

# Forschung Teilchenphysik

## Inhalt

H1-Experiment	55
ZEUS-Experiment	65
HERMES-Experiment	75
ATLAS-Experiment	83
CMS-Experiment	99
Astroteilchenphysik	113
ALPS-Experiment	119
Theoretische Physik	123
Aktivitäten in Hamburg	123
Aktivitäten in Zeuthen	134
International Linear Collider	139
Forschung Linearbeschleuniger-Technologien	155

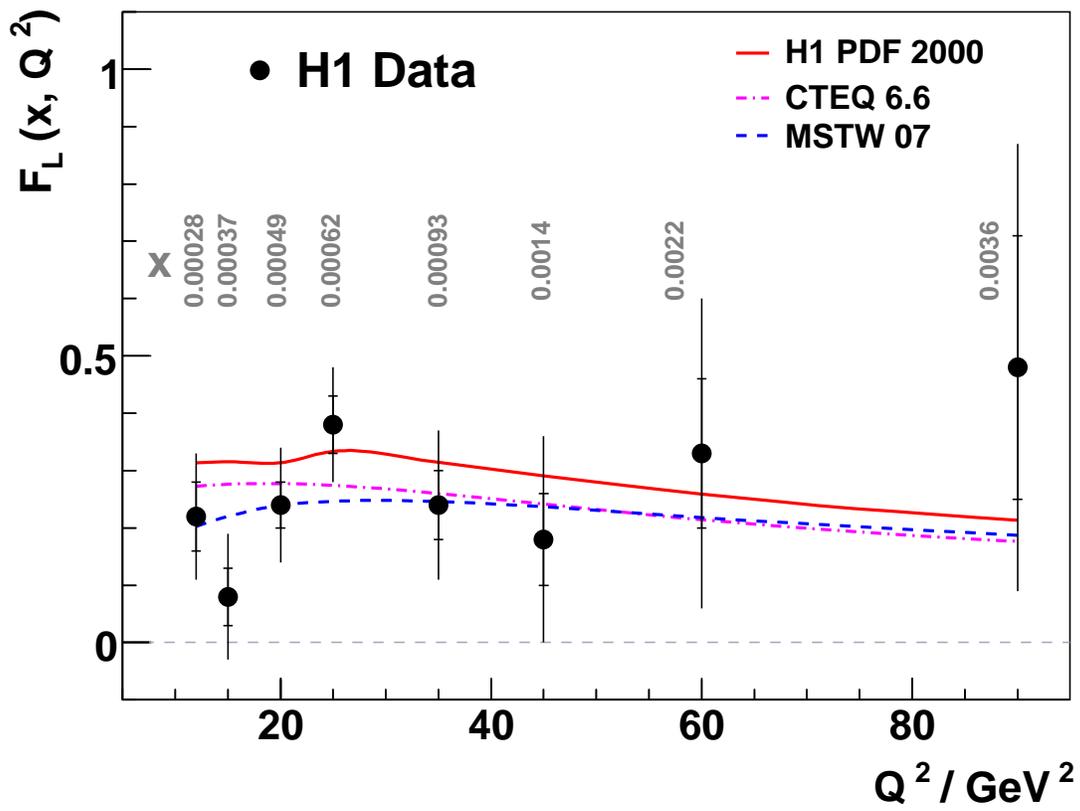


Abbildung 21: Die erste Messung der longitudinalen Proton-Strukturfunktion  $F_L$  bei kleinen  $x$ -Werten.

# H1-Experiment

**Beteiligte Institute:** RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Vinca Inst. of Nucl. Sci. Belgrad, Univ. of Birmingham, NIPNE Bucharest, Inter-Univ. ULB-VUB Brussels, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Inst. for Nucl. Phys. Cracow, Univ. Dortmund, JINR Dubna, CEA Saclay, DESY Hamburg, Univ. Hamburg, Univ. und MPI Kernphys. Heidelberg, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, Univ. Marseille, CINVESTAV Merida und Mexico, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. de Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Univ. of Montenegro Podgorica, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Inst. for Nucl. Research and Nucl. Energy Sofia, Inst. of Phys. and Techn. Mongolian Acad. of Sci. Ulaanbaatar, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ. Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

**Sprecher:** Cristinel Diaconu, CPPM Marseille, Frankreich

Die nach Beendigung des HERA-Betriebs im Sommer 2007 begonnenen Abbauarbeiten am H1-Detektor wurden Anfang des Jahres abgeschlossen. Mit Ausnahme des Haupt-Solenoiden und des Eisenjochs mit integriertem Myonsystem, die gemeinsam als möglicher Teststand erhalten bleiben sollen, sind mittlerweile alle Detektorkomponenten abgebaut. Der reguläre Zugang zur Halle Nord wurde im Sommer geschlossen.

Im Berichtsjahr veröffentlichte die H1 Kollaboration insgesamt 10 Analysen, die im Folgenden näher beschrieben werden. Im Bereich der Suche nach neuer Physik wurden 5 Arbeiten publiziert und eine Reihe weiterer Analysen der gesamten HERA-Daten steht unmittelbar vor dem Abschluss. Es ist geplant, die verbleibenden Analysen auf diesem Gebiet im Laufe des Jahres 2009 noch vor dem Start des LHC abzuschließen. Der in einigen Kanälen in den HERA I-Daten beobachtete Überschuss von Ereignissen konnte mit der erhöhten HERA II-Statistik nicht bestätigt werden. Vier der Veröffentlichungen zu Studien auf dem Gebiet des hadronischen Endzustands beruhen noch auf den HERA I-Daten, deren Analyse damit weitgehend

abgeschlossen ist. Die in den letzten Betriebsmonaten des Jahres 2007 bei reduzierter Protonenergie aufgezeichneten Daten wurden für eine erste direkte Messung der longitudinalen Strukturfunktion  $F_L$  bei kleinen Werten der Skalenvariablen  $x$  verwendet. Nachdem erste vorläufige Resultate bereits auf den Frühjahrskonferenzen vorgestellt wurden, konnte die Analyse eines Teils der Daten inzwischen veröffentlicht werden (siehe Abbildung 21).

Anlässlich der im Frühjahr 2008 in London veranstalteten DIS-Konferenz konnte die H1 Kollaboration 15 neue vorläufige Resultate vorstellen. Zur ICHEP Sommerkonferenz, die in Philadelphia, USA stattfand, wurden mehr als 60 Abstracts eingereicht, von denen sich 8 auf weitere neue Resultate beziehen. Die H1-Kollaboration war auf dieser wichtigen Konferenz mit einem Plenarvortrag und 9 Vorträgen in verschiedenen Parallelsitzungen wieder sehr gut vertreten. Im September wurde unter maßgeblicher organisatorischer und wissenschaftlicher Beteiligung von H1-Mitgliedern das International Symposium on Multiparticle Dynamics bei DESY veranstaltet.

Im Bereich der QCD und der elektroschwachen Physik werden von der Auswertung der mit hoher Qualität

aufgezeichneten HERA II-Daten mit polarisierten Elektronen und Positronen weitere Präzisionsmessungen erwartet. Um höchste Genauigkeit für Schlüsselergebnisse, wie z. B. die Messung von NC- oder CC-Wirkungsquerschnitten, inklusiven oder diffraktiven Partondichteverteilungen oder der starken Kopplungskonstanten  $\alpha_s$  zu erreichen, werden weitere sorgfältige und weitreichende systematische Studien benötigt, so dass einige dieser Analysen noch einige Jahre in Anspruch nehmen werden.

Eine Reihe von Verbesserungen im Bereich der Detektor-Kalibration und der Rekonstruktionssoftware wurden erzielt und alle HERA-II-Daten konnten innerhalb von wenigen Wochen mit dem so verbesserten Detektorverständnis neu rekonstruiert werden. Die Erzeugung von großen Mengen von Monte Carlo Ereignissen, die ebenfalls für die Auswertung der HERA II-Daten von großer Bedeutung sind, konnte durch die Verwendung der im LCG GRID verfügbaren Rechnerkapazitäten noch einmal deutlich erhöht werden. Bei einer Spitzenrate von über 350 Millionen Ereignissen pro Monat konnten im Berichtsjahr insgesamt 2.4 Milliarden Monte Carlo Ereignisse produziert werden.

Eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit wird von der Kombination der Resultate von H1 und ZEUS erwartet. In diesem Bereich hat es weitere Fortschritte gegeben und es findet zurzeit eine enge Zusammenarbeit auf mehreren Gebieten statt. Hervorzuheben ist hier die erste Anpassung von Partondichteverteilungen an die kombinierten HERA-I-Daten von H1 und ZEUS, die zu einer erheblichen Reduzierung der experimentellen Fehler geführt hat. Da die bei HERA bestimmten Partondichteverteilungen unter anderem auch für die Interpretation zukünftiger LHC-Daten von großer Bedeutung sein werden, wurden die neuen HERA-PDFs inzwischen unter dem Namen HERAPDF0.1 im Rahmen der Bibliothek LHAPDF allgemein zugänglich gemacht. Die Zusammenarbeit von HERA- und LHC-Experimenten im Rahmen des HERA-LHC Workshops wurde durch Bildung der neuen Arbeitsgruppe PDF4LHC weiter intensiviert.

Es ist nicht abzuschließen, dass es über die gegenwärtig geplanten Veröffentlichungen hinaus in der Zukunft

Bedarf für bisher noch nicht vorgesehene Analysen der HERA-Daten geben wird. Dieser könnte sich zum Beispiel durch unerwartete Resultate am LHC ergeben, die eine Bestätigung durch ep-Daten erfordern oder durch Fortschritte in theoretischen Rechnungen begründet sein, die in Kombination mit einer neuen Analyse zu einer deutlichen Reduktion des systematischen Fehlers führen würden. Aus diesem Grund haben die HERA-Kollaborationen damit begonnen, gemeinsam mit Vertretern von Experimenten an den anderen Beschleunigern zu diskutieren, wie Daten aufbereitet und gespeichert werden müssten, um solche Analysen zu einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen. Der erste von mehreren geplanten internationalen Workshops zu diesem Thema wird im Frühjahr 2009 bei DESY stattfinden.

## Physikergebnisse

### Inklusive Messungen

Der inklusive Wirkungsquerschnitt für tiefinelastische Streuung (DIS) wird im Bereich kleiner Werte für das Quadrat des Impulsübertrags  $Q^2$  durch die beiden Strukturfunktionen  $F_2$  und  $F_L$  beschrieben. Im vereinfachten Quark-Parton Modell entspricht  $F_2$  der Summe der mit dem Quadrat der Ladung gewichteten Verteilungen des relativen Impulses  $x$  von Quark und Antiquarks, während der Wert von  $F_L$  verschwindet. In der Quantenchromodynamik (QCD) hingegen erhält  $F_L$  Beiträge sowohl von Quarks als auch von Gluonen und ist damit direkt empfindlich auf die Gluondichte im Proton. Während die Präzisionsmessung von  $F_2$  zu den zentralen Ergebnissen von HERA zählt, konnte  $F_L$  bislang nicht direkt gemessen werden, da für eine solche Messung Daten mit unterschiedlichen Strahlenergien analysiert werden müssen. Wie bereits im letzten Jahr berichtet, wurden aus diesem Grund die letzten 3 Monate des HERA Betriebes im Jahre 2007 dazu verwendet, Daten bei reduzierter Protonstrahlenergie aufzuzeichnen. Zusätzlich zu den Daten bei nomineller Protonenergie von 920 GeV stehen der H1-Kollaboration für die  $F_L$ -Messung insgesamt  $12.3 \text{ pb}^{-1}$  bei 460 GeV und

$6.5 \text{ pb}^{-1}$  bei  $575 \text{ GeV}$  zur Verfügung. Bei gegebenem  $x$  und  $Q^2$  kann aus der Abhängigkeit des reduzierten Wirkungsquerschnittes von der Inelastizität  $y$  der Wert für  $F_L$  bestimmt werden. Das Resultat ist für einen Teil des zugänglichen kinematischen Bereichs in Abbildung 21 dargestellt. Der Vergleich mit dem H1 PDF 2000 Fit und den Erwartungen von globalen Fits der Gruppen MSTW und CTEQ zeigt gute Übereinstimmung innerhalb der Fehler und unterstreicht somit die Gültigkeit des üblicherweise verwendeten DGLAP-Formalismus im Rahmen der perturbativen QCD (pQCD). Die Analyse der vollständigen Daten in einem erweiterten kinematischen Bereich wird fortgesetzt und wird zu einer weiteren Veröffentlichung führen.

## Messungen des hadronischen Endzustands

Die Untersuchung der bei der Kollision von hochenergetischen Teilchen entstehenden Hadronen gibt Aufschluss über den Hadronisationsprozess, bei dem Quarks und Gluonen zu farblosen Hadronen werden. Da die meisten Hadronen mit kleinem Transversalimpuls produziert werden, kann die perturbative QCD hier nicht angewendet werden. Stattdessen werden phänomenologische Modelle zur Beschreibung herangezogen. In thermodynamischen Modellen für die Hadronproduktion erwartet man für kleine Transversalimpulse einen exponentiellen Verlauf für die Transversalimpulsspektren. Üblicherweise wird die Transversalimpulsverteilung durch ein Potenzgesetz beschrieben, welches für kleine Impulse einem exponentiellen Verlauf entspricht, wie er von thermodynamischen Modellen vorhergesagt wird. Abbildung 22 zeigt den inklusiven differentiellen Photoproduktions-Wirkungsquerschnitt als Funktion des Transversalimpulses für eine Reihe von Hadronen, die im H1 Detektor nachgewiesen wurden. Die Kurven sind Anpassungen an die Daten in der Form eines Potenzgesetzes. Aus dem Ergebnis der Anpassung ergibt sich, dass trotz ihrer recht unterschiedlichen Eigenschaften die untersuchten Hadronen mit etwa der gleichen mittleren transversalen kinetischen Energie produziert werden. Dies ist in Übereinstimmung mit einem thermodynami-

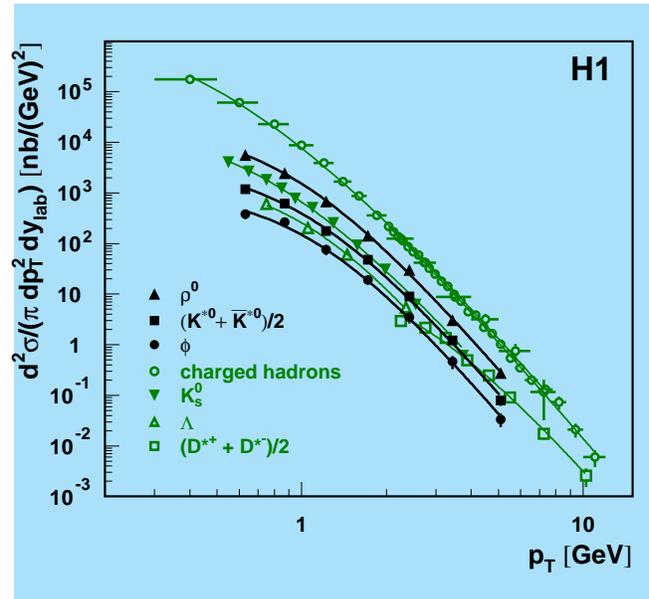


Abbildung 22: Inklusive differentielle Wirkungsquerschnitte für die Produktion von verschiedenen Teilchen als Funktion des Transversalimpulses zusammen mit einer Anpassung an ein Potenzgesetz.

sehen Bild der Hadronproduktion, in dem die primären Hadronen während der Wechselwirkung thermalisieren.

