



Abbildung 59: *Einbau des zentralen Strahlrohres.*

# CMS-Experiment

**Gruppenleiter:** K. Borras, W. Zeuner, DESY

Seit dem Beitritt von DESY in die CMS Kollaboration im Jahre 2006 ist die am CMS Experiment beteiligte Gruppe am DESY stetig gewachsen. Mit dem Zugang von neuen Mitgliedern wurden die bestehenden Tätigkeitsbereiche verstärkt. Mittlerweile umfasst die CMS Gruppe 16 Physiker, 9 PostDocs und 8 Doktoranden, die voll oder zeitweise für CMS arbeiten. Sie werden von einem Ingenieur und drei Technikern unterstützt. Zwei Doktoranden und zwei Diplomanden schlossen ihre Arbeiten im Jahr 2008 erfolgreich ab. Im letzten Jahr ist es gelungen, erfolgreich zwei neue Nachwuchsgruppen einzuwerben, die im Frühjahr / Sommer 2009 ihre Arbeit aufnehmen werden. Mit diesen beiden Nachwuchsgruppen wird das Spektrum der Physik-Analysen um die zwei noch fehlenden Bausteine erweitert, der Suche nach dem Higgs-Boson sowie der Suche nach neuen Teilchen aus der Theorie der Supersymmetrie. Durch die personelle Ausstattung der Nachwuchsgruppen wird die Mitgliederzahl der CMS Gruppe signifikant um zwei Physiker, drei PostDocs und drei Doktoranden erhöht.

Aufgrund ihrer Erfahrungen mit dem Aufbau und Betrieb von Großexperimenten und der Physik-Analyse von Daten erfüllen zahlreiche Mitglieder der DESY CMS Gruppe wichtige und sehr sichtbare Verantwortlichkeiten in der Koordination von unterschiedlichen Arbeitsgebieten in der CMS Kollaboration. Als Stellvertreter des Technischen Koordinators sowie als Koordinator des CMS-weiten Computings, sind zwei DESY Mitarbeiter im Management-Board der CMS Kollaborationen vertreten und tragen zu richtungsweisenden Entscheidungen bei. Weitere DESY Mitarbeiter ko-

ordinieren die Arbeitsgruppen Data Quality Monitoring und Data Certification, Kalibration und Alignment, die Projektleitung für das CASTOR Kalorimeter und das GRID Software Deployment. Diese langfristig übernommenen Verantwortlichkeiten verleihen der DESY Gruppe eine herausragende Rolle innerhalb der CMS Kollaboration.

In Ergänzung zu den oben erwähnten Bereichen gibt es Beteiligungen am High Level Trigger und am Beam Condition Monitor, sowie den Aufbau und die Inbetriebnahme eines Remote Operation Centers für das CMS Experiment am DESY. Mithilfe dieses Centers, das über eine direkte Videostandleitung verfügt, war es möglich, den Detektorbetrieb und Aktivitäten am Experiment von DESY aus zeitnah zu verfolgen und direkt zur Sicherung der Datenqualität beizutragen.

Die DESY CMS Gruppe ist eng vernetzt mit den CMS Gruppen an deutschen Universitäten. In monatlich stattfindenden Videokonferenzen werden Aktivitäten vorgestellt und gemeinsame Lösungen und Vorgehensweisen besprochen. Ein besonders enger Kontakt besteht mit der CMS Gruppe an der Universität Hamburg. Insbesondere in den Bereichen Physik und Datenanalyse, im Alignment des CMS Spurendetektors und im Computing findet die Zusammenarbeit, wie auch die gemeinsame Betreuung von Studenten, auf zum Teil täglicher Basis statt. Im folgenden werden die Aktivitäten in den einzelnen Projektbereichen näher beschrieben.



Abbildung 60: *Einbau des CASTOR Kalorimeters*

## Technische Fertigstellung

Im Berichtsjahr standen die Fertigstellung des Detektors und seine Inbetriebnahme im Vordergrund. Von Beginn des Jahres war klar, dass CERN alle Anstrengungen unternehmen würde, LHC in diesem Jahr fertig zu stellen und den Strahlbetrieb zu beginnen. Die gesamte verbleibende Installation stand deshalb unter erheblichem Zeitdruck. Im Januar wurden die letzten beiden großen Endkappen in die Untergrundkaverne gebracht. Damit endete nach 27 Monaten die Phase der schweren Kranarbeiten. Die Reihenfolge, in der die beiden Endkappen in die Kaverne gebracht wurden, war kurzfristig geändert worden, um den Platz am Vakuumtank der Magneten frei zu halten und die Verkabelung des Trackers im Inneren des Tanks ohne Unterbrechung durchführen zu können. Von Januar bis Ende März wurde der Tracker an das Patchpanel innerhalb des Vakuumtanks angeschlossen. Diese Arbeit war eine große logistische Herausforderung, da Kühlung, optische Fasern und Kabel gleichzeitig auf äußerst beengtem Raum angeschlossen und getestet werden mussten. Anfang April wurden alle Arbeiten für ein paar Tage unterbrochen, um der breiten Öffentlichkeit im Rahmen eines Tages der offenen Tür ein letztes Mal die Gelegenheit zu geben, den Detektor zu besichtigen. Am

Wochenende des 5. und 6. April besichtigten insgesamt etwa 6000 interessierte und begeisterte Besucher den vollständig geöffneten Detektor.

Das nächste große Projekt war die Installation des Strahlrohres. Zuerst wurde das etwa 7 m lange zentrale Strahlrohr eingebaut, das zwischen den Endflanschen des Trackers nur an einem dünnen Stahlseil hängt. Danach wurden auf beiden Seiten von außen nach innen jeweils zwei weitere 6.5 m und 8 m lange Strahlrohrabschnitte montiert und damit die Verbindung zum Beschleuniger hergestellt. Zum Schluss wurde das gesamte Strahlrohr von CMS evakuiert und einige Tage bei etwa 200 Grad ausgebacken. Die Innenseite des Strahlrohres ist mit einer speziellen Oberfläche beschichtet, die wie ein Schwamm Restgasmoleküle absorbiert. Durch Ausbacken wird diese Neg-Oberfläche von absorbierten Molekülen befreit und regeneriert.

In der Zwischenzeit war es der Kalorimetergruppe gelungen, den Bau des elektromagnetischen Endkappenkalorimeters so zu beschleunigen, dass bis Mitte Juli alle vier Dees fertig gestellt sind. Ein Techniker der DESY CMS-Gruppe verstärkte das Kalorimeter-Team bei der Erfüllung dieses schwierigen Zeitplans. Detaillierte Studien zeigten, dass es bei genauer Planung und sorgfältiger Vorbereitung der Infrastruktur

möglich ist, das Kalorimeter gleichzeitig mit dem Pixeldetektor einzubauen und in Betrieb zu nehmen. Auf mehr als 100 Betonblöcken wurden die notwendigen Plattformen und Vermessungstürme aufgebaut und am 8. Juli erreichte das erste Dee der Endkappe die Experimentierhalle in Cessy. Genau einen Monat später war der Einbau aller vier Dees abgeschlossen. Parallel dazu war der Pixeldetektor eingebaut worden. Zuerst wurde der zentrale *Barrel-Pixeldetektor* zwischen Strahlrohr und Tracker geschoben, danach wurden die beiden Vorwärts-Pixeldetektoren eingebaut. Mit der Installation des Strahlmonitors an den Endflanschen des Trackers waren innerhalb des Vakuumentanks dann alle Detektoren eingebaut. Anfang August war auch der Magnet wieder kalt und bereit für Tests mit magnetischem Feld. Nachdem alle Plattformen entfernt worden waren, wurden die Endkappen geschlossen und die beiden Vorwärts-Hadronkalorimeter (HF) aus ihren Garagen an den Enden der Halle geholt. Als letztes wurden die Strahlmonitore, eine Hälfte des CASTOR-Kalorimeters bestückt mit einem Oktanten, sowie eine Hälfte des TOTEM T2 Detektors eingebaut. Danach wurden die HFs auf Strahlhöhe gebracht und am Abend des 3. September wurden die schweren klappbaren Abschirmungen von den Stirnwänden der Halle zum HF geschlossen. Damit war CMS bereit für den Strahlbetrieb. Als letztes wurde das Strahlrohr abgepumpt und am 8. September konnten die Ventile zum Beschleuniger geöffnet werden.



