

Abbildung 48: Monte-Carlo-Simulation eines  $t\bar{t}$ -Ereignisses in einem Layout für den Inneren Detektor des ATLAS-Experiments mit vier Lagen von Silizium-Pixeldetektoren und fünf Lagen von Silizium-Streifendetektoren.

# ATLAS-Experiment

**Gruppenleiter:** M. Medinnis, K. Mönig, DESY

DESY war 2008 im dritten Jahr am Experiment ATLAS am Large Hadron Collider am CERN beteiligt. Die DESY-ATLAS-Gruppe besteht mittlerweile aus 11 permanenten Mitarbeitern, 13 Post-Docs und 13 Doktoranden. Darin enthalten sind zwei Nachwuchsgruppen aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds der HGF. Die von DESY übernommenen Aufgaben im Rahmen der Beteiligung an ATLAS werden in enger Kooperation mit einer Gruppe der Humboldt-Universität zu Berlin und einem Juniorprofessor der Universität Hamburg bearbeitet. Die Aufgaben umfassen Arbeiten an Software und Computing, den höheren Trigger Stufen, dem Luminositätsmonitor ALFA, der Vorbereitung der Physikanalysen sowie Entwicklungsarbeiten für den Upgrade des Pixeldetektors für den SLHC. Diese Aktivitäten werden im weiteren näher beschrieben.

Der ATLAS Detektor wurde 2008 vollständig in Betrieb genommen und mit Myonen aus der kosmischen Strahlung getestet. Auch konnten in kurzen Perioden, während ein einzelner Strahl im LHC war, testweise Daten genommen werden. Dabei zeigte sich, dass der Detektor, die Trigger- und Datennahmekette sowie die Softwarekette im wesentlichen einwandfrei funktionierten.

## Der ATLAS-Trigger

Aufgrund der hohen Wechselwirkungsraten am Large Hadron Collider (LHC) sind die Triggersysteme der LHC-Experimente besonders wichtige Komponenten. Das ATLAS-Triggersystem ist in Abbildung 49

skizziert. Das Triggersystem des ATLAS-Experiments besteht aus drei Stufen, welche die anfängliche Bunchkreuzungsrate von 40 MHz auf eine Ereignisrate von 200 Hz reduzieren.

Die erste der drei Triggerstufen ist in speziell gefertigter Elektronik (FPGAs und ASICs) realisiert. Mit einer maximalen Latenzzeit von 2.5  $\mu$ s reduziert sie die Datenrate auf ungefähr 100 kHz. Zur Selektion werden ausschließlich Signale aus den Kalorimetern und den Myon-Systemen verwendet. Die erste Triggerstufe übernimmt auch die Zuordnung eines Ereignisses zur jeweiligen Strahlkreuzung, in der es erzeugt wurde. Dies ist von Bedeutung für eine genaue Luminositätsmessung. Die Selektion der zweiten und dritten Triggerstufe wird von Software-Prozessen übernommen, die auf großen Computer-Farmen laufen. Diese beiden Triggerstufen werden unter dem Namen *High-Level-Trigger* (HLT) zusammengefasst. Auf der zweiten Triggerstufe (LVL2) haben die Selektionsalgorithmen Zugang zur vollen Granularität des Detektors, allerdings nur in so genannten *Regions-of-Interest*, die vorher von der ersten Stufe identifiziert worden sind. Für die vorgesehene Ratenreduktion auf etwa 1 kHz stehen der zweiten Stufe im Durchschnitt 40 ms zur Verfügung. Die dritte Triggerstufe, der *Event-Filter* (EF), läuft nach dem Zusammenführen aller Daten eines Ereignisses, dem *event building*. Algorithmen, welche auch in der vollen Rekonstruktion laufen, fällen hier innerhalb von durchschnittlich 4 s eine Entscheidung, für welche sie Zugang zur gesamten Ereignisinformation haben. Dort wird die Datenrate auf einige hundert Hz reduziert.

Wie alle Anstrengungen des LHC und der vier LHC Experimente standen 2008 auch die des Triggersystems

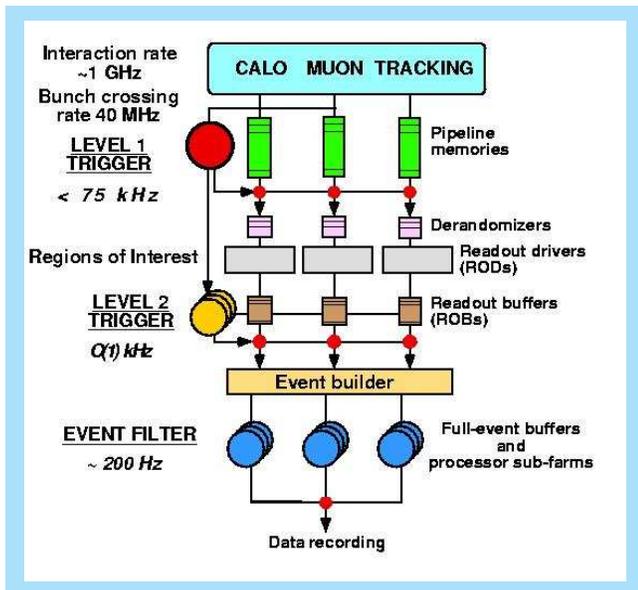


Abbildung 49: Schema des dreistufigen ATLAS-Triggersystems.

ganz im Zeichen der bevorstehenden ersten Kollisionsdaten. Schon Ende 2007 waren alle drei Triggerstufen installiert und betriebsbereit. Die Komponenten der ersten Triggerstufe - der zentrale Trigger, der Myon-Trigger und der Kalorimeter-Trigger - waren ständiger Bestandteil der Datennahme von Myonen aus kosmischer Höhenstrahlung. Die HLT/DAQ-Infrastruktur war komplett, die LVL2-Ereignisverteiler, der Event Builder, und die finalen Datensammler waren installiert. Noch fehlende Rechner der HLT-Farm wurden in den ersten Monaten des Jahres komplettiert.

Von Januar bis September 2008 lag das Hauptaugenmerk auf kombinierten Tests des ATLAS-Detektors, der Datennahme, und der Übermittlung von Daten an die Offline-Rekonstruktionsfarm. Bei diesen Tests stand vor allem das Zusammenspiel aller Subdetektoren bei der Aufzeichnung kosmischer Höhenstrahlung im Mittelpunkt. In speziellen Wochen wurde das HLT-System, entkoppelt vom ATLAS-Detektor, getestet. Hierfür wurden neben aufgezeichneten Ereignissen auch simulierte Kollisionsdaten verwendet, womit realistischere Zeit- und Ratenmessungen durchgeführt werden konnten. Im Juni 2008 wurden dann im zweiten *Full-Dress Rehearsal* in Echtzeit der Datentransport

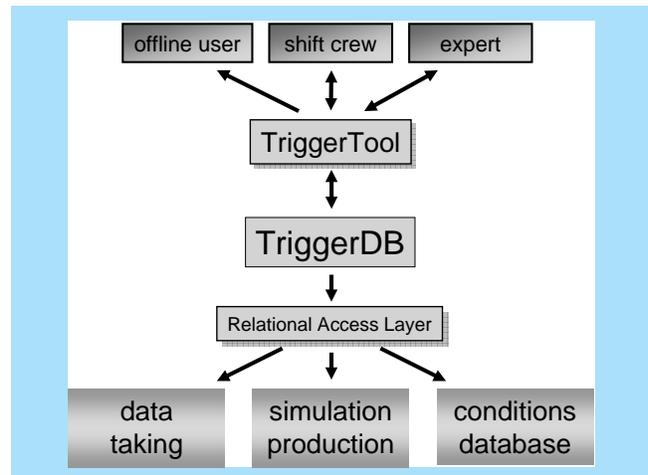


Abbildung 50: Schema des ATLAS-Triggerkonfigurationssystems, mit der TriggerDB als zentrale Quelle für Konfigurationsinformation. Die Information wird verwendet für die Konfiguration des Triggers für Datennahme und Simulation, und für Datenanalyse durch die Konditionsdatenbank.

von den ATLAS-Datensammlern zu den Rekonstruktionsfarmen, die anschließende Rekonstruktion dieser simulierten Kollisionsdaten, sowie die Qualitätskontrolle der Rekonstruktion exerziert.

Die DESY-Gruppe war in all diesen Vorgängen involviert. Das Hauptengagement der Gruppe liegt bei der Implementation von wichtigen Trigger Softwarekomponenten - sowohl zum Betrieb des ATLAS-Triggers als auch zur Analyse von Triggerdaten. Die Gruppe ist verantwortlich für das Konfigurationssystem des Triggers, das System zur Überwachung der Datennahme, sowie die Reproduktion des Triggers beim Prozessieren von ATLAS Daten. Die Gruppe ist mitverantwortlich für die zentrale Triggersoftware und trägt entscheidend zur Bereitstellung von Informationen und Tools für die Triggerdatenanalyse bei.