Die Untersuchung der Produktion von Hadronen, die ein Strange-Quark enthalten erlaubt eine Reihe von Studien der starken Wechselwirkung sowohl im perturbativen als auch im nicht-perturbativen Bereich. Eine der traditionellen Fragestellungen betrifft die Unterdrückung der Produktion von Strangeness relativ zu den leichteren Quark-Flavours in der Fragmentation, die in einer Vielzahl von Prozessen gemessen wurde und durch den so genannten Strangeness-Unterdrückungsfaktor  $\lambda_s$  charakterisiert wird. In einer weiteren Veröffentlichung wurden daher Wirkungsquerschnitte für die Produktion von  $K_s^0$ -Mesonen und  $\Lambda$ -Baryonen in DIS sowie ihr Verhältnis zur Produktion von geladenen Teilchen mit den Vorhersagen von verschiedenen Monte Carlo Modellen verglichen. Keines der betrachteten Modelle ist in der Lage, gleichzeitig Form und Normierung aller untersuchten Verteilungen mit einem einheitlichen Wert für  $\lambda_s$  zu beschreiben. Je nach Modell und betrachtetem kinematischem Be-

reich liegt der bevorzugte Wert zwischen  $\lambda_s = 0.22$  und  $\lambda_s = 0.3$ .

Da der Anfangszustand in der ep-Streuung bereits ein Baryon enthält, kann der Unterschied zwischen den Rapiditätsverteilungen von  $\Lambda$ - und  $\bar{\Lambda}$ -Baryonen dazu herangezogen werden, die Hypothese vom Baryonzahl-Transfer zwischen Anfangs- und Endzustand zu überprüfen. Abbildung 23 zeigt die gemessene Asymmetrie zwischen  $\Lambda$ - und  $\bar{\Lambda}$ -Produktion als Funktion der Pseudorapidität  $\eta$ . Im Rahmen der Fehler ist die Verteilung konstant und verträglich mit Null und liefert somit keine Unterstützung für diese Hypothese, die einen Überschuss von  $\Lambda$ s gegenüber  $\bar{\Lambda}$ s in Vorwärtsrichtung, also bei großen  $\eta$  erwarten ließe.

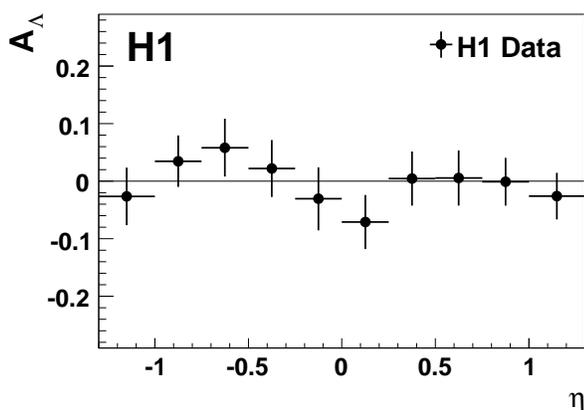


Abbildung 23: Gemessene relative Asymmetrie in der Produktion von  $\Lambda$ - gegenüber  $\bar{\Lambda}$ -Baryonen als Funktion der Pseudorapidität  $\eta$ .

Um Rechnungen der pQCD anwenden zu können, muss der untersuchte Prozess mindestens eine harte Skala aufweisen. Bei der Produktion von schweren Quarks bei HERA ist dies durch deren hohe Masse gewährleistet. Der sich anschließende Übergang des Charm-Quarks in ein beobachtbares Charm-Hadron kann jedoch nicht im Rahmen der pQCD berechnet werden, sondern es bedarf phänomenologischer Modelle, um ihn zu beschreiben. Eine der wichtigsten Variablen, die diesen Übergang charakterisiert, ist der Anteil des Longitudinalimpulses  $z$ , der vom Quark auf das Hadron übertragen wird. Die Verteilung von  $z$  wird durch die so

genannte Fragmentationsfunktion beschrieben, die auf verschiedene Weisen parametrisiert werden kann. In einer Veröffentlichung wurden DIS-Ereignisse selektiert, die ein  $D^{*\pm}$  Meson enthalten. Weiterhin wurden die Ereignisse danach unterschieden, ob das  $D^{*\pm}$  Meson Teil eines Jets mit einer Transversalenergie grösser als 3 GeV ist  $D^{*\pm}$  jet sample oder nicht *no D\*± jet sample*. Experimentell kann  $z$  auf verschiedene Weise rekonstruiert werden. Abbildung 24 zeigt den normierten differentiellen Wirkungsquerschnitt getrennt für die beiden Ereignisklassen als Funktion von  $z$ , hier rekonstruiert nach der so genannten Hemisphären-Methode. Ebenfalls eingezeichnet sind jeweils die  $\pm 1 \sigma$  Fehlergrenzen eines Fits an diese Daten, basierend auf der Vorhersage des Monte Carlo Programms RAPGAP. Es wird deutlich, dass die extrahierten Fragmentationsparameter für diese beiden Ereignisklassen mit  $\alpha = 4.4$  bzw.  $\alpha = 10.3$  innerhalb der Fehler nicht miteinander kompatibel sind. Die Untersuchungen zeigen ferner, dass das *no D\*± jet sample* im Gegensatz zum  $D^{*\pm}$  jet sample nicht befriedigend durch eine NLO Rechnung beschrieben werden kann. Diese Befunde deuten darauf hin, dass QCD-Modelle in Verbindung mit einfachen Parametrisierungen der Fragmentationsfunktionen nicht in der Lage sind, die Fragmentation von Charm-Quarks konsistent im gesamten Phasenraum bis hinunter zur kinematischen Schwelle zu beschreiben.

## Diffraktive Physik

Im letzten Jahr wurde bereits über die Messung der exklusiven Produktion von Photonen  $\gamma^* + p \rightarrow \gamma + p$  bei hohen  $Q^2$  berichtet. Dieser als *Deeply Virtual Compton Scattering* (DVCS) bezeichnete Prozess ist von besonderem Interesse, da seine Berechnung im Vergleich zum verwandten Prozess der exklusiven Vektormesonproduktion erheblich geringere theoretische Unsicherheiten hat. Diese Messung wurde nun zum ersten Mal in den Bereich der Photoproduktion ( $Q^2 < 0.01 \text{ GeV}^2$ ) bei hohen Werten für das Quadrat des Viererimpulsübertrags am Protonvertex ( $|t| > 4 \text{ GeV}^2$ ), die die Anwendung von perturbativen QCD-Rechnungen ermöglicht, ausgedehnt. Hierzu wurden Ereignisse der Reaktion  $e^+p \rightarrow e^+\gamma Y$  mit einer großen Rapiditätslücke zwischen

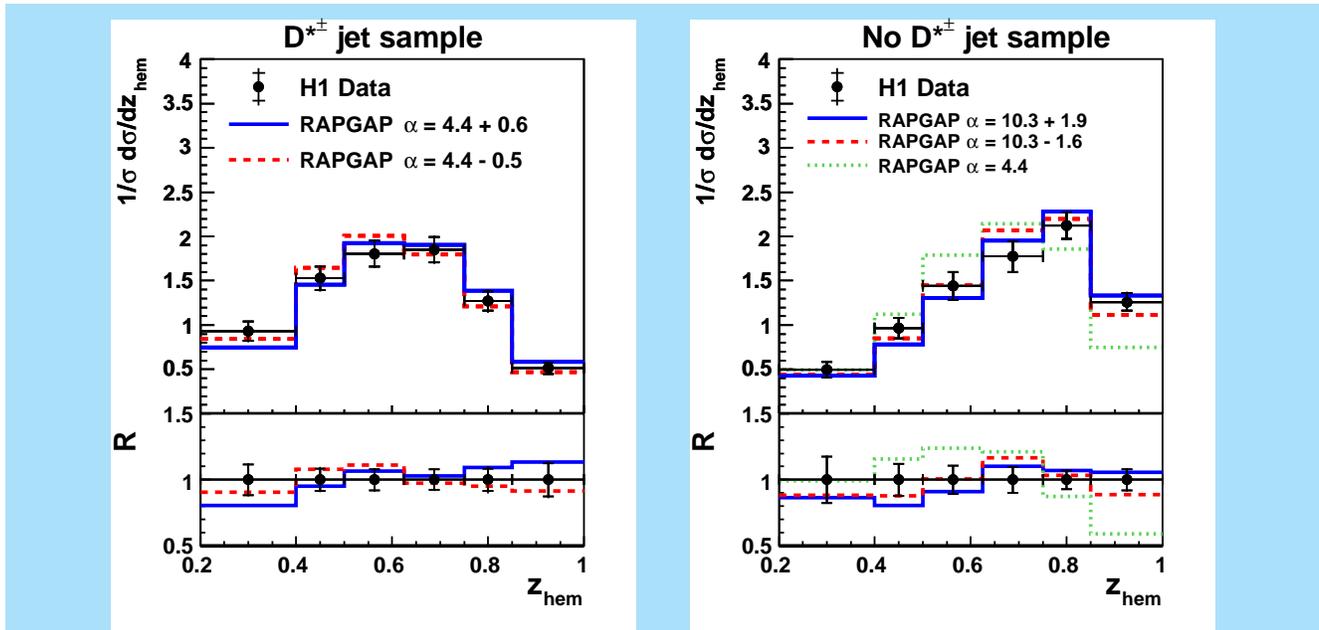


Abbildung 24: Der normierte  $D^{*\pm}$ -Meson Wirkungsquerschnitt als Funktion des Anteils  $z_{hem}$  des Longitudinalimpulses, der vom Charm-Quark auf das  $D^{*\pm}$  Meson übertragen wurde getrennt für Ereignisse mit (links) und ohne (rechts)  $D^{*\pm}$ -Jet. Im unteren Teil ist jeweils das Verhältnis  $R=MC/Daten$  dargestellt.

dem im Detektor nachgewiesenen Photon und dem Protondissoziationssystem  $Y$  selektiert. Abbildung 25 zeigt den gemessenen differentiellen  $\gamma p$  Wirkungsquerschnitt für diffraktive Photonstreuung als Funktion des Viererimpulsquadrats  $|t|$  im Vergleich mit Vorhersagen des LLA BFKL Modells, das eine zufrieden stellende Beschreibung der  $|t|$ -Abhängigkeit der diffraktiven  $\rho$  und  $J/\Psi$  Produktion bei HERA liefert. Die vorliegenden Messungen zeigen demgegenüber eine deutlich härtere  $|t|$ -Verteilung.

### Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Obwohl es bisher kein etabliertes experimentelles Resultat gibt, das dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik widerspricht, gibt es verschiedene Hinweise darauf, dass dieses Modell zu höheren Energien hin erweitert werden muss. Insofern ist die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells (SM) bei jedem Vor-

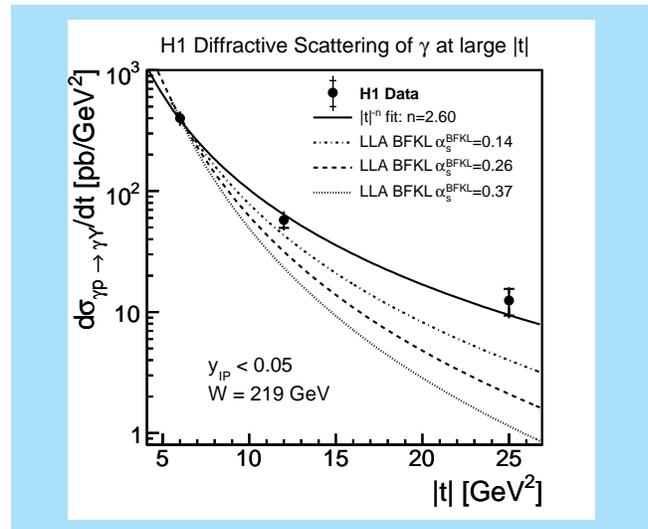


Abbildung 25: Der differentielle  $\gamma p$  Wirkungsquerschnitt für diffraktive Photonstreuung als Funktion des Viererimpulsquadrats  $|t|$  zusammen mit einer Anpassung der Form  $|t|^{-n}$  an die Daten sowie Vorhersagen des LLA BFKL Modells für verschiedene Werte des Parameters  $\alpha_s^{BFKL}$ .

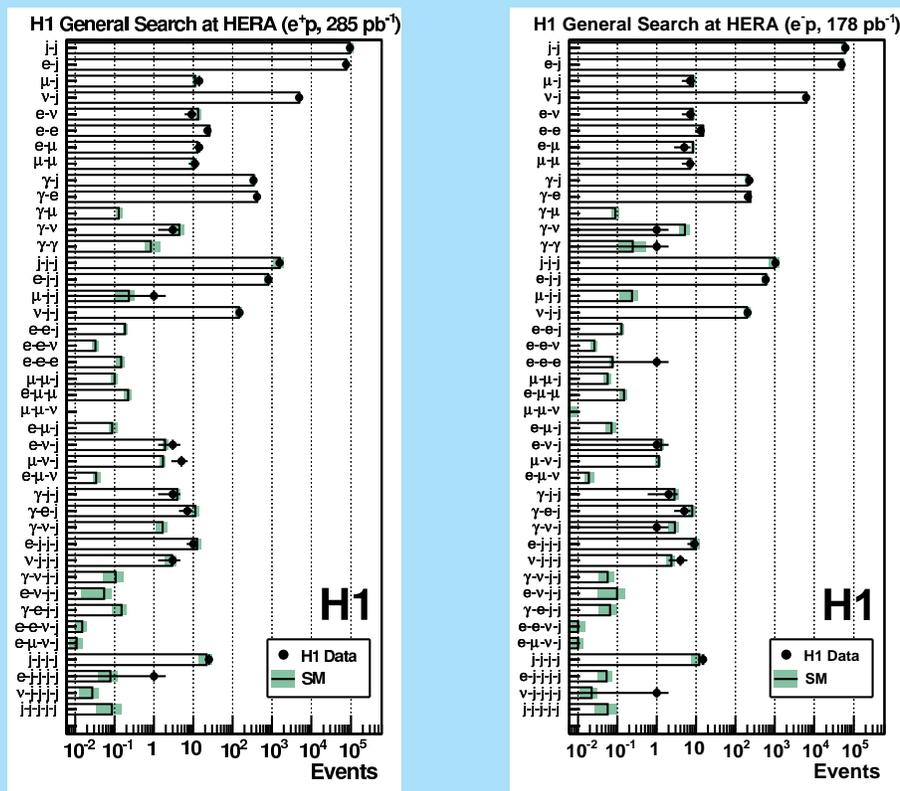


Abbildung 26: Daten und SM Erwartung in verschiedenen Ereignisklassen für  $e^+p$  (links) und  $e^-p$  (rechts).

stoß in einen höheren Energiebereich, wie er auch bei HERA gegeben ist, von großer Bedeutung. Da in diesem Zusammenhang nach seltenen Ereignissen gesucht wird, ist es wichtig eine möglichst große Datenmenge zu analysieren.