Abbildung 61: *Geschlossener Detektor.*

Der Magnet wurde im August direkt nach dem Schließen des Jochs ausführlich bis zu 3 T getestet. Der Solenoid selbst funktionierte auf Anhieb und die gemessenen Feldwerte im Innern stimmten perfekt mit den Messungen aus dem Sommer 2006 überein. Allerdings stellte sich schnell heraus, dass die Streufelder im Bereich der HFs wesentlich größer waren als erwartet. Damit waren auch die Kräfte, die auf den HF-Turm wirkten viel stärker als erwartet und führten zu erheblichen Verschiebungen bei angeschaltetem Feld. Insbesondere das CASTOR-Kalorimeter war davon betroffen, da es nah am Strahlrohr angebracht ist. Kleinste Bewegungen der Aufbauten am HF und dem CASTOR im starken Magnetfeld können sehr schnell zur Unterschreitung des Sicherheitsabstands führen. Deshalb wurde der Magnet zunächst nicht auf seine volle Feldstärke gebracht.

Bereits seit dem Frühjahr 2008 hat CMS regelmäßig mit immer mehr Komponenten Daten mit kosmischen Myonen genommen. Ende August waren zum ersten Mal Teilchen aus dem Beschleuniger bei CMS registriert worden, als im Rahmen der Inbetriebnahme von LHC Strahlteilchen an einem Kollimator 150 m vor CMS gestoppt wurden. Der 10. September war für CMS ein großer Erfolg: der Strahl war sofort in allen eingeschalteten Komponenten sichtbar. Dazu gehörten die Strahlmonitore, die Kalorimeter und die Myondetektoren. Tracker und Pixeldetektor blieben aus Sicherheitsgründen ausgeschaltet. Nach dem unglücklichen kurzfristigen Ende des Strahlbetriebes am 19. September wurde beschlossen, weitere Studien zu den Streufeldern des Magneten im Vorwärtsbereich durchzuführen, sowie einen etwa sechswöchigen Run zur Aufzeichnung kosmischer Myonen anzuschließen. Danach sollte der Shutdown beginnen. Zunächst wurde das CASTOR Kalorimeter entfernt, um jede Gefahr für das Strahlrohr auszuschließen. Danach konnte der Magnet problemlos auf 4 T gebracht werden. Die Bewegungen im Vorwärtsbereich wurden im Detail studiert und größtenteils verstanden. Durch einige Änderungen am Cradle und am Tisch des CASTOR Kalorimeters sollte es möglich sein den Detektor so zu fixieren, dass keine Gefahr für das Strahlrohr mehr besteht. Diese Änderungen werden im Shutdown durchgeführt und es ist geplant CASTOR im Sommer 2009 wieder einzubau-

en. Nach sechs Wochen sehr erfolgreicher Datennahme mit mehr als 250 Millionen Ereignissen mit kosmischen Myonen begann am 20.11.2008 der Shutdown. Neben Wartung und kleineren Reparaturen am Detektor, sowie einer großen Überholung der Trackerkühlung, dient er vor allem dem Einbau des Endkappen-Preshower-Detektors direkt vor dem Endkappenkalorimeter. Damit wird für die Datennahmeperiode 2009 / 2010 der vollständige CMS Detektor in seiner ursprünglich vorgesehenen Konfiguration zur Verfügung stehen.

## CASTOR Kalorimeter

Im Berichtszeitraum wurden mehrere Meilensteine für das Projekt des CASTOR Kalorimeters erreicht. Dieses Kalorimeter wird rund 14.4 m entfernt vom Wechselwirkungspunkt, direkt anschließend an den zentralen Detektor, eingebaut und erweitert damit den kinematischen Bereich zum Nachweis der in den Wechselwirkungen erzeugten Teilchen in erheblichem Maße. Aufgrund seiner Position im Vorwärtsbereich des Experimentes ist es sehr hohen Teilchenflüssen ausgesetzt und muss daher besonders strahlenhart ausgelegt sein. Sein Betrieb wird signifikant zu den Erkenntnissen des Betriebes einer Detektorkomponente unter Bedingungen, wie sie später am SuperLHC herrschen, beitragen.

Als Technologie wurde ein Schicht-Kalorimeter aus Wolfram- und Quarz-Platten gewählt. Mit der hohen Dichte des Wolframs können Teilchenschauer und damit die Energie des Primärteilchens sehr kompakt absorbiert und gemessen werden. In den Quarz-Platten erzeugen geladene Teilchen über den Cherenkov-Effekt Lichtsignale, deren Stärke proportional zur Energie der einfallenden Teilchen ist. Die erzeugten Lichtsignale werden durch Photon-Vervielfacher in elektrische Signale umgewandelt und über eine Front-End Elektronik ausgelesen.

Mit der Platzierung in der Vorwärtsrichtung eignet sich das CASTOR Kalorimeter ideal für das Studium einer Reihe von Fragestellungen der QCD, wie zum Beispiel der Partonen-Dichteverteilungen im Proton bei kleinen Impulsbruchteilen  $x$  und eventuellen Sättigungseffek-

ten, der Multi-Parton-Wechselwirkungen, sowie Diffraktion. Alle diese Fragestellungen sind mit an den HERA-Experimenten erzielten Forschungsergebnissen eng verbunden; die Erfahrungen von HERA können so direkt eingebracht werden.

Ein signifikanter Beitrag zur Realisierung des Kalorimeters wird durch die eingeworbene Finanzierung einer neuartigen Helmholtz-Russian-Joint-Research-Group (HRJRG) ermöglicht, welche im September 2007 für eine Laufzeit von drei Jahren genehmigt wurde. Diese HRJRG ist eine weitere Möglichkeit der Pflege der traditionell guten Vernetzung zwischen DESY und russischen Instituten, hier mit den Moskauer Instituten MSU, ITEP und MEPhI. Mitarbeiter, sowohl von DESY als auch von den drei russischen Instituten beteiligen sich an der Konstruktion und der Produktion der Mechanik, sowie an der Elektronik, der Erstellung der Software für die Data Acquisition, der Analyse der Teststrahl- und der Vorstudien für die Physik-Analysen. Die Koordination aller DESY und HRJRG Aktivitäten erfolgt im Rahmen der Gesamtprojektleitung, die durch eine DESY Mitarbeiterin, sowie einem Kollegen von der Universität Athen geleistet wird.

