IEKP-KA/2001-12

Studien an Siliziumstreifendetektoren und deren Qualitätssicherung für CMS

Christian Piasecki

Diplomarbeit

Institut für Experimentelle Kernphysik
Universität Karlsruhe

03. April 2001

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Was die Welt im Innersten zusammenhält

Mit diesem Problem beschäftigt sich die Menschheit nicht erst seit Goethes Zeiten. Schon die Philosophen des alten Griechenlands machten sich Gedanken, was passiert, wenn man Materie immer weiter zerkleinert. Sie glaubten, dass Materie aus vielen kleinen unteilbaren Teilchen, den Atomen, besteht.
Ab dem 18. Jahrhundert schließlich konnte vor allem die Chemie, mit Hilfe der Vorstellung von Atomen und Molekülen, Eigenschaften von Stoffen verstehen. Erst um die vorletzte Jahrhundertwende jedoch war die Wissenschaft in der Lage, die Größe von Atomen zu bestimmen. Man erkannte auch, dass Atome noch weiter teilbar sind und aus einem Kern und einer Elektronenhülle bestehen. Während Elektronen auch nach heutigem Wissensstand nicht weiter geteilt werden können, sie also im strengen Sinne Elementarteilchen sind, erkannte man, dass der Kern aus noch kleineren Teilchen, den Protonen und Neutronen, zusammengesetzt ist. 1964 schlugen Ne'eman, Gell-Mann und Zweig vor, dass Protonen, Neutronen und einige weitere Teilchen, die man im Laufe der Jahre entdeckt hatte, aus Quarks bestehen, was schließlich in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts experimentell bestätigt wurde. Die Quarks haben sich bis heute als unteilbar erwiesen.
Der Aufbau der Materie wird im sogenannten **Standardmodell der Teilchenphysik (SM)** beschrieben (s. Abschnitt 1.2). Obwohl diese Theorie zu den erfolgreichsten der Physik zählt, weiß man, dass sie nicht der Weisheit letzter Schluss ist, da sie einige Dinge, wie zum Beispiel die CP-Verletzung nicht erklären kann. Es gibt aber bereits dem SM übergeordnete Theorien, und diese zu verifizieren bzw. zu falsifizieren gehört zu den größten Herausforderungen der Experimentellen Teilchenphysik.
Der Weg dahin ist vom Prinzip her eigentlich sehr einfach, aber technisch nur unter größten Anstrengungen zu erreichen: Man braucht extrem hohe Teilchenenergien und das aus zwei Gründen:

- Einige Theorien sagen sehr schwere Teilchen voraus, also braucht man nach Einsteins wohl berühmtester Formel $E= mc^2$ hohe Energie.
- Zur Auflösung kleinster Substrukturen in der Materie benötigt man Teilchen hoher Energie, denn nach de Broglie gilt, dass die Wellenlänge eines Teilchens umgekehrt proportional zu seinem Impuls ist ($\lambda= \frac{h}{p}$).

Bei Ernest Rutherford's berühmten Streuexperiment von α-Teilchen an einer Goldfolie hatten die α-Teilchen eine Energie von ein paar MeV. Die „heutige“-Teilchenphysik hat mittlerweile den TeV-Bereich erreicht, benutzt also um den Faktor eine Million höher energetische Teilchen als Rutherford.
In der kosmischen Höhenstrahlung gibt es zwar Teilchen mit noch viel höheren Energien (die in Experimenten auch untersucht werden), allerdings ist ihre Anzahl sehr gering. Es gibt deshalb auf der Erde nur eine Möglichkeit, so hochenergetische Teilchen in großer Anzahl zu untersuchen: **Teilchenbeschleuniger.**

Die größte Anlage, der Large Hadron Collider (LHC)[11], wird zur Zeit am CERN[1] gebaut und soll im Jahr 2005 in Betrieb gehen. Mit der angestrebten Schwerpunktsenergie von 14 TeV für Protonen sollen Auflösungen im Attometer-Bereich (10^{-18}m) erreicht werden. Abschnitt 1.3 wird einige Details dieser Anlage aufzeigen.