## Trigger Konfigurationssystem und Zentrale Trigger Software

Das Konfigurationssystem des ATLAS-Triggers versorgt die verschiedenen Triggerstufen mit allen Para-

metern, die während der Datennahme benötigt werden. Es dient ebenso der Archivierung dieser Parameter für die spätere detaillierte Datenanalyse. Das Konfigurationssystem gewährleistet auch die Verfügbarkeit aller Triggerkonfigurationsdaten, welche für jedwede Analyse benötigt werden. Dieses System soll auch zur Konfiguration der triggerrelevanten Teile bei der Rekonstruktion und Simulation von Ereignissen eingesetzt werden.

Die zentrale Komponente des Konfigurationssystems ist die Trigger-Datenbank (TriggerDB), dargestellt in Abbildung 50, welche die gesamte zur Konfiguration des Triggers nötige Information speichert. Die TriggerDB ist eine relationale Datenbank, welche in ORACLE, MySQL, und SQLite betrieben werden kann und die in das ATLAS-weite System von Online-Datenbanken integriert ist. Zu Beginn der Datennahme (oder Simulation) beziehen die Komponenten des Triggers die nötigen Konfigurationsdaten aus der TriggerDB. Um den ORACLE-Datenbankserver nicht zu überlasten, benutzen die etwa 3000 HLT-Prozesse ein hierarchisches System aus einer Vielzahl von Datenbankproxies, von welchen jeder Anfragen von mehreren Prozessen bündelt und als einzige Anfrage weiterleitet. Die Relationalität der Datenbank bewirkt, dass eine komplette Konfiguration eines Triggers in allen drei Stufen durch eine geringe Anzahl von nur vier Schlüsselwörtern vollständig bestimmt ist. Dies trägt entscheidend zur Reproduzierbarkeit des Triggerverhaltens bei. Die Triggerentscheidung wird für jeden Trigger im Event gespeichert. Die Triggerkonfiguration, welche für die Interpretation der Triggerentscheidung in jedem Ereignis benötigt wird, bleibt konstant während der Datennahme und wird separat in der Zustandsdatenbank aufgezeichnet. Speziell entworfene Replikationsmechanismen sorgen dafür, dass diese Daten an sämtlichen ATLAS-Standorten verfügbar sind. Das ATLAS-Analysemodell erfordert die Bereitstellung der Triggerkonfiguration in den Analysedaten. Dies, sowie die Entwicklung entsprechender Zugangstools, ist ebenfalls Teil der Arbeit am Konfigurationssystem.

Zum Bearbeiten der TriggerDB ist ein grafisches Interface (TriggerTool) in Java entwickelt worden. Dieses erlaubt es, komplizierte Menüs übersichtlich darzustellen

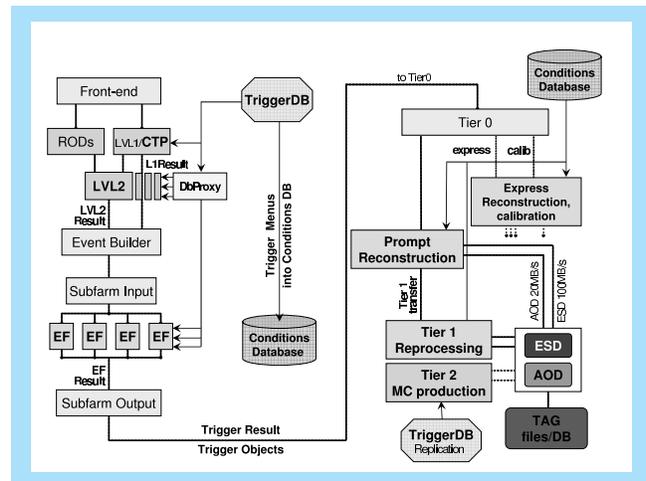


Abbildung 51: Fluss der Konfigurationsinformation von der TriggerDB zur Triggerhardware und Triggersoftware, und zu den Analysezentren für den Benutzer von Triggerdaten.

und einfach zu verändern, so dass alle Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Der geforderten Möglichkeit, jedwede Triggerkonfiguration in der TriggerDB einsehen und verschiedene Konfigurationen vergleichen zu können, wird durch das TriggerTool sowie ein webbasiertes Interface zu diesem Rechnung getragen. Ebenfalls wurde eine Web-Suchmaschine für Datensätze mit bestimmten Triggerkonfigurationen bereitgestellt.

Des Weiteren wird ein System entwickelt, welches es erlaubt, Triggerkonfiguration aus der Datennahme ebenfalls für die Triggersimulation zu verwenden. Dies unterstützt die Verifizierbarkeit der Simulation und den Vergleich mit genommenen Daten. Dasselbe System erlaubt es auch, eine existierende Triggerkonfiguration, jedoch mit Modifikationen, erneut auf bereits genommenen Daten zu verwenden, was eine wesentliche Erleichterung bei der Entwicklung und Untersuchung von neuen Triggern darstellen wird.

Die DESY-Gruppe ist an der Ideenfindung und Entwicklung aller Teile des Systems führend beteiligt. Das Konfigurationssystem, welches direkt am Experiment installiert ist, wird seit September 2006 standardmäßig zur Konfiguration der Triggerselektion eingesetzt. Die Konfigurationsdaten werden konsistent in allen Analyseformaten repliziert und sind somit für jedwede

Analyse verfügbar. Der Einsatz der TriggerDB und ihr Replikationmechanismus ist in Abbildung 51 dargestellt. Als zentrale Informationsquelle für alle Triggerkonfigurationen ist die TriggerDB Ausgangspunkt für viele triggerorientierte Anwendungen.

Die DESY-Gruppe ist auch an weiteren Arbeiten innerhalb der zentralen Trigger Software maßgeblich beteiligt. So stellt sie zum Beispiel Experten, welche die Funktion des Triggers bei der Datennahme überwachen. Mitglieder der DESY-Gruppe sind ebenfalls für die Korrektheit der Triggerdaten in der offline-Rekonstruktion verantwortlich.

## Trigger-Studien

Die Algorithmen, die zur Selektion der Ereignisse im ATLAS-Triggersystem verwendet werden, können zu jedem Zeitpunkt im Rahmen der technischen Gegebenheiten verändert werden. Die Gruppe beteiligt sich vor allen Dingen an der Optimierung der Selektion des Elektronentriggers. Hier können beispielsweise die Algorithmen, die in der Hardware (FPGA Firmware) der ersten Triggerstufe implementiert sind, im Rahmen der technischen Möglichkeiten verändert und neu angepasst werden. Da die Selektion auf den höheren Triggerstufen als Software implementiert ist, können hier weit komplexere Algorithmen eingesetzt werden. Am DESY werden vor allem so genannte multivariate Methoden, wie z. B. neuronale Netze, zur Selektion von Elektronen studiert.

Ein wichtiger Aspekt vieler Studien am LHC ist die richtige Berücksichtigung von Triggereffizienzen. Zur Bestimmung von Triggereffizienzen am LHC sind einige Methoden bekannt. Eine gängig Methode ist die so genannte *tag & probe*-Methode, die bei DESY auf den  $Z \rightarrow e^+e^-$  Kanal angewandt wurde. In dieser Methode werden in einer Offline-Selektion Ereignisse ausgewählt, die einen rekonstruierten Zerfall  $Z \rightarrow e^+e^-$  aufweisen. Es wird verlangt, dass eines der Elektronen das Selektionskriterium für Elektronen erfüllt (*tag*). Das zweite Elektron (*probe*) kann dann zur Bestimmung der Rekonstruktionseffizienz für Elektronen benutzt werden.

Die DESY-Gruppe ist führend an den Studien zur Leistungsfähigkeit dieser Methode mit simulierten Ereignissen beteiligt. Insbesondere wurde die Effizienz des Elektronentriggers studiert. Vergleiche mit der wahren Information bestätigten die Verwendbarkeit der Methode für die Bestimmung von Triggereffizienzen von Elektronen. Teile der Ergebnisse der Studie wurden in der ATLAS-Detektor-Referenz-Publikation und in einer Publikation, welche die zu erwartenden Physikresultate beschreibt, veröffentlicht. Um die Anstrengungen im Bereich der Elektronenanalyse zu bündeln, wurde ein universitätsübergreifende Analysegruppe gebildet, in welcher die DESY-Gruppe maßgeblich involviert ist.