Im Berichtsjahr wurden fünf Analysen publiziert, in denen nach Physik jenseits des Standardmodells gesucht wurde. Alle Analysen benutzen die gesamte von H1 aufgenommene integrierte Luminosität. Eine Veröffentlichung beinhaltet eine generische modellunabhängige Suche, zwei beziehen sich auf die Suche nach angeregten Leptonen und zwei weitere auf Multileptonen, beziehungsweise auf Ereignisse mit Leptonen und unausgeglichener Impulsbilanz.

In vielen Suchen nach neuer Physik werden die Messdaten derart analysiert, dass nach einem spezifischen neuen Effekt (z.B. Existenz eines neuen Teilchens) ge-

sucht wird. Dagegen wird in der im Folgenden besprochenen Veröffentlichung eine allgemeine Suche nach Abweichungen von den Erwartungen des Standardmodells durchgeführt. Diese Suche ist modellunabhängig und damit sensitiv auf neue Physik, von der man möglicherweise heute noch keine konkreten Vorstellungen hat. Da neue Physik mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zuerst im Bereich hoher Teilchenenergien sichtbar werden würde, konzentriert sich diese generische Suche auf Streueignisse, in denen Teilchen (Elektronen, Myonen, Photonen, Jets oder Neutrinos) mit Transversalimpulsen grösser als 20 GeV erzeugt werden. Dabei werden alle Ereignisse klassifiziert, die wenigstens zwei dieser hochenergetischen Teilchen aufweisen, und dann die Massen und totalen transversalen Energien dieser Teilchensysteme bestimmt. In 27 Kanälen wurden Ereignisse beobachtet mit bis zu 5 Teilchen hohen Transversalimpulsen. Für jeden Kanal (z.B. Elektron und Jet



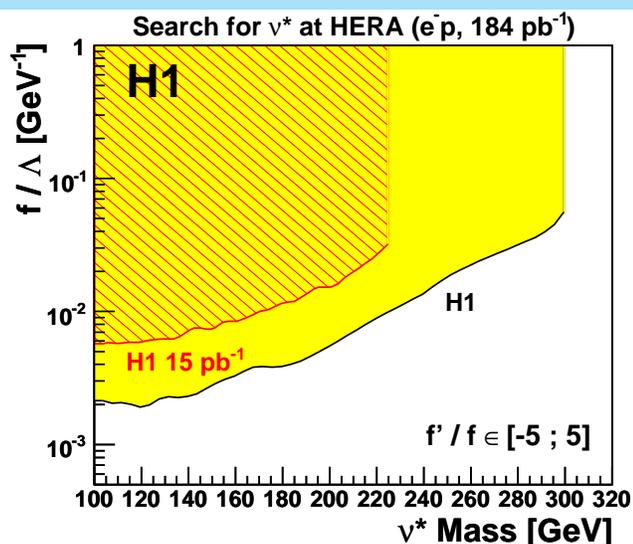


Abbildung 28: Ausschlussbereich für die  $\nu^*$  Kopplung als Funktion der  $\nu^*$  Masse verglichen mit früheren Messungen von H1 (schraffiert).

wesentlich erweiterter Ausschlussbereich sowohl zu kleineren Kopplungen als auch zu grösseren  $\nu^*$  Massen hin.

H1 beobachtete in den HERA I-Daten in zwei Ereignisklassen (Ereignisse mit Multileptonen bzw. mit Leptonen und unausgeglichener Impulsbilanz) einen Überschuss von Ereignissen relativ zur SM Erwartung. Obgleich die statistischen Signifikanzen nicht sehr hoch waren, erregten die Beobachtungen sehr großes Interesse. Beide Beobachtungen wurden in  $e^+p$  Datensätzen gemacht. Die wesentlich erhöhte Luminosität bei HERA II und der große akkumulierte  $e^-p$  Datensatz erlauben nun, die HERA-I-Beobachtungen mit stark erhöhter Sensitivität zu überprüfen.

In der Multileptonanalyse werden Ereignisse mit mindestens zwei Leptonen ( $e$  oder  $\mu$ ) und hohem Transversalimpuls untersucht. Es wurden Ereignisse in den Kanälen  $ee, \mu\mu, e\mu, eee, e\mu\mu, ee\mu$  und  $eeee$  gefunden. Die globalen Raten der Ereignisse stimmen gut mit den Erwartungen des SM überein, die durch Photon-Photon-Streuprozesse dominiert werden. Bei HERA I wurde ein Überschuss an Ereignissen für hohe Werte des gesamten Transversalimpuls des Multileptonensys-

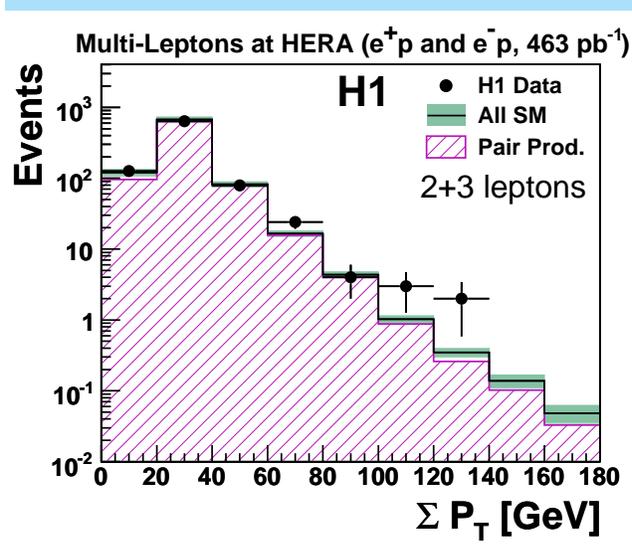


Abbildung 29: Multileptonereignisrate als Funktion des gesamten Transversalimpuls. Die Daten sind mit der SM Erwartung verglichen.

tems gefunden. Abbildung 29 zeigt diese Verteilung aus der neuen Analyse. Es wird immer noch ein Überschuss für Transversalimpulse grösser als 100 GeV gefunden, jedoch ist dieser nicht sehr signifikant (fünf gefundene Ereignisse bei einer Erwartung von einem).

Ereignisse mit Leptonen und unausgeglichener Bilanz des Transversalimpuls sind sehr sensitiv auf Physik jenseits des SM. Im Rahmen des SM werden diese Ereignisse dominant durch Produktion von W Bosonen generiert, wobei im leptonischen Zerfall des W Bosons das Lepton und das Neutrino erzeugt werden. Solche SM Ereignisse haben dominant kleine Werte des hadronischen Transversalimpuls  $P_T^X$ . Bei HERA I wurden jedoch im  $e^+p$  Datensatz für Werte von  $P_T^X > 25$  GeV im  $e$  und  $\mu$  Kanal zehn Ereignisse beobachtet bei einer Erwartung von nur drei Ereignissen. Die jetzige Analyse aller HERA Daten beinhaltet sowohl  $e^+p$  als auch  $e^-p$  Datensätze und umfasst alle leptonischen ( $e, \mu, \tau$ ) Kanäle. Die Resultate für den  $\tau$  Kanal ergeben in allen Aspekten eine gute Übereinstimmung mit der SM Erwartung. Dies gilt auch für den  $e$  und  $\mu$  Kanal im  $e^-p$  Datensatz. Abbildung 30 zeigt die  $P_T^X$  Verteilung für den  $e^+p$  Datensatz im  $e$  und  $\mu$  Kanal. Die Signifikanz des Überschusses bei hohen  $P_T^X$  ist relativ zur

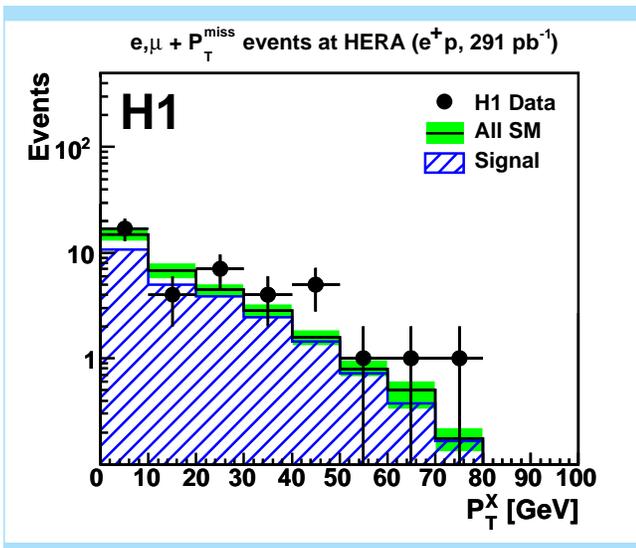


Abbildung 30: Hadronischer Transversalimpuls im  $e$  und  $\mu$  Kanal für den  $e^+p$  Datensatz. Die Daten sind mit der SM Erwartung verglichen, die durch  $W$  Produktion (schraffiert) dominiert wird.

HERA-I-Analyse auf  $2.4 \sigma$  vermindert. Es gibt daher kein Anzeichen für eine signifikante Abweichung vom SM. Aus den Daten wurden verschiedene Parameter der  $W$  Produktion in  $ep$  Streuung bestimmt. Diese sind der totale Produktionswirkungsquerschnitt, die Kopplungsparameter der Drei-Eichboson-Kopplung  $WW\gamma$  und die Polarisation der  $W$  Bosonen. Alle diese Parameter stimmen sehr gut mit den SM Vorhersagen überein.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die oben beschriebenen Analysen keine Anzeichen für Abweichungen von der Erwartungen des Standard Modells ergeben haben. Die statistisch noch nicht sehr signifikanten Hinweise aus den HERA-I-Daten auf mögliche neue Physik konnten durch die neuen, sensitiveren Analysen, die auf den gesamten von H1 aufgenommenen Datensätzen beruhen, nicht erhärtet werden.



Abbildung 31: Ausbau des letzten Urankalorimetermoduls aus dem ZEUS Detektor im September 2008.

# ZEUS-Experiment

**Beteiligte Institute:** Univ. of the Aegean Chios, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Humboldt Univ. Berlin, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, Panjab Univ. Chandigarh, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabria und INFN Cosenza, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, AGH Univ. Cracow, Univ. und INFN Firenze, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, Columbia Univ. Irvington, Univ. Malaya Kuala Lumpur, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, Univ. Lodz, Imperial Coll. und Univ. Coll. London, Univ. Cathol. de Louvain, Univ. of Wisconsin Madison, Univ. Autónoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, MPI München, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Inst. of Technol. Tokyo, Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. del Piemonte Orientale Novara, Univ. Toronto, KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. for Nucl. Stud. und Univ. Warschau, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

**Specher:** T. Haas, DESY

**Das Jahr 2008 war für die ZEUS Kollaboration das erste Jahr, das ausschließlich der endgültigen Datenanalyse gewidmet war. Folglich wurden insgesamt 18 wissenschaftliche Artikel veröffentlicht. Darüber hinaus wurden große Anstrengungen unternommen die endgültige Kallibration der Daten abzuschließen und das entsprechende konsistente *Grand Reprocessing* aller im HERA-II-Run aufgenommenen Daten durchzuführen.**

## Abbau des ZEUS-Experiments

Im Berichtszeitraum konnte der Abbau des ZEUS Detektors mit Ausnahme des Eisenjochs abgeschlossen werden. Der Ausbau und Abtransport des Uran-Szintillator Kalorimeters begannen zwar mit einer Verzögerung von vier Monaten, die sich durch eine verspätete Erteilung der Ausfuhrgenehmigung für die Uranmodule des Kalorimeters in die USA ergeben hatte. Diese Verzögerung konnte allerdings nahezu

vollständig durch Vorziehen anderer Abbauarbeiten aufgeholt werden.

## Organisation der ZEUS-Kollaboration

Das Jahr 2008 war das erste volle Jahr nach dem Ende der HERA Datennahme. Entsprechend gab es Veränderungen in der Art und Weise des wissenschaftlichen Arbeitens in der ZEUS Kollaboration. Zum Beispiel nahm die Anzahl der ständig bei DESY arbeitenden Mitarbeiter auswärtiger Institute deutlich ab. Entsprechend mußten wesentlich mehr der mit zentraler Verantwortung ausgestatteten Positionen von Mitgliedern der DESY Gruppe übernommen werden als das in früheren Jahren der Fall gewesen war.

Trotzdem bleiben die Beiträge aus den beteiligten auswärtigen Instituten bei der endgültigen Auswertung der ZEUS Daten von allerhöchster Wichtigkeit.

Um diese weiterhin zu ermöglichen wurden monatliche 3-tägige Analysetreffen eingerichtet, die sich sehr bewährt haben. Während dieser Treffen präsentieren die verschiedenen Analysearbeitsgruppen ihre Ergebnisse. Außerdem werden zentrale Veranstaltungen, wie Probevorträge für internationale Konferenzen, Editorial Boards und die Lesungen der zu veröffentlichenden Artikel abgehalten. Darüberhinaus werden inzwischen alle regelmäßigen Arbeitstreffen in Form von Video- oder Telefonkonferenzen abgehalten, um auch denjenigen die Teilnahme zu ermöglichen, die aus finanziellen oder organisatorischen Gründen nicht regelmäßig zu DESY reisen können.

## Kalibration und Grand Reprocessing

Im Herbst 2008 wurden die gesamten in der HERA-II-Periode aufgenommenen Daten neu prozessiert, insgesamt fast eine halbe Milliarde ep-Streuereignisse. Mit diesem sogenannten *Grand Reprocessing* soll die bestmögliche Datenqualität für alle endgültigen Physikanalysen bereitgestellt werden.

Der Schwerpunkt des Grand Reprocessing lag im Bereich des *Präzisionstrackings* mit den für HERA II neu eingebauten Spurdetektoren. Eine der Hauptanstrengungen lag dabei im Bereich der Detektorkalibration: nacheinander wurden zunächst der *zentrale Mikrovertexdetektor (BMVD)*, dann der *Vorwärtsmikrovertexdetektor (FMVD)* und zum Schluss der *Straw-tubetracker in Vorwärtsrichtung (STT)* neu kalibriert. Der Hauptaspekt war dabei das Präzisionsalignment, d. h. die genaue Bestimmung der Positionen der einzelnen Detektoren, wie z. B. von jedem der insgesamt 600 Siliziumsensoren des BMVD und die Ausrichtung des gesamten Mikrovertexdetektorsystems relativ zum Referenzdetektor der zentralen Driftkammer. Dazu werden Spuren benutzt die durch möglichst viele Detektoren durchgehen. Eine erhebliche Verbesserung des Alignments des BMVD konnte durch die Hinzunahme von fast 600000 Myonen aus der kosmischen Höhenstrahlung erzielt werden.

