

# Hauptseminar: Der Urknall und seine Teilchen

## Das CMS-Experiment

Handout zum Vortrag am 6.10.2011

Jonathan Lehr

### Inhalt

|   |    |
|---|----|
| 1. Der LHC und seine Detektoren und die verfolgten Ziele..... | 2  |
| 2. Das Higgs-Boson .....                                      | 3  |
| 3. Teilchennachweis anhand des Beispiels Higgs-Teilchen ..... | 4  |
| 4. Teilchennachweis und Detektorsystem .....                  | 5  |
| 5. Vergleich von CMS und ATLAS.....                           | 9  |
| 6. Mögliche Ergebnisse.....                                   | 10 |
| 7. Quellenangaben .....                                       | 12 |

## 1. Der LHC und seine Detektoren und die verfolgten Ziele

Das CMS-Experiment ist ein Detektor am Large Hadron Collider (LHC). Der LHC ging 2009 vollständig in Betrieb und seitdem werden am Detektor Daten von Teilchenkollisionen aufgenommen.

Mit bis zu 14 TeV bei pp-Kollisionen und bis zu 1150 TeV bei Schwerionenkollisionen setzt der LHC die Suche nach neuer Physik auf höherer Energieskala fort.

Die Größe des Rings (27 km) sowie des CMS-Detektors (15 m Höhe, 20 m Länge) veranschaulicht die Gewaltigkeit eines solchen Großexperiments.

Mit Kollisionen zweier Pakete derzeit im 50ns-Takt finden 20 Millionen in der Sekunde statt. Ein solches Paket besteht bspw. aus 115 Milliarden Protonen. Im Vollbetrieb befinden sich 2800 Pakete im Ring. Da man in beide Richtungen positive Teilchen schickt, benötigt man zwei Strahlrohre, in denen die Teilchen gegenläufig zirkulieren. An den Detektoren kreuzen sich die Strahlrohre und es kommt zur Teilchenkollision. Aufgrund der vielen Kollisionen erzeugen die Detektoren riesige Datenmengen für die Auswertung.

Leider unterliegen solche Experimente technischen Grenzen wie der Größe der Erde, der Supraleitfähigkeit des Materials bis zu einer bestimmten Magnetfeldstärke und dem Energieverlust durch Bremsstrahlung von den auf einer Kreisbahn gehaltenen relativistischen Teilchen.

Die am LHC erzeugbaren Energien gewähren uns möglicherweise einen Einblick in die Vorgänge zur Zeit der Quark-Ära in der Entstehungsgeschichte des Universums nach der Urknalltheorie. Eines der aktuellen Ziele der experimentellen Teilchenphysik ist demnach die Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas, das in der Quark-Ära vorherrschend gewesen sein soll. Ein weiteres Ziel ist die Entdeckung von supersymmetrischen Teilchen vorhergesagt von SUSY. Kandidaten sind das leichteste supersymmetrische Teilchen (LSP), möglicherweise das Neutralino, sowie das Graviton oder sein supersymmetrisches Partnerteilchen Gravitino im Falle einer SUGRA (einheitliche Beschreibung von Supersymmetrie und Gravitation). Weiter wird die leichte CP-Verletzung durch die schwache Wechselwirkung anhand von B-Mesonen untersucht. Und schließlich wird die Suche nach dem Higgs-Boson fortgeführt. Es ist das einzige Teilchen des Standardmodells, das bisher nicht nachgewiesen werden konnte.

Während am LHCb (B-Meson-Detektor) die CP-Verletzung untersucht wird und am ALICE das Quark-Gluon-Plasma bei Schwerionenkollision, verfolgen CMS und ATLAS beide das Auffinden des Higgs-Teilchens und supersymmetrischer Teilchen sowie die Untersuchung von Schwerionenkollisionen. CMS bedeutet Compact Muon Solenoid und soll für die Kompaktheit des Detektors z.B. im Vergleich zu ATLAS stehen, für seine ausgeprägte Fähigkeit Myonen zu detektieren und für seinen starken Solenoid, der ein Magnetfeld von bis zu 4 T erzeugt.