## Trigger-Monitoring

Für eine erfolgreiche Datennahme ist es wichtig, den Zustand des Triggers und des gesamten ATLAS-Detektors permanent zu kontrollieren. Dies betrifft zum einen die gesamte Kette der Datenaufzeichnung und Speicherung, zum anderen aber auch die Qualität der genommenen Daten. Da der Trigger als erster und einziger Zugriff auf alle Daten hat (auch jene welche nicht gespeichert werden), bietet seine Instrumentierung mit einem Monitorsystem die beste Möglichkeit, die Datenqualität fortwährend und umfassend zu überprüfen. Ein solches Monitorsystem gibt der Schichtbesatzung die Möglichkeit, im Falle einer Fehlfunktion schnell eingreifen und die fehlerhaften Komponenten identifizieren zu können, und somit den Verlust von qualitativ hochwertigen Daten zu minimieren. Abbildung 52 zeigt das grafische Interface des Monitorsystems, welches der Schichtbesatzung zur Verfügung steht. Perioden, in denen wesentliche Teile des Triggers nicht wie vorgesehen funktioniert haben, können vom Monitorsystem als unbrauchbar markiert und somit von der späteren Datenanalyse ausgeschlossen werden. DESY hat zusammen mit der Gruppe der Humboldt-Universität beide Aspekte der Triggerüberwachung übernommen.

Ein erster Test der Qualität der genommenen Daten sind die beobachteten Triggerraten und deren Übereinstimmung mit den erwarteten. Dazu wurde am DESY ein

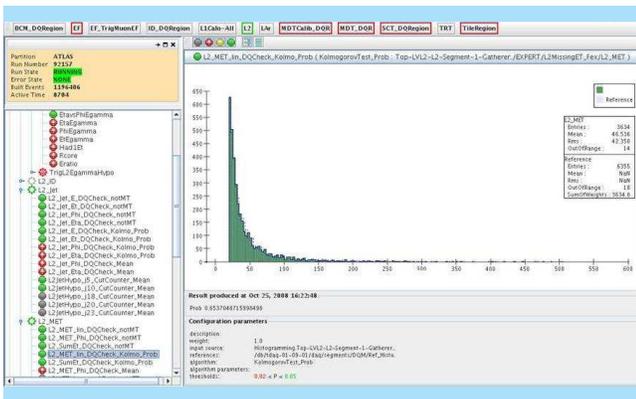


Abbildung 52: Das Datenqualitätsmonitorsystem zeigt übersichtlich die Verteilungen relevanter Triggerdaten und erlaubt so die schnelle Diagnose von Problemen bei der Triggerrekonstruktion.

Programm entwickelt, das sämtliche Raten der zweiten und dritten Triggerstufe in Form von Histogrammen erfasst und an den *Histogram Server* weitergibt, sowie ein Programm, das diese Raten benutzerfreundlich darstellt. Da diese beiden höheren Triggerstufen bei ATLAS aus Software bestehen, die auf Standard-Rechnersystemen laufen, kann das Trigger-Rate-Monitoring leicht in die Triggerprogramme integriert werden. Dies erlaubt einen Zugriff auf sämtliche Triggerraten, sowohl für die selektierten als auch für die verworfenen Ereignisse. Ein weiteres am DESY entwickeltes Programm speichert die Triggerraten für jeden Datenblock in einer Datenbank, wo sie für Bestimmung der Luminosität und für spätere Datenanalyse zur Verfügung stehen.

Dieselbe, auf Histogrammen basierende, Methode zur Erfassung von Triggerdaten wird verwendet, um alle für die Ereignis Selektion verwendeten Informationen zu sammeln und zu analysieren. Die Auswertung der Daten geschieht im so genannten *Data Quality Monitoring Framework*. Die Ergebnisse werden für die weitere Datenanalyse als Trigger-Qualitätsinformation gespeichert. Dieses System wurde von der DESY/Humboldt-Gruppe entwickelt. Auch die Analyse der Trigger-Information im *Dataquality-Monitoring Framework* (DQMF) wird von der DESY/Humboldt-Gruppe koordiniert.

Zusätzlich zur Funktion des Triggers muss die Hardware des Datennahmesystems selbst überwacht werden. Dazu veröffentlichen alle Programme und Hardwarekomponenten Informationen über ihren Zustand auf dem so genannten *Information Server* (IS). Bei DESY wurde das *Online Monitoring Display* (OMD) entwickelt, ein Programm, welches beliebige Informationen vom IS darstellen und analysieren kann. Die Flexibilität des OMD machte es besonders nützlich bei der Inbetriebnahme des Datennahmesystems.

## Software und Computing

Der instrumentelle Hauptbeitrag von DESY liegt weiterhin in der Bereitstellung eines Tier-2-Zentrums für jedes LHC-Experiment. Dieses steht zur Simulation und zur Datenanalyse bereit. In Kooperation mit dem Tier-1 in Karlsruhe und den daran angeschlossenen Tier-2-Zentren wurde die Produktion von Simulationsdaten gefördert und Weiterentwicklungen der Software unterstützt.

DESY baut im Rahmen der Helmholtz-Allianz eine *National Analysis Facility* (NAF) auf, um für deutsche Physiker zusätzliche Rechenkapazitäten für Physikanalysen bereit zu halten. DESY beteiligt sich federführend bei allen Aspekten des Betriebes der NAF für die deutschen ATLAS-Gruppen, angefangen von der Benutzeradministration, über die Installation und Wartung der ATLAS spezifischen Software bis hin zur Benutzerunterstützung. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Werkzeugen, um die NAF-Ressourcen besser in die ATLAS-Software einzubinden.

Im Bereich der Datenverteilung werden Werkzeuge zur Überwachung der Datenübertragung entwickelt und für die ATLAS-Kollaboration nutzbar gemacht. DESY beteiligt sich personell an der Überwachung der Datenverteilung und unterstützt die Weiterentwicklung der vorhandenen Softwarepakete.

Im Rahmen des ATLAS Computing Modells soll nicht nur die offizielle Monte-Carlo-Produktion und Simulation und Daten-Rekonstruktion auf dem GRID durch-

geführt werden, sondern auch große Teile der Physikanalysen. Die Anforderungen durch die Physikanalysen an die GRID-Ressourcen und Werkzeuge weichen aber stark von denen der Monte-Carlo-Produktion und Simulation ab und sind teilweise noch nicht ausreichend entwickelt und getestet worden. DESY versucht, dem Computing-Modell bei der Physikanalyse zu folgen und aus der gewonnenen Erfahrungen auf die Entwicklung der Konzepte und Werkzeuge unter dem Augenmerk der Anwenderfreundlichkeit Einfluss zu nehmen. Der Kontakt zu den DESY IT Experten (GRID, Massenspeicher, usw.) ist sehr hilfreich um auch technisch die benutzten Werkzeuge für die ATLAS-Kollaboration weiter zu entwickeln.

Des Weiteren ist die Gruppe an der schnellen Simulation von elektromagnetischen Schauern und der Entwicklung von Datenformaten für die ersten Daten beteiligt und ist verantwortlich für die Schnittstellen zwischen den Ereignisgeneratoren und der ATLAS-Simulationssoftware.

## Simulation elektromagnetischer Schauer

Das ATLAS-Experiment übertrifft viele frühere Experimente in Größe, Komplexität und Messgenauigkeit. Zur vollen Ausschöpfung des Physikpotentials ist ein genaues Verständnis des Detektors nötig. Eine wichtige Komponente in diesem Erkenntnisprozess ist eine detaillierte Detektorsimulation. Das Zeitbudget dafür wird durch die reine Detektorsimulation dominiert, die zwischen 10 und 15 Minuten für ein typisches Physikereignis liegt.

DESY und die Universität Hamburg haben die Methode der Frozen Showers entwickelt und in den vergangenen Jahren in die ATLAS-Simulationsumgebung implementiert. Bei dieser Methode werden einzelne Teilchen im Kalorimeter durch vorgenerierte Schauer ersetzt, so dass ein detaillierter Simulationsprozess für dieses Teilchen nicht mehr notwendig ist und so Zeit gespart wird. Eine Reduzierung der Simulationzeit um einen Faktor 3 wird erreicht, indem niederenergetische Elektronen

und Photonen mittels der Frozen Shower Methode behandelt werden. Die Bibliotheken für die vorgenerierten Elektron- und Photon-Schauer müssen nur einmal erzeugt werden und können für die gesamte Simulation benutzt werden.

Im Jahr 2008 wurde die Methode offiziell von der entsprechenden Gruppe in der ATLAS-Kollaboration erfolgreich validiert. Bei dieser Validierung wurden mehrere Physikprozesse mit der Methode der Frozen Shower simuliert und mit der Standardsimulation verglichen. Dabei sind keine merklichen Unterschiede gefunden worden. Damit steht diese Simulationsoption der Kollaboration offiziell zur Verfügung. Die Benutzung durch die einzelnen Physikgruppen ist aber gering, da zur Zeit nicht die Simulationzeit sondern der zur Verfügung stehende Plattenplatz auf dem GRID ausschlaggebend bei der Wahl der Simulation ist. Es wird aber erwartet, dass sich dies mit der Verfügbarkeit der ersten Daten ändern wird und die Methode der Frozen Shower verstärkt von der ATLAS-Kollaboration benutzt wird. Selbst nach der Anwendung der Frozen-Shower-Methode auf Elektronen und Photonen in den Vorwärtskalorimetern ist die aufgewandte Simulationzeit in diesen ein dominanter Anteil der gesamten Simulationzeit. Zurzeit wird studiert, ob die Frozen-Shower-Methode auch auf geladene Pionen angewandt werden kann, um die Simulationzeit in den Vorwärtskalorimetern weiter zu reduzieren.

