

Teilchendetektor-Konzepte an Hand des CMS-Detektors

Christian Lüdtke

Teilchendetektion funktioniert, indem die zu untersuchenden Teilchen mit der Materie bekannte Wechselwirkungen eingehen, wodurch direkt oder indirekt Rückschlüsse auf bestimmte physikalische Eigenschaften dieses Teilchens gezogen werden können. Die wichtigsten Effekte die dabei auftreten sind für geladene Teilchen die Ionisation, Anregung und der Energieverlust durch Bremsstrahlung, wenn das Teilchen beschleunigt wird. Photonen wechselwirken hauptsächlich durch den photoelektrischen Effekt, den Comptoneffekt und die Paarbildung, während Hadronen, die der starken Wechselwirkung unterliegen, elastisch oder inelastisch am Detektionsmaterial streuen.

1 Das CMS-Experiment

Das wichtigste Ziel des CMS-Experiments ist der experimentelle Nachweis der Existenz des Higgs-Bosons, welches das letzte bisher nicht entdeckte Teilchen im Standardmodell darstellt. Außerdem hofft man Hinweise auf supersymmetrische Teilchen zu finden. Direkt kann man das Higgs-Boson nicht sehen, sondern man würde bei einer Detektion die Produkte des Zerfallskanals messen. Um eine Vielzahl von verschiedenen Teilchen mit unterschiedlichen Eigenschaften messen zu können, bedarf es mehrerer Detektionsmethoden. Daher besteht ein Teilchendetektor aus mehreren Subdetektoren, die jeweils zur Messung anderer Teilchen, beziehungsweise anderer Teilcheneigenschaften dienen. Beim CMS sind vier Subdetektorsysteme verbaut: in Strahlnähe ein Spurtracker, dahinter ein elektromagnetisches sowie ein hadronisches Kalorimeter und ganz außen die Myonkammern.

2 Der Spurtracker

Der Spurtracker dient zur genauen Orts- und Impulsmessung. Um hochenergetische Teilchen messen zu können, benötigt man daher einen starken Magneten, denn von diesem hängt die Bahnkrümmung im Tracker ab, und je größer der Impuls, desto größer wird der Bahnradius. Der Spurtracker ist aus einem Silizium-Pixeldetektor und einem Streifen-detektor aufgebaut. Diese gehören beide zur Klasse der Halbleiterdetektoren, die im Prinzip wie ein pn -Übergang in Sperrrichtung funktionieren: Durchdringt ein geladenes

Teilchen den Halbleiter, so können Valenzelektronen ins Leitungsband angeregt werden, die ihrerseits ein Loch im Valenzband zurücklassen. So entstehen in der Raumladungszone mehrere Elektron-Loch-Paare und damit ein messbarer Strom. Dieses Prinzip kann man sich in verschiedenen Bauformen zu Nutze machen. Im Streifendetektor bringt man auf einem n -dotierten Körper parallel mehrere p -dotierte Siliziumstreifen an, die jeweils ausgelesen werden. Um zweidimensionale Information zu erhalten, bringt man auf der gegenüberliegenden Seite des Substrats weitere Streifen orthogonal zu den anderen an. Eine genauere, aber viel aufwendigere Methode besteht darin, viele kleine, nur aus einem pn -Übergang bestehenden Detektoren, planar anzuordnen und jeden einzeln auszulesen, so baut man den Pixeldetektor. Dieser stellt jedoch durch die vielen Kanäle extreme Ansprüche an die Elektronik und man leistet sich dieses Konzept am CMS nur in der direkten Strahlumgebung. Weiter außen hat man Streifendetektoren angebracht. Als Halbleitermaterial verwendet man Silizium, da seine Bandlücke eine günstige Größe besitzt. Einerseits ist sie so groß, dass man nicht zu viele Störsignale empfängt, andererseits ist sie so gering, dass das vermessene Teilchen nur wenig Energie verliert.