## 2. Das Higgs-Boson

Das Higgs-Boson folgt aus dem Higgs-Mechanismus. Es ist ein Austauscheteilchen der Wechselwirkung aller massebehafteten Teilchen mit dem quantisierten Higgs-Feld. Theoretisch wird der Higgs-Mechanismus hervorgerufen durch eine spontane Symmetriebrechung. Diese wird verursacht durch ein Potential, dessen Minimum sich nicht im Ursprung befindet, sondern eine Kreisbahn um den Ursprung beschreibt. Man nennt es anschaulicherweise Mexican-Hat-Potential:

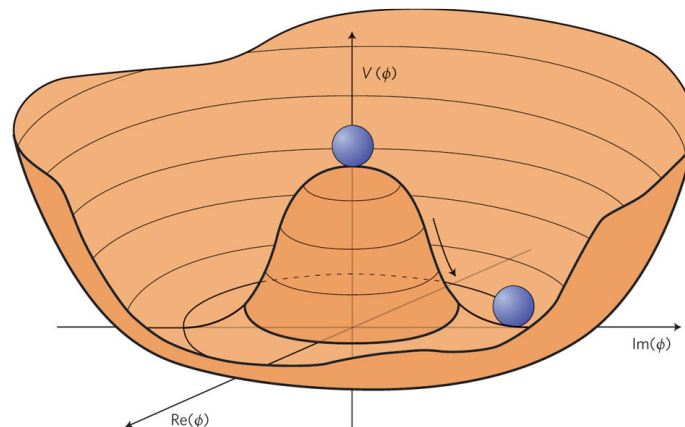


Abbildung 1: Mexican-Hat-Potential

Der Grundzustand befindet sich nicht bei  $\phi = 0$ . Der Zustand eines Teilchens bei  $\phi = 0$  ist labil. Aufgrund der immer gegenwärtigen Quantenunschärfe würde ein Teilchen dort in die Potentialmulde fallen. Während eine Bewegung entlang des Minimums keine Energie erfordert (masseloses Goldstone-Boson), tut es dies entlang der Krümmung. Eine solche Bewegung wird durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Boson beschrieben und seine Masse hängt mit der Krümmung des Potentials am Minimum zusammen.

In der Lagrangefunktion tritt ein zusätzlicher Wechselwirkungsterm mit dem Potential  $V(\phi)$  auf. Es bekommt die Kopplungskonstante  $m^2$  als Vorfaktor. Damit kann dann erklärt werden, dass eine Kopplung des Higgs-Teilchens proportional zur Masse des Teilchens ist, an das gekoppelt wird. Bei der Beschreibung einer Teilchenreaktion mit beteiligtem Higgs-Teilchen durch Feynman-Diagramme bekommt ein Vertex damit den Faktor  $m$ .

Die Einführung des Higgs-Mechanismus ist wichtig, um die Massen der Eichbosonen  $Z_0$  und  $W^\pm$  zu erklären. Denn die mathematische Beschreibung erfordert masselose Eichbosonen!

Eigenschaften des Higgs-Bosons: Elektrisch neutral, Spin 0 und Masse  $> 114 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ . Diese Untergrenze der Masse konnte durch die Vorgänger des LHCs ermittelt werden. Man maß bis zu dieser Energie und aufgrund des Ausbleibens einer Entdeckung kann der Energiebereich ausgeschlossen werden.

### 3. Teilchennachweis anhand des Beispiels Higgs-Teilchen

Ein Higgs-Boson kann beispielsweise durch Fusion zweier Austauschteilchen (z.B.  $Z + Z \rightarrow H$ ) entstehen oder durch Bremsstrahlung (z.B.  $W^\pm \rightarrow W^\pm + H$ ). Da die Kopplung des Higgsteilchens an andere Teilchen proportional zu deren Masse ist, ist die Entstehung über Z-Bosonen am wahrscheinlichsten. Eine direkte Kopplung an Photonen ist somit nicht möglich, da sie keine Masse besitzen.

Um ein Higgs-Boson im Detektor nachzuweisen, bedarf es der Kenntnis seiner Zerfallskanäle. Das Teilchen selbst zerfällt aufgrund seiner großen Masse viel zu schnell, um direkt nachgewiesen werden zu können. Es können aber stabilere Zerfallsprodukte des Teilchens detektiert werden. Auftreten und Wahrscheinlichkeit seiner verschiedenen Zerfallskanäle sind abhängig von seiner Masse. Bei jeder möglichen Masse sind jedoch Kanäle über zwei Austauschteilchen sehr wahrscheinlich. Entsteht ein Z-Paar oder  $W^+W^-$ -Paar, so zerfällt auch dieses schnell weiter. Liegt seine Masse beispielsweise zwischen  $140$  und  $600 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ , so könnte man es über den sogenannten Goldenen Kanal nachweisen ( $H \rightarrow Z + Z \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \mu^+ + \mu^-$ ). Dieser Kanal könnte aufgrund der vier gut nachweisbaren Myonen klar und eindeutig detektiert werden. Es könnte aber auch in andere stabile Teilchen zerfallen:  $\gamma, e^-, \nu_e, \nu_\mu$  sowie deren Antiteilchen. Oder es entstehen Jets, beispielsweise über einen Zerfall in ein Quark-Antiquark-Paar. Jets bestehen in diesem Fall aus unzähligen Hadronen. Jets haben den Nachteil, dass deren Energie recht ungenau bestimmt werden kann. Deswegen kann man ein Higgs-Teilchen über solche Kanäle nur schlecht identifizieren. Alle oben aufgeführten Zerfallsprodukte bis auf Neutrinos lassen sich im Detektor nachweisen.