Für das CASTOR Kalorimeter wurden für drei Wochen im Sommer 2008 Messzeit am Teststrahl im CERN genehmigt. Für diese Messungen wurde ein Achtel (Oktant) des Kalorimeters in einer speziellen Halterung vorbereitet und intensiv mit Teilchenstrahlen untersucht. Dabei wurden Elektronen, Pionen und Myonen unterschiedlicher Energie, sowohl der üblichen Energien von 10-350 GeV, als auch mit einem aufwendigen Teststrahl-Aufbau mit sehr geringen Energien von 2-10 GeV, in das Kalorimeter gelenkt. Abbildung 62 zeigt oben die Linearität und unten die Auflösung der Energiesignale des CASTOR Kalorimeters als Funktion der Teststrahl-Energie für Elektronen. Durch einen optimierten Zuschnitt der Quarz-Platten wurde eine höhere Lichtausbeute erzielt. In diesem Teststrahl-Experiment kam auch die Front-End Elektronik zu Einsatz, die am DESY für das CASTOR Kalorimeter produziert wurde.

Parallel zu den Teststrahl-Messungen wurde am DESY die Haltestruktur für eine Hälfte des CASTOR Ka-

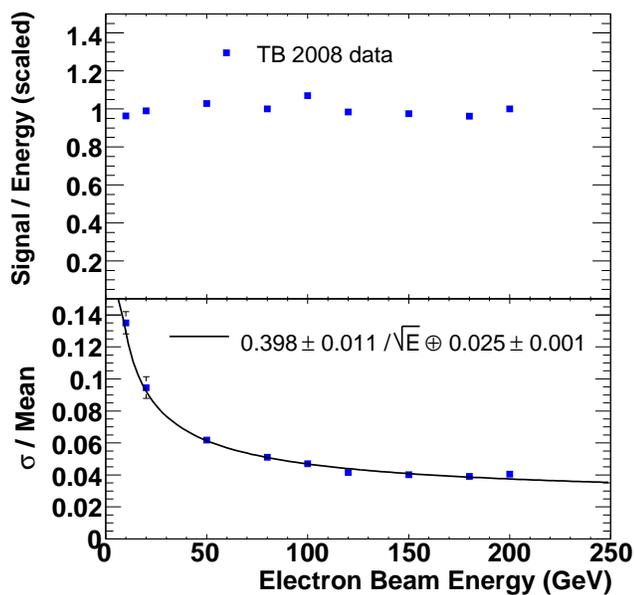


Abbildung 62: Ergebnisse zur Linearität (oben) und Auflösung (unten) in der Energie-Rekonstruktion für Elektronen als Funktion der Energie. Die Daten wurden im Sommer 2008 im Teststrahl am CERN aufgezeichnet.

lorimeters gebaut und nach den Messungen mit dem vermessenen Oktanten gefüllt. Nach ausgiebigen Tests und der Installation von Sensoren zur Überwachung des Magnetfeldes, der Temperatur und Feuchte, wurde diese CASTOR-Hälfte Anfang September in den CMS Detektor eingebaut und nahm an der Inbetriebnahme des LHC mit den ersten Teilchenstrahlen teil. Bei dem Einbau wurde festgestellt, dass das Streufeld des Zentralmagneten um etwa zwei Größenordnungen höher ist, als von Simulationen vorhergesagt. Dieses starke Streufeld kann von den gewählten Photon-Vervielfachern nicht toleriert werden und es war daher erforderlich eine neue Art von Photon-Vervielfachern zu suchen. Photon-Vervielfacher, die Magnetfelder bis zu 1 T tolerieren, wurden zum Beispiel am Spacal Kalorimeter des H1 Experiments am HERA Ring eingesetzt. Nach intensiven Studien wurden diese Photon-Vervielfacher für das CASTOR Kalorimeter zugelassen, so dass ein Teil der früheren Spacal Photon-Vervielfacher nunmehr seinen Einsatz bei CMS finden wird.



Abbildung 63: Photographie einer Hälfte des CASTOR Kalorimeters nach dem Befüllen mit Wolfram- und Quarz-Platten.

Nach der Freigabe der erforderlichen technischen Anpassungen durch die CMS Leitung wurde die zweite CASTOR-Hälfte in der DESY Mechanikwerkstatt produziert und zum CERN transportiert. Abbildung 63 zeigt eine Hälfte des CASTOR Kalorimeters, nach der Befüllung mit Wolfram- und Quarz-Platten. Rechts oben sind die kleineren Platten der vier elektromagnetischen Kanäle erkennbar, mit denen die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen gemessen wird. Danach schließen sich die Kanäle für die Messung der Energie von Hadronen, z. B. Pionen an. Sowohl im elektromagnetischen Teil, wie auch im ersten Drittel des hadronischen Teiles sind die Wolfram-Platten mit Aluminium beschichtet. Im weiteren Teil (weiter links unten) sind die Wolfram-Platten mit weissem Tyvek-Papier von den Quarz-Platten getrennt. Beides, das Aluminium und das Tyvek-Papier, dienen zur Rückstreuung des erzeugten Cherenkov-Lichtes zur effektiven Aufsammlung an den oberen Kanten, wo später Lichtleiter montiert werden. Im ersten Bereich des Kalorimeter musste das Tyvek-Papier durch eine andere Technologie ersetzt werden, weil Bestrahlungsexperimente am PSI in Zürich gezeigt hatten, dass das Tyvek-Papier nicht strahlenhart genug ist, um die dort erwartete Strahlenbelastung zu tolerieren.

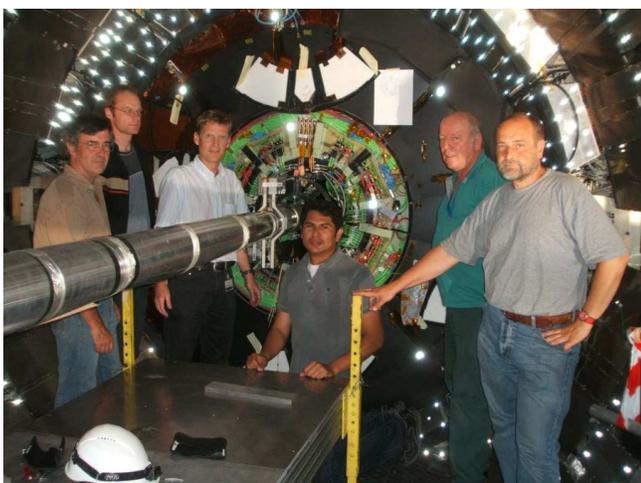


Abbildung 64: Einbau der BCM1F-Detektoren nahe dem Strahlrohr im CMS-Experiment.

In den kommenden Monaten werden beide Hälften des Kalorimeters fertiggestellt und getestet werden. Der Einsatz der anderen Art von Photon-Vervielfachern macht neue Kalibrationsmessungen erforderlich, die für Mai 2009 geplant sind. Direkt anschließend soll das Kalorimeter in den CMS Detektor eingebaut werden, damit das Zusammenwirken mit dem hohen magnetischen Streufeld getestet werden kann, bevor die ersten Teilchen im LHC zirkulieren.