Im Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) arbeitet eine Gruppe des Instituts für Experimentelle Kernphysik (IEKP) der Universität Karlsruhe an der Entwicklung und dem Bau des Spurdetektors für CMS[2] (siehe Abschnitt 1.3 und 3.1). Besonderer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem Gebiet der Qualitätssicherung sowohl auf der Ebene der Siliziumstreifensensoren aber auch von kompletten Detektormodulen. Weitere Arbeiten befassen sich mit dem Anschließen von Sensoren an die Ausleseelektronik und der Integration individueller Detektormodule auf Unterstrukturen des endgültigen Detektors. Neben diesen experimentellen Arbeiten werden auch Projekte aus dem Software Bereich verfolgt. So werden Programme für die Rekonstruktion der Spuren im Detektor entwickelt. Ferner werden physikalische Ereignisse mittels Monte Carlo Simulationen erzeugt, die man dann durch Analyseprogramme untersucht. Hierbei sollen Algorithmen zum Nachweis des Higgs-Teilchen optimiert werden.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit Untersuchungen an Silizium-Streifen-Sensoren und Teststrukturen für das CMS-Experiment. Nach einer kurzen Zusammenfassung einiger Grundlagen zu Halbleiterdetektoren (Kapitel 2) werden die folgenden Punkte behandelt:

- Optische und elektrische Qualitätskontrolle der Sensoren (Kapitel 3)
- Einsatzmöglichkeiten von Mustererkennungssoftware beim Alignment und der optischen Qualitätskontrolle (Kapitel 3)
- Eigenschaften von Sensoren und Teststrukturen vor und nach Bestrahlung mit Protonen (Kapitel 5)
- Temperaturabhängigkeit von Sensoren (Kapitel 5)

---

[1] **C**entre **E**uropéenne pour la **R**echerche **N**ucléaire

[2] **C**ompact **M**uon **S**olenoid ; CMS ist einer der 4 Detektoren für den LHC

1.2 Theoretische Modelle der Teilchenphysik

1.2.1 Standardmodell

Die in der Natur vorkommenden Kräfte können durch die folgenden Wechselwirkungen beschrieben werden:

- die elektromagnetische Wechselwirkung
- die schwache Wechselwirkung
- die starke Wechselwirkung
- die Gravitation

Das Konzept der Feldquantisierung[3], das seit 1927 zunächst für das elektromagnetische Feld und bald darauf auch für das Materiefeld verfolgt wurde, war wesentlich für die Entwicklung der Theorie der Elementarteilchen. Dies führte zur Formulierung der Quantenelektrodynamik (QED). In den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts gelang es Glashow, Weinberg und Salam die schwache Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Wechselwirkung zur elektroschwachen Wechselwirkung zu vereinheitlichen. Zusammen mit der Eichtheorie der starken Wechselwirkung (QCD[4]) bildet sie das sogenannte Standardmodell der Teilchenphysik. Die Auswirkungen der Gravitation auf Raum, Zeit und Materie werden zwar sehr gut durch die Allgemeine Relativitätstheorie[5] beschrieben, allerdings ist es bisher nicht gelungen sie auf quantenmechanischer Ebene zu formulieren. Die Eichtheorien werden in vielen Lehrbüchern erläutert, z. B. [1, 2, 14]. Die elementaren Teilchen des Standardmodells sind die folgenden zwölf Fermionen (Spin 1/2–Teilchen) und ihre Antiteilchen:

Generation	1	2	3
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Leptonen	e^-	μ^-	τ^-
	u	c	t
Quarks	d	s	b

Sie treten in drei Generationen auf, wobei in jeder Generation ein Duplett von Leptonen und ein Duplett von Quarks existieren. Wegen seiner hohen Masse konnte das Top–Quark bisher nur am TEVATRON, dem $p\overline{p}$–Speicherring im Fermilab, der mittlerweile bei einer Schwerpunktsenergie von 2 TeV betrieben wird, direkt erzeugt werden.