## 4. Teilchennachweis und Detektorsystem

Im Detektor möchte man Energie und Impuls der Teilchen messen. Weiter kann auf die Ladung und Teilchenart geschlossen werden. Abhängig von seiner Teilchenart durchdringt ein Teilchen den Detektor unterschiedlich weit und wird an unterschiedlichen Stellen detektiert. Der Detektor besteht aus verschiedenen Schichten (Tracker, zwei Kalorimeter, Myonensystem). Diese sind zylinderförmig um die Strahlachse, in der sich die Stoßteilchen bewegen und die Kollision stattfindet, angeordnet. Ein Querschnitt durch das Barrel des Detektors sieht folgendermaßen aus:

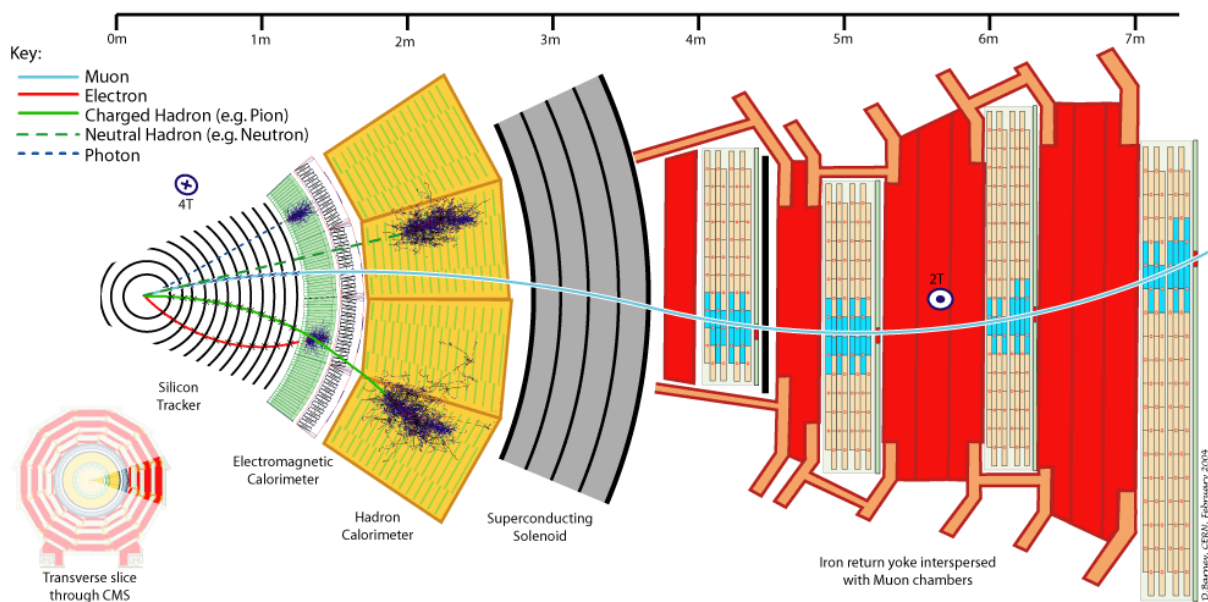


Abbildung 2: Querschnitt durch CMS-Detektor, Detektorschichten

An den beiden Enden des sogenannten Barrels sitzen die Endkappen mit demselben Detektormaterial, um Teilchen im gesamten Raumwinkel  $\Omega = 4\pi$  nachweisen zu können.

Photonen  $\gamma$  wechselwirken elektromagnetisch mit dem Detektormaterial (Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung). Sie werden im **elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL)** durch Szintillation nachgewiesen. Das heißt, sie regen Szintillatormaterial an oder ionisieren es. Im CMS-Detektor werden eigens für diesen Zweck entwickelte Bleiwolframat-Kristalle ( $PbWO_4$ ) eingesetzt. Diese besitzen eine kurze Abklingzeit und eine kurze Strahlungslänge  $X_0$ . Das von ihnen ausgesendete Szintillationslicht wird mittels Photodioden, die an der kleinsten Außenfläche des länglichen Kristallquaders sitzen, registriert und elektrisch ausgewertet.