## Beam Condition Monitor

Ein DESY Beitrag zum CMS Detektor ist die Komplettierung und Inbetriebnahme des BCM1F-Subsystems des Beam Condition Monitors. Dieser liefert Informationen über den Zustand der LHC-Strahlen und die Strahlenbelastung der CMS-Detektoren in Zeitintervallen von Nanosekunden bis zu Monaten. Diese Informationen dienen sowohl dem sicheren Betrieb, insbesondere der strahlennahen Spurdetektoren, als auch der Optimierung der Luminosität.

Der BCM1F Detektor hat eine sehr gute Zeitauflösung und erlaubt die Messung einzelner Protonenpakete im Strahl. Es besteht aus acht Modulen, jeweils vier auf einer Ebene zu beiden Seiten des Wechselwirkungspunktes. Jedes Modul ist aus einem einkristallinen Dia-

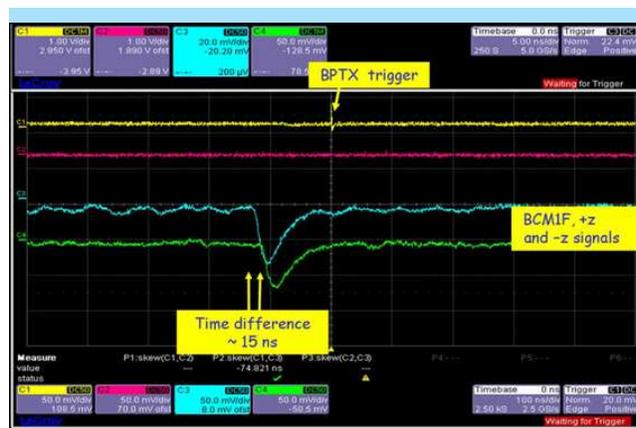


Abbildung 65: Die ersten LHC-Strahl Signale vom BCM1F Strahlmonitor auf dem Schirm eines Oszilloskops am 10. September 2008.

mantsensor, einem Signalverstärker und einem Halbleiterlaser zur optischen Signalübertragung aufgebaut. Die Signale werden über einen Lichtleiter aus dem CMS-Detektor herausgeführt, digitalisiert und mit einem Computer ausgewertet. Alle acht Module wurden vor dem Einbau einem ausgiebigen Testprogramm unterzogen. Dazu gehörte unter anderem der Funktionstest in einer Klimakammer, in welcher die Temperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}\text{C}$  variiert wurde.

Nach dem erfolgreichen Abschluss aller Tests erfolgte im August 2008 der Einbau im CMS-Detektor. Damit war eine spezielle Arbeitsgruppe von Physikern vom DESY, CERN und mehreren Universitäten, die in Abbildung 64 nach dem erfolgreichen Abschluss der Arbeiten zu sehen ist, befasst.

Die Zeit vor der Inbetriebnahme des LHC am 10. September wurde für ausgiebige Funktionstests aller BCM1F Module genutzt. Parallel dazu wurde die am DESY entwickelte Auslese-Software in Betrieb genommen. Pünktlich am 10. September war das System betriebsbereit. Bereits nach wenigen Stunden wurden erste Signale aufgezeichnet. Abbildung 65 zeigt den als Signal im BPTX gemessenen Durchgang eines der ersten Teilchenpakete am CMS-Detektor. Das blaue und grüne Signal stammen von einem Teilchen, welches Sensoren von BCM1F vor und nach dem Spurdetektor trifft. Die

zeitliche Versetzung der Signale entspricht der Flugzeit des Teilchens zwischen beiden Sensoren.

In den wenigen Tagen, in denen Teilchenstrahlen im LHC zirkulierten, wurden einige Tausend Signale registriert, ausreichend, um für jeden Kanal ein Signalspektrum, wie in Abbildung 66 gezeigt, zu erhalten. Parallel wurde an der Komplettierung einer flexiblen Datennahme- und Analysesoftware gearbeitet, um zur Datennahme mit dem CMS-Detektor im Jahre 2009 unter optimalen Bedingungen beizutragen.

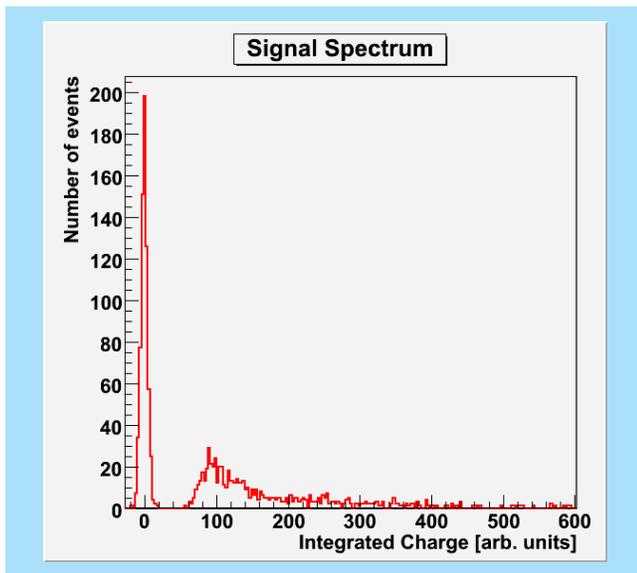


Abbildung 66: Aufgenommenes Signalspektrum eines Kanals des BCM1F-Detektors, unmittelbar nachdem erstmals Protonen in den LHC eingespeist wurden.

## Computing

DESY leistet entscheidende Beiträge zum Aufbau und Betrieb des CMS Computing. Ein DESY Wissenschaftler war im Jahr 2008 als Koordinator des gesamten Computing-Projekts im CMS-Management in Planung und Koordination tätig.

Die Aktivitäten im Computing standen im Jahr 2008 ganz im Zeichen der Vorbereitung auf die Datennahme. Im Frühjahr 2008 wurde ein letzter großer Test CCRC'08 (Common Computing Readiness Challen-

ge) der verteilten WLCG-Infrastruktur unter Beteiligung aller LHC-Experimente durchgeführt. Dabei wurden Lastzustände bei der Datenübertragung sowie der Jobverarbeitung erzeugt, wie sie bei der Datennahme des LHC erwartet werden. Gleichzeitig wurde in den Tier-2 Zentren die Analyse von simulierten Daten durchgeführt, um ein möglichst realistisches Szenario zu simulieren. Das DESY Tier-2 Zentrum, das in enger Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen betrieben wird, nahm erfolgreich am CCRC'08 teil und präsentierte sich als zuverlässige Computing- und Speicher-Ressource.

Im Herbst wurden mit dem CMS-Detektor über mehrere Wochen erfolgreich Ereignisse der kosmischen Strahlung aufgezeichnet. Während dieser Datennahme wurde die Computing-Infrastruktur von CMS im Schichtbetrieb überwacht, an dem sich auch DESY beteiligt hat.

Im Computing-Modell von CMS sollen die Physikanalysen zum größten Teil an den Tier-2 Zentren statt finden. Um eine bessere Koordination der Datenflüsse zu erreichen, werden die verschiedenen Analysegruppen auf die Tier-2 Zentren verteilt. Die deutschen Tier-2 Zentren für CMS, DESY und die RWTH Aachen, unterstützen sechs Analysegruppen, wobei vier Gruppen an DESY bzw. zwei an Aachen gebunden sind. CMS nutzt weltweit zurzeit etwa 50 Tier-1 und Tier-2 Zentren. Damit diese für die Produktion von simulierten Ereignissen und die Physikanalyse verwendet werden können, muss die CMS Software am Zentrum verfügbar sein. Die zentrale CMS Softwareinstallation für die Zentren in Europa und Asien (ca. 40 Zentren), wird von einem DESY Wissenschaftler koordiniert.