Für alle drei Detektoren BMVD, FMVD und STT konnte eine signifikante Auflösungsverbesserung erzielt werden. Noch mehr zählt aber, dass mit der für jede grössere Datenperiode separat durchgeführten Kalibration nun eine weitgehend homogene Datenqualität für alle HERA-II-Daten erreicht wurde.

Ein zweiter Schwerpunkt des Grand Reprocessing lag im Bereich der Spurrekonstruktion. Hier wurde erreicht, dass nun alle HERA-II-Daten mit den besten verfügbaren Algorithmen für *Pattern Recognition* und *Spurfit* neu rekonstruiert wurden.

Als Beispiel für die erzielte Datenqualität ist in Abbildung 32 die Auflösung des transversalen Impulses gezeigt für lange zentrale Spuren die in der zentralen Driftkammer und in dem BMVD gemessen werden. Die Auflösung wurde bestimmt aus dem Vergleich der Spurparameter der oberen und unteren Spurhälfte von kosmischen Myonen. Der mit dem Impuls linear ansteigen-

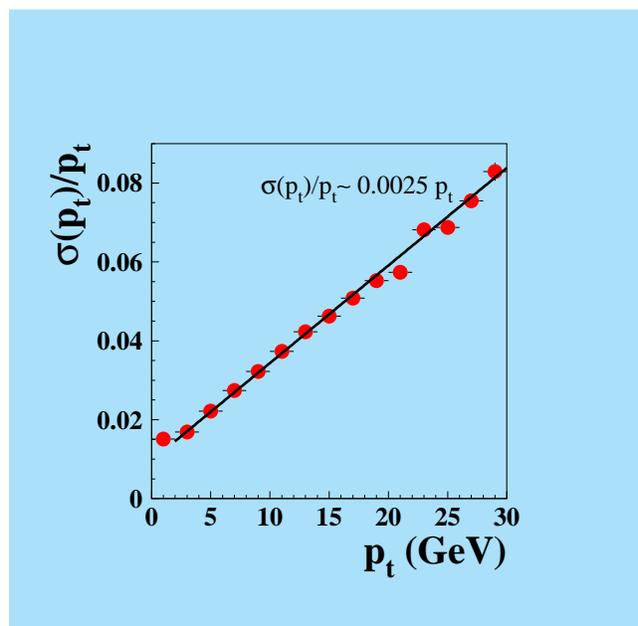


Abbildung 32: *Transversale Impulsauflösung für zentrale lange Spuren bei ZEUS nach dem Grand Reprocessing als Funktion des Transversalimpulses  $p_t$ . Die Daten sind mit einer Geradenfunktion angepasst (durchgehende Linie). Der bei großen Impulsen dominierende lineare Term der Auflösung ist zu  $\sigma(p_t)/p_t \sim 0.0025 p_t / [GeV]$  bestimmt worden.*

de Term der Auflösung dominiert bei grösseren Impulsen: dieser Term ist um etwa einen Faktor zwei besser als bei HERA I, wo man noch keinen Mikrovertexdetektor zur Verfügung hatte.

## Wissenschaftliche Ergebnisse

Im Jahr 2008 befand sich die ZEUS-Kollaboration in einer intensiven Phase der Datenanalyse. Die Arbeiten mit HERA-I-Daten wurden nahezu vollständig abgeschlossen, während die ersten Ergebnisse basierend auf dem vollständigen HERA Datensatz veröffentlicht werden konnten. Dieser Datensatz, der mehr als 500 Millionen Kollisionsereignisse umfaßt und einer integrierten Luminosität von ca.  $500\text{pb}^{-1}$  entspricht, ist von unschätzbarem Wert. Mit seiner Hilfe werden im Laufe der kommenden Jahre eine große Zahl wichtiger Fragestellungen in der Hochenergiephysik bearbeitet werden. Insbesondere der konsistent prozessierte HERA-II-Datensatz eröffnet hier Perspektiven.

Im Folgenden werden eine Reihe von Ergebnissen vorgestellt, die auf dem Stand der Daten vor dem endgültigen *Reprocessing* beruhen und im Jahr 2008 veröffentlicht wurden.

## Diffraktive Streuung

Bereits im Jahr 1993 kam es bei ZEUS zu einer überraschenden Beobachtung: In ca. 10 % der tiefunelastischen Streuereignisse wird kein Hinweis auf ein Zerplatzen des am Streuprozess beteiligten Protons beobachtet. Konkret sind im Vorwärtsbereich des Detektors keine Hinweise auf den sogenannten Protonrest zu sehen. Es handelt sich dabei um diffraktive Streuung, ein Phänomen, das von Hadron-Hadron Wechselwirkungen bekannt ist, aber in tiefunelastischer Streuung nicht erwartet wurde. Obwohl seit dieser Entdeckung inzwischen 15 Jahre vergangen sind, muß man eingestehen, dass diffraktive Streuung bei großen Impulsüberträgen nicht vollständig verstanden ist.

Das lässt sich mittels folgender Betrachtung erläutern: Nach unserem heutigen Verständnis ist das Proton ein

komplexer Zustand bestehend aus Quarks und Gluonen, dessen Masse von ca. 1 GeV der Bindungsenergie entspricht. Bei den untersuchten diffraktiven Prozessen findet nun eine Streuung an diesem Objekt statt, bei der der Impulsübertrag ein Vielfaches dieser Bindungsenergie beträgt. Eigentlich dürfte das Proton diese Kollision nicht überstehen und trotzdem geschieht in ca. 10 % der Fälle genau dies. Von dem Mechanismus, der das Proton vor der Zerstörung bewahrt, gibt es unterschiedliche Modellvorstellungen, die allerdings alle das Phänomen vollständig beschreiben und erklären können. Somit bleibt es eine offene, spannende und in höchstem Maße relevante Frage, wie groß der Anteil diffraktiver Prozesse am LHC sein wird.

Ein wichtiger Beitrag zur Lösung diesem Problem ist die Trennung von diffraktiven Ereignissen vom nicht-diffraktiven Untergrund. Hier werden zurzeit drei verschiedene Verfahren verwendet, die auf unterschiedlichen Eigenschaften der Ereignisse basieren, nämlich die *Large-Rapidity-Gap* (LRG), die MX- und die *Proton-Tagging* (LPS) Methode. Diese Methoden können im Detail hier nicht erklärt werden. Es sei aber erwähnt, dass die Methoden mit unterschiedlichen systematischen Fehlern behaftet sind. Erst im Jahr 2008 gelang es durch sorgfältige Studien dieser systematischen Fehler zum ersten Mal, die Ergebnisse aller drei Methoden in Einklang zu bringen. Dabei wurden zunächst die Ergebnisse der Proton-Tagging Methode verwendet um abzuschätzen welcher Anteil der Ereignisse auf Proton-Dissoziation entfällt. Die Ergebnisse der LPS und MX Methoden konnten damit entsprechend korrigiert und anschließend verglichen werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 33 zu sehen. Hier ist der reduzierte diffraktive Wirkungsquerschnitt dargestellt. Die Messungen wurden einmal mit der MX und zum anderen Mal mit der LRG Methode gewonnen. Die Tatsache, dass die Ergebnisse der beiden Methoden in guter Übereinstimmung miteinander sind, besagt, dass es gelungen ist, die unterschiedlichen systematischen Effekte der Methoden zu verstehen und zu korrigieren. Das ist in der Tat ein entscheidender Meilenstein zum Verständnis des Phänomens der Diffraction in tiefunelastischer Streuung. Der nächste Schritt wird die Kombination dieser Daten mit denen von H1 sein.

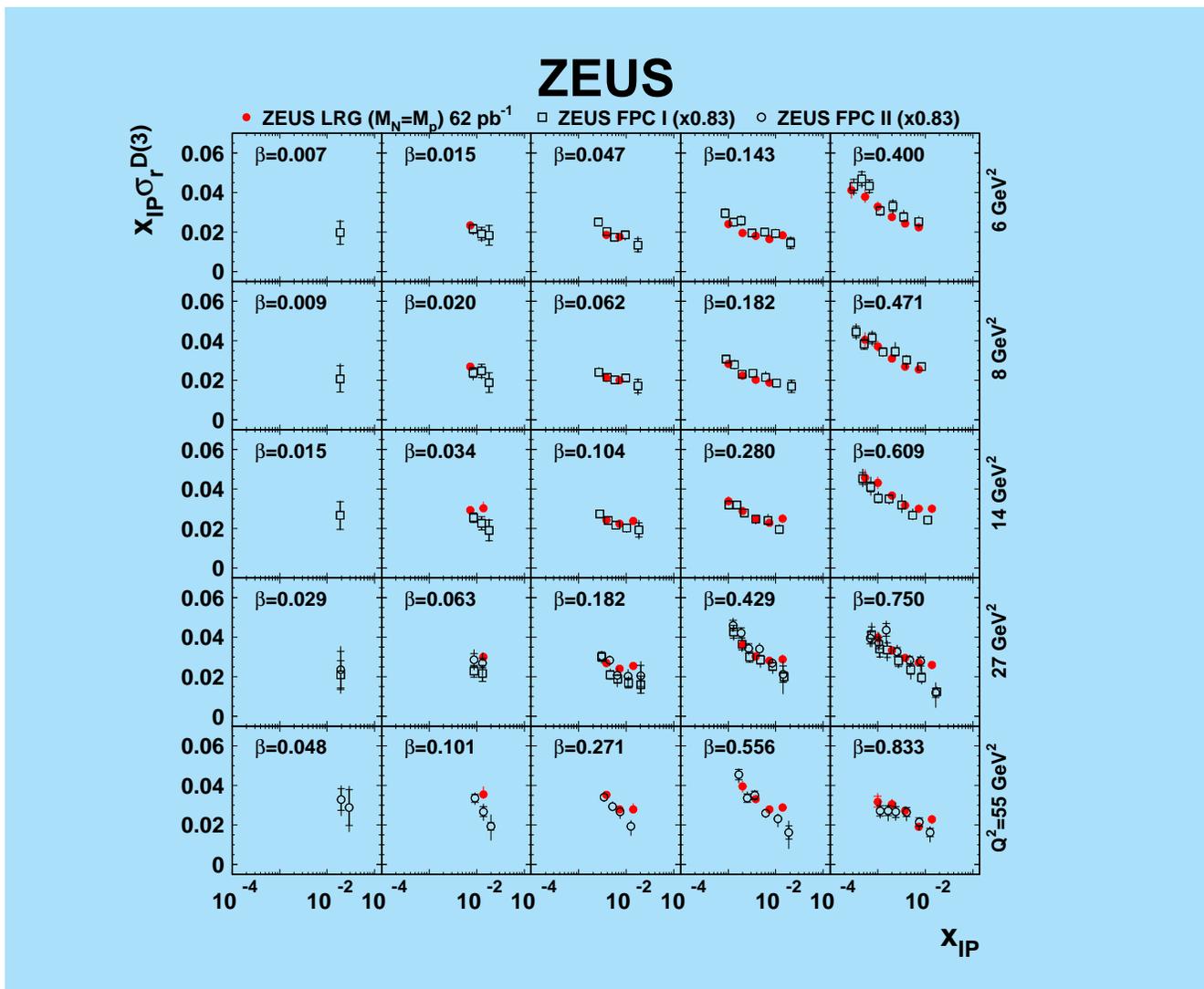


Abbildung 33: Der reduzierte diffraktive Wirkungsquerschnitt mal  $x_P$ ,  $x_P \sigma_r^{D(3)}$  für verschiedene Werte von  $Q^2$  und  $\beta$  bei niedrigem  $Q^2$ . Die Resultate der LRG Methode (volle Punkte) werden mit den Resultaten der MX Methode (offene Punkte und Quadrate verglichen).

Wie bereits erwähnt ist das sorgfältige Verständnis dieser Daten auch in Hinblick auf die Experimente am LHC wichtig. Auch dort wird ein erheblicher Anteil von diffraktiven Prozessen erwartet. Zum einen müssen diese als Untergrund für die Suche nach exotischen Phänomenen angesehen werden. Zum anderen kann man die speziellen Eigenschaften diffraktiver Wechselwirkungen, insbesondere den sauberen hadronischen Endzustand, nutzen, um die Eigenschaften neuer Teil-

chen besser zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist auch die im folgenden beschriebene Untersuchung wichtig.

## Tiefvirtuelle Compton Streuung

Zur tiefunelastischen diffraktiven Elektron-Proton Streuung gibt es Beiträge von sehr unterschiedlichen einzelnen Prozessen. Ein besonders interessantes Beispiel,

mittels dessen sich wichtige Eigenschaften sowohl von Diffraktion als auch generische Eigenschaften des Protons untersuchen lassen, ist die tiefvirtuelle Compton-Streuung. Damit bezeichnet man die diffraktive Produktion von reellen Photonen,  $ep \rightarrow e\gamma p$ . Der Endzustand, den man im Detektor beobachtet, das gestreute Elektron und ein hochenergetisches Photon, ist dabei sehr einfach und sollte entsprechend auch ein besonders geeignetes Laboratorium zum Verständnis der Diffraktion darstellen. Allerdings ist der Endzustand auch identisch mit dem des Bethe-Heitler Prozesses, der Abstrahlung eines Photons vom gestreuten Elektron und muß deshalb statistisch separiert werden.

In perturbativer QCD beschreibt man tiefvirtuelle Compton Streuung durch den Austausch zweier Partonen mit unterschiedlichem longitudinalen und transversalen Impuls in einer farblosen Gesamtkonfiguration. Durch eine Messung dieser Prozesse gewinnt man Daten zu den Generalisierten Partondichten (GPD), die wiederum Informationen über die Wellenfunktion des Protons enthalten. Das gilt ganz besonders für die transversale Verteilung von Partonen im Proton, die mit der Abhängigkeit der GPDs vom Impulsübertrag,  $t$ , am Protonvertex zusammenhängt.

Ebenso wie bereits weiter oben diskutiert, ist für diese Messung ein Verständnis des Proton-dissoziativen Untergrunds sehr wichtig. Das gelang mithilfe des ZEUS *Leading Proton Spectrometers* (LPS). Das LPS identifiziert minimal abgelenkte Protonen, die weniger als ein Prozent ihres Longitudinalimpulses verloren haben und bestimmt ihren Transversalimpuls. Daraus lässt sich der Impulsübertrag am Protonvertex berechnen. Die Ergebnisse dieser Messung sind beispielhaft in Abbildung 34 dargestellt. Diese zeigt den Wirkungsquerschnitt als Funktion des Impulsübertrags,  $t$ , am Protonvertex. Man beobachtet einen exponentiellen Abfall  $d\sigma/dt \propto \exp(-b|t|)$ , wobei der Wert von  $b$  direkt Auskunft über die transversale Ausdehnung von Protons gibt. Der gemessene Wert von  $b \approx 4.5$  ist vergleichsweise klein und verweist darauf, dass die für die Streuung verantwortliche Konfiguration des Protons deutlich kleiner ist als der wohlbekannte Ladungsradius des Protons, der in den 1950'er Jahren von Hofstadter in Brookhaven gemessen worden war.