Ebenso werden Elektronen und Positronen  $e^+$ ,  $e^-$ , die bei der Kollision entstanden, im ECAL nachgewiesen. Dies geschieht durch Stoßionisation oder über Bremsstrahlung. Bei der Bremsstrahlung werden sie an den positiv geladenen Atomkernen gestreut und emittieren dabei Photonen. Diese Photonen sind anfänglich hochenergetisch und zerfallen über Paarbildung in neue  $e^+$  und  $e^-$ , welche wiederum Energie durch Bremsstrahlung verlieren. Dabei werden sie in alle möglichen Richtungen gestreut und emittieren in diese Richtungen weitere Photonen. Dieses Wechselspiel hat ein Aufschauern im Detektormaterial zur Folge und die Energie des anfänglichen Teilchens wird über große Bereiche im Detektormaterial abgegeben. Da der Effekt mit steigender Kernladungszahl des Materials stärker wird, wird im CMS Pb und W verwendet. Die Energie des Schauers wird dabei stark gedämpft. Für die Energie gilt:

$$\frac{dE}{dx} \sim \frac{E}{X_0} \rightarrow E(x) = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}}$$

Es empfiehlt sich daher ein Detektormaterial mit hoher Dichte bzw. kurzer Strahlungslänge. Es gibt jedoch auch eine obere Grenze, weil das Material für die Szintillations-Photonen durchlässig bleiben muss.

Im **Tracker** kann der Impuls geladener Teilchen durch Spurrekonstruktion bestimmt werden. Da sich der Teil im Magnetfeld (durch einen supraleitenden Solenoiden) befindet, werden die Teilchen aufgrund der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn gezwungen, über deren Krümmungsradius auf den Impuls geschlossen werden kann. Die Funktionsweise eines Trackers besteht darin, dass geladene Teilchen entlang ihrer Bahn freie Ladungsträger durch Ionisation erzeugen. Das Detektormaterial kann sein Gas, Flüssigkeit oder ein Halbleiter. Die Dichte der Elektron-Loch-Paare, die das Teilchen im Halbleiter erzeugt, ist dort wegen des festen Aggregatzustands am größten. Somit kann über einen Halbleiter das stärkste Signal erzeugt werden. Es entsteht durch Driften der freien Ladungsträger im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode. An einem der beiden Kontakte angekommen erzeugen sie einen messbaren Stromimpuls.

Im CMS werden Siliziumdetektoren verwendet. Insgesamt sind es 13 Schichten, davon bestehen die 3 innersten aus Pixeldetektoren und die äußeren aus Streifendetektoren. Pixeldetektoren liefern eine hohe Ortsauflösung (Größe eines solchen Pixels selbst), sind aber mit viel Elektronik und Auswertekanälen verbunden. Eine Detektorschicht benötigt eine weitere darunterliegende Auslesechip-Schicht. Streifendetektoren bieten nur eine gute eindimensionale Auflösung, decken dafür aber große Flächen ab und benötigen weniger Auslese-Elektronik. Um trotzdem den exakten Ort des Teilchendurchgangs zu bestimmen, verwendet man bei den Streifendetektoren Dreierpaare von Schichten. Zwei der Schichten werden unter sehr kleinem Winkel zueinander ausgerichtet, um den Ort bei gleichzeitigem Durchgang mehrerer Teilchen mit möglichst geringem Fehler bestimmen zu können (Wahrscheinlichkeit für Verwechslung bei Zuordnung der Signale aus beiden Schichten ist

geringer). Die dritte Schicht wird dazu rechtwinklig angeordnet, um die zweite Koordinate zu ermitteln. Die Teilchenspur kann schließlich dreidimensional rekonstruiert werden aufgrund des Schichtsystems des gesamten Trackers:

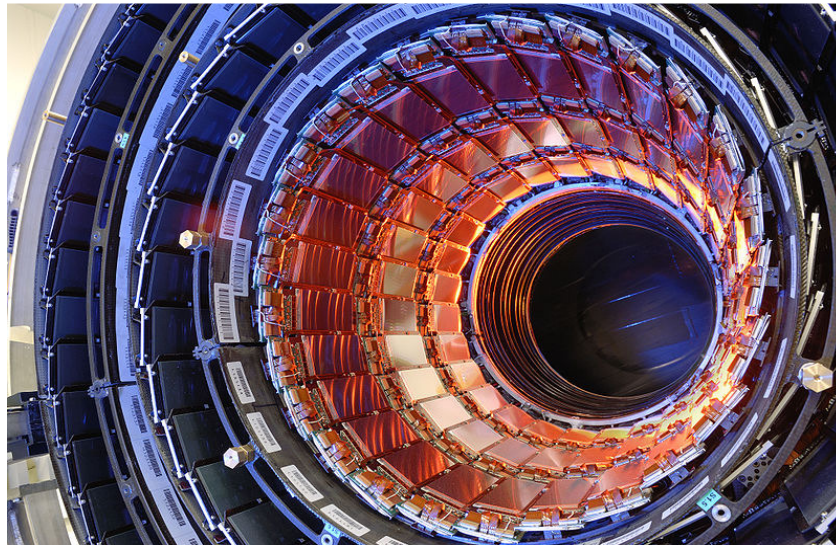


Abbildung 3: Tracker des CMS

Von den Hadronen sind  $p, n, \pi$  und  $K$  mit einer Lebensdauer im Bereich von  $10^{-8}$  s die stabilsten Teilchen und gelangen deswegen am weitesten durch das Detektormaterial. Andere Hadronen zerfallen sehr schnell und legen zu kleine Wege zurück, um sie im Detektor messen zu können. Die Detektion der stabileren Hadronen findet hauptsächlich im **hadronischen Kalorimeter (HCAL)** statt.

Das  $\pi^0$  ist mit einer Lebensdauer im Bereich von  $10^{-17}$  s jedoch nicht sehr stabil und kann schon im ECAL zerfallen. Es zerfällt sehr häufig in zwei  $\gamma$ . Ein  $\pi_0$  kann auch später über eine Zerfallskette entstehen und in zwei  $\gamma$  zerfallen. Die entstandenen  $\gamma$ 's sind hochenergetisch und werden für zwei Subschauer verantwortlich sein. Die Schauer entstehen nach selbigem oben beschriebenen Prinzip der Paarbildung und Bremsstrahlung. Hierbei wird deutlich, dass der Nachweis auch im HCAL schließlich über elektromagnetische Wechselwirkung erfolgen muss. Am Ende einer nachweisbaren Zerfallskette stehen übrigens immer die stabilsten Teilchen  $\gamma, e^+, e^-$ , die über elektromagnetische Wechselwirkung im Detektor ein elektrisches Signal erzeugen. Nur ein solches kann gemessen und ausgewertet werden. (Andere stabile Teilchen, die Myonen  $\mu^+, \mu^-$ , entstehen aufgrund ihrer hohen Masse (eher) nicht über eine Zerfallskette, sondern nur bei der Teilchenkollision selbst. Weitere stabile Teilchen, die Neutrinos  $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$  wechselwirken nur schwach und können daher nicht direkt nachgewiesen werden. Da sie sowieso nur minimal wechselwirken, verlassen sie den Detektor gewöhnlich unentdeckt und ohne jede Spur.)

Wie aus vorangegangenem Abschnitt ersichtlich wird, ist das Detektorprinzip im HCAL die Szintillation wie im ECAL. Im CMS werden hier jedoch keine teuren  $PbWO_4$ -Kristalle benutzt,

sondern günstigere Plastiksintillatoren wegen der größeren abzudeckenden Fläche weiter außen im Detektor. Diese emittieren UV-Licht, welches über Quarzfasern zu Hybridphotodioden weitergeleitet wird und dabei in Licht grüner auslesbarer Wellenlänge umgewandelt wird.

Um die detektierbaren  $\gamma$ ,  $e^+$ ,  $e^-$  zu erzeugen, müssen die Hadronen stark und schwach wechselwirken. Dies geschieht in Absorbermaterial (in CMS Fe und Cu/Zi), wo eine hohe Teilchendichte vorliegt, also viele Quarks und Gluonen für starke Wechselwirkung. Dort zerfallen die Hadronen und geben ihre Energie unter Aufschauern ab. Im HCAL befinden sich abwechselnd Schichten von Absorber- und Detektormaterial.

$\mu^+$  und  $\mu^-$  sind schließlich die einzigen übrig gebliebenen detektierbaren Teilchen. Aufgrund ihres geringen Wirkungsquerschnitt, weil dieser antiproportional zur Masse eines Teilchens ist und Myonen schwer sind, passieren sie den gesamten Detektor. Im Gegensatz zu Neutrinos sind sie jedoch geladen und können elektromagnetisch wechselwirken. Dies tun sie im **Myonensystem**, welches aus mit Gas gefüllten Kammern drei verschiedener Typen besteht. Nach selbigem wie beim Tracker beschriebenen Prinzip hinterlassen sie eine Ionisationsspur im Detektor, diesmal bestehend aus Gas ( $ArCO_2$ ). In Driftröhren (im Barrel) und Kathodenstreifenkammern (in den Endkappen) lösen sie Elektronen aus dem Gas, welche zu Anodendrähten in den Driftröhren bzw. Anodenstreifen an den Kathodenstreifenkammern driften. In diesen beiden Kammertypen lässt sich eine sehr ortspräzise Messung durchführen. In den Kathodenstreifenkammern, zwei parallele Platten, zwischen denen sich das Gas befindet, stehen Anodenstreifen auf der einen Platte orthogonal zu den Kathodenstreifen auf der anderen Platte. Signale von beiden Platten lassen den Ort zweidimensional rekonstruieren.