Die Austauschteilchen, welche die verschiedenen Wechselwirkungen vermitteln, sind die folgenden Bosonen (Spin 1–Teilchen):

QED	schwache Wechselwirkung	QCD
Photon	Z- und W-Teilchen	Gluonen
γ	Z^0, W^+, W^-	$G_{b\bar{r}}, G_{b\bar{g}}, ...$

---

[3] Beschreibung der Wechselwirkung durch den Austausch von Teilchen

[4] **Q**uanten **C**hromo **D**ynamik

[5] Albert Einstein 1915

Elektroschwache Wechselwirkung

Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch die Quantenelektrodynamik (QED) beschrieben. Hierbei handelt es sich um eine abelsche Eichtheorie, die durch eine $U(1)$–Symmetriegruppe dargestellt wird. Als Eichboson tritt das masselose Photon auf, an das alle elektrisch geladenen Teilchen koppeln. Die Kopplung ist proportional zur elektrischen Ladung. Da Photonen elektrisch neutral sind, können sie nicht untereinander wechselwirken.
Durch das Glashow–Weinberg–Salam–Modell, welches eine nicht-abelsche Yang–Mills–Theorie ist, wird die QED mit der schwachen Wechselwirkung, die durch eine $SU(2)_L$-Symmetriegruppe[6] beschrieben wird, vereinheitlicht. Dies ergibt die Symmetriegruppe $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ und führt zu einer Kopplung von Isospin und Ladung. Die dabei entstehende neue Quantenzahl ist die Hyperladung Y:

$$Q = T_3 + \frac{Y}{2},$$

wobei Q die elektrische Ladung ist und T_3 die dritte Komponente des schwachen Isospins. Schwache Vorgänge können nur gemeinsam mit elektromagnetischen Vorgängen konsistent beschrieben werden. Die Austauschteilchen W^+, W^- und Z^0 erhalten ihre Masse über den „Higgs–Mechanismus“, durch den die lokale Isospin–Symmetrie verdeckt wird („spontane Symmetriebrechung“). Ihre Massen hängen vom schwachen Mischungswinkel θ_W ab, der das Verhältnis zwischen elektromagnetischer und schwacher Kopplung angibt:

$$\begin{aligned} m_{W^\pm} &= (\frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F})^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\sin\theta_W} && (1.1)\\ m_{Z^0} &= m_{W^\pm} \cdot \frac{1}{\cos\theta_W} && (1.2)\\ G_F &: \text{Fermikonstante} && (1.3) \end{aligned}$$

Desweiteren liefert die Theorie noch zwei weitere Bosonen: das masselose Photon und das Higgs–Teilchen, welches den Elementarteilchen ihre Masse gibt. Das Higgs-Boson ist das einzige nicht experimentell nachgewiesene Teilchen des Standardmodells nachdem im Jahre 2000 das ν_τ am Fermilab entdeckt wurde. Die Untergrenze der Masse des Higgs–Bosons liegt aufgrund experimenteller Daten vor allem durch LEP bei ca. 114 GeV, die Obergrenze aufgrund elektroschwacher Präzisionsmessungen bei ca. 200 GeV.
Man hofft jedoch, das Higgs mit Hilfe von TEVATRON oder LHC zu finden und damit die Masse zu bestimmen.

Starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung wird im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben. Zu ihrer Formulierung als Eichtheorie wird lokale Eichinvarianz der Theorie unter Transformation im $SU(3)_{Farbe}$–Raum verlangt. Quarks tragen die Farbladung rot (r), grün (g) oder blau (b). Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind die acht masselosen Gluonen, welche Spin 1 und Ladung Null haben. Gluonen tragen Kombinationen von Farb–Antifarbzuständen:

$$r\bar{b}, r\bar{g}, b\bar{g}, b\bar{r}, g\bar{r}, g\bar{b}, \frac{r\bar{r} - b\bar{b}}{\sqrt{2}}, \frac{r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g}}{\sqrt{6}}$$

---

[6] Der Index L gibt an, dass der schwache Isospin-Strom nur an linkshändige Teilchen koppelt.

Da sie selbst Farbe besitzen, können sie auch untereinander wechselwirken. Die Wechselwirkung unter den masselosen Gluonen bewirkt eine zunehmende Kopplungskonstante bei größer werdendem Abstand (running of α_s)[7] und erlaubt deshalb keine freien Quarks (confinement).