3 Elektromagnetisches Kalorimeter

Kalorimeter dienen der Energiemessung. Hierbei unterscheidet man zwischen elektromagnetischen und hadronischen Kalorimetern. Man benötigt beide, da Hadronen sehr schwer sind und deshalb das elektromagnetische Kalorimeter durchqueren. Die Energiemessung geschieht nämlich, indem das Teilchen durch Schauerbildung vollständig vom Material absorbiert wird und entsprechend seiner ursprünglichen Energie ein messbares Signal liefert. Im elektromagnetischen Kalorimeter entsteht durch den Paarbildungseffekt und Bremsstrahlung eine Kaskade. Ein einfallendes Photon würde sich in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln, diese beiden Teilchen wiederum durch Bremsstrahlung jeweils Photonen emittieren, und so weiter. Dieser Schauer bildet sich so lange aus, bis die Energie der einzelnen Teilchen kleiner wird als die kritische Energie. Geschieht dies, so geben die Teilchen ihre Energie durch Ionisation oder Anregung ab und das Teilchen wird absorbiert. Die Teilchenenergie wird gemessen, indem die im Schauer entstandenen Photonen mittels szintillierenden Stoffen und Photodioden in elektrische Signale umgewandelt werden. Als Szintillator verwendet man üblicherweise feste Kristalle, es gibt aber auch solche aus Polymeren oder Flüssigkeiten. Am elektromagnetischen Kalorimeter des CMS sind Kristalle aus Bleiwolframat verbaut, die gleichzeitig als Absorber und Szintillator dienen.

4 Hadronisches Kalorimeter

Auch Hadronen bilden im Material Schauer aus, aber da sie hauptsächlich stark wechselwirken, sind hierbei nicht mehr Paarbildung und Bremsstrahlung die dominierenden Effekte. Stattdessen stoßen die Hadronen mit dem Absorber inelastisch und erzeugen dabei sekundäre Hadronen. Um aber einen solchen Schauer zu absorbieren, benötigt man dichtere Materialien als bei der elektromagnetischen Kaskade. Deshalb setzt man hierbei alternierend Absorber- und Szintillatorschichten ein ('sampling calorimeter'). Auch das-

jenige am CMS ist so aufgebaut; als Absorber verwendet man Messing und ein Polymer zur Szintillation.

5 Myonkammern

Das Myonsystem dient zur Impulsmessung von Myonen und zur Triggerung, denn um die riesigen Datenmengen zu bewältigen, werden Daten von Kollisionen, bei denen keine signifikanten Zerfallsprodukte detektiert werden, bereits im Vorhinein verworfen. Am CMS hat man drei verschiedene Arten von Gasdetektoren verbaut: Driftkammern, Kathodenstreifenkammern und resistive plate chambers. Sie alle beruhen auf der Gasionisation. Dazu befüllt man einen Container mit dem Ionisationsgas und Elektroden. Durchdringt ein geladenes Teilchen dieses Gas, so kann es Gasteilchen ionisieren, wodurch Elektronen zur Anode und die Ionen zur Kathode wandern. So erhält man ein elektrisches Signal. Dieses Prinzip kann man sich durch unterschiedliche Bauformen zu Nutze machen. In der resistive plate chamber wird ein starkes elektrisches Feld angelegt, sodass die ionisierten Atome selbst weitere Gasatome ionisieren können. Somit bildet sich eine Lawine aus. Erreichen die driftenden Elektronen und Ionen schließlich die Elektroden, so ändert sich das elektrische Feld und man erhält ein messbares Signal. Die resistive plate chamber arbeitet sehr schnell und hat eine kurze Totzeit; sie wird deshalb als Triggerdetektor verwendet. Die Kathodenstreifenkammer dient wie auch die Driftröhren zur Positionsmessung. Ersterer ist aus orthogonal zueinander gespannten Anodendrahten im Gas aufgebaut, so erhält man eine dreidimensionale Information. Bei den Driftröhren ist lediglich ein Anodendraht eingespannt, wodurch man zunächst nur eine Dimension messen kann. Wenn man aber die Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Gas kennt, kann man durch

$$s = v_{drift}\Delta t$$

aber auch die zweite Dimension messen.

6 Quellen

- Particle Detectors / Grupen, Claus, 2008
- Detektoren für Teilchenstrahlung / Kleinknecht, Konrad, 2005
- Teilchen-Detektoren / Allkofer, Otto C., 1971
- <http://www.hephy.at/project/halbleiter/VOSkriptum/VO-4-Halbleiterdetektoren.pdf>
- <http://cmsinfo.web.cern.ch/cmsinfo/Detector/>
- Folien zur Physik VI Vorlesung der Universität Karlsruhe WS08/09
- CMS Physics Technical Design Report Volume 1, 2006