Bei den länglichen Driftröhren wird eine Dimension durch nebeneinander Liegen mehrerer Röhren messbar und die andere Dimension über die Messung der Driftzeit  $\Delta t$  der erzeugten Ladungsträger im elektrischen Feld der Anodendrähte. Die Driftgeschwindigkeit ist über einen langen Weg näherungsweise konstant und es gilt  $s = v_{Drift} \cdot \Delta t$ . Die dritte Dimension wird wie im Tracker durch das Prinzip mehrerer Schichten von Detektormaterial rekonstruierbar.

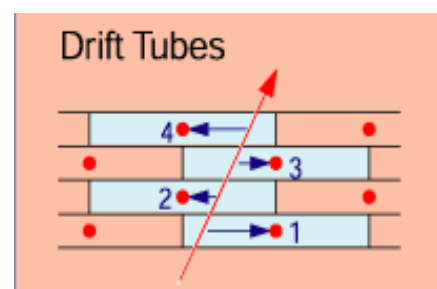


Abbildung 4: Driftkammern

Über die ortspräzise Messung der beiden Kammertypen kann der Impuls anhand der Krümmung der Teilchenbahn im äußeren Magnetfeld des Solenoids bestimmt werden.

Das Myonsystem fungiert auch als **Trigger**. Es ist nötig, bei so vielen Events (20 Millionen pro Sekunde) auszusortieren, weil sonst unbehandelbar große Datenmengen erzeugt würden. Da Myonen nur bei der Kollision entstehen und nirgends sonst als Zerfallsprodukte, beinhalten sie eindeutige Information von der Kollision. Über sie kann entschieden werden,



ob das gemessene Event interessant ist oder nicht (Bsp.: Higgs-Zerfall über Goldenen Kanal ist wichtig). Da der dritte Kammertyp, die Resistive Plate Chambers eine sehr schnelle Myondetektion erlauben und damit eine zeitpräzise Messung, fungieren sie als Trigger (Auslöser), um zu entscheiden ob das Event gespeichert werden soll oder nicht. Aufgrund seiner Komplexität ist das Myonensystem redundant und robust gegen Ausfälle.

Eine Besonderheit an CMS ist die Verwendung des äußeren Magnetfeldes des Solenoids zur Bestimmung des Myonimpulses. Damit dies möglich ist, befinden sich große Mengen Eisen zwischen den Myonkammern zur Führung und Verstärkung des außen schwächeren (2 T) Magnetfelds. Ein weiterer Zweck dieser Eisenschichten ist die Abschirmung jeglicher anderer Teilchenstrahlung (außer den Myonen), falls diese die darunter liegenden Detektorschichten unerwarteter Weise durchdringen konnte, sodass wirklich nur Myonen zur Detektion übrig bleiben.

## 5. Vergleich von CMS und ATLAS

Beide Detektoren verfolgen dieselben Ziele. Ihre Suche bestreiten sie auf etwas unterschiedliche Art und Weise. Ein Vergleich der Detektorschichten zeigt dies:

Im Tracker werden zwar bei beiden Detektoren Siliziumhalbleiter verwendet, jedoch benutzt ATLAS zusätzlich Transition Radiation Tracker. Das sind in Schichten angeordnete Platten zweier Materialien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten im Wechsel. Beim Übergang eines Teilchens von einer Schicht zur nächsten wird Röntgenstrahlung emittiert, die charakteristisch für die Teilchenart ist. Somit kann ATLAS schon im Tracker neben der Impulsbestimmung zusätzliche Information über die Teilchenart gewinnen.

ECAL und HCAL bestehen im CMS wie weiter oben erwähnt aus festem Detektormaterial (Kristall- und Plastikszintillatoren) und im ATLAS hauptsächlich aus flüssigem Argon. Um dies flüssig zu halten, muss das System stark gekühlt werden. ATLAS besitzt weiter außen im HCAL noch zusätzliche Schichten von Szintillatoren wie im CMS. Der Mechanismus ist für beide Aggregatzustände derselbe: Emission von Photonen durch Anregung des Detektormaterials. Die Detektoren verwenden schließlich auch unterschiedliche Metalle bzw. Legierungen als Absorbermaterial.