1.2.2 Grand Unified Theorie (GUT)

Das Standardmodell beschreibt die beobachteten Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen mit erstaunlicher Präzision. Dennoch gibt es einige offene Fragen:

- Warum gibt es drei unabhängige Symmetriegruppen für die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft ?
- Warum gibt es so viele freie Parameter (mindestens 18) ?
- Warum gibt es drei Familien von Quarks und Leptonen ?
- Warum haben Protonen und Elektronen exakt entgegengesetzte Ladungen ?
- Was ist der Ursprung der dunklen Materie ?

Der Versuch diese Fragen zu beantworten führte auf die Theorien der Vereinheitlichung der Kräfte. Diese besagen, dass sich oberhalb einer Energie von 10^{15}GeV die elektroschwache und die starke Kraft zu einer Kraft vereinen. Von vielen Physikern wird im Moment die Supersymmetrie (SUSY) als GUT favorisiert. Sie geht davon aus, dass alle Fermionen und Bosonen einen supersymmetrischen Partner haben. Zwei der Hauptgründe, die für die Supersymmetrie sprechen sind:

- Aufgrund der postulierten R-Paritäts[8]-Erhaltung wäre das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil und somit ein Kandidat für einen Teil der Dunklen Materie.
- Wegen der Strahlungskorrekturen der supersymmetrischen Teilchen lassen sich die Kopplungskonstanten im Gegensatz zum Standardmodell exakt vereinheitlichen. [3]

Eine der Haupaufgaben des LHC wird die Suche nach supersymmetrischen Teilchen sein.

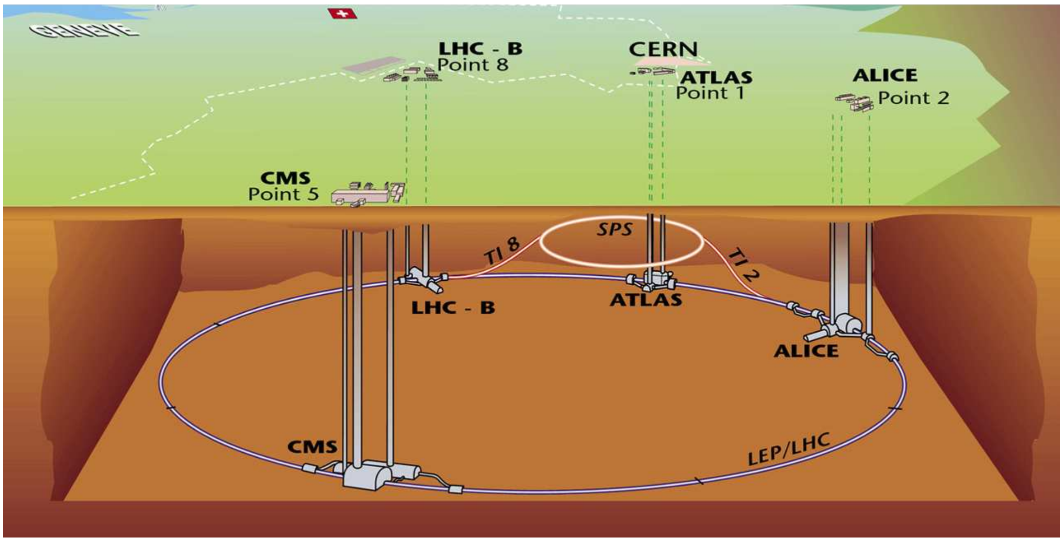
1.2.3 Theory of Everything (TOE)

Das große Ziel der Physik ist es alle Kräfte, also auch die Gravitation, mit nur einer Theorie zu beschreiben. Man geht davon aus, daß innerhalb der Planck-Zeit ($1,35 * 10^{-43} s$) nach dem Urknall alle 4 Kräfte in einer Superkraft vereinheitlicht waren. Ein Kandidat für eine solche Theory of Everything wäre z.B. die Super-String-Theorie.

---

[7] Auch W- und Z-Bosonen wechselwirken untereinander, aber deren Kopplungskonstante nimmt bei größer werdendem Abstand ab.

[8] Multiplikative Quantenzahl, SUSY-Teilchen haben R= -1, die „normalen“ Teilchen R= 1


GENEVE
LHC - B
Point 8
CERN
ATLAS
Point 1
ALICE
Point 2
CMS
Point 5
SPS
TI 8
TI 2
LHC - B
ATLAS
ALICE
CMS
LEP/LHC