## Datenformate

Die Entwicklung des so genannten *Derived Physics Data* (DPD) für die  $\tau$ -Performance-Gruppe von ATLAS im Laufe des Jahres 2007 konnte im Jahre 2008 genutzt werden, um auf der erfolgreichen Basis eine komplette Familie von so genannten *Performance DPDs* aufzusetzen, die alle relevanten Informationen für das Verständnis des Detektors und der Rekonstruktion in den ersten Daten für alle Bereiche (Jet-Rekonstruktion, Leptonen, usw.) enthalten. Auch viele Physikanalysen mit den ersten Daten können auf diesem Format durchgeführt werden. Sowohl die Entwicklung des Formats und der entsprechenden Werkzeuge als auch die

Anpassung für einzelne Performance- und Physikgruppen werden maßgeblich von DESY vorangetrieben und koordiniert. Z. B. trägt DESY maßgeblich zu der Entwicklung von DPDs in den  $\tau$ -,  $e\gamma$ -, Standard-Modell- und Top-Quark-Gruppen bei.

## Monte-Carlo-Generatoren

Mitglieder der DESY-Gruppe haben die Verantwortung sowohl für die ATLAS-MC-Gruppe als ganzes und als auch für die Einbindung der Monte-Carlo-Generatoren in die ATLAS-Software.

Verschiedene systematische Studien zum Vergleich und zur Validierung der MC-Generatoren wurden durchgeführt. So wurde die Simulation von  $\tau$ -Zerfällen in den Generatoren Tauola, Pythia, Herwig, Pythia8, Herwig++ und Sherpa miteinander verglichen. Es stellte sich heraus, dass die Simulation der  $\tau$ -Zerfälle in Sherpa und in Herwig++ ähnliche Präzision erreicht wie in dem speziell dafür entwickelten Generator Tauola.

Der neue Generator Pythia8 wurde für viele verschiedene physikalische Prozesse wie  $t\bar{t}$ -Produktion, Vektorboson-Produktion und Dijet-Produktion untersucht. Die Wirkungsquerschnitte und differentiellen Verteilungen der Observablen des harten Streuprozesses zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Verteilungen von Fortran-Pythia. Allerdings gibt es starke Abweichungen bei den steuerbaren Observablen wie der Teilchenmultiplizität des hadronischen Endzustandes und der Anzahl der Jets mit niedrigem Transversalimpuls. Hier muss Pythia8 an die existierenden Daten angepasst werden.

Für MC-Generatoren, die die Wirkungsquerschnitte in führender Ordnung (leading order, LO) berechnen, wie beispielsweise Pythia, Herwig und Sherpa, wurden spezielle Partonverteilungsfunktionen (LO\*) entwickelt, die in Normalisierung und in der Form der Verteilungen der Observablen den Ergebnissen von nächstführender Ordnung (next-to-leading order, NLO) Berechnungen mit NLO-Partondichten nahe kommen. Die DESY-ATLAS Gruppe hat den Effekt der neuen LO\*-Funktionen auf W-Produktion mit Pythia untersucht und das erwartete Verhalten im Vergleich zu CTEQ6L1 Verteilungen, die bisher bei ATLAS verwendet wurden,

bestätigt. Neu wurde beobachtet, dass die Anzahl der Jets, die aus Gluonabstrahlung und Wechselwirkung der Partonen entstehen, signifikant erhöht wird. Der Einfluss der LO\* auf die Entwicklung des Partonshowers wird derzeit noch weiter untersucht.

Neben der Unterstützung der existierenden Software wurden auch neuere Generatoren wie der Monte-Carlo-Generator Herwig++ und Pythia8, die in C++ neu geschriebene Generatoren Herwig und Pythia, in die ATLAS-Software eingebunden.

In ATLAS werden viele so genannte Matrix-Element-(ME) Generatoren verwendet, die nur den harten Streuprozess berechnen und als Ergebnis Vierervektoren der gestreuten Teilchen im dafür entwickelten Les-Houches Event Format (LHEF) ausgeben. Diese Ereignisse werden von Generatoren wie Pythia, Herwig oder Sherpa eingelesen, die dann die Entwicklung des Partonschauers und die Hadronisierung berechnen. Bisher gab es in ATLAS für jeden dieser ME-Generatoren ein eigenes Interface. Wir haben ein generisches Interface geschrieben, das erlaubt, das LHEF-Format unabhängig vom spezifischen ME-Generator in die Software einzulesen. Ferner wurde ein Schema entwickelt im generierten Ereignis abzuspeichern, von welchem Generator bzw. welche Kombination von Generatoren (z. B. AcerMC mit Herwig, Tauola und Photos) das Ereignis erzeugt wurde. Dies ist wichtig, um bei der späteren Analyse generatorspezifischen Code anwenden zu können.

## ALFA

Seit dem Jahr 2007 nimmt DESY am Bau des ALFA Detektors teil. ALFA ist ein Vorwärts-Spektrometer, das elastisch oder quasi-elastisch (diffraktiv) gestreute Protonen nachweisen kann. Über die Messung des elastischen Streuquerschnittes kann auf die absolute Luminosität am ATLAS-Wechselwirkungspunkt geschlossen werden. Der Detektor besteht aus einem System von so genannten *Roman-Pots*, das auf beiden Seiten des Wechselwirkungspunktes in einer Entfernung von ca. 240 m aufgestellt wird. Ein *Roman-Pot* ist ein evakuierter Behälter, der einen Detektor beinhaltet.

Er erlaubt, den Detektor bei stabilen Stahlbedingungen ganz nah an den Strahl zu fahren, vom Vakuum der Maschine nur durch ein sehr dünnes Fenster getrennt. Der gesamte Detektor besteht aus acht *Roman-Pots*, vier auf jeder Seite des Wechselwirkungspunktes, davon jeweils zwei oben und zwei unten. In den Roman Pots befinden sich szintillierende Fasern, die mit Photomultipliern ausgelesen werden. Die primäre Aufgabe des Detektors ist die Messung der elastischen Proton-Proton Streuung. Diese Messungen werden in kurzen Runs mit einer speziellen high-beta Strahloptik durchgeführt. Der Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit vom Impulsübertrag im Bereich der Coulomb-Streuung ermöglicht die Bestimmung der absoluten Luminosität für das ATLAS-Experiment mit einer Genauigkeit von etwa einem Prozent. Zur Vorbereitung des Einbaus vom ALFA im LHC-Tunnel wurden im Jahr 2008 bei den Arbeiten die folgenden drei Schwerpunkte verfolgt:

1. Fertigstellung eines kompletten Prototyps und Untersuchung der Parameter im SPS-Teststrahl;
2. Fertigstellung aller Komponenten der Roman-Pot-Mechanik;
3. Abschluss der technologischen Vorbereitungen zur präzisen Herstellung aller Faserdetektoren.

Im Frühjahr wurde in Gießen der Prototyp-1 fertiggestellt. Damit wurden erste Erfahrungen bei der Fertigung der Faserdetektoren gesammelt. Alle Szintillationsfasern und die Faserbündel zur Auslese der Triggerdetektoren wurden erstmals in spezielle Masken verklebt. Diese Masken sind der Pixelstruktur der Multi-Anode Photomultiplier (MAPMT) angepasst und ermöglichen die separate Auslese der Signale einzelner Fasern. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei Prototyp-1 war die Passung des Detektors einschließlich aller Faserbündel in die engen Toleranzen des *Roman Pots*. Abbildung 53 zeigt, dass alle Detektoren und Fasern in die Plexiglas-Nachbildung eines *Roman Pots* passen.

Eine wichtige Bedingung für die gute Ortsauflösung des Detektors ist die genaue Positionierung der Fasern. Die DESY-Gruppe hat die Vermessung aller Faserdetektoren übernommen. Der Messplatz für die optische Vermessung mit Mikroskop, Präzisionsmesstisch und



Abbildung 53: ALFA Prototyp in einer Plexiglas-Nachbildung des Roman Pots.

dem PC zur Datenerfassung und Auswertung ist in Abbildung 54 zu sehen. Alle Fasern werden an mehreren Punkten vermessen und die resultierenden Geradenparameter archiviert. Diese Geometriedaten werden zur Qualitätskontrolle jedes Detektors sowie zur Rekonstruktion des Durchgangspunktes der registrierten Protonen verwendet. Bei der Vermessung von Prototyp-1 wurden gewisse Abweichungen der Fasern von den Sollpositionen beobachtet. Diese Vermessungsdaten sind der wesentliche Ausgangspunkt zur Verbesserung der Technologie der Faserverklebung. Die Fasern werden auf Titan-Platten geklebt, die genau gearbeitete Kanten für die Positionierung der ersten Faser besitzen. Durch Elektro-Erosion wird eine Genauigkeit unter 5  $\mu\text{m}$  erreicht. Für jeden Pot werden jeweils 10 Platten für die Faserdetektoren, 3 Platten für die Überlappdetektoren und 2 Platten für die Triggerzähler benötigt. Die Titan-Platten sind ein Beitrag der HU Berlin und alle Platten wurden im Sommer 2008 fertiggestellt.