Der Solenoid im CMS umschließt den Tracker und die Kalorimeter und baut im Innern ein sehr starkes Magnetfeld von 4 T auf. Im ATLAS bringt es der Solenoid nur auf 2 T. Jedoch befinden sich dort weiter außen (im Myonsystem) acht Toroidmagnete im Barrel und weitere in den Endkappen. Die Toroidmagnete im Barrel erzeugen ein ringförmiges Magnetfeld um die inneren Detektorschichten herum.

Im Myonsystem ist CMS mit drei verschiedenen Kammertypen versierter als ATLAS mit nur zwei. In beiden befinden sich aber Kammern zur genauen Impulsbestimmung und Kammern, die als Trigger dienen.

Fazit ist, dass man bei der einzigartigen Möglichkeit, nämlich durch den LHC so hohe Energien zu vermessen, gleich zwei Experimente baut, die sich in der Umsetzung etwas unterscheiden. Findet man dieselben Ergebnisse bei beiden Detektoren, so hat man eine gegenseitige Bestätigung. Durch die zum Teil unterschiedlichen Methoden könnte ein Detektor besser bzw. genauer sein. Somit ist auch eine gegenseitige Ergänzung möglich. Zwei unabhängige Experimente durchzuführen, ist ein wichtiger Grundsatz der Physiker.

## 6. Mögliche Ergebnisse

In folgendem Bild ist ein mögliches Event eines Higgs-Teilchens dargestellt.

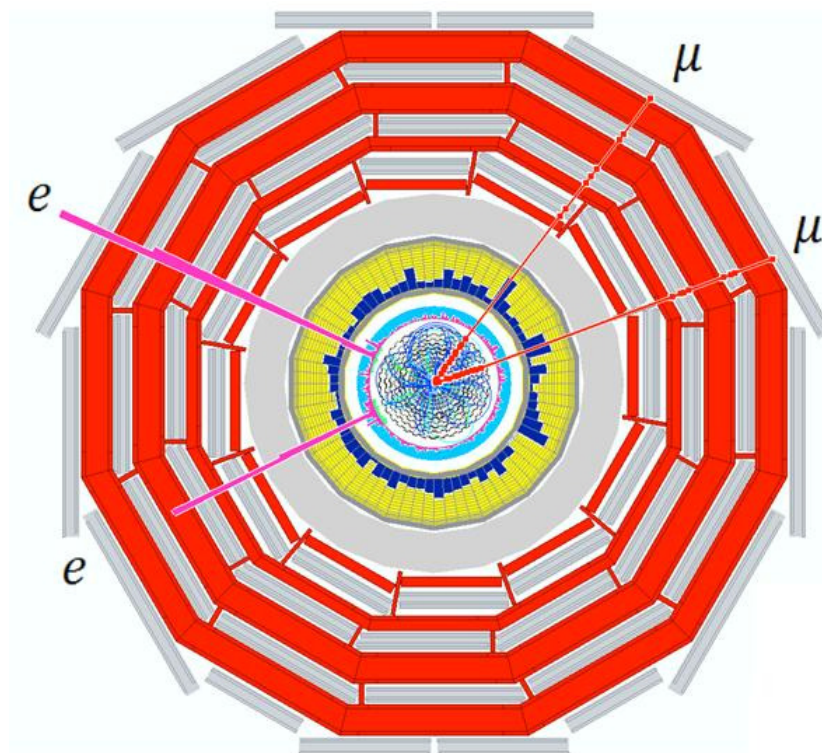


Abbildung 5: Simuliertes Event eines Higgs-Zerfalls

In den Kalorimetern ist die deponierte Energie durch blaue bzw. pinke Balken dargestellt. Teilchenbahnen sind mit Linien gekennzeichnet. In den Myonkammern sind die Stellen, an denen Myonen hindurch gingen, mit roten Punkten gekennzeichnet.

Das Event wird interpretiert als jeweils zwei entstandene Elektronen und Myonen. Ein Higgs-Teilchen zerfiel in zwei  $Z^0$  und diese wiederum in ein  $e^+e^-$ -Paar und ein  $\mu^+\mu^-$ -Paar, welche dann detektiert wurden.