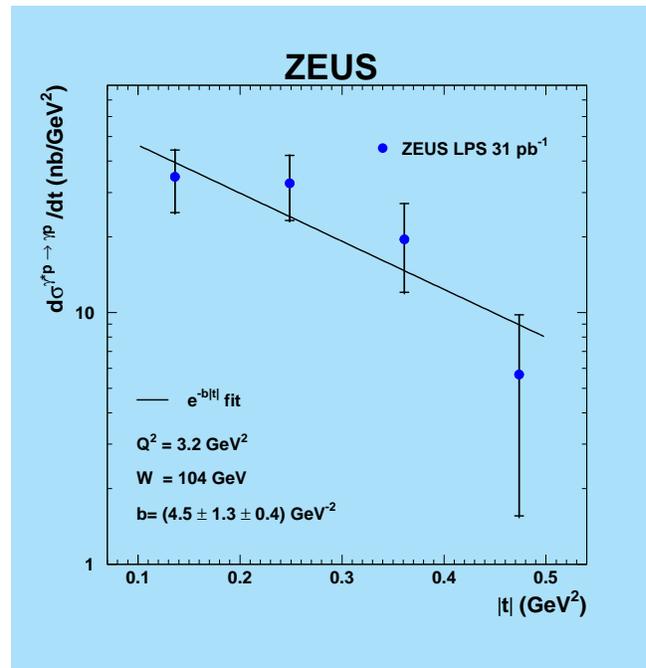


Abbildung 34: Der Wirkungsquerschnitt für tiefvirtuelle Compton Streuung,  $ep \rightarrow e\gamma p$  als Funktion des Impulsübertrags,  $t$ , am Protonvertex.

## Inklusive Wirkungsquerschnitte bei hohen Impulsüberträgen

Die zentrale Zielsetzung beim Umbau von HERA im Jahr 2000 waren Messungen zur Elektro-schwachen Wechselwirkung in Elektron-Proton Kollisionen bei hohen Impulsüberträgen mit longitudinal polarisierten Elektron- und Positronstrahlen. Diese Messungen sind komplementär zu anderen Messungen z. B. bei LEP und Tevatron, da man es bei HERA mit einem Austausch von raum-artigen schweren Eichbosonen zu tun hat. Man untersucht somit einen anderen Sektor des Standardmodells, in dem die Gegenwart anderer schwerer Bosonen denkbar wäre, die mit anderen Experimenten nicht nachweisbar sind. Zusätzlich zu den Parametern der Elektroschwachen Kraft hat man damit auch Zugang zu Partondichteverteilungen bei hohen Werten von  $x_{Bj}$ , insbesondere zum Verhältnis von  $u$ - und  $d$ -Quarks.

Im Berichtszeitraum wurden die endgültigen Messungen der Wirkungsquerschnitte sowohl des geladenen als

auch des neutralen Stroms bei hohen Werten des Impulsübertrags  $Q^2$ ,  $t$  für Elektron-Proton Wechselwirkungen veröffentlicht. Diese Ergebnisse sind vor allem daher bedeutsam, da aus HERA I nur eine sehr kleine Menge Daten mit Elektronstrahl vorliegt. Die Daten aus HERA II verzehnfachen diese Statistik.

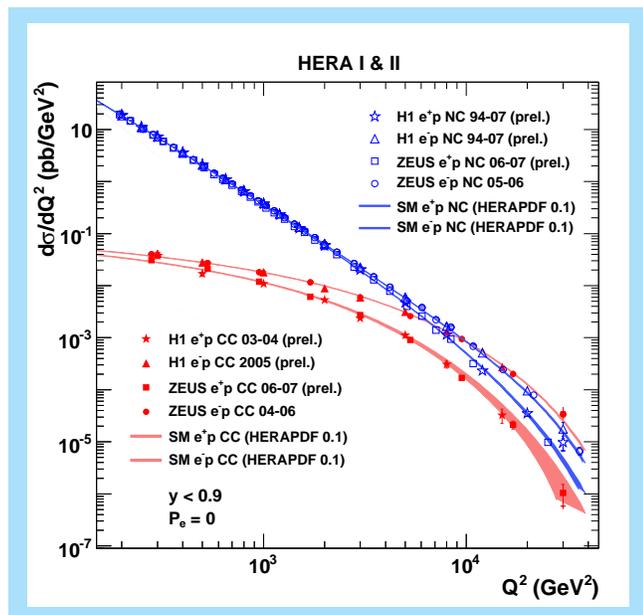


Abbildung 35: Der Wirkungsquerschnitt der tiefinelastische Elektron-Proton Streuung sowohl für Ereignisse des Neutralen Stroms als auch für Ereignisse des Geladenen Stroms. Protonvertex.

Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse ist in Abbildung 35 dargestellt. Diese Darstellung demonstriert auf eindrückliche Weise ein weites Spektrum zentraler Eigenschaften des Standardmodells der Teilchenphysik: Der Wirkungsquerschnitt des neutralen Stroms ( $eP \rightarrow eX$ , blaue Symbole) fällt über mehrere Größenordnungen mit der Virtualität,  $Q^2$ , des ausgetauschten Bosons, typischerweise eines Photons. Der entsprechende Wirkungsquerschnitt des geladenen Stroms ( $eP \rightarrow \nu X$ , rote Symbole) dagegen hat einen flacheren Verlauf bei Werten von  $Q^2 < 10000 \text{ GeV}^2$  aufgrund der Masse der ausgetauschten W-Bosonen. Bei Werten von  $Q^2 \approx m_W^2$  sind beide vergleichbar groß, eine sehr direkte Demonstration der Vereinigung von Elektromagnetischer und Schwacher Wechselwirkung.

Die Unterschiede zwischen Elektron-Proton und Positron-Proton Wechselwirkungen bei den Prozessen des geladenen Stroms erklären sich aus den unterschiedlich großen Partondichten für u- und d-Quarks bei hohem  $x_{Bj}$ , wobei man grob erwartet, dass die u-Dichte zweimal so groß ist wie die d-Dichte. Schließlich sind Unterschiede zwischen linkshändig- und rechtshändig-polarisierten Daten zu sehen. Dieser Unterschied ist aufgrund der Paritätsverletzung der Schwachen Kraft bei Wechselwirkungen des geladenen Stroms maximal. Er ist allerdings auch für die Ereignisse des Neutralen Stroms klar zu erkennen. Dort kommt der Effekt durch die Interferenz der durch Photonen vermittelten mit denen durch  $Z^0$ -Bosonen vermittelten Wechselwirkungen zustande. Dementsprechend können aus diesen Daten direkt die Parameter des Standardmodells wie die Masse des W-Bosons und die Fermikonstante bestimmt werden. Außerdem gewinnt man Informationen darüber, wie genau die gemessenen Daten mit den Vorhersagen des Standardmodells übereinstimmen. Aus eventuellen Abweichungen kann man dann auf neue Phänomene oder Teilchen schließen, oder eben auch Grenzen für deren Existenz aufstellen. Ein Beispiel dafür soll im folgenden beschrieben werden.

## Suche nach neuen Teilchen

Die Suche nach neuen Teilchen bedarf des detaillierten Verständnisses der erwarteten Prozesse im Standardmodell der Teilchenphysik. Eine hohe Empfindlichkeit für neue Physik ist somit immer dann gegeben, wenn dieser Standardmodelluntergrund gering ist. Ein besonders geeigneter Prozess ist die Produktion freier W-Bosonen. W-Bosonen, die Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung, treten, anders als zum Beispiel die Gluonen in der QCD, auch als freie Teilchen auf. Allerdings wird nur eine kleine Zahl von Ereignissen mit freien W-Bosonen bei HERA erwartet. Die Beobachtung einer deutlich größeren Anzahl als erwartet wäre demnach ein Hinweis auf neue Physik,

Eine Untersuchung solcher Ereignisse, in denen das W-Boson leptonic zerfällt, also z. B. in ein Elektron und ein Anti-Elektronneutrino, oder ein Myon

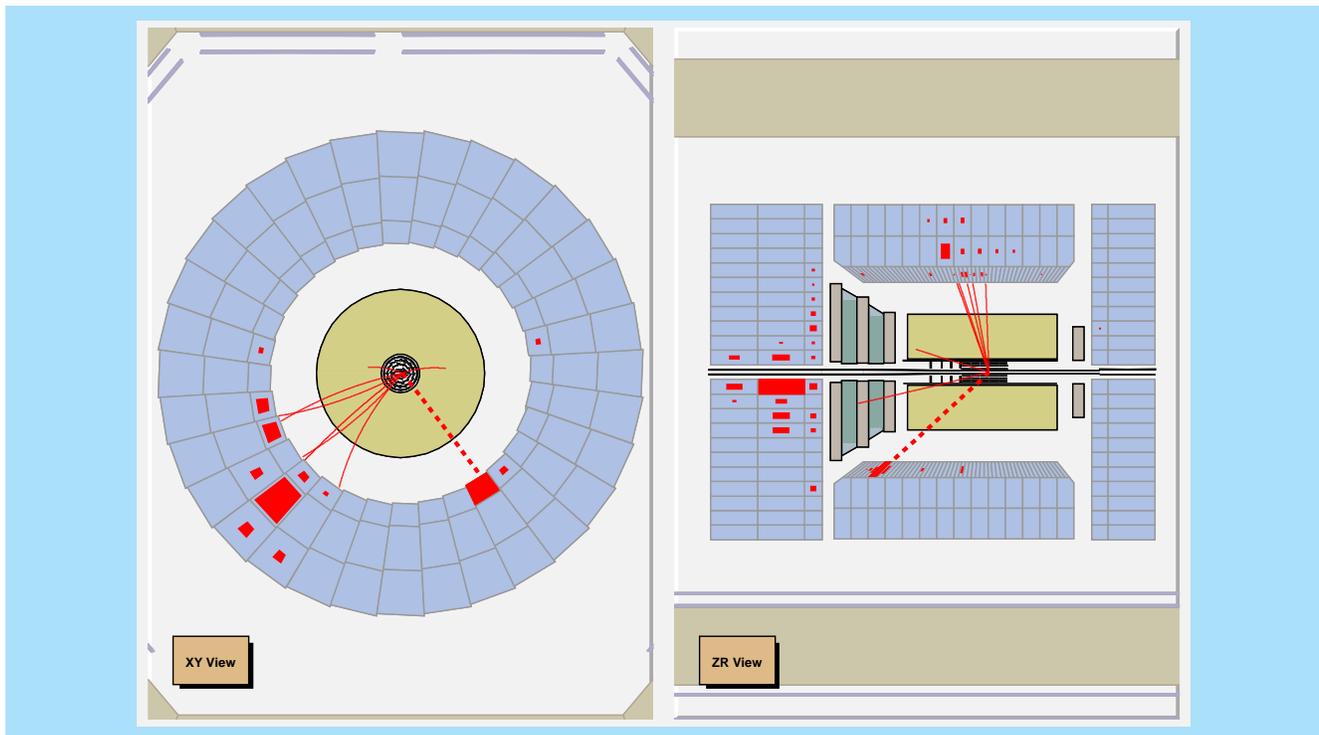


Abbildung 36: Darstellung des Zerfalls eines freien W-Bosons im ZEUS Detektor.

und ein Anti-Myon neutrino, wurde im Berichtszeitraum veröffentlicht. Die Ereignisse, die dieser Untersuchung zugrunde liegen, haben eine besonders spektakuläre Signatur: In vieler Hinsicht ähneln sie den Ereignissen des neutralen Stroms. Allerdings sind das Lepton und das hadronische System nicht gegenseitig balanciert, da das bei der Abstrahlung des W-Bosons ebenfalls entstehende Neutrino im Detektor unsichtbar bleibt. Ein solches Ereignis ist in Abbildung 36 dargestellt. In der XY-Ansicht (links) des Bildes, erkennt man auf der einen Seite den fragmentierten hadronischen Teilchenjet und leicht schräg gegenüber die Spur und die Energiedeposition des Elektrons aus dem der Zerfall des W-Bosons. Dieses Elektron liegt dem hadronischen Teil des Ereignisses nicht direkt gegenüber sondern ist leicht nach unten abgelenkt, sozusagen wie eine Speiche eines Mercedes-Sterns, in dem allerdings die dritte Speiche fehlt. Das weist darauf hin, dass nach rechts oben ein unsichtbares Teilchen, in diesem Fall das Anti-Elektron neutrino, entwichen ist.

In dem gesamten HERA-Datensatz, der nahezu eine halbe Milliarde Ereignisse enthält, und der einer integrierten Luminosität von einem halben inversen Femtobarn entspricht, finden sich nur eine Handvoll solcher W-Boson Ereignisse, in voller Übereinstimmung mit den Erwartungen des Standardmodells. Somit ergeben sich allerdings auch keinerlei Hinweise auf neue Physik in diesem Kanal. Das bedeutet wiederum, dass man den Wirkungsquerschnitt für die Produktion freier W-Bosonen zum Wert von ca. 0.9 pb bestimmt mit einem Fehler von 30 %. Dieser Prozess ist also wie im Standardmodell zweifelsfrei nachgewiesen ohne die Notwendigkeit neuer Mechanismen oder Teilchen.

Ein anderer physikalischer Bereich, in dem nach exotischen Teilchen gesucht wurde, sind die exotischen Kernteilchen oder Hadronen. Hierzu muß eine kurze Erläuterung vorangestellt werden: Man unterscheidet bei den Kernteilchen zwei Gruppen, die Mesonen und die Baryonen, wobei die Mesonen aus zwei und die Baryonen aus drei Quarks aufgebaut sind. Zusätzlich zu diesen sollte es durchaus auch Kernteilchen beste-

hend aus Gluonen, sogenannte Glueballs, oder solche mit vier oder fünf Quarks, also Tetra- und Pentaquarks, geben. Die Existenz derartiger Zustände ist allerdings bis heute nicht nachgewiesen. Die Suche insbesondere nach Pentaquarks hatte in den Vorjahren bereits zu interessanten aber durchaus auch kontroversen Ergebnissen geführt. Im Berichtszeitraum wurde bei ZEUS nun eine Untersuchung von Mesonen veröffentlicht, die in zwei neutrale Kaonen zerfallen.