Die ALFA-Triggerdetektoren werden von DESY in Zeuthen gebaut. Die Szintillatorteile wurden auf CNC-Fräsmaschinen mit entsprechender Genauigkeit hergestellt. Die Triggersignale werden durch Bündel aus klaren Faser zu den Trigger-Photomultipliern geleitet. Die Szintillatorteile müssen mit einer Genauigkeit von 10  $\mu\text{m}$  mit der Unterkante der Faserdetektoren übereinstimmen. Im Dezember wurden alle Klebearbeiten für die 20 Titan-Platten der Spurdetektoren und der Überlappdetektoren beendet.



Abbildung 54: Präzisionsmesstisch zur Vermessung der Faserdetektoren.

Alle Spurdetektoren werden durch 64-Kanal MAPMT ausgelesen. Für den Strahltest eines kompletten Prototyps wurden 25 neue MAPMTs gekauft. Diese wurden in einem speziellen Testaufbau unter Verwendung von LEDs in Bezug auf Signalstärke und Gleichmäßigkeit des Signal aller 64 Kanäle vermessen. Ein wichtiger Beitrag von DESY ist die Beschaffung von etwa 50 % der MAPMTs und der Qualitätskontrolle aller bei ALFA eingebauten Geräte.

Die HV-Versorgung aller MAPMTs und Trigger-PMTs wird ebenfalls von DESY übernommen. Insgesamt werden 8 HV-Module mit je 32 Kanälen sowie die langen, mehradrigen HV-Kabel vom Kontrollraum zu den 240 m entfernten Roman Pots bereitgestellt.

Der für den ersten kompletten Pot vorgesehen Detektor wurde im Sommer in Gießen fertiggestellt. Danach wurde dieser Prototyp-2 zum CERN transportiert und für die Messung im SPS-Teststrahl H8 vorbereitet. Mit einer gepulsten LED wurden kurze Lichtpulse für die MAPMTs erzeugt und die gesamte Ausleseketten von der Front-End-Elektronik bis hin zur DAQ getestet. Ein hinreichendes Verständnis des Motherboards wurde erst kurz vor dem Beginn der Messzeit im Teststrahl erreicht. Mit zwei verschiedene Varianten des Motherboards konnten noch ca.  $10^6$  Trigger in Kombination mit einem Silizium-Streifenteleskop aufgezeichnet werden. Ende August war die Testzeit beendet. Die

Auswertung der Daten war 2008 nicht abgeschlossen. Alle bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Qualität der Spurrekonstruktion durch die Fehlfunktionen des Motherboards stark beeinträchtigt wurde. Ein neues Design für diese Komponente wurde noch 2008 begonnen und wird im Frühjahr 2009 zur Verfügung stehen.

## Physikstudien

Bei den Physikstudien konzentriert sich die Gruppe auf drei Aspekte, Analysen im Rahmen des Standardmodells, Physik mit Top-Quarks und der Suche nach Supersymmetrie (SUSY). Als Teil der SUSY-Studien beschäftigt sich die Gruppe auch mit der Rekonstruktion von  $\tau$ -Leptonen.

## Interpretation der LHC-Daten

Das Higgs-Boson ist das einzige fehlende Teilchen im Standardmodell. Es gibt jedoch indirekte Hinweise auf seine Masse durch Präzisionsmessungen bei LEP, SLD und am Tevatron. In Zusammenarbeit mit CERN und der Universität Hamburg wird in der DESY-Gruppe ein neues Software-Framework, Gfitter, entwickelt, das diese Daten interpretiert und konsistent mit den direkten Ausschlussgrenzen kombiniert. Es zeigt sich, dass die Daten ein Higgs knapp über der LEP-Ausschlussgrenze von 115 GeV bevorzugen. Gfitter ist so ausgelegt, dass die Daten nicht nur im Standardmodell sondern auch in darüber hinausgehenden Modellen interpretiert werden können. Ergebnisse in Modellen mit zwei Higgs-Dubletts sind bereits veröffentlicht, supersymmetrische Modelle werden zurzeit implementiert. Neben einem Präzisionstest des Standardmodells wird die Interpretation der Daten der LHC-Experimente (zusammen mit den oben schon verwendeten Messungen) in Modellen Neuer Physik eines der Hauptziele der Teilchenphysik in den nächsten Jahren darstellen. Dabei steht die Falsifikation von Modellen, die Unterscheidung von Modellen und die Messung von Modellparametern im Mittelpunkt. Dies wird im Rahmen des

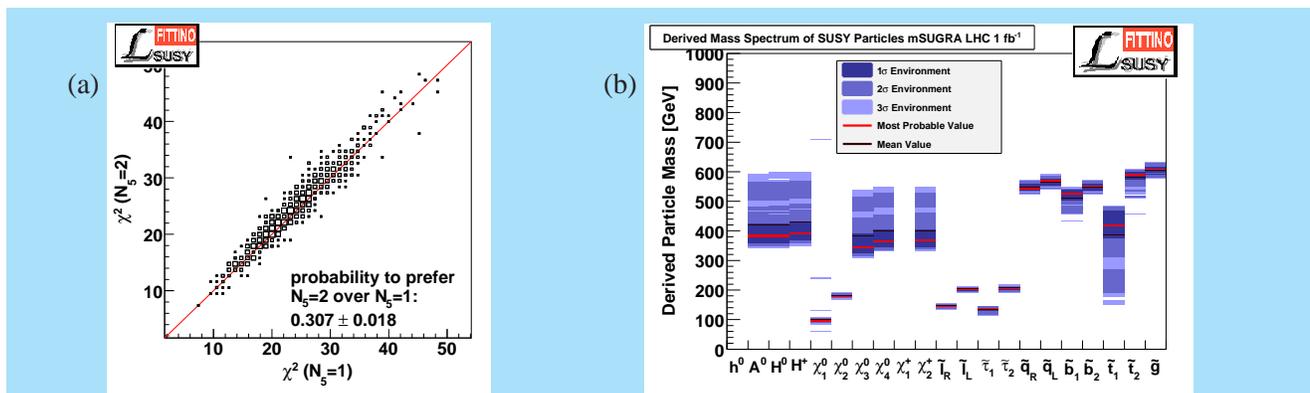


Abbildung 55: a) Beispiel für das Unterscheidungsvermögen zwischen zwei Modellen, die sich durch ganzzahlige Parameter unterscheiden. b) ein Beispiel für die Präzision der Messung eines mSUGRA-Spektrums mit Daten des LHC und anderer Experimente.

Fittino-Projekts anhand von Supersymmetrie als Beispiel neuer Physik mit Ergebnissen von Physikstudien der LHC-Experimente erprobt.

Abbildung 55 zeigt beispielhaft zwei Ergebnisse dieser Arbeit. In Abbildung 55a wird der Fall untersucht, dass mehrere Modelle gleichzeitig oder ein Modell mit mehreren unterschiedlichen Einstellungen eines ganzzahligen Parameters gleichzeitig eine statistisch korrekte Beschreibung der Messwerte liefern. In diesem Fall sind mehrere Modelle erlaubt, zusätzlich untersucht werden muss jedoch, mit welcher statistischen Sicherheit ein Modell gegenüber dem anderen klar bevorzugt werden kann. Das Beispiel zeigt, dass für den Fall der Verwendung von schon existierenden Präzisionsmessungen ein GMSB-Modell mit einem Satz ganzzahliger Parameter nicht von einem Modell mit anderen ganzzahligen Parametern unterschieden werden kann, weil in 30.7 % aller möglichen Ergebnisse der Messungen durch die Streuung der Messwerte erwartet wird, dass das falsche Modell einen besseren Fit als das richtige Modell ergibt.

Abbildung 55b zeigt eine Abschätzung der möglichen Präzision der Messung des Spektrums der SUSY-Teilchen mit den Daten des LHC, die für eine integrierte Luminosität von  $10 \text{ fb}^{-1}$  erwartet werden. Im Rahmen eines Modell mit wenigen Parametern, wie hier mSUGRA, ist eine Präzision im Bereich von 10 % erreichbar.

