

## Schlussbericht 2006-2009

### *Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment*

Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen, Universität Hamburg, Universität Karlsruhe

Sprecher des FSP-102 in der Förderperiode: Prof. Thomas Hebbeker

## Zusammenfassung

Das CMS-Experiment (Compact Muon Solenoid) ist ein Vielzweckdetektor am LHC Proton-Proton-Beschleuniger (Large Hadron Collider) am CERN. Die physikalischen Zielsetzungen umfassen die Suche nach Higgsbosonen, nach supersymmetrischen Teilchen und anderer neuer Physik, sowie präzise Messungen im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik.

Die CMS-Kollaboration hat ungefähr 3000 Mitglieder. Die deutschen Universitätsgruppen (Aachen, Hamburg, Karlsruhe) sind schon seit vielen Jahren Mitglied in CMS und haben wesentlich zum Bau des Detektors und den Vorbereitungen zur Datenanalyse beigetragen. Sie bilden den BMBF-Forschungsschwerpunkt FSP-102. Seit 2006 ist auch eine DESY-Gruppe assoziiertes Mitglied des FSP-102.

Höhepunkt im Zeitraum Juli 2006 – Juni 2009 war die erfolgreiche Inbetriebnahme des CMS-Detektors mit allen Komponenten. Die deutschen Gruppen haben wesentliche Teile der Endkappen des Silizium-Spurdetektors und Myon-Driftkammern entwickelt, gebaut und installiert. Parallel dazu wurde in Deutschland eine exzellente (Grid-)Computing-Infrastruktur aufgebaut. Rekonstruktions- und Kalibrationsalgorithmen wurden entwickelt, und anhand von Monte-Carlo-Studien konnte das Physikpotenzial des CMS-Experimentes studiert und durch Einsatz neuer Analysetechniken erweitert werden. Gleichzeitig wurden so die Datenanalysen vorbereitet.

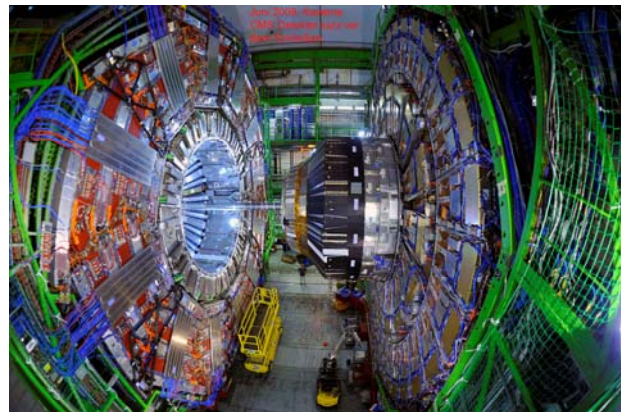
Nachdem im Jahr 2006 Teile des Detektors oberirdisch aufgebaut worden waren, konnten erste Tests mit Myonen aus der kosmischen Strahlung durchgeführt werden. Im Jahr 2007 wurde der CMS-Detektor in der Untergrundkaverne installiert und dann im Jahr 2008 die Tests mit kosmischen Myonen wiederholt, unter Einsatz praktisch aller Komponenten und bei eingeschaltetem Solenoid-Magneten. Im Herbst 2008 wurden die ersten Protonstrahlen in den LHC eingeschossen und der Detektor konnte Halo-Myonen und Sekundärteilchen aus Beam-Dumps vermessen. Nach dem technischen Unfall im Beschleuniger wurde dieser repariert, und Ende 2009 konnten erste Proton-Proton-Kollisionen mit CMS nachgewiesen werden.

Auch die Vorbereitungen für den zukünftigen SLHC (Super-LHC) haben begonnen, denn viele CMS-Detektor- und Elektronik-Komponenten werden erneuert, verbessert oder ergänzt werden müssen.

## Bericht

### 1. Das CMS-Experiment

Der CMS-Detektor besteht aus inneren Silizium-Spurdetektoren (Pixeldetektor, Siliziumtracker), Kalorimetern (elektromagnetisch:  $\text{PbWO}_4$ , hadronisch: Messing mit Szintillatorauslese), einem 4 Tesla starken supraleitenden Solenoiden und Myonkammern (Driftkammern, Kathodenstreifendetektoren und Widerstandsplattenkammern), sowie speziellen Detektoren im Vorwärtsbereich. Den in der Förderperiode Juli 2006 – Juni 2009 erzielten Fortschritt demonstrieren die beiden folgenden Photos; sie zeigen den Innenbereich des Detektors an der Oberfläche im Jahr 2006, noch ohne Spurdetektor und ohne elektromagnetisches Kalorimeter, und den kompletten Detektor in der Kaverne, kurz vor dem 'Schließen', 3 Jahre später.



CMS funktioniert sehr gut, mit der erwarteten hohen Messgenauigkeit und mit vernachlässigbar wenigen defekten Detektorzellen.

Entsprechende Fortschritte sind für den Aufbau der Computing-Infrastruktur zu berichten: Mitte 2006 entstand neben dem Tier-1 Zentrum GridKa der Prototyp für das gemeinsame deutsche CMS Tier-2-Zentrum in Aachen und am DESY. Drei Jahre später waren die für CMS abrufbaren Ressourcen um etwa eine Größenordnung angewachsen, auf nun über 2000 CPU-Kerne und ca. 1500 TB Festplattenspeicher (Tier-1 plus Tier-2).

Auch die Rekonstruktionssoftware, Kalibrationsmethoden und Analysewerkzeuge wurden weiterentwickelt. Eine große Zahl von Monte-Carlo-Studien wurde durchgeführt, die Ergebnisse sind im zweibändigen CMS Physics – TDR veröffentlicht worden ('Detector Performance und Software', 'Physics Performance').

CMS ist also gut für die LHC-Datennahme vorbereitet, die Ende 2009 begann und im Jahr 2010 bei einer Schwerpunktsenergie von 10 TeV und vorerst niedriger Luminosität fortgesetzt wird. Mittelfristig soll die Schwerpunktsenergie auf 14 TeV erhöht und die Luminosität nach und nach auf  $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$  gesteigert werden. Dann werden die seit langem brennenden fundamentalen Fragen der Teilchenphysik (Gültigkeit des Standardmodells, Suche nach Higgs-Bosonen, Supersymmetrie und

anderer ‚neuer Physik‘) und auch der Kosmologie (dunkle Materie) hoffentlich beantwortet werden können. Langfristig ist eine weitere Erhöhung der instantanen Luminosität auf  $10^{35}/\text{cm}^2/\text{s}$  geplant (Super-LHC =SLHC).

Inzwischen sind mehrere 100 Millionen kosmische Ereignisse aufgezeichnet und analysiert worden, und die mit CMS erzielten Detektorauflösungen wurden in der zweiten Jahreshälfte 2009 publiziert.

## 2. Deutsche Beteiligung am CMS-Experiment

Die international zusammengesetzte CMS-Kollaboration hat etwa 3000 Mitglieder. Die deutschen Universitätsgruppen sind:

- I. Physikalisches Institut B der RWTH Aachen (Prof. L. Feld, Prof. S. Schael et al.)
- III. Physikalisches Institut A der RWTH Aachen (Prof. M. Erdmann, Prof. T. Hebbeker et al.)
- III. Physikalisches Institut B der RWTH Aachen (Prof. A. Stahl et al.)
- Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg (Prof. R. Klanner, Prof. P. Schleper et al.)
- Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe (Prof. W. de Boer, Prof. M. Feindt, Prof. T. Müller, Prof. G. Quast et al.)

Seit März 2006 ist auch eine starke DESY-Gruppe (Dr. K. Borras, Dr. W. Zeuner et al.) assoziiertes Mitglied des FSP-102. Die Zusammenarbeit innerhalb von CMS und mit den deutschen Theoriegruppen und Atlas-Kollegen wird auch durch die Helmholtz-Allianz ‚Physics at the Terascale‘ verstärkt.

Alle beteiligten fünf deutschen Universitätsinstitute verfügen traditionell über eine hervorragende Infrastruktur, insbesondere Mechanik- und Elektronikwerkstätten, und inzwischen auch über große Computer-Ressourcen. Sowohl die Sach- als auch die Personalmittel für das CMS-Projekt wurden zu einem großen Teil durch die BMBF-Verbundforschung aufgebracht.

Die im Rahmen des FSP bewilligten Stellen sind alle besetzt, auch die erfreulicherweise zusätzlich im Rahmen der CERN-Nutzungsinitiative hinzugekommenen. Letztere erlaubt vielen unserer Mitarbeitern das Arbeiten vor Ort am CERN, was sowohl für den Detektorbetrieb als auch für die Mitarbeit in und Koordination von Analysegruppen essentiell ist.

Die deutschen Universitäten stellen knapp 5% der promovierten Physiker in CMS. Insgesamt arbeiten im FSP-102 etwa 220 Personen (Universitäten + DESY), 30 davon sind zum CERN abgeordnet (Stand Mitte 2009).

Deutschland liefert einen sehr sichtbaren Beitrag von 10% zum Computing von CMS im Tier1- sowie im Tier2-Bereich.

Unsere Beiträge zu CMS sind an mehreren CMS-Koordinatorpositionen abzulesen, Beispiele für die abgelaufene Förderperiode sind (Universitäten plus DESY): QCD-Analyse (K. Rabbertz), Analyse-Software (R. Wolf), hadronische SUSY-Zerfälle (C. Autermann), Technische Koordination (W. Zeuner, Stellv.), Collaboration Advisory Board (R. Klanner), Myon Institution Board (T. Hebbeker, H. Reithler), CMS Conference Committee (T. Müller), Computing (M. Kasemann), Rekonstruktion von Jets und fehlendem Transversalimpuls (P. Schleper), Tracker Alignment (M. Weber), Computing Facilities (P. Kreuzer), Koordination der Tier-2-Zentren (T. Kress), Alignment Software (G. Flucke), Data Quality Monitoring (A. Meyer), Kalibration und Alignment (R. Mankel). Vertreter im Management- und Finanzboard war T. Hebbeker als Sprecher der deutschen Gruppen und des FSP-102.

### 3. Forschungsarbeiten und Zusammenarbeit im FSP-102

Die deutschen CMS-Gruppen arbeiten eng zusammen, insbesondere in den folgenden übergreifenden Projekten:

- Computing
- Detektor-Hardware und -Software und Betrieb
- Offline-Software und Physikanalysen
- SLHC-Vorbereitungen
- Öffentlichkeitsarbeit
- Koordinierung

Die Beteiligung am **Computing** und insbesondere der Grid-Infrastruktur war und ist essentiell für die deutschen CMS-Gruppen, um auch in der Physikanalyse eine führende Rolle einnehmen zu können, und um einen adäquaten Beitrag zum Experiment auch in diesem Bereich zu leisten. Dies erfordert schnellen Zugang zu allen Daten und zu adäquaten Rechen- und Speicherkapazitäten. Die damit verbundenen Arbeiten und Fortschritte sind im Folgenden in einem eigenen Abschnitt beschrieben.

Um ihre Kräfte zu bündeln, fokussierten die deutschen Universitätsgruppen ihre Anstrengungen beim **Detektorbau** auf zwei wesentliche Komponenten von CMS: Vier der Institute haben maßgeblich zum zentralen Spurdetektor beigetragen, insbesondere im Vorwärtsbereich, und das Institut IIIA aus Aachen hat großflächige Myonkammern für den ‚Barrelbereich‘ gebaut und getestet. Wir sind sehr zufrieden mit dem Ergebnis dieser Anstrengungen, denn beide Komponenten funktionieren ohne Probleme. Wir haben aktiv an den Kalibrationen, an der Qualitätskontrolle und am Schichtbetrieb teilgenommen, und werden dies in der Zukunft fortsetzen. Wir tragen auch weiterhin Verantwortung für diese Komponenten. Im Detail werden diese Aktivitäten in den Einzelberichten erläutert.