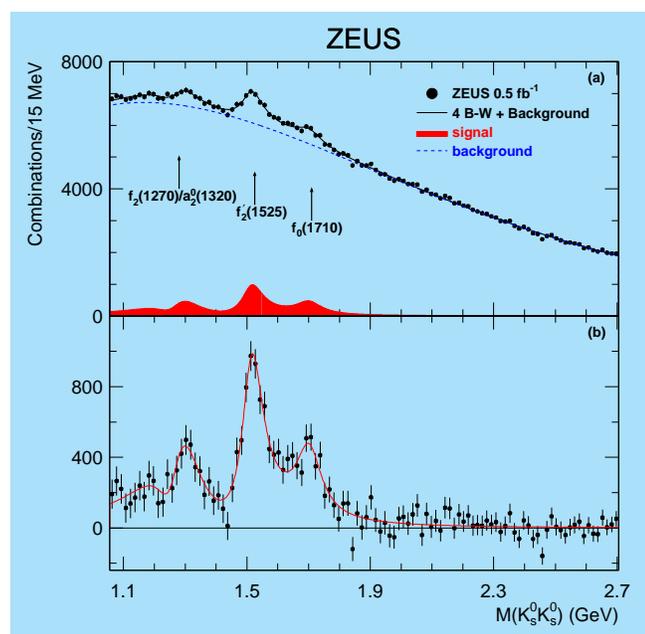


Abbildung 37: Die invariante Masse zweier neutraler Kaonen in eP Kollisionen im ZEUS Detektor.

Bei dieser Untersuchung konnte die Existenz zweier Teilchen bestätigt werden, die bereits mit deutlich geringerer Statistik einige Jahre vorher andeutungsweise gesehen worden waren. Es handelt sich dabei um das  $f_2'(1525)$  und um das  $f_0(1710)$ . Diese Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt, in der man die invariante Masse von zwei Kaonen sieht. In einer solchen Darstellung erscheinen Teilchen als Resonanzen, also lokale Erhöhungen, die desto breiter sind, je länger die Lebensdauer eines Teilchens ist. Schmale, wohldefinierte Resonanzen sind also ein Zeichen für langlebige Teilchen. Besonders scharf ist das  $f_2'(1525)$ , aber auch das  $f_0(1710)$  ist ganz klar zu sehen. Letzteres ist von besonderem Interesse, da es sich hierbei möglicherweise

um einen Glueball handelt. Der zweifelsfreie Nachweis eines Glueballs wäre ein erheblicher Schritt voran. Dazu muß jedoch der Produktionsmechanismus des Teilchens besser verstanden werden. An diesem Thema wird deshalb intensiv weitergearbeitet.

## Angeregte Charm und Charm-Strange Mesonen

In den Elektron-Proton Kollisionen bei HERA werden in ca. 20 % der Fälle Charm-Quarks erzeugt, die wiederum ein reiches Spektrum von Mesonen bilden. Daher sind die Daten von HERA ein ergiebiges Feld für Untersuchungen mit diesen Mesonen und für die Suche nach bisher unbekannt Zuständen. Obwohl dieses Gebiet bereits seit nunmehr 30 Jahren betrieben wird, wurden dort gerade in allerletzter Zeit spannende Beobachtungen gemacht. Insbesondere die B-Fabriken am KEK und am SLAC haben dazu beigetragen. Ein Beispiel ist das  $X(3872)$  Teilchen, das aus Charm Quarks besteht, dessen genaue Struktur und Zusammensetzung noch ungeklärt sind. Es wird inzwischen davon ausgegangen, dass es sich bei diesem Teilchen sogar um eine Art Molekül bestehend aus D-Mesonen handeln könnte. Das wäre dann in der Tat ein vollkommen neuer Zustand der Materie.

Im Berichtsjahr wurde eine sehr umfangreiche Studie zu Charm-Mesonen abgeschlossen und veröffentlicht. In dieser Studie wurden sowohl Mesonen bestehend aus Charm, als auch Mesonen bestehend aus Charm und Strange Quarks identifiziert und ihre Eigenschaften untersucht. Insbesondere wurde die Helizitätsstruktur der Zerfälle dieser Teilchen betrachtet und somit wichtige Beiträge zum Verständnis ihrer Zusammensetzung und Spinstruktur geleistet. In diesem Sinne sind die Daten von HERA komplementär und in einzelnen Kanälen durchaus wettbewerbsfähig mit denen der B-Fabriken. Eine wichtige Beobachtung ist außerdem in Abbildung 38 gezeigt. Dort ist das Ergebnis der Suche nach einem radial angeregten  $D^{*\pm}$  gezeigt. Die Beobachtung eines solchen Zustands hatte das OPAL-Experiment veröffentlicht. Ein hypothetisches Signal entsprechend der Beobachtung von OPAL ist als gelbes

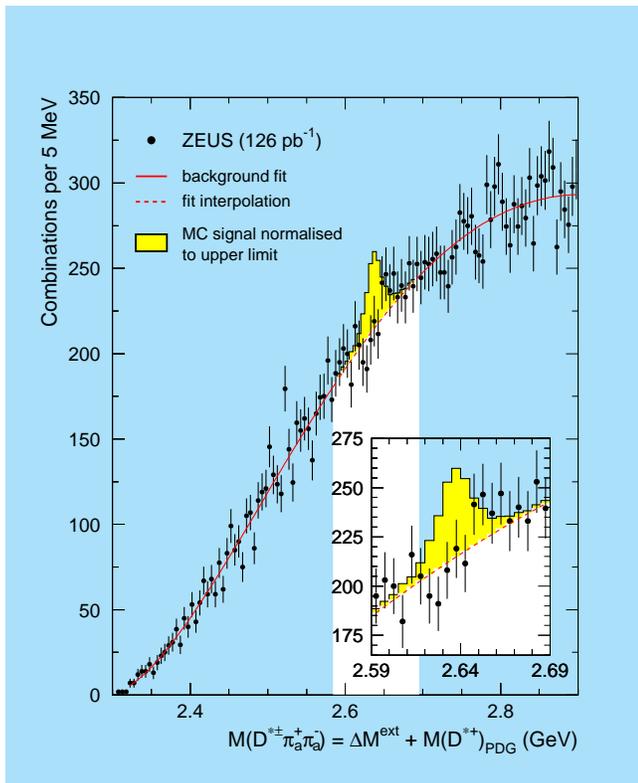


Abbildung 38: Die invariante Masse von Kombinationen von  $D^{*/\pm}$  mit zwei gegensätzlich geladenen Pionen.

Histogramm gezeigt. Es ist klar ersichtlich, dass ZEUS das Ergebnis von OPAL nicht bestätigen kann. Der von ZEUS daraufhin gewonnene Grenzwert für die Produktionsraten eines solchen Zustands liegt außerdem deutlich unter dem von OPAL angegebenen Wert.

Aus diesem Ergebnis wird klar, dass die ZEUS-Kollaboration mithilfe der HERA Daten noch wichtige Beiträge zur Klärung offener Fragen in diesem und anderen Gebieten leisten kann.

## Schlussbetrachtung

Im Berichtszeitraum konnten von der ZEUS-Kollaboration 18 Artikel mit einem weiten Spektrum von Themen veröffentlicht werden. Die Daten aus dem HERA-II-Run wurden durch verbesserte Kalibrationen in ihren optimalen Zustand gebracht. Die Abschätzun-

gen darüber, wie viele Wissenschaftler an der Auswertung dieser Daten mitarbeiten werden ist durchaus ermutigend. Folglich kann man davon ausgehen, dass auch in den kommenden Jahren mit vielen verschiedenen interessanten Ergebnissen zu rechnen ist.

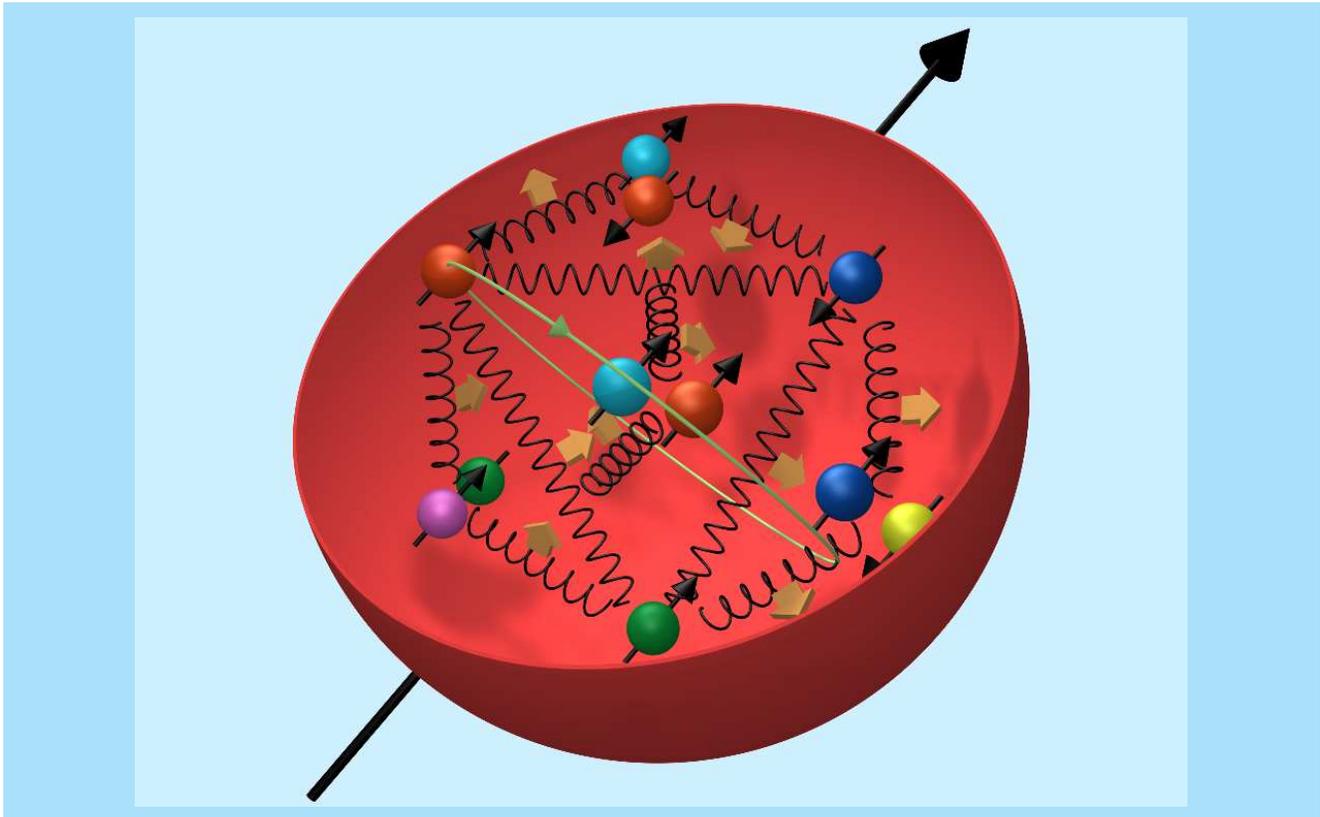


Abbildung 39: Schematische Darstellung des Aufbaus des Nukleons aus Quarks und Gluonen. Ein Schwerpunkt des HERMES-Forschungsprogramms ist die Frage, wie der Spin des Nukleons sich aus den Spins der Quarks und Gluonen und ihren Bahndrehimpulsen zusammensetzt.

# HERMES-Experiment

**Beteiligte Institute:** NIKHEF und Vrije Universiteit Amsterdam, Univ. of Michigan Ann Arbor, ANL Argonne, Univ. und INFN Bari, Beijing Univ., Univ. of Colorado Boulder, JINR Dubna, Univ. Erlangen-Nürnberg, Univ. und INFN Ferrara, INFN Frascati, Univ. Gent, Univ. Gießen, Univ. Glasgow, DESY Hamburg, Univ. Sci. Technol. Hefei, P. N. Lebedev Inst. Moscow, IHEP Protvino, Univ. Regensburg, INFN und Ist. Sup. Sanità Rome, St. Petersburg Nucl. Phys. Inst., Tokyo Inst. Technol., Univ. of Illinois Urbana-Champaign, TRIUMF Vancouver, Andrzej Soltan Inst. Warsaw, Yerevan Phys. Inst., DESY Zeuthen

**Sprecher:** E.R. Kinney, University of Colorado (bis Juni 2008); K. Rith, Universität Erlangen-Nürnberg (seit Juli 2008)

**Nach dem Ende des Experimentierbetriebs im Sommer 2007 konzentrierten sich im Berichtsjahr die Aktivitäten der HERMES-Kollaboration auf die Fortführung und den Abschluss der Analyse des großen Datensatzes von über 100 Millionen tief-unelastischen Streueignissen, die seit Beginn der Datennahme im Jahr 1995 aufgezeichnet wurden. Die Analyse der Daten aus der ersten Phase der Datennahme bis zum Jahre 2000, in der vor allem die tief-unelastische Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen bzw. Positronen an longitudinal polarisierten Targets von atomarem Wasserstoff, Deuterium und Helium-3 untersucht wurde, ist weitgehend abgeschlossen. Diese Messungen dienten hauptsächlich der detaillierten Untersuchung der inneren Spinstruktur des Nukleons und der Bestimmung der Beiträge der Spins der einzelnen Quarksorten und der Gluonen zum Spin des Nukleons. Der Gesamtbeitrag der Quarkspins zum Spin des Nukleons wurde durch diese Messungen mit sehr kleinem Fehler zu etwa 1/3 festgelegt.**

Das physikalische Programm reicht aber weit über diesen speziellen Aspekt hinaus. HERMES ist ein Experiment, mit dem viele weitere Details der Struktur und der Erzeugung von Hadronen und der hadronischen Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Sonde

bei Schwerpunktsenergien von etwa 7 GeV untersucht werden. So erlaubte beispielsweise die weiter unten erläuterte Messung von Multiplizitäten geladener Kaonen in der tief-unelastischen Streuung an polarisierten und unpolarisierten Deuteriumtargets eine neuartige präzise Bestimmung der Impulsverteilung von Strange-Quarks im Nukleon. Eine Vielzahl von Ergebnissen zu unterschiedlichen Fragestellungen wurde bereits publiziert und die Veröffentlichung einiger weiterer Resultate ist in Vorbereitung.

In der zweiten Phase der Datennahme in den Jahren 2002-2005 kam ein transversal zur Strahlrichtung polarisiertes Wasserstofftarget zum Einsatz. Hauptziele der Messungen mit diesem transversal polarisierten Target sind die erstmalige experimentelle Bestimmung der sogenannten *Transversity*-Verteilung, welche angibt, wieviele Quarks mit einem bestimmten Bruchteil  $x$  am Longitudinalimpuls des Nukleons in einem transversal polarisierten Nukleon ihren Spin parallel bzw. antiparallel zum Spin des Nukleons haben, und der entsprechenden *Collins*-Fragmentationsfunktion. Diese Messungen erlaubten auch die erstmalige Bestimmung der sogenannten *Sivers*-Verteilungsfunktion für Up- und Down-Quarks, deren Existenz voraussetzt, dass Quarks in einem transversal polarisierten Nukleon einen von Null verschiedenen Bahndrehimpuls besit-

zen. Informationen über diese Verteilungen erhält man über Asymmetrien in den Azimutwinkelverteilungen der im tief-unelastischen Prozess erzeugten Hadronen. Von Bedeutung sind hierbei der Azimutwinkel  $\Phi$  um die Richtung des ausgetauschten virtuellen Photons zwischen der Ebene, die durch das einlaufende und das gestreute Elektron/Positron aufgespannt wird und der Ebene, die durch das virtuelle Photon und das erzeugte Hadron festgelegt wird, sowie der Azimutwinkel  $\Phi_s$  zwischen der Streuebene und der Richtung des Target-Spinvektors. Vorläufige Resultate dieser Messungen wurden im letzten Jahresbericht ausführlich diskutiert. Im Berichtszeitraum wurden diese Messungen erweitert auf die Untersuchung von azimutalen Verteilungen von Paaren ungleichnamig geladener Pionen. Auch die Analyse der mit dem transversal polarisierten Target genommenen Daten nähert sich dem Ende und die Publikation der entsprechenden Resultate steht kurz bevor.