Um für die deutschen CMS-Gruppen gute Rahmenbedingungen für die Analyse zu schaffen, wird die Nutzung von lokal vorhandenen Ressourcen eng zwischen den deutschen CMS-Standorten, DESY, Universität Hamburg, Aachen und Karlsruhe abgestimmt. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die National Analysis Facility (NAF), die im Jahr 2008 bei DESY aufgebaut und in Betrieb genommen wurde. Die NAF liefert eine wichtige technische Grundlage für gemeinsame Datenanalysen mehrerer an LHC beteiligter Institute. Ende

2008 waren bereits etwa fünfzig Mitglieder von CMS als Benutzer der NAF registriert.

## High Level Trigger

Das CMS Experiment ist mit einem zweistufigen Triggersystem ausgestattet. In der ersten Stufe, Level-1 (L1), ist eine schnelle Elektronik implementiert, die totzeitfrei, innerhalb von 2.5  $\mu$ s anhand charakteristischer Eigenschaften der Ereignisse die Entscheidung trifft, ob ein Ereignis ausgelesen oder verworfen wird. Während dieser Zeit wird die vollständige digitalisierte Information der Ereignisse zwischengespeichert. In der zweiten Triggerstufe, dem High Level Trigger (HLT), werden die ausgelesenen Ereignisse mithilfe einer Filter-Farm bestehend aus mehreren tausend kommerziellen CPU weiter untersucht. Für die Datennahme von Physikereignissen in Proton-Proton Kollisionen wird die auf der Filter-Farm installierte Software so konfiguriert, dass nur etwa 1/1000 der Ereignisse akzeptiert und aufgezeichnet werden.

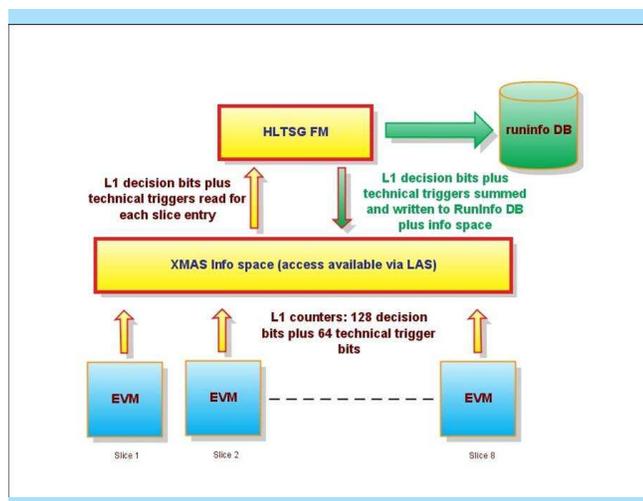


Abbildung 67: Schematische Darstellung der Infrastruktur zur Sammlung und Darstellung der gemessenen Triggerraten.

DESY ist an der Entwicklung und Implementierung des High Level Trigger Supervisor (HLTS) für die Filter-Farm beteiligt. Zentrale Aufgaben des HLT Supervisors sind das Auslesen und Summieren von Trigger-

Statistiken und das Herunterladen von Prescale-Werten während der Runs. Abbildung 67 zeigt ein Diagramm der dafür entwickelten Infrastruktur. Für das Echtzeit-Monitoring werden die Trigger-Statistiken von den Event Manager Einheiten (EVM) abgefragt und in das sogenannte Live-Access Server (LAS) System sowie in die RunInfo Database eingespeist. Der LAS ist ein Webserver, in dem für die Datennahme relevante Zustandsinformationen zentral gespeichert werden, so dass sie über Web-Services abrufbar sind. Die RunInfo Database speichert die Informationen dauerhaft für einzelne Runs. Die am DESY entwickelte Kontroll-Software ist in Java geschrieben und greift über das allgemeine Web-Based Monitoring System (WBM) auf die Information in der RunInfo Database zu (Abbildung 68).

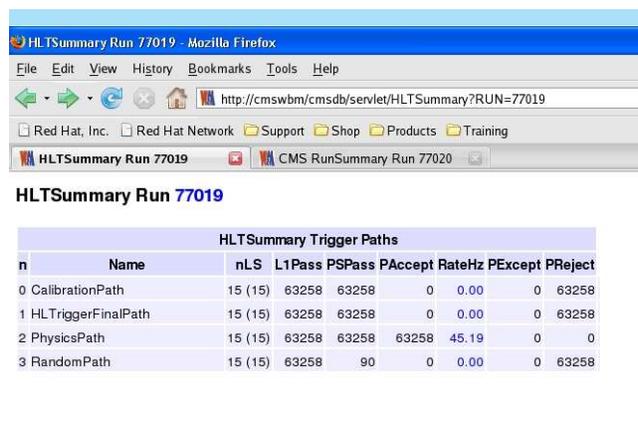


Abbildung 68: Beispiel einer Webseite mit Triggerinformationen.

Eine erste Version dieser Software ist seit Mitte 2008 in Betrieb. Gegenwärtig wird das System erweitert, um zusätzlich zu den HLT Informationen auch Informationen von der ersten Triggerstufe verfügbar zu machen.

## CMS Center am DESY

Die CMS Kollaboration setzt bei der Kontrolle und Überwachung des Detektors in Cessy, etwa 15 km entfernt vom CERN Hauptgelände, nicht nur auf die Experten und die Betriebsmannschaft lokal vor Ort am

Detektor, sondern vermehrt auch auf Experten und Schicht-Personen in einem entfernten *Remote Operation Center*. CMS Centers dieser Art wurden 2007 schon am CERN in Meyrin und am FNAL bei Chicago betrieben. Ein CMS Center ist als zentrale Stelle einer lokalen CMS-Gruppe in einem Institut konzipiert, die es ermöglicht, durch permanenten Video- und Audio-Kontakt der CMS Centers untereinander und mit dem Kontrollraum am Detektor Aufgaben im Betrieb des Detektors zu übernehmen. Diese Aufgaben können sowohl im online wie auch im offline Bereich oder in einer technischen Arbeitsgruppe liegen, wie z. B. die online und offline Qualitätskontrolle der aufgezeichneten Daten, die Kalibration einer Detektorkomponente oder die Überwachung der Computingprozesse in den Tier-1 oder Tier-2 Zentren.

Ende 2007 wurde ein Konzept für ein solches CMS Center für DESY entwickelt und im Jahr 2008 realisiert. Nach Fertigstellung des CMS Centres im Oktober 2008 wurden von DESY aus regelmässige, tägliche Schichten durchgeführt. Abbildung 69 zeigt den Arbeitsplatz der DQM-Schicht im CMS Center. Das Videosystem ist links im Bild zu sehen.



Abbildung 69: *DQM Schichtbetrieb im CMS Center am DESY.*

Das CMS Center am DESY ist die zentrale Anlaufstelle für aktuelle Informationen über den Status des CMS Detektors und der LHC Maschine. Dadurch wer-

den nicht nur die Mitglieder der CMS Gruppe, sondern auch DESY Mitarbeiter und Besuchergruppen über eine der Hauptaktivitäten von DESY im Bereich Teilchenphysik in den nächsten Jahren informiert. Das CMS Center ist daher an einem zentralen Platz im Laborgebäude 1 installiert. Eine Glastür erlaubt den Einblick in die Aktivitäten für Besucher.

An der Erweiterung des Nutzungskonzepts vor allem für Besuchergruppen wird in Zusammenarbeit mit der PR-Abteilung gearbeitet. Es wurden seit Oktober bereits mehrere Besuchergruppen durch das CMS Center geführt.

## Data Quality Monitoring

Im Jahr 2008 wurde die bereits seit 2007 für die Echtzeitkontrolle der Datennahme im Einsatz befindliche Data-Quality-Monitoring (DQM) Software auf den Offline-Bereich der Rekonstruktion und Software-Release-Validierung ausgedehnt. Das Offline-DQM System ist auf der Grundlage der gleichen Basis-Software realisiert, die auch für das Online-System verwendet wird. Entsprechende Erweiterungen und Anpassungen wurden so implementiert, dass die detektorspezifischen Module für die Histogrammierung der Daten portabel sind, das heisst gleichermaßen online und offline verwendet werden können. Im Gegensatz zum Online-System, wo mehrere Applikationen parallel unterschiedliche Aspekte der Daten überprüfen, ist die Offline-DQM Software direkt in den globalen Rekonstruktionsprozess eingepasst. Dies führt zu erheblich verschärften Anforderungen an Stabilität und Zuverlässigkeit des Systems. Das Prozessieren einer Dateneinheit (Run) erfolgt in mehreren parallelen Prozessen. Die dazugehörigen Histogramme werden in einem zweiten Schritt aus den Dateien extrahiert und zusammengefügt, d.h. aufsummiert. Wie im Online-DQM werden Algorithmen verwendet, um die resultierenden Verteilungen auf mögliche Fehler hin zu untersuchen. In diesem Schritt wird die endgültige Zertifizierung der Daten durchgeführt. Dazu wird zusätzlich zu den DQM Verteilungen auch Information über den Detektorstatus verwendet. Eine schematische

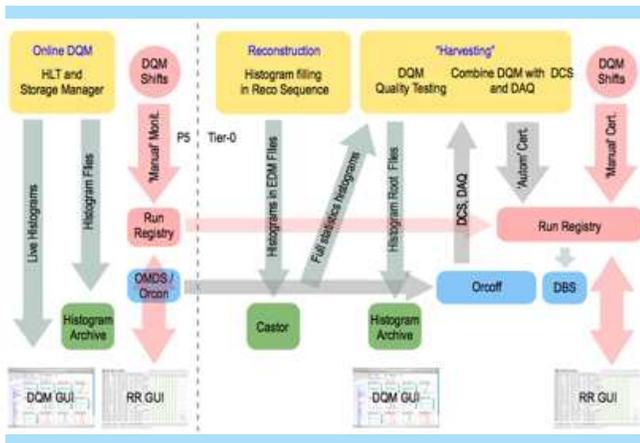


Abbildung 70: Schematische Darstellung der Infrastruktur des CMS DQM Systems (Online, Offline und Zertifizierung).

Darstellung der gesamten DQM-Infrastruktur ist in Abbildung 70 dargestellt.

Parallel zu den Entwicklungen in der Software wurde ein Schichtbetrieb etabliert, bei dem ausgesuchte *Schicht-Histogramme* für die visuelle Auswertung durch Schichtpersonen herangezogen werden. Neben den Schichten im CMS Kontrollraum am Experiment in Cessy, wurden regelmäßige Remote-Schichten am FNAL und am DESY durchgeführt. Auf diesem Wege konnten DESY und FNAL wichtige Beiträge zur Optimierung der Arbeitsabläufe und Dokumentation leisten, und die Qualitätssicherung der aktuellen Daten verbessern.

Die ermittelten Ergebnisse werden in der sogenannten Run-Registry (RR), bestehend aus einer über einen Webserver zugänglichen Datenbank, gespeichert. Die Webseite ist verbunden mit der RunInfo Database, in der die Konfigurationsinformation für jeden Run gespeichert ist. Die RR ist das zentrale Werkzeug für die Kontrolle der Arbeitsabläufe beim DQM-Schichtbetrieb, sowie für die Speicherung manuell eingegebener Ergebnisse. Die auf diese Weise zur Verfügung gestellte konzise Liste der wesentlichen Details und spezifischen Eigenschaften der einzelnen Runs wird von allen Detektor- und Analysegruppen in CMS verwendet. Für die endgültige Zertifizierung werden die im Schichtbetrieb und mithilfe von Algorithmen ermittelten Er-

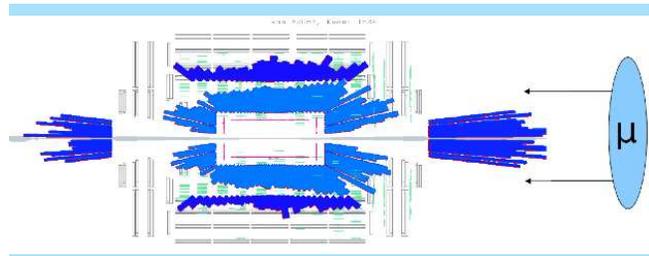


Abbildung 71: Am 10. September 2008 aufgezeichnetes Strahluntergrund-Ereignis. Die einlaufenden Teilchen, größtenteils Myonen, wurden durch eine gezielt herbeigeführte Kollision des Protonstrahl mit einem Kollimator erzeugt.

gebnisse überprüft, gegebenenfalls korrigiert, und am Ende bestätigt. Dazu wird ein regelmäßiges wöchentliches sogenanntes Sign-Off Meeting durchgeführt. Die endgültigen Qualitätsinformationen werden im zentralen Dataset Bookkeeping System (DBS) gespeichert, wo sie als Startpunkt für Datenanalysen verwendet werden.

Während der ersten Datennahmen mit Strahlen im September 2008 (siehe auch Abbildung 71) und den anschließenden Runs mit kosmischen Myonen erwies sich das DQM System als robustes Werkzeug zur Beobachtung und Optimierung der aufgezeichneten Daten. Die gewonnenen Einsichten und Erfahrungen fließen in die gegenwärtig durchgeführte Konsolidierung des Systems ein.

## Alignment

Das Leistungsvermögen des CMS-Detektors hängt entscheidend von der präzisen Kalibration der Positionen aller Detektorelemente ab, die man auch als *Alignment* bezeichnet. Obwohl alle Komponenten vor und während des Einbaus so genau wie möglich vermessen wurden, kann die höchste Präzision nur durch Alignment *in situ* erfolgen. Dabei werden die Signale der mit dem Detektor aufgezeichneten Teilchenspur selbst verwendet, um feine Korrekturen in Form von Alignmentkonstanten zu bestimmen. Auch optische Alignmentssysteme basierend auf Laserstrahlen

liefern wichtige Informationen und können insbesondere Veränderungen der Geometrie zeitnah erfassen.

Die CMS-Gruppe am DESY war im Berichtsjahr in mehrfacher Hinsicht am Alignment beteiligt: durch die Koordination der CMS-Alignment-Gruppe, durch direkte Beteiligung am Alignment des CMS-Spurdetektors, sowie durch Koordination des Computing, Software and Analysis Challenge (CSA08), bei dem die Alignment- und Kalibrationsmethoden des Experiments einem umfangreichen Test unterzogen wurden.