Ein solcher Zerfall ist ein Beispiel für den sogenannten Goldenen Kanal:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^+l^-l^-$ . Seinen Namen hat er aus folgendem Grund: Simulationen zeigen, dass ein solcher Zerfall eine sich klar vom Hintergrundrauschen abhebende Resonanz ergeben würde. Denn im Gegensatz zu Jets kann die Energie der vier Leptonen sehr genau bestimmt werden. Ihre Ruhemasse ist bekannt und der Impuls, mit dem sie fast die gesamte Energie der Kollision

tragen, kann gut bestimmt werden. Im folgenden Bild ist die Anzahl an Events über der invarianten Masse von vier Leptonen aufgetragen:

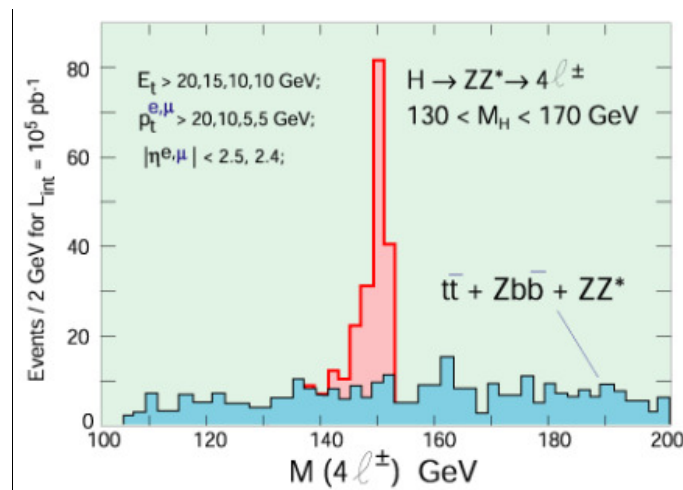


Abbildung 6: Simulation einer Statistik eines  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm$  Zerfall

Es kann auch ein Higgs-Zerfalls bei niedrigeren Energien in zwei  $\gamma$ 's geschehen. Hier würde sich die Higgs-Resonanz nur schwach von einem großen Hintergrundrauschen abheben.

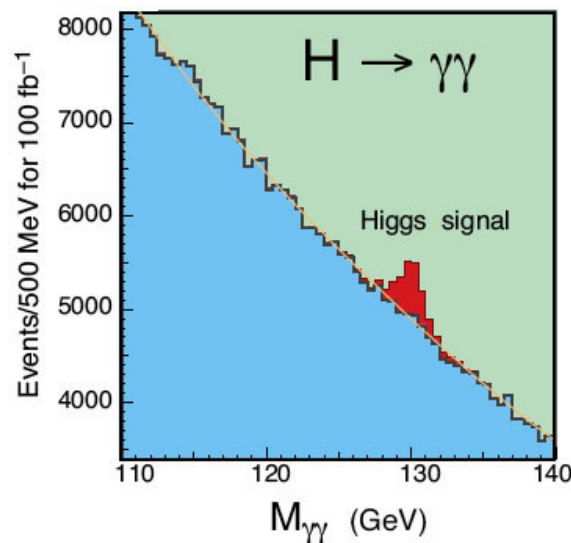


Abbildung 7: Simulation einer Statistik eines  $H \rightarrow \gamma\gamma$  Zerfall

Die Simulationen veranschaulichen, dass der Detektor eine hohe Sensibilität haben muss. Er muss die Energien sehr genau messen können um schmalbandige Signale wie beim Goldenen Kanal aufzulösen. Und aufgrund des starken Hintergrundrauschens beim  $\gamma\gamma$ -Zerfall sowie der geringen Wahrscheinlichkeit für eine Higgs-Teilchen-Produktion (bei  $10^{12}$  Kollisionen am Tag entsteht im Schnitt nur ein Higgs-Teilchen) ist eine hohe Luminosität des Teilchenbeschleunigers wichtig um genug Events zu erzeugen.

## 7. Quellenangaben

### Abbildungen:

1. [www.nature.com/nphys/journal/v7/n1/fig\\_tab/nphys1874\\_F1.html](http://www.nature.com/nphys/journal/v7/n1/fig_tab/nphys1874_F1.html)
2. [de.wikipedia.org/wiki/Compact\\_Muon\\_Solenoid](http://de.wikipedia.org/wiki/Compact_Muon_Solenoid)
3. [cms.web.cern.ch/cms/Media/index.html](http://cms.web.cern.ch/cms/Media/index.html)
4. [cms.cern.ch](http://cms.cern.ch)
5. [cms.web.cern.ch/cms/Media/index.html](http://cms.web.cern.ch/cms/Media/index.html)
7. [cms.cern.ch](http://cms.cern.ch)

### Quellen:

- [cms.cern.ch](http://cms.cern.ch)
- [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [de.wikipedia.org](http://de.wikipedia.org)
- Vorlesung Moderne Experimentalphysik III im SS11 bei Prof. Dr. Michael Feindt
- K. Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlung