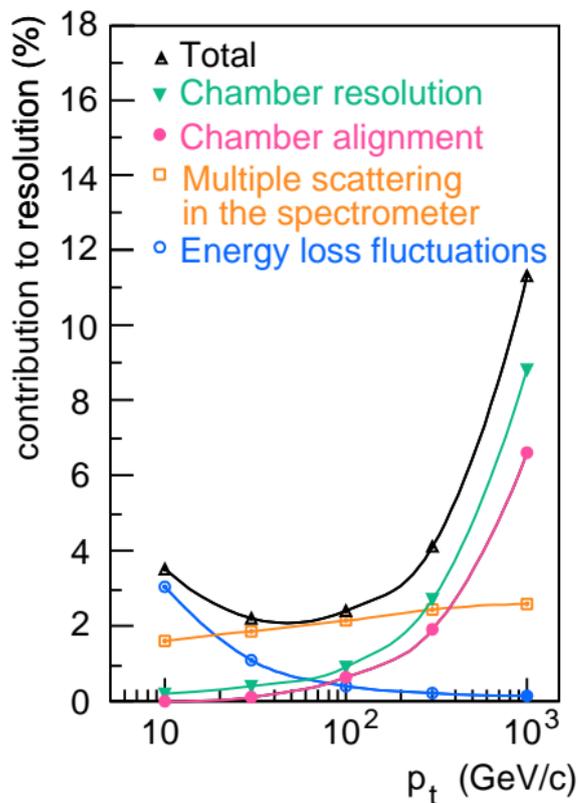
ATLAS



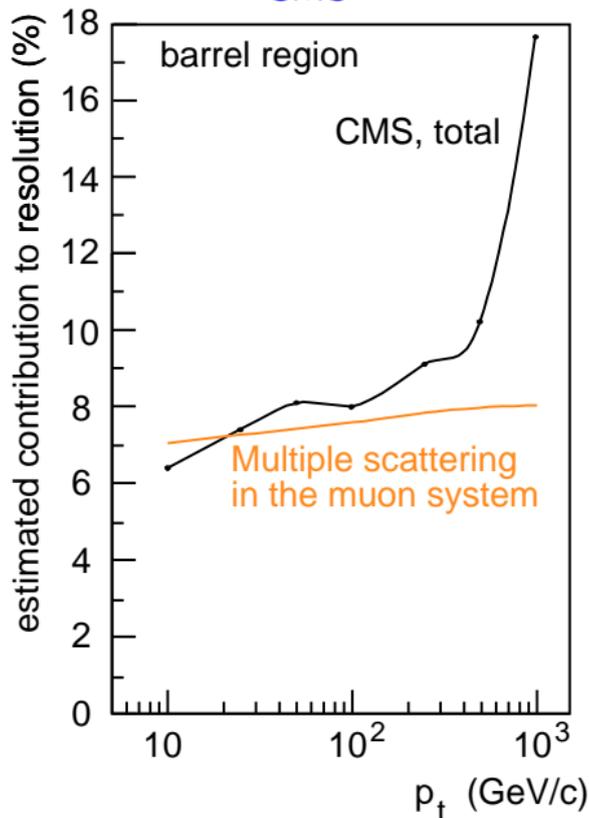
CMS



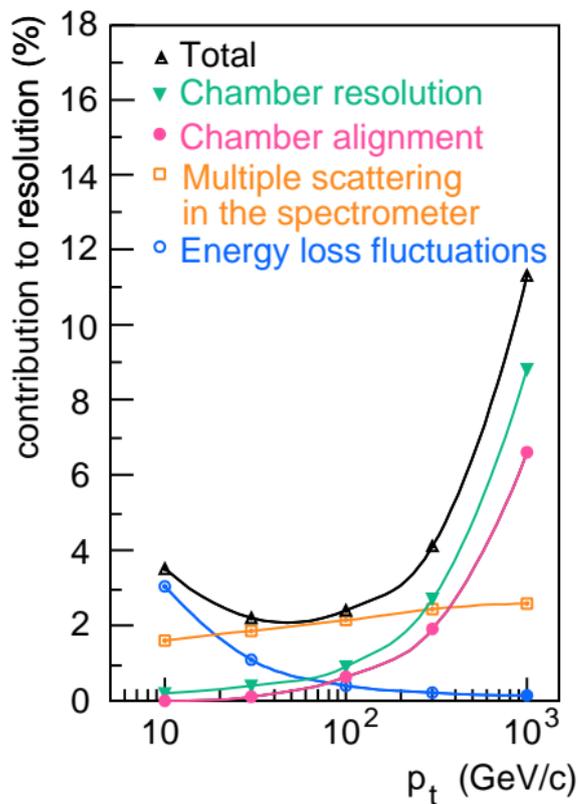
ATLAS



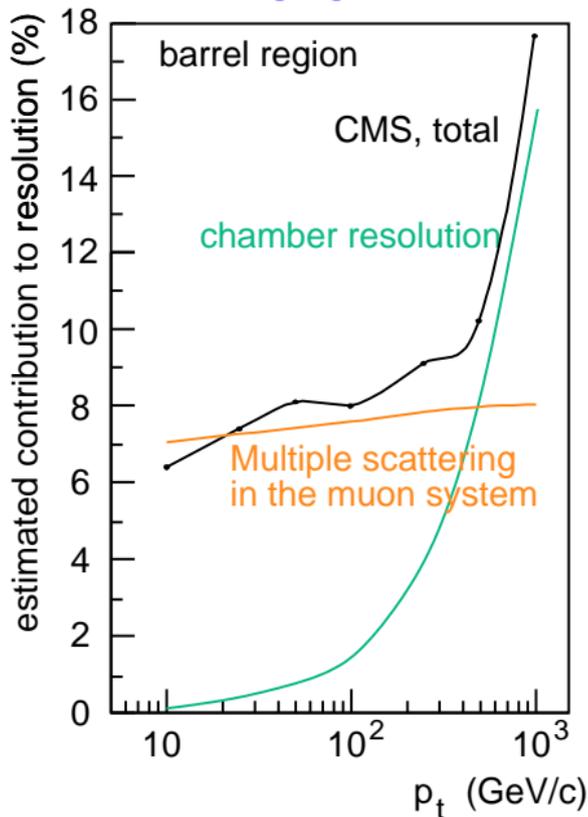
CMS



ATLAS

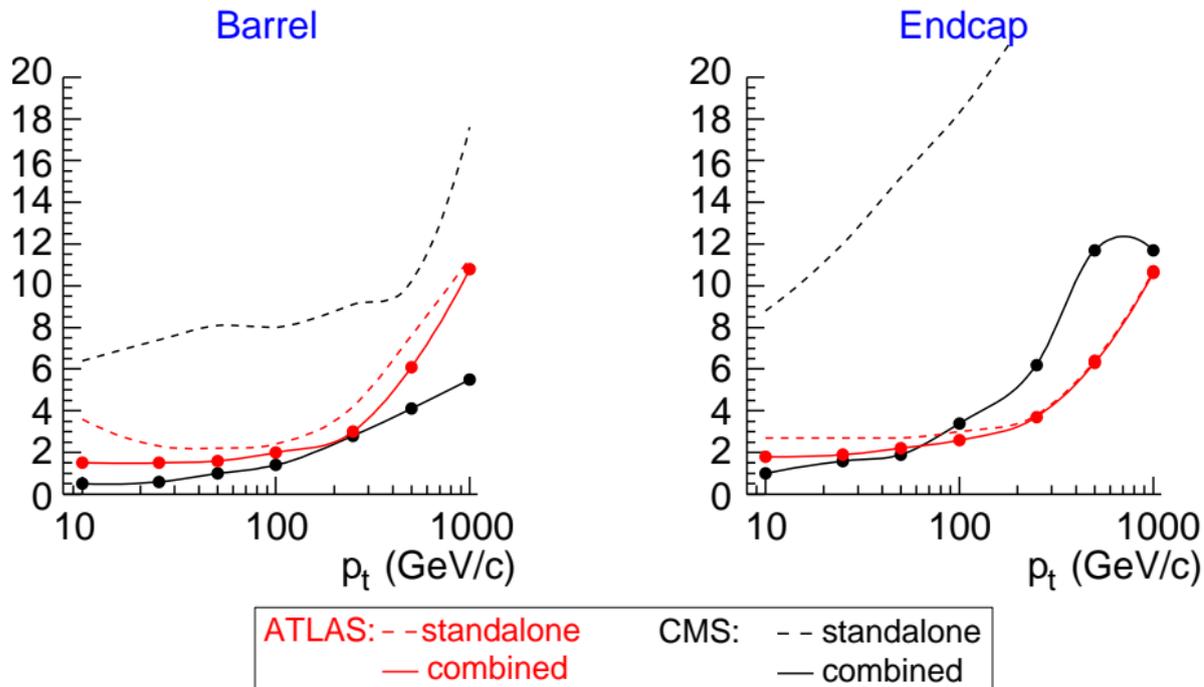


CMS



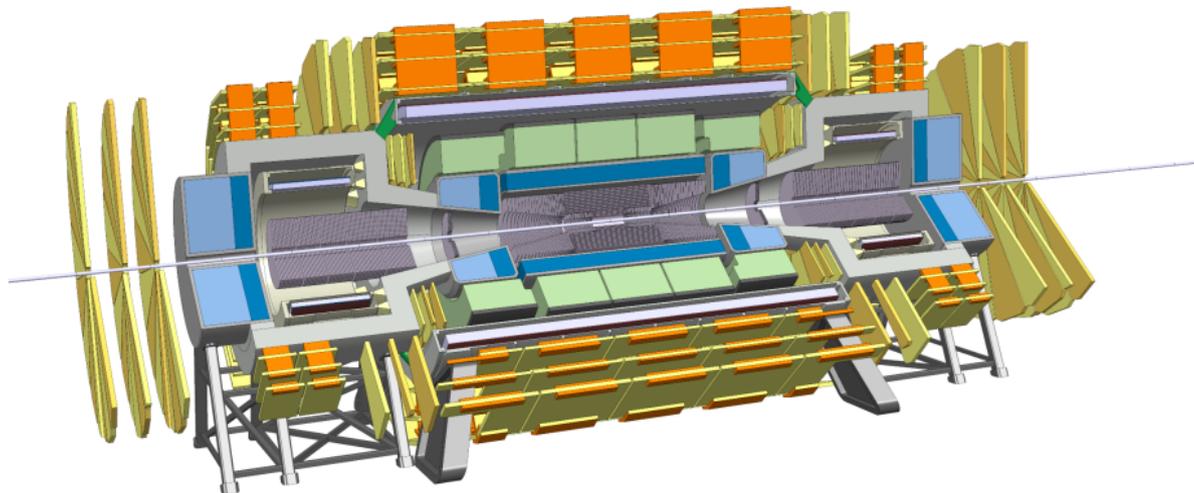
Impulsauflösung mit Innendetektor und Myonsystem

Verbesserung der Impulsauflösung durch Kombination der Messungen im Innendetektor und im Myonsystem.



Besser Impulsauflösung bei CMS im Innendetektor wegen des größeren Magnetfeldes.

Muonsystem des FCC-Referenzdetektors



- 4 T 10 m Solenoid + Solenoiden im Vorwärtsbereich.
- Siliziumhalbleitersensoren im Innendetektor.
- Flüssingargonkalorimeter.
- Eine Myonkammerlage. Impulsmessung für den Trigger aus der Einflugrichtung in das Myonsystem.