## Rekonstruktion von $\tau$ -Leptonen

Die Arbeiten im Bereich der Rekonstruktion und Identifikation von  $\tau$ -Leptonen konzentrieren sich hauptsächlich auf mögliche Messungen mit ersten Daten des ATLAS-Experiments. Dabei wurden besondere Schwerpunkte auf die Rekonstruktion von Photon-Konversionen in  $\tau$ -Zerfällen, die Entwicklung einer möglichst robusten Identifikation mittels einer einfachen schnittbasiereten Analyse speziell für erste Daten und auf Messungen von  $\tau$ -Rekonstruktions- und Identifikationseffizienz in ersten Daten gelegt.

### Entwicklung der $\tau$ -Rekonstruktions- und Identifikationsalgorithmen

Die bisherigen Algorithmen zur Identifikation von  $\tau$ -Kandidaten und der Unterdrückung des dominanten QCD-Untergrunds im ATLAS-Experiment konzentrieren sich auf komplexe, auf Neuronale Netzen oder Likelihoods basierten Methoden mit vielen komplexen Observablen. In der DESY-Gruppe wurde mittels aufwändiger statistischer Verfahren eine möglichst simple aus reinen Schnitten auf wenige möglichst unkorrelierte Variablen bestehende Selektion entwickelt. In vielen kinematischen Bereichen ist diese den bisherigen viel komplexeren und in den ersten Daten schwerer zu verstehenden Methoden fast ebenbürtig (siehe Abbildung 56a). Diese Selektion ist als Standard zum Einsatz für die ersten Daten vorgesehen.

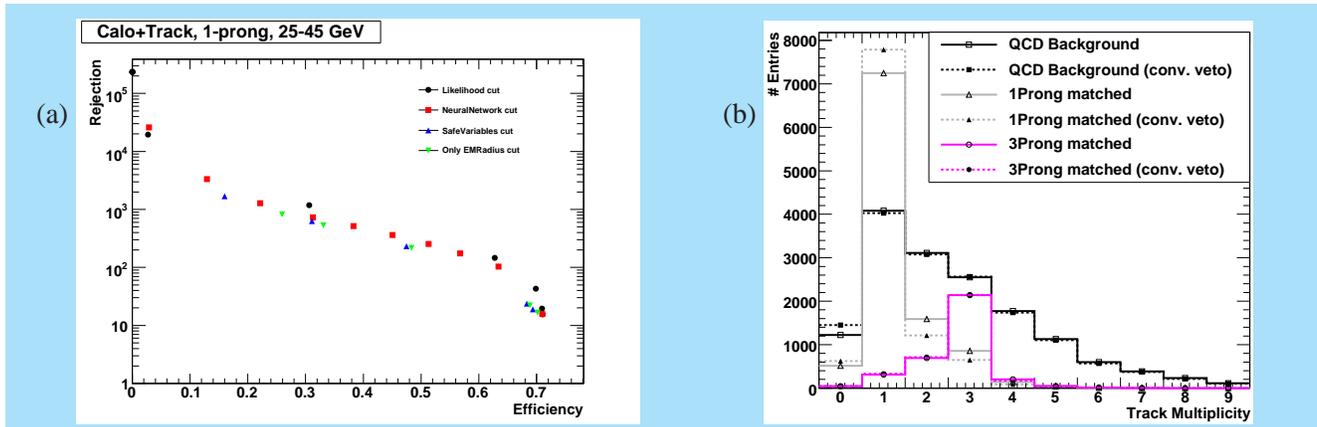


Abbildung 56: In (a) wird die Reinheit und Effizienz verschiedener  $\tau$ -Identifikationen dargestellt. Dabei erreicht die hier entwickelte einfache schnittbasierte Selektion mit wenigen Variablen fast das Niveau der Likelihood-basierten komplexen Identifikation mit mehr Variablen. In (b) ist die Korrektur der Spektren der Spuren in rekonstruierten  $\tau$ -Leptonen dargestellt. Durch explizite Rekonstruktion von  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ -Konversionen kann eine deutliche Verbesserung des Signalspektrums bei gleichbleibendem Untergrund erreicht werden.

Weiter fortgeführt wurden Arbeiten zur Identifikation von Photonkonversionen in hadronischen  $\tau$ -Zerfällen, die zum größten Teil aus dem Prozess  $\tau \rightarrow \pi^+\pi^0 \rightarrow \pi^+\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\gamma e^+e^-$  stammen. Diese verzerren das Spektrum der Zahl der Spuren im  $\tau$ -Jet und verschlechtern die Reinheit der identifizierten  $\tau$ -Kandidaten. Eine aufwändige dedizierte Identifikation dieser Konversionen unter Verwendung von Vertexfits und einer Identifikation der Teilchensorte durch besondere Hits im Transition Radiation Tracker erlaubt eine deutliche Verbesserung des Spektrums der Zahl der rekonstruierten Spuren nach Verwerfung der als Konversionsprodukte identifizierten Spuren (Abbildung 56b).

### Messung der Eigenschaften von $\tau$ -Rekonstruktionsalgorithmen aus ersten ATLAS-Daten

Die Arbeiten zur Messung der Untergrundunterdrückung und der Effizienz der  $\tau$ -Selektion aus ersten Daten wurden fortgeführt und weiterentwickelt. Bei der Untergrundunterdrückung konzentriert sich die Arbeit darauf, Untergrund-Jets verschiedener Quellen, also aus Gluonen, leichten Quarks und schweren Quarks getrennt zu vermessen. Die Effizienzmessung wurde in vollhadronischen und semileptonischen  $\tau$ -Zerfällen

aus dem Prozess  $pp \rightarrow ZX \rightarrow \tau^+\tau^-X$  untersucht, wobei festgestellt wurde, dass der semileptonische Kanal als einziger eine hinreichende Triggereffizienz und Untergrundunterdrückung bietet. Dort wird eine Präzision der Effizienzmessung auf dem Niveau von  $\mathcal{O}(10\%)$  mit  $\mathcal{L}_{\text{int}} = 100 \text{ pb}^{-1}$  erwartet, wobei mehrere  $\tau$ -Identifikationsalgorithmen untersucht werden.

## Supersymmetrie

Zur Vorbereitung der ATLAS-Datenanalyse untersucht die DESY-Gruppe schwerpunktmäßig das Entdeckungspotenzial für supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells. Wegen ihres Potenzials, offene Fragen der Teilchen- und Astrophysik zu erklären, sind supersymmetrische Theorien sehr populär. Die meisten Theorien zur *Großen Vereinheitlichung* und Superstringtheorien sind supersymmetrisch. Die minimal mögliche, mit bisherigen Erkenntnissen kompatible Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik (SM), das Minimale Supersymmetrische Standardmodell (MSSM), ist der am meisten untersuchte Kandidat für Physik jenseits des Standardmodells. Allerdings konnte trotz vielversprechender theoretischer Argu-

mente bis heute kein experimenteller Beweis erbracht werden, dass Supersymmetrie tatsächlich in der Natur existiert, insbesondere wurden noch keine Superpartner bekannter Teilchen beobachtet, die im Massenbereich bis etwa 1 TeV erwartet werden. Durch die hohe Schwerpunktenergie und Luminosität wird dieser Energiebereich mit der Inbetriebnahme des LHC zum ersten Mal zugänglich.

Da die neuen supersymmetrischen Teilchen offensichtlich nicht die Massen ihrer SM-Partner tragen, muss Supersymmetrie gebrochen sein. Verschiedene Mechanismen der SUSY-Brechung führen zu unterschiedlichen Teilchenspektren und somit auch zu unterschiedlichen experimentellen Signaturen in Proton-Proton-Kollisionen am LHC. In einigen Modellen, die von heute zugänglichen Messungen bevorzugt werden, befinden sich insbesondere  $\tau$ -Leptonen in den Endzuständen. Eine HGF-Nachwuchsgruppe am DESY beschäftigt sich deshalb mit der Rekonstruktion von  $\tau$ -Leptonen im ATLAS-Detektor und mit dem speziellen Studium von Endzuständen mit  $\tau$ -Leptonen in supersymmetrischen Modellen.

Einer der Mechanismen, der zu SUSY-Brechung führt, ist in so genannten *gauge mediated supersymmetry breaking* Modellen (GMSB) umgesetzt. In diesen Modellen ist entweder das Neutralino oder der leichtere Partner des  $\tau$ -Leptons, das  $\tilde{\tau}_1$  das supersymmetrische Teilchen mit der zweitleichtesten Masse (*next-to-lightest-supersymmetric particle*, NLSP). In allen Fällen ist das Gravitino das leichteste SUSY-Teilchen (LSP). Das Neutralino zerfällt in diesen Modell in ein hochenergetisches Photon und ein Gravitino, das  $\tilde{\tau}_1$  in ein  $\tau$  und ein Gravitino. In beiden Fällen konnte gezeigt werden, dass ein großer Bereich des Parameterraums beim LHC entdeckt oder ausgeschlossen werden kann.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein Modell untersucht, in dem ein Axion das LSP ist und die dunkle Materie im Universum bildet. In diesem Modell ist im größten Teil des Parameterraums das  $\tilde{\tau}_1$  das zweitleichteste Teilchen und zerfällt erst außerhalb des Detektors. In ATLAS erscheint es als ein schweres Myon. Auch dieses Modell kann am LHC entdeckt oder ausgeschlossen werden.