Ein weiterer Schwerpunkt der Aktivitäten war die Fortführung der Untersuchungen von harten exklusiven Reaktionen, bei denen lediglich ein reelles Photon, ein Vektor-Meson oder ein pseudoskalares Meson erzeugt werden, das Nukleon jedoch intakt bleibt bzw. zu einer Resonanz angeregt wird. Langfristiges Ziel dieser Untersuchungen ist die Bestimmung von sogenannten *Generalisierten Parton-Verteilungen*. In diesen sind sowohl die Formfaktoren der elastischen als auch die Partonverteilungsfunktionen der tief-unelastischen Nukleonstreuung kodiert. Sie ermöglichen, wie bereits in früheren Jahresberichten erläutert, eine dreidimensionale Beschreibung der Struktur des Nukleons auf dem Niveau von Partonen, indem sie den Anteil eines Partons am longitudinalen Impuls des Nukleons mit seiner transversalen Position im Nukleons korrelieren. Außerdem erlauben sie, unter Verwendung der existierenden Information über den Beitrag der Quarkspins zum Spin des Nukleons, den Bahndrehimpuls von Quarks direkt zu bestimmen. Informationen über diese Verteilungen erhält man wiederum über azimutale Asymmetrien in den Verteilungen der erzeugten Photonen (Mesonen). HERMES hat verschiedene azimutale Asymmetrien extrahiert, die mit speziellen experimentellen Randbedingungen verknüpft sind (Strahl-Ladung, Strahl-Spin, longitudinale bzw. transversale

Polarisation des Streutargets) und sensitiv sind auf unterschiedliche *Generalisierte Parton-Verteilungen*. So wurde im Berichtszeitraum erstmals für die harte exklusive Erzeugung von reellen Photonen (tiefvirtuelle Compton-Streuung) eine kombinierte Analyse derartiger azimutaler Asymmetrien in Abhängigkeit von der Strahlladung und der transversalen Targetpolarisation durchgeführt und veröffentlicht.

Für die Datennahme in der dritten und letzten Phase von Anfang 2006 bis Mitte 2007 wurde das HERMES-Spektrometer um einen speziellen Rückstoß-Detektor erweitert, der die HERMES-Targetregion umschloss. Details dieses Detektors wurden in vorangehenden Jahresberichten ausführlich dargestellt. Er dient zum Nachweis von niederenergetischen Rückstoß-Protonen unter großen Streuwinkeln und der damit verbundenen verbesserten Identifizierung der harten exklusiven Elektroproduktion mit einem internen gasförmigen Wasserstoff- bzw. Deuterium-Target hoher Dichte. Die exakte Kalibrierung dieses Detektors und seine Einbindung in die Datenanalyse war einer der Schwerpunkte der HERMES-Aktivitäten im Berichtszeitraum.

## Ausgewählte HERMES-Ergebnisse

### Partonverteilungen von Strange-Quarks

Strange-Quarks tragen zu den Quantenzahlen des Nukleons nicht bei und sind daher nur als kurzlebige Quark-Antiquark Fluktuationen am Aufbau des Nukleons beteiligt. Es gibt nur wenige experimentelle Proben, die sensitiv auf den Strangeness Anteil im Nukleon sind. Die spärlichen experimentelle Informationen über die Impulsverteilung von Strange-Quarks im Nukleon basieren bisher nahezu ausschließlich auf der Messung von Ereignissen mit zwei Myonen entgegengesetzter Ladung im Endzustand in der tief-unelastischen Neutrino- bzw. Antineutrino-Nukleon-Streuung mit geladenen Strömen. Aus derartigen Messungen wurde gefolgert, dass bei den typischen Schwerpunktsenergien von Experimenten mit festem Streutarget die Quark-

zahldichte von Strange-Quarks jeweils etwa halb so groß ist wie die der leichten Up- und Down-Quarks im 'Nukleon-See'. HERMES hat zum ersten Male eine direkte Messung der Summe der Strange-Quark und der Anti-Strange-Quark Verteilung  $S(x) = s(x) + \bar{s}(x)$  mit einer anderen Technik durchgeführt, dem sogenannten 'Flavour-tagging'. Die grundlegende Idee hierbei ist, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Flavour (dem Typ) des im tief-unelastischen Streuprozess getroffenen Quarks und den erzeugten Hadronen gibt. So liegt zum Beispiel die Annahme nahe, dass bei der Erzeugung eines positiv geladenes Kaons  $K^+$ , das aus einem Up-Quark und Anti-Strange-Quark aufgebaut ist, überwiegend eines dieser beiden Quarktypen im Nukleon getroffen wurde, und entsprechend bei der Erzeugung eines negativen Kaons  $K^-$  ein Strange-Quark und ein Anti-Up-Quark. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, dass das beobachtete Hadron das gestoßene Quark gar nicht enthält und in einem komplizierten Fragmentationsprozess erzeugt wurde. Die Erzeugungsraten für ein spezielles Hadron sind dann proportional zu einer Summe über alle Quarktypen aus dem Produkt der Verteilungsfunktion des getroffenen Quarks und einer Fragmentationsfunktion, die nicht von  $x$  abhängt und ein Maß dafür ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Quark eines bestimmten Typs in eine bestimmte Hadronensorte übergeht. HERMES hat in führender Ordnung der QCD die Impulsverteilung von Strange-Quarks und Anti-Strange-Quarks aus der Erzeugung von geladenen Kaonen in der tief-unelastischen Streuung an polarisierten und unpolarisierten Deuteriumtargets bestimmt. Das Deuteron ist ein isoskalares Target, d. h. die Up(Down)-Quark Verteilung im Proton und die Down(Up)-Quark Verteilung im Neutron sind identisch, und der Fragmentationsprozess kann beschrieben werden, ohne dass zusätzliche Annahmen bezüglich isospinabhängiger Fragmentation notwendig wären. Strange-Quarks tragen keinen Isospin und die Strange-Quark-Seeverteilungen im Proton und Neutron sind identisch. Daher kann unter der Annahme von Isospin-symmetrie und Invarianz des Fragmentationsprozesses unter Ladungskonjugation aus der Multiplizität der erzeugten geladenen Kaonen, d. h. ihrer Zahl bezogen auf die Zahl der tief-unelastischen Streueignisse, die

Strange-Quark-Verteilung bestimmt werden. Die Multiplizität ist proportional zur Summe aus zwei Termen. Der erste Term ist das Produkt aus der Summe der aus anderen Messungen wohlbekanntem Verteilungsfunktionen der leichten Quarks  $u(x) + d(x) + \bar{u}(x) + \bar{d}(x)$  und einer Kombination von im Bereich der HERMES-Kinematik nicht so gut bekannten Fragmentationsfunktionen  $D_q^K$  von leichten Quarks und Antiquarks in geladenen Kaonen. Der zweite Term ist das Produkt von  $S(x)$  mit der Fragmentationsfunktion  $D_S^K$  von Strange- und Anti-Strange-Quarks in geladene Kaonen. Im oberen Teil der Abbildung 40 ist diese Multiplizität der geladenen Kaonen als Funktion der Variablen  $x$  gezeigt. Bei Werten von  $x$  oberhalb von ca. 0.3 ist  $S(x)$  in guter Näherung gleich Null und daher kann aus dem Wert der Multiplizität in diesem kinematischen Bereich der Wert von  $D_q^K$  bestimmt werden und hiermit dann im Bereich kleinerer Werte von  $x$  die Strange-Quark Verteilungsfunktion  $S(x)$ . In Abbildung 41 ist der extrahierte Verlauf von  $xS(x)$  als Funktion der Variablen  $x$  gezeigt. Die durchgezogene Kurve ist der beste Fit an die Daten, die gestrichelte Kurve ist das Resultat einer gängigen Parametrisierung (CTEQ6L) von  $xS(x)$  und die strichpunktierte Kurve diejenige der Summe der Verteilungen der leichten Antiquarks. Die von HERMES aus den Kaon-Multiplizitäten bestimmte Strange-Quark Verteilung ist deutlich verschieden von der CTEQ6L Parametrisierung und auch von der Annahme, dass diese etwa halb so groß ist, wie der Mittelwert der Verteilungen der leichten Anti-Up- und Down-Quarks.

## Transversale Einzelspin-Asymmetrien in der Elektroproduktion von $\pi^+\pi^-$ -Paaren

Im letzten Jahresbericht wurden vorläufige Resultate der Messung von semi-inklusiven azimuthalen Einzelspin-Asymmetrien von Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget ausführlich dargestellt. Diese Messungen dienen zur Bestimmung der *Transversity*-Verteilungen und der *Sivers*-Verteilungsfunktionen von Quarks. Im Berichtszeitraum wurde diese Analyse auf

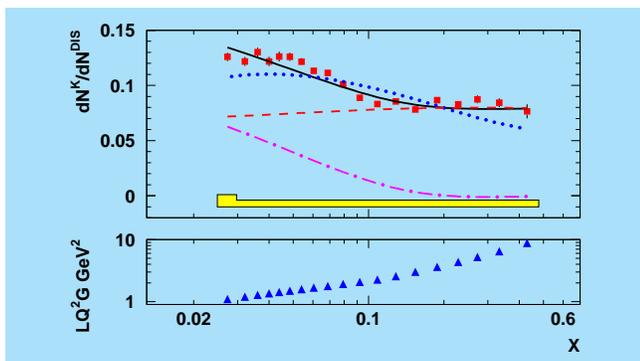


Abbildung 40: Die Multiplizitäten geladener Kaonen in der tief-unelastischen Streuung an einem Deuteriumtarget.

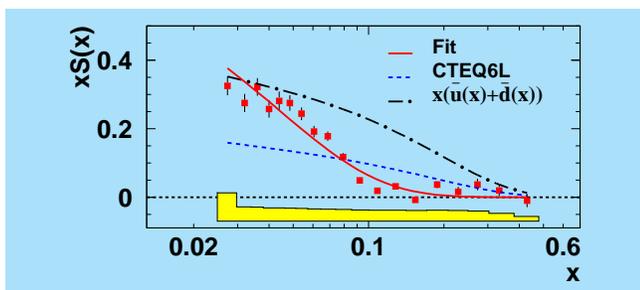


Abbildung 41: HERMES-Resultat für die Partonverteilung  $xS(x)$  aus den Multiplizitäten geladener Kaonen in der tief-unelastischen Streuung an einem Deuterium-Target.

geladenen Kaonen ausgedehnt und weitgehend abgeschlossen.

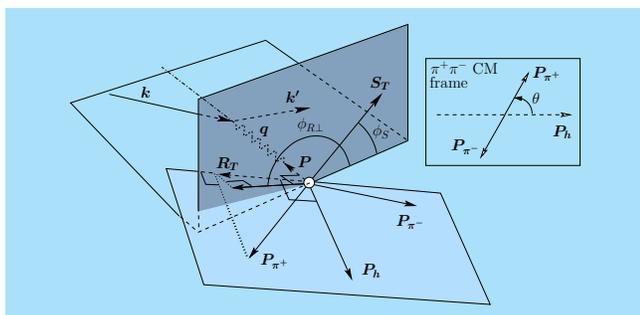


Abbildung 42: Schematische Darstellung der semi-inklusiven Streuung von Leptonen an einem transversal polarisiertem Target, bei der ein Pionenpaar nachgewiesen wurde.

Die Messung der *Transversity*-Verteilung wird dadurch erschwert, dass die Verteilung ungerade unter Chiralitätsumkehr ist. Da in harten Streuprozessen die Chiralität eine Erhaltungsgröße ist, muss die *Transversity*-Verteilung mit einer weiteren chiral-ungeraden Größe kombiniert werden. Dies kann z. B. die Fragmentationsfunktion sein. In der Abbildung 42 ist ein Prozess dargestellt, in dem neben dem gestreuten Lepton auch ein ungleichnamig geladenes Pionenpaar ( $\pi^+$  und  $\pi^-$ ) nachgewiesen wird. Diese Reaktion ist durch die Untersuchung zweier Hadronen im Endzustand komplexer als die 'gewöhnliche' semi-inklusive tief-unelastische Streuung, bei der nur ein Hadron im Endzustand untersucht wird. Jedoch erlaubt das Studium der Ausrichtung der Ebene, die durch die Impulsvektoren der beiden Hadronen aufgespannt wird, Zugang zur *Transversity*-Verteilung. Es existiert eine Korrelation zwischen dem transversalen Spin des Nukleons und dieser Ebene, welche zu einer Sinusabhängigkeit des Streuquerschnittes in den Winkeln  $\phi_S$  und  $\phi_{R\perp}$  führt.

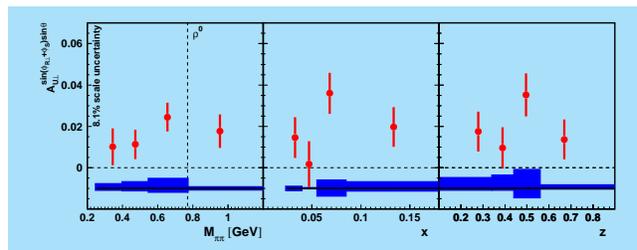


Abbildung 43: HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusiven azimuthalen Asymmetrien von geladenen Pionenpaaren an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien in Abhängigkeit von der invarianten Masse des Pionenpaares (die  $\rho^0$  Masse ist durch eine gestrichelte vertikale Linie gekennzeichnet), von der Bjorken-Variablen  $x$  und vom Bruchteil  $z$  der Photonenergie, der auf das Pionenpaar fällt.

Für diese azimuthale Asymmetrie in der semi-inklusiven Pionenpaarproduktion gibt es zwei grundlegend gegensätzliche Vorhersagen. Eine davon erwartet einen Vorzeichenwechsel der Asymmetrie als Funktion von der invarianten Masse der beiden Pionen, welcher in der Umgebung der Masse des  $\rho^0$  Mesons stattfinden soll, also ungefähr bei 770 MeV. In Abbildung 43 sieht man,

dass die HERMES-Ergebnisse diese Vorhersage mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen (die  $\rho^0$  Masse ist als gestrichelte vertikale Linie eingezeichnet). Die Asymmetrie bleibt im gesamten gemessenen Bereich positiv und hat ihr Maximum wahrscheinlich in der Nähe der  $\rho^0$  Masse.