Der im Mai 2008 durchgeführte CSA08-Challenge war der erste umfangreiche Test des CMS-Experiments, bei dem die Situation in der Anfangsphase der LHC-Datennahme im Detail simuliert wurde. Entsprechend der wachsenden Luminosität des Colliders wurden jeweils eine Woche Datennahme bei  $2 \cdot 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $2 \cdot 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  zu Grunde gelegt. Dadurch ergaben sich jeweils etwa 150 Millionen Ereignisse. Während die Maschine bei Design-Luminosität hohe Raten von Signaturen wie beispielsweise  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  liefert, die sich ideal für das Detektoralignment eignen, bestand der CSA08-Datensatz größtenteils aus gewöhnlichen inelastischen Proton-Proton-Kollisionen. Die Alignment-Methodik musste also an die Struktur dieser Wechselwirkungen angepasst werden. Darüber hinaus stellte aber auch die zeitnahe Durchführung vieler gleichzeitiger Alignment- und Kalibrationsalgorithmen eine erhebliche Herausforderung dar.

Das CMS-Experiment verfügt über ein hochentwickeltes Konzept, welches die Anpassung von Alignment- und Kalibrationskonstanten mit geringer Latenzzeit sicherstellt. Der in CSA08 verwendete Datenfluss ist in Abbildung 72 dargestellt. Anstelle vom Detektor kamen die Rohdaten aus der Monte Carlo-Simulation, die auf verschiedenen Farmen der Tier-0, Tier-1 und Tier-2 Rechenzentren durchgeführt wurde. Diese Ereignisse wurden zeitnah auf der Tier-0 Rechnerplattform am CERN rekonstruiert. Dabei wurden auch sehr kompakte Auswahl Datensätze hergestellt, die lediglich die sehr spezielle Information enthielten, welche die einzelnen Alignment- und Kalibrationsalgorithmen benötigten. Diese *AlCaReco*-Datensätze wurden auf die CERN-Analysis-Facility (CAF) transferiert, wo die einzelnen

Alignment- und Kalibrationsalgorithmen die entsprechenden Korrekturen bestimmten und in die Offline-Datenbank hochluden. Die Rekonstruktion erfolgte dann mit den aktualisierten Konstanten in den Tier-1 Rechenzentren. Für die Datenanalyse wurden die rekonstruierten Datensätze zu den Tier-2 Zentren kopiert, ein Teil der Analyse fand auch auf der CAF statt.

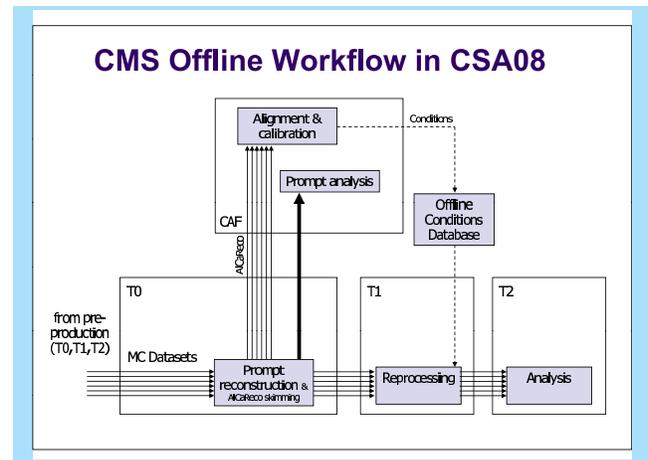


Abbildung 72: Ablaufschema von Alignment und Kalibration im CSA08-Challenge.

Im Ergebnis war der CSA08-Challenge sehr erfolgreich: die volle Komplexität von fast 20 Alignment- und Kalibrationsprozeduren wurde durchgeführt, die Ergebnisse validiert und die resultierenden Konstanten rechtzeitig für die Reprozessierung der Daten in die Datenbank hochgeladen. Die reprozessierten Daten wurden erfolgreich zur Physikanalyse eingesetzt.

Beim Alignment des Spurdetektors in CSA08 waren die Gruppen der Universität Hamburg und des DESY mit der Anwendung des Millepede-Algorithmus beteiligt. Mit diesem Algorithmus wurde die höchste Genauigkeit erreicht: wie in Abbildung 73 gezeigt, wurden die Module im Zentralbereich des Pixeldetektors beim ersten Datensatz (S43) mit einer Genauigkeit von  $6 \mu\text{m}$  kalibriert, beim zweiten Datensatz (S156), der auch kosmische Myonen enthielt, wurde sogar eine Genauigkeit von  $3 \mu\text{m}$  erzielt.

Weiterhin entscheidend für die Inbetriebnahme von Kalibration und Alignment des CMS-Detektors war die Datennahme mit kosmischen Myonen, insbesondere

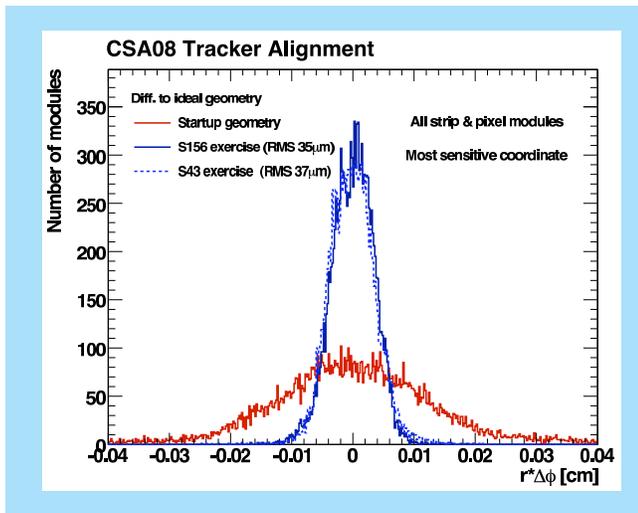


Abbildung 73: Vergleich zwischen durch Alignment bestimmter und wahrer Position der Pixelmodule des CMS Spurdetektors (in tangentialer Richtung).

während des über vier Wochen ausgedehnten CRAFT-Runs in Oktober und November, bei dem das Magnetfeld überwiegend eingeschaltet war. Auch hierbei konnte das Zusammenspiel einer Vielzahl von Kalibrationsmethoden erfolgreich koordiniert werden. Bereits kurz nach dem Ende der Datennahme war ein erster Satz von Alignment- und Kalibrationskonstanten zusammengestellt, und im Dezember erfolgte eine erste Reprozessierung des gesamten Datensatzes.

## Vorbereitung Physikanalyse

Die Aktivitäten in der Vorbereitung von Physikanalysen ist im Jahr 2008 weiter verstärkt worden. Zusätzlich zu den bestehenden Aktivitäten im Bereich der Physik der Top-Quarks, sowie QCD Phänomenologie, gelang es, wie eingangs beschrieben, zwei neue Nachwuchsgruppen einzuwerben, die sich ab Mitte 2009 mit der Suche nach Higgs-Bosonen sowie nach Supersymmetrischen Teilchen beschäftigen werden.

## Physik der Top Quarks

Die Physik der Top-Quarks ist bereits seit einigen Jahren ein Schwerpunkt der Aktivitäten der DESY Gruppe bei CMS. Im Jahr 2008 wurden einige Diplom- und Doktorarbeiten in diesem Bereich fertiggestellt. Zwei neue Doktoranden nahmen im Sommer 2008 die Arbeit an ihrer Doktorarbeit auf.