Die **Analysevorbereitungen** waren und sind in vollem Gange. Dazu zählen auch die bereits erwähnten detektornahen Projekte wie Kalibration, Alignment und Monitoring. Ferner wurden Offline-Softwarepakete erarbeitet, dazu gehören Rekonstruktionsalgorithmen und allgemeine Analyse-Werkzeuge, die jetzt zur Anwendung auf LHC-Daten bereitstehen. Insbesondere wurde die graphische Entwicklungsumgebung VISPA für Physikanalysen entwickelt. Die durchgeführten Physikanalyse-Studien umfassen das gesamte Spektrum der Hadron-Collider-Physik bei höchsten Energien:

Die wichtigsten Physik-Schwerpunkte in Deutschland bilden die Suche nach Neuen Teilchen und dem Higgs-Boson, Präzisionsstudien zum Standardmodell, Top-Physik und Messungen mit Tau-Leptonen. Viele der Studien wurden in CMS-Notes und im 'CMS Physics TDR' veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt, siehe Einzelberichte. Auch bei Simulation und Analyse der kosmischen Myonen haben wir uns engagiert. Im folgenden werden beispielhaft die zwei Analyseschwerpunkte 'Neue Physik jenseits des Standardmodells' und 'Top-Physik' kurz vorgestellt:

- **Neue Physik:** Die Gruppen aus Hamburg, Karlsruhe, Aachen IB und IIIA haben das Entdeckungspotential für Supersymmetrie ausgelotet. Dabei wurden komplementäre Endzustände im Rahmen des 'MSSM' untersucht (rein hadronisch, mit einem Lepton, mit mehreren Leptonen), um so insgesamt ein vollständiges Bild zu bekommen. Es wurden neue Analysemethoden eingebracht, neue Ereignisvariable eingeführt und komplexe Fitmethoden erprobt. Damit sind wir gut vorbereitet für die Analyse der ersten LHC-Daten – dies ist wichtig, da schon bei geringer Luminosität SUSY-Signale erkennbar sein könnten. Ferner wurde für eine Vielzahl von 'exotischen' theoretischen Modellen der mögliche Nachweis mit CMS studiert ('Unparticles', 'Extra-Dimensionen' etc). Auch ein Programm zu modellunabhängigen Suche nach neuer Physik wurde entwickelt (MUSIC).
- **Top-Quark:** Wie man Top-Quark-Ereignisse optimal vom Untergrund abtrennt, und wie die Produktions- und Zerfallsprozesse möglichst genau vermessen werden können, wurde in AC IIIA, AC IIIB, Hamburg und Karlsruhe untersucht. Sowohl Paarproduktion als auch die elektroschwache Erzeugung einzelner Top-Quarks wurden einbezogen. Ferner wurden Monte-Carlo-Studien zur Suche nach Neuer Physik (Top-Antitop-Resonanzen) durchgeführt. Es wurden verschiedene neue Analysetechniken entwickelt, um die komplexen Top-Ereignisse vermessen zu können; Beispiele sind: Paralleles Anpassen verschiedener Ereignishypothesen, Erkennung von Substrukturen in hochenergetischen Jets.

Die Institute Karlsruhe und Aachen IIIA haben auch ihre Forschungen am Tevatron (CDF bzw. D0) weitergeführt, die teilweise die Basis für die LHC-Studien bilden.

Die **Vorbereitungen für den SLHC** haben aufgrund der langen Vorlaufzeiten für die Entwicklung von neuen Komponenten bereits begonnen. In Phase 1 soll die instantane Luminosität des Beschleunigers bis etwa 2015 um einen Faktor 3 relativ zum LHC-Designwert von  $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$  angehoben werden, und am Ende der folgenden Phase 2 sollen dann  $10^{35}/\text{cm}^2/\text{s}$  erreicht werden. Parallel dazu muss der Detektor an die höheren Raten und Strahlenbelastungen angepasst werden. In CMS