## Top-Quark Physik

Mit dem LHC wird ab Mitte 2008 erstmals eine Maschine bereitstehen, die Top-Quarks in großer Anzahl produzieren wird und deshalb zurecht den Titel *Top-Fabrik* verdient. Die Wirkungsquerschnitte für im Wesentlichen durch Gluon-Gluon-Fusion erzeugte Top-Paare und elektroschwach produzierte einzelne Top-Quarks sind mit 833 pb und 323 pb etwa hundertmal höher als am Tevatron.

Untersuchungen des Top-Quarks am LHC und damit auch an ATLAS sind von großer Relevanz, da sie neben der Anreicherung des Wissens über das Top-Quark selbst auch der Charakterisierung einer der Hauptquellen für Untergrund für neue Physik dienen. Top-Quark Physik ist auch das Physikthema der zweiten HGF-Nachwuchsgruppe, die in Zeuthen angesiedelt ist.

Eine notwendige Voraussetzung für die Analyse des Top-Quarks ist die korrekte und effiziente Selektion von Top-Ereignissen. Deshalb war einer der Schwerpunkte der Arbeit auf diesem Gebiet die Untersuchung des ATLAS-Triggersystems im Hinblick auf die Auswahl von Top-Ereignissen. Der nahezu hundertprozentige Zerfall der Top-Quarks in ein W-Boson und ein Bottom-Quark und der weitere Zerfall des W-Bosons in entweder ein Lepton-Neutrino- oder ein Quark-Antiquark-Paar hinterlässt im Detektor verschiedene markante Signaturen. So lassen sich Signaturen sowohl aus leptonischen und hadronischen Triggern (auch mit höheren Multiplizitäten) als auch aus Triggern für fehlende transversale Energie ( $\cancel{E}_T$ ) kombinieren.

In Zusammenarbeit mit der Top-Trigger-Arbeitsgruppe von ATLAS hat die DESY-Gruppe sich speziell mit der Untersuchung der hadronischen Jet-Trigger, der  $\cancel{E}_T$  - und  $\Sigma E_T$  -Trigger, sowie der Redundanz und dem Überlapp verschiedener Trigger beschäftigt. Eine weitere wichtige Rolle spielte die Analyse und die Entwicklung von Monitor-Triggern, zur Bestimmung des Trigger-Effizienz an Hand von Daten.

Die Studien zur Redundanz und dem Überlapp verschiedener Trigger galten dem Auffinden und der Charakterisierung der Korrelation zwischen den verschiedenen Triggerobjekten. Dabei wurde eine Aus-

wahl relevanter Trigger verglichen und die Ansprechwahrscheinlichkeit des einen als Funktion des jeweils anderen bestimmt. Diese Untersuchungen, welche sowohl für verschiedene Luminositäten als auch Ereignis-Auswahl-Kriterien durchgeführt wurden, geben Aufschluss, welche Trigger sich sinnvoll und möglichst korrelationsfrei kombinieren und welche sich als Monitor-Trigger nutzen lassen. Die Grundidee bei der Einführung von Monitor-Triggern ist die Bestimmung der Effizienz eines Triggers nur an Hand von Daten und damit befreit von zusätzlichen, durch Monte-Carlo-Simulationen eingebrachten, systematischen Fehlern.

Abbildung 57 zeigt die Effizienz für mehrere hadronische Trigger, wie sie direkt aus dem Monte Carlo bestimmt wurde und wie sie bei Vorhandensein eines Lepton-Triggers aus den Daten gemessen werden kann, sowie die Differenz der beiden Methoden. In allen Fällen ist die Differenz mit Null verträglich, was bedeutet, dass die Effizienz zuverlässig aus den Daten bestimmt werden kann.

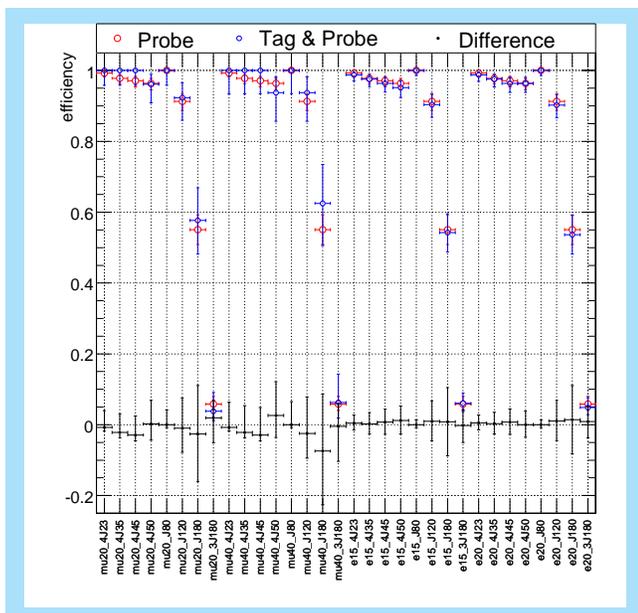


Abbildung 57: Triggereffizienz für verschiedene Jet-Trigger direkt aus der Monte-Carlo-Simulation bestimmt (Probe) und bei Vorhandensein eines Testtriggers (Tag & Probe).

Ein zweiter Schwerpunkt war die Analyse der Produktion einzelner Top-Quarks. Einzelne Top-Quarks werden im Standardmodell nur über elektroschwache Prozesse erzeugt, und der Wirkungsquerschnitt ist daher proportional zum Element  $V_{tb}$  der Kobayashi-Maskawa-Matrix, das bisher noch nicht gemessen wurde. Da die Einzeltopproduktion einen sehr hohen Untergrund insbesondere von der Top-Paarproduktion hat, sind die erwarteten systematischen Fehler sehr groß. Da die systematischen Unsicherheiten jedoch stark korreliert sind mit den Unsicherheiten der Paarproduktion, wurde im Rahmen einer Diplomarbeit versucht, statt des absoluten Wirkungsquerschnitts das Verhältnis der Einzelproduktion zur Paarproduktion zu messen. Es konnte gezeigt werden, dass sich damit der systematische Fehler signifikant reduzieren lässt.

Zusätzlich zu den direkten Physikstudien hat die Arbeitsgruppe an der Entwicklung und Pflege von allgemein zugänglicher und genutzter Software mitgearbeitet und wichtige Funktionen bei der Validierung und Produktion von Monte-Carlo-Daten, speziell für die Top-Arbeitsgruppe, übernommen.

## Standardmodell-Analysen

Im Rahmen des Standardmodells finden zwei weitere Analysen unter DESY-Beteiligung statt. Teile der DESY-Gruppe haben durch ihre HERA-Analysen große Erfahrungen in Parton-Verteilungsfunktionen. Diese Erfahrungen sollen für Präzisionsmessungen der W- und Z-Boson-Produktion genutzt werden. In Zusammenarbeit mit Gruppen aus Mainz und Liverpool finden Studien zu Selektion dieser Ereignisse sowie zur Messung der Triggereffizienz statt. Dabei konzentriert sich die DESY-Gruppe auf W- und Z-Zerfälle in Elektronen. Außerdem sollen die Erfahrungen, die bei der Konzeption des Minimum-Bias-Triggers gewonnen wurden, auch weiter genutzt werden. Daher wurde eine detaillierte Analyse solcher Ereignisse begonnen. Als erster Schritt wurden dazu mehrere Monte-Carlo-Generatoren für Minimum-Bias-Ereignisse verglichen sowie neue Generatoren an die Daten bei niedrigeren Energien angepasst.

## R&D für Super-LHC

Während der ATLAS-Detektor noch in Betrieb genommen wird, sind seit dem Jahr 2005 Planungen für ein Upgrade des Detektors angelaufen, das den Anforderungen des geplanten Luminositätsupgrades des LHC zum Super-LHC (SLHC) genügt. Beim SLHC soll, nach derzeitiger Planung etwa ab dem Jahr 2018, die instantane Luminosität des LHC um einen Faktor 10 gegenüber der Designluminosität erhöht werden, auf etwa  $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Die damit verbundene hohe Strahlendosis und Belegungsdichte legt die Ersetzung des Inneren Detektors durch ein neues Spurfindungssystem nahe, das ausschließlich auf Siliziumdetektoren beruht. Der neue Innere Detektor soll dabei bei vergleichbarem Materialbudget deutlich mehr Auslesekanäle als der derzeitige Detektor haben und trotz der hohen Belegungsdichte dieselben Anforderung an Spurfindung und Identifikation von Jets mit B-Hadronen erfüllen.