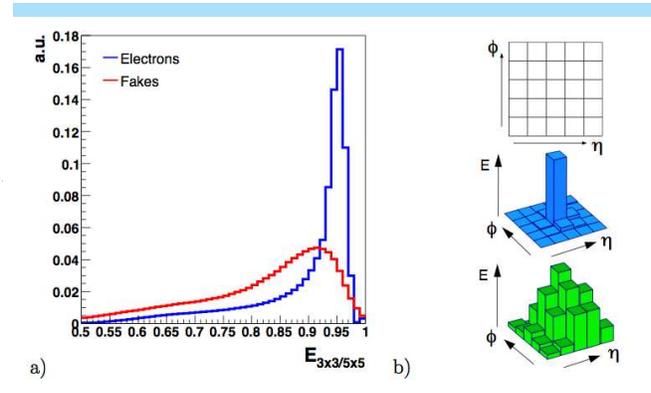


Abbildung 74: Verteilung der Estimatorvariablen  $E_{\frac{3 \times 3}{5 \times 5}}$  zur Unterscheidung von Elektronen und Hadronen im Elektromagnetischen Kalorimeter.

Ein Schwerpunkt in einer der fertiggestellten Doktorarbeiten war die Optimierung der Selektion von Top-Ereignissen im semileptonischen Zerfallskanal. Dabei stand unter anderem die Identifikation von Elektronen im Kalorimeter im Vordergrund. In Abbildung 74 ist exemplarisch die Verteilung einer der untersuchten Trennungsvariablen gezeigt. Elektronen und Hadronen unterscheiden sich deutlich in der lateralen Ausdehnung der Energiedepositionen im Kalorimeter.

Zudem wurde für die Selektion und die finale Ereignisrekonstruktion ein kinematischer Fit entwickelt. Mithilfe dieses Fits werden vorselektierte Ereignisse mit einem Lepton- und vier Jetkandidaten auf Konsistenz mit der Top-Quark Ereignissignatur überprüft. Für die Berechnung des Wahrscheinlichkeitsparameters werden Randbedingungen auf den jeweils untersuchten Top-Quark-Zerfall angelegt. Als Test der kompletten Kette werden die differentiellen Verteilungen in Rapidität, invarianter Masse und transversalem Impuls des Top-Quark Paares analysiert.

## Underlying Events und Multiple Interactions

In hochenergetischen Proton-Proton Wechselwirkungen am LHC gibt es aufgrund der sehr großen Parton-dichteverteilungen (im wesentlichen Gluonen) eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass in einzelnen Proton-Proton Kollision mehrere Partonen aus den beiden Protonen miteinander wechselwirken können (Multi-Parton Wechselwirkungen). Diese Prozesse sind unabhängig von der Luminosität, also auch in der Anfangsphase von LHC wichtig. Das Verständnis der Multi-Parton Wechselwirkungen ist für Präzisionsmessungen am LHC unerlässlich. Sie führen über die zusätzlichen Wechselwirkungen zu Untergrundenergien, welche in den Messsignalen für die untersuchten Prozesse subtrahiert werden müssen. Außerdem können durch die Mehrfach-Wechselwirkungen Teilchen-Endzustände produziert werden, welche denjenigen entsprechen, nach denen für die Entdeckung des Higgs-Bosons oder von neuartigen SUSY-Prozessen gesucht wird. Deshalb muss auch der Beitrag durch Mehrfach-Wechselwirkungen mit möglichst hoher Genauigkeit bekannt sein, um die Signifikanz der Entdeckung zu bestimmen.

Allerdings sind diese Multi-Parton Wechselwirkungen theoretisch noch nicht vollständig verstanden, und man ist in ihrer Beschreibung auf approximative Modelle angewiesen. Diese Modelle können mit Messungen bei HERA, aber auch mit Messungen am Tevatron am FNAL, verglichen und angepasst werden. Allerdings sind für Vorhersagen bei LHC Extrapolationen über ein Größenordnung erforderlich und daher mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Multi-Parton Wechselwirkungen können besser verstanden werden, indem man die Energiedeposition im CASTOR Kalorimeter mit der Teilchenmultiplizität im Zentraldetektor korreliert. Diese Studien wurden im Berichtszeitraum weitergeführt und in dem letzten Treffen der HERA-LHC-Workshop Reihe erfolgreich präsentiert und interessiert diskutiert.

Das CASTOR Kalorimeter eignet sich für eine ganze Reihe von Untersuchungen von QCD Aspekten, welche die starke Wechselwirkung betreffen und einen starken Überlapp mit der HERA-Physik haben. Zum einen betrifft dies die Untersuchung der Diffraktion, wie sie

auch bei den HERA Experimenten intensiv studiert wird. Aber auch die Analysen zur Struktur des Protons zählen mit zu den gemeinsamen Arbeitsbereichen. Insbesondere die Entwicklung der Partonen-Dichten bei kleinen Impulsbruchteilen  $x$  ist hier interessant, weil mit der hohen LHC Protonenenergie sehr viel kleinere  $x$  erreichbar sind. Wie mit den HERA Daten möchte man auch hier feststellen, ob sich die Partonen-Dichten gemäß der sogenannten DGLAP-Gleichungen oder im sogenannten BFKL-Schema entwickeln. Der Unterschied zwischen diesen beiden Ansätze besteht darin, dass im Falle der DGLAP-Gleichungen sich die Partonen-Dichten geordnet im transversalen Impulsbruchteil entwickeln, während sie sich im Falle von BFKL ungeordnet entwickeln. Im Vergleich bedeutet dies für den Phasenraum des CASTOR Kalorimeters, welches besonders empfindlich für Wechselwirkungen mit sehr kleinen  $x$  ist, dass für eine BFKL-ähnliche Entwicklung Jets mit höherer Energie erwartet werden als durch die DGLAP-Gleichungen hervorgesagt.

Abbildung 75 verdeutlicht diesen Sachverhalt mit der Analyse von simulierten Proton-Proton Wechselwirkungen. Diese Simulationen zeigen schon mit einer sehr geringen Anzahl von Ereignissen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Modellen. Deshalb besteht die Hoffnung, dass ein solches Resultat zu den ersten Veröffentlichungen zur LHC Physik gehören wird.

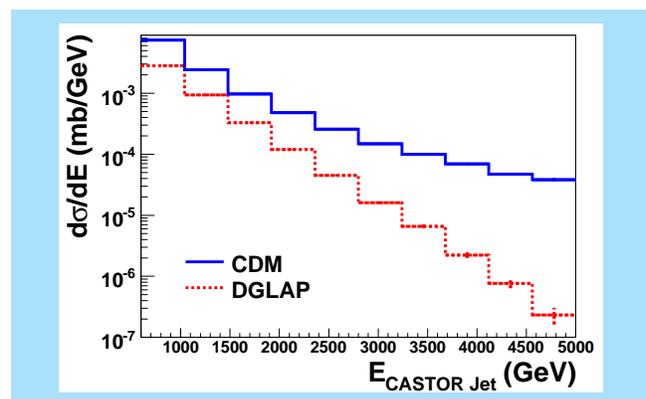


Abbildung 75: Vorhersage von Jet-Energien im CASTOR Kalorimeter unter Verwendung von zwei verschiedenen Modellen zur Entwicklung der Parton-Dichten im Proton.