Mit dem Start der HGF-Nachwuchsgruppe *Top as Key to LHC Physics* im April 2008 wurde in der DESY-ATLAS-Gruppe die Planung für Hardwareprojekte im Rahmen des SLHC-Upgrades intensiviert. Die Strategie der Gruppe sieht zunächst eine Beteiligung an der Inbetriebnahme und dem späteren Betrieb des derzeitigen ATLAS-Pixeldetektors vor. Gleichzeitig beteiligt sich die DESY-Gruppe an zwei Forschungs- und Entwicklungsprojekten für den SLHC, einerseits der Test von Stromversorgungskonzepten für Siliziumdetektoren, andererseits Simulationsstudien zum Layout des Inneren Detektors. Diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollen im Laufe der kommenden Jahre ausgebaut werden mit dem Ziel, an Konstruktion und Inbetriebnahme der neuen Detektoren mitzuwirken.

### Inbetriebnahme des ATLAS-Pixeldetektors

Bei der Inbetriebnahme des ATLAS-Pixeldetektors hat die DESY-Gruppe Aufgaben auf den Gebieten der Kalibrierung und der Überwachung der Betriebsparameter des Systems übernommen. Darüber hinaus haben Mitglieder der Gruppe am Schichtbetrieb für

den Pixeldetektor teilgenommen. Diese Arbeiten liefern wichtige Betriebserfahrung mit dem derzeitigen ATLAS-Pixeldetektor, die für die Arbeit am Upgrade des Inneren Detektors unerlässlich sind.

Vor dem Betrieb der Module des Pixeldetektors muss regelmäßig der Arbeitspunkt des Auslesechips bestimmt werden. Ein Signal wird nur dann registriert, wenn die gesammelte Ladung einen Schwellwert von etwa  $4000 e^-$  überschreitet. Anhand eines Testaufbaus wurde ein alternativer Ansatz zur Kalibrierung der Pixelmodule untersucht, bei dem der Schwellwert schneller und sicherer bestimmt werden kann.

Um den stabilen Betrieb des Pixeldetektors zu gewährleisten, werden dessen Betriebsparameter genau überwacht. Dabei werden Ströme, Spannungen, Temperaturen, Drücke usw. über das DCS (Detector Control System) ausgelesen und gespeichert. Mit einer von der DESY-Gruppe entwickelten Software können diese Betriebsparameter schnell ausgelesen und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Damit können mögliche Detektorprobleme schnell diagnostiziert werden, was insbesondere in der Phase der Inbetriebnahme von großer Bedeutung ist. In Abbildung 58 wird das Temperaturverhalten der Detektormodule als Funktion der Leistungsaufnahme gezeigt. Anhand der Korrelation der beiden Größen lassen sich fehlerfrei funktionierende Module von Modulen unterscheiden, die z. B. aufgrund einer Reparatur der Kühlleitung weniger gut gekühlt werden können.

### Neuartige Konzepte zur Stromversorgung von Siliziumdetektoren

Die Forderung nach einem Materialbudget im Inneren Detektor, das trotz einer deutlich höheren Anzahl von Auslesekanälen vergleichbar mit dem des derzeitigen Detektors ist, führt zur Entwicklung neuartiger Konzepte zur Stromversorgung der Siliziumdetektoren. Derzeit werden für die SLHC-Siliziumdetektoren zwei Konzepte diskutiert, die serielle Stromversorgung der Detektormodule und die parallele Stromversorgung mit Gleichstromwandlung am Modul. Im

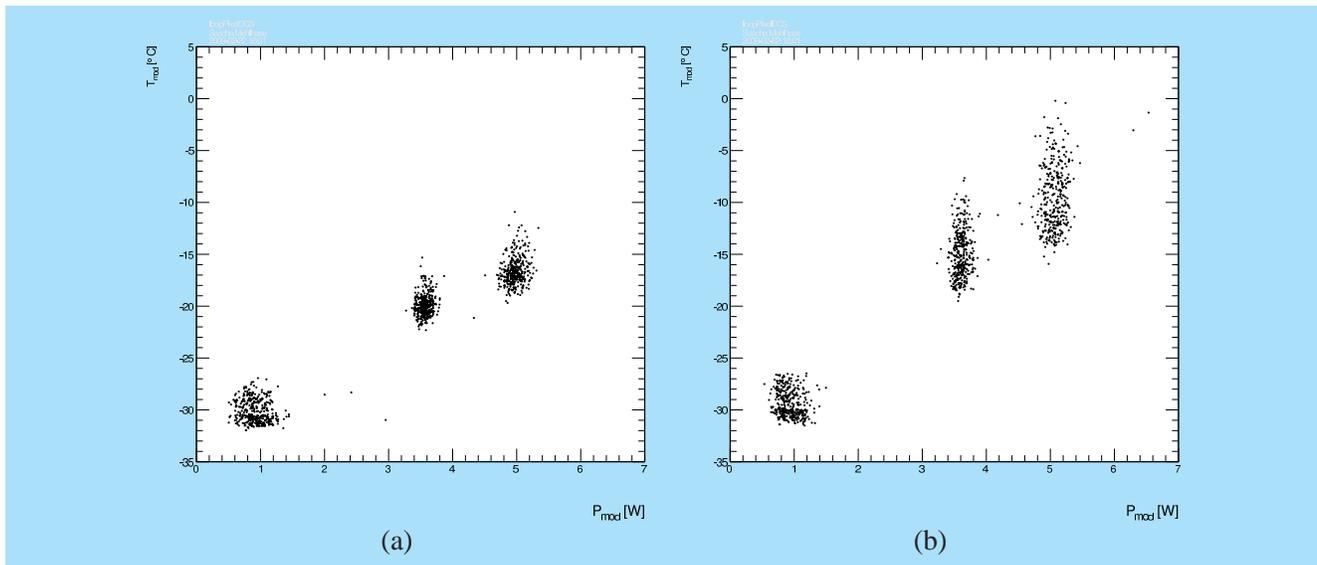


Abbildung 58: Leistungsaufnahme und Temperaturverhalten von ATLAS-Pixeldetektor-Modulen: Fehlerfreie Module (links) und Module mit reduzierter Kühlleistung (rechts).

ATLAS-Experiment werden beide Konzepte von unterschiedlichen Instituten verfolgt.

Im Jahr 2008 hat die DESY-Gruppe erste Vorarbeiten auf dem Gebiet der Stromversorgungskonzepte geleistet. Die Gruppe bereitet einen Versuchsaufbau vor, mit dem die unterschiedlichen Konzepte unter realistischen Bedingungen und möglichst vergleichend getestet werden können. Diese Arbeiten sollen zu einem späteren Zeitpunkt durch Studien zur Systemintegration der Detektormodule ergänzt werden.

## Monte-Carlo-Studien zum Layout des Inneren Detektors

Das Layout des Inneren Detektors folgt aus der Forderung nach gleicher Leistungsfähigkeit trotz zehnfach höherer Luminosität. Ein optimales Layout kann dabei nur im Zusammenspiel der Entwicklung von Detektormodulen und deren mechanischer Aufhängung und elektrischer Verbindung mit detaillierten Simulationsrechnungen erreicht werden. Im Rahmen von Monte-Carlo-(MC-)Simulationen kann der Einfluss der Überlagerung von bis zu 400 gleichzeitigen Proton-Proton-Kollisionen bei SLHC-Luminositäten auf die

Leistungsfähigkeit des Inneren Detektors überprüft werden. Wichtige Kenngrößen sind hier die Belegungsichte der Auslesekanäle, sowie die Impuls- und Stoßparameterauflösung.

Die ersten MC-Studien zum Upgrade des Inneren Detektors wurden mit derselben Software durchgeführt, die schon für das Design des derzeitigen ATLAS-Detektors verwendet wurde. Diese beruht auf dem Geant3-Paket und separaten Rekonstruktionsalgorithmen. Die endgültige Simulation soll jedoch im Rahmen der ATLAS-Standard-Software mit Geant4 und der offiziellen Rekonstruktionssoftware erfolgen. Als Ergänzung dazu soll die schnelle Detektorsimulation FATRAS benutzt werden. FATRAS benutzt dieselben Rekonstruktionsalgorithmen wie die volle Geant4-Simulation, erlaubt aber durch gezielte Vereinfachungen in Detektorsimulation den schneller Test verschiedener Detektor-Layouts. Die DESY-Gruppe hat die ATLAS-Software für den Einsatz zur Upgrade-Simulation erweitert und erste FATRAS-Studien zur Leistungsfähigkeit eines Pixeldetektors mit vier anstatt wie bisher drei Lagen durchgeführt. In Abbildung 48 ist ein rekonstruiertes  $t\bar{t}$ -Ereignis in einem möglichen Layout für den Inneren Detektor gezeigt.