## Exklusive Elektroproduktion von $\rho^0$ -Mesonen

Die exklusive Erzeugung eines  $\rho^0$  Mesons durch Streuung eines virtuellen Photons am Nukleon wird schon seit Jahrzehnten als interessanter Prozess betrachtet.

Der Spinzustand des erzeugten  $\rho^0$  Vektor-Mesons (Spin-1) ist in seiner Spindichtematrix kodiert. Das  $\rho^0$  zerfällt unmittelbar und zu fast 100% in ein Paar spinloser geladener Pionen  $\pi^+\pi^-$ . Die Messung der Winkelverteilung des  $\rho^0$  Mesons in Bezug auf die Impulsrichtung des einlaufenden Photons und der Winkelverteilung des Pionenpaares in Bezug auf die Impulsrichtung des erzeugten  $\rho^0$  Mesons erlaubt Rückschlüsse auf seinen Spinzustand. Eine komplette Messung seiner Spindichtematrix erfordert, dass sowohl der einlaufende Leptonstrahl als auch das Targetnukleon spin-polarisiert sind. Bisher wurden nur Ergebnisse aus  $\rho^0$ -Erzeugung in vollständig unpolarisierter Streuung publiziert. Die hier vorgestellte Messung von HERMES enthält erstmalig Ergebnisse, die mit polarisiertem Leptonstrahl erhalten wurden.

Die Helizität eines Teilchens ist die normierte Projektion seines Spins auf seine Bewegungsrichtung. Photon und  $\rho^0$ -Meson einerseits, sowie ein- und auslaufendes Nukleon andererseits, besitzen jeweils denselben Spin. Daher sind Helizitätsamplituden sehr gut geeignet, um alle möglichen Übergänge eines Photons in ein  $\rho^0$ -Meson zu beschreiben. Die Faltung der Spindichtematrix des einlaufenden virtuellen Photons mit den Helizitätsamplituden liefert die Spindichtematrix des erzeugten  $\rho^0$ -Mesons. Diese wiederum steht in direkter Beziehung zur Winkelabhängigkeit des differentiellen Erzeugungsquerschnittes für  $\rho^0$ -Mesonen. Dessen Messung erlaubt daher die Bestimmung von Elementen der

$\rho^0$ -Spindichtematrix (spin density matrix elements, SDMEs). Die gemessenen SDMEs können als Kombinationen von bestimmten Helizitätsamplituden interpretiert werden, da die Photon-Spindichtematrix aus der Reaktionskinematik berechnet werden kann.

Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse der Messung von 23  $\rho^0$ -SDMEs am Proton (Quadrate) und am Deuteron (Kreise) mit dem HERMES-Experiment.

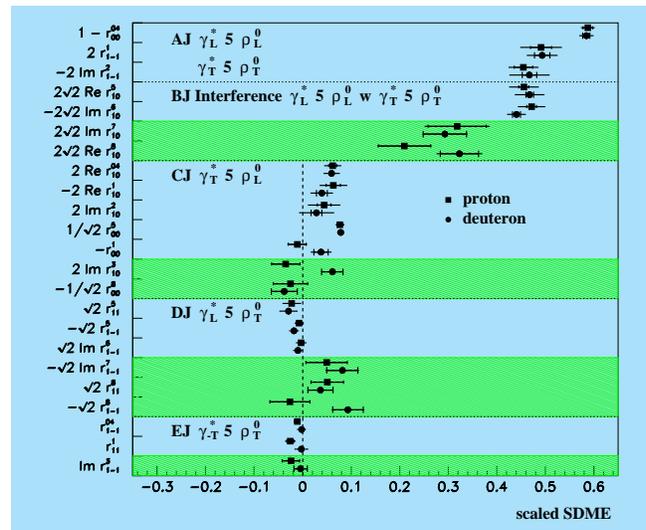


Abbildung 44: HERMES-Ergebnisse für die 23  $\rho^0$ -Spindichtematrixelemente am Proton (Quadrate) und am Deuteron (Kreise).

Die Klassen A bis E zeigen die SDMEs für die verschiedenen Übergänge  $\gamma_{L,T} \rightarrow \rho_{L,T}^0$ , für welche aufgrund der vermuteten Hierarchie der Helizitätsamplituden abnehmende Intensitäten erwartet werden. Hierbei bezeichnen die Indices L und T longitudinale und transversale Photonen bzw.  $\rho^0$ -Mesonen. Schraffierte Bereiche zeigen erstmalig diejenigen SDMEs, welche nur bei Vorhandensein eines polarisierten Leptonstrahls gemessen werden können. Die Daten zur Klasse A bestätigen die erwartete Dominanz der Übergänge bei gleicher Helizität,  $\gamma_L \rightarrow \rho_L^0$  und  $\gamma_T \rightarrow \rho_T^0$ . Die Daten zu Klasse B zeigen, dass diese beiden Übergänge stark interferieren. Der Vergleich der Klassen D und C (einfacher Helizitätsaustausch) zeigt, dass die Helizitätsamplitude des Übergangs  $\gamma_T \rightarrow \rho_L^0$  grösser ist als diejenige von

$\gamma_L \rightarrow \rho_T^0$ . Die SDMEs für eine Änderung der Helizität um 2 Einheiten  $\gamma_{-T} \rightarrow \rho_T^0$  sind innerhalb der Fehler mit Null verträglich.

## Datenanalyse mit dem Rückstoß-Detektor

Der in der letzten Phase der HERMES-Datennahme eingesetzte Rückstoß-Detektor ermöglicht es, weitgehend die Kinematik der Rückstoßprotonen festzulegen und die Auflösung im Impulsübertrag auf das Proton gegenüber der Auflösung, die man unter Verwendung nur der Informationen des Vorwärtsspektrometers erhält, um etwa eine Größenordnung zu verbessern. Er dient außerdem dazu, Ereignisse, bei denen der Rückstoßpartner nicht ein einzelnes Proton sondern z. B. eine  $\Delta$ -Resonanz ist, von den exklusiven Ereignissen zu trennen und gegebenenfalls auch die Asymmetrie dieses Beitrags zu bestimmen.

Da diese Messungen mit unpolarisierten Targets mit sehr viel höherer Targetdichte als im polarisierten Fall durchgeführt wurden, konnte zudem die Gesamtzahl von registrierten exklusiven Ereignissen substantiell gegenüber den Vorjahren erhöht werden. Wir erwarten daher aus diesen Daten Resultate mit sehr viel höherer statistischer Präzision und mit deutlich reduzierten systematischen Fehlern.

Der Rückstoß-Detektor besteht aus einem inneren Teil mit zwei Lagen von doppelseitigen Silizium-Streifenzählern (SSD) mit einer Dicke von 300  $\mu\text{m}$ , die noch im Vakuum der Targetkammer die Target-Speicherzelle (Wandstärke 75  $\mu\text{m}$ ) umschließen. Sie erlauben über den differentiellen Energieverlust eine Bestimmung des Impulses (der kinetischen Energie) der Rückstoß-Protonen, die nicht in der dünnen Wand der Speicherzelle gestoppt werden, im Bereich von etwa 100 MeV/c (5 MeV) bis ca. 200-250 MeV/c, deren Energie aber nicht ausreicht, auch die Wand der Vakuumkammer zu durchdringen. Außerhalb der Vakuumkammer befinden sich zwei zylindrische Detektoren aus szintillierenden Fasern (SFT). Rückstoßprotonen mit Impulsen oberhalb von ca. 250 MeV/c können

von diesen nachgewiesen werden. In diesem Impulsbereich wird zur Bestimmung des Teilchenimpulses die Ablenkung von geladenen Spuren im Magnetfeld eines Solenoiden mit einem longitudinalen Feld von 1 T verwendet. Dieses Magnetfeld diene außerdem dazu, niederenergetische Möller-Elektronen auf so enge Spiralbahnen zu lenken, dass sie nicht auf die Silizium-Streifenzähler treffen. Ein äußerer Zylinder von Szintillationszählern und dünnen Wolframplatten bildet den Photon-Detektor (PD). Er dient dem Nachweis von Photonen aus hadronischen Zerfällen und der weiteren Untergrundunterdrückung.

Das Verfahren zur Kalibrierung und für das interne Alignment dieses Detektorsystems war sehr aufwendig und zeitraubend. Es wurden sowohl Spuren kosmischer Teilchen als auch Spuren von Reaktionsprodukten aus dem Target bei ausgeschaltetem und eingeschaltetem Solenoidmagneten verwendet.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch momentane Ergebnisse dieser Prozedur, die in einigen Details immer noch verbessert und optimiert wird.

Abbildung 45 zeigt das Potential der Trennung von Pionen und Protonen mit dem Rückstoß -Detektor. Aufgetragen ist der differentielle Energieverlust geladener Teilchen in dem inneren Silizium-Zähler gegen den aus der Krümmung der Teilchenbahnen im Magnetfeld bestimmten Impuls. Entsprechende Resultate gibt es auch für alle anderen Subdetektoren.

Die Abbildungen 46 und 47 demonstrieren, wie sauber exklusive Prozesse mithilfe des Rückstoß-Detektors identifiziert und vom Untergrund abgetrennt werden können, Abbildung 46 für die tief-virtuelle Compton-Streuung (DVCS), Abbildung 47 für die exklusive  $\rho^0$ -Produktion. In Abbildung 46 zeigt die obere Kurve als Funktion des Quadrats der fehlenden Masse  $M_X^2$  die Zahl der DVCS- Kandidaten, für die im Spektrometer nur ein gestreutes Elektron und ein hochenergetisches Photon nachgewiesen wurden aber keine weitere geladene Spur oder Energiedeposition durch ein neutrales Teilchen im Kalorimeter registriert wurde. Die untere Kurve zeigt die Ereignisse, die man erhält, wenn man zusätzlich eine positiv geladene Spur im Rückstoß-Detektor verlangt, und die ausgefüllte Fläche zeigt die

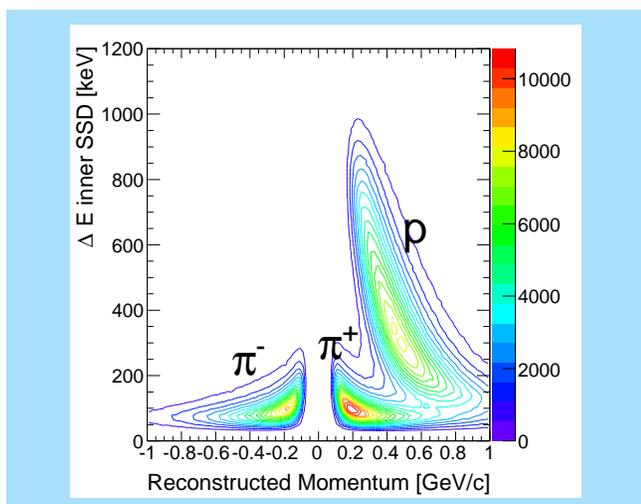


Abbildung 45: Pion-Proton Separation basierend auf dem differentiellen Energieverlust und dem rekonstruierten Teilchenimpuls im inneren Silizium-Zählern.

Ereignisse, die man erhält, wenn man zusätzlich fordert, dass die Differenz  $\Delta p$  zwischen dem Impuls, den man aus der Kinematik der im Spektrometer nachgewiesenen Teilchen für einen exklusiven Prozess erwartet, und dem Impuls, der von dem Rückstoß-Detektor gemessen wird, kleiner als 1 GeV/c ist.

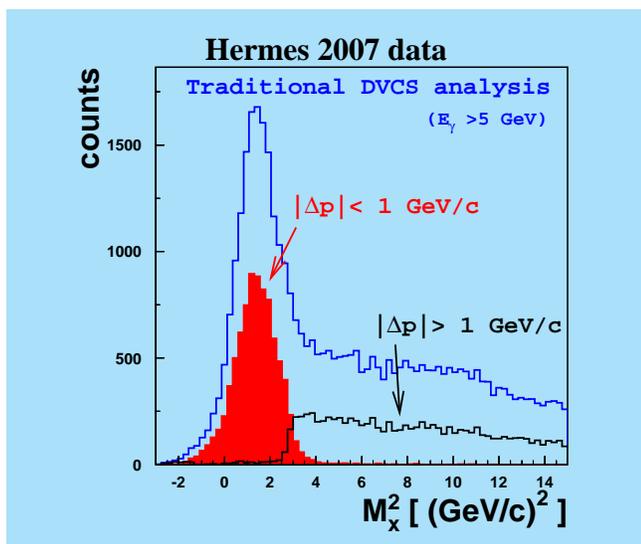


Abbildung 46: Identifizierung von Ereignissen der tief-virtuellen Compton-Streuung mithilfe des Rückstoß-Detektors.

Entsprechend sind in Abbildung 47 als Funktion der fehlenden Energie  $\Delta E_{\pi\pi}$  die  $\rho^0$ -Kandidaten gezeigt, bei denen anstelle des hochenergetischen Photons ein  $\pi^+ \pi^-$  Paar nachgewiesen wurde (blaue Kurve). Die Trennung von Untergrund und Signal ist mit diesen Daten sehr schwierig. Die untere schwarze Kurve zeigt wiederum die Ereignisse, die man erhält, wenn man zusätzlich eine positiv geladene Spur im Rückstoß-Detektor verlangt, und die rote Kurve zeigt die Ereignisse, die man mit der zusätzlichen Forderung erhält, dass  $\Delta p$  kleiner als 1 GeV/c ist. Man erhält ein nahezu untergrundfreies Signal.

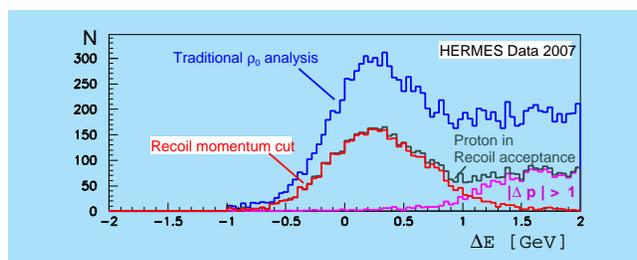


Abbildung 47: Identifizierung von Ereignissen der exklusiven Erzeugung von  $\rho^0$  Mesonen mithilfe des Rückstoß-Detektors.

Hervorzuheben ist hierbei, dass für diese erste Analyse weder die zusätzliche Möglichkeit der Teilchenidentifizierung noch weitere kinematische Einschränkungen aufgrund von Koplanaritätsbedingungen oder kinematischen Fits verwendet wurden. Für weitergehende Analysen, die gegenwärtig vorbereitet werden, sollen diese zusätzlichen Möglichkeiten eingesetzt werden, ebenso die Möglichkeit der Unterdrückung des assoziierten Untergrundes z. B. aus dem Zerfall  $\Delta^+ \rightarrow p\pi^0$  mithilfe des Photon-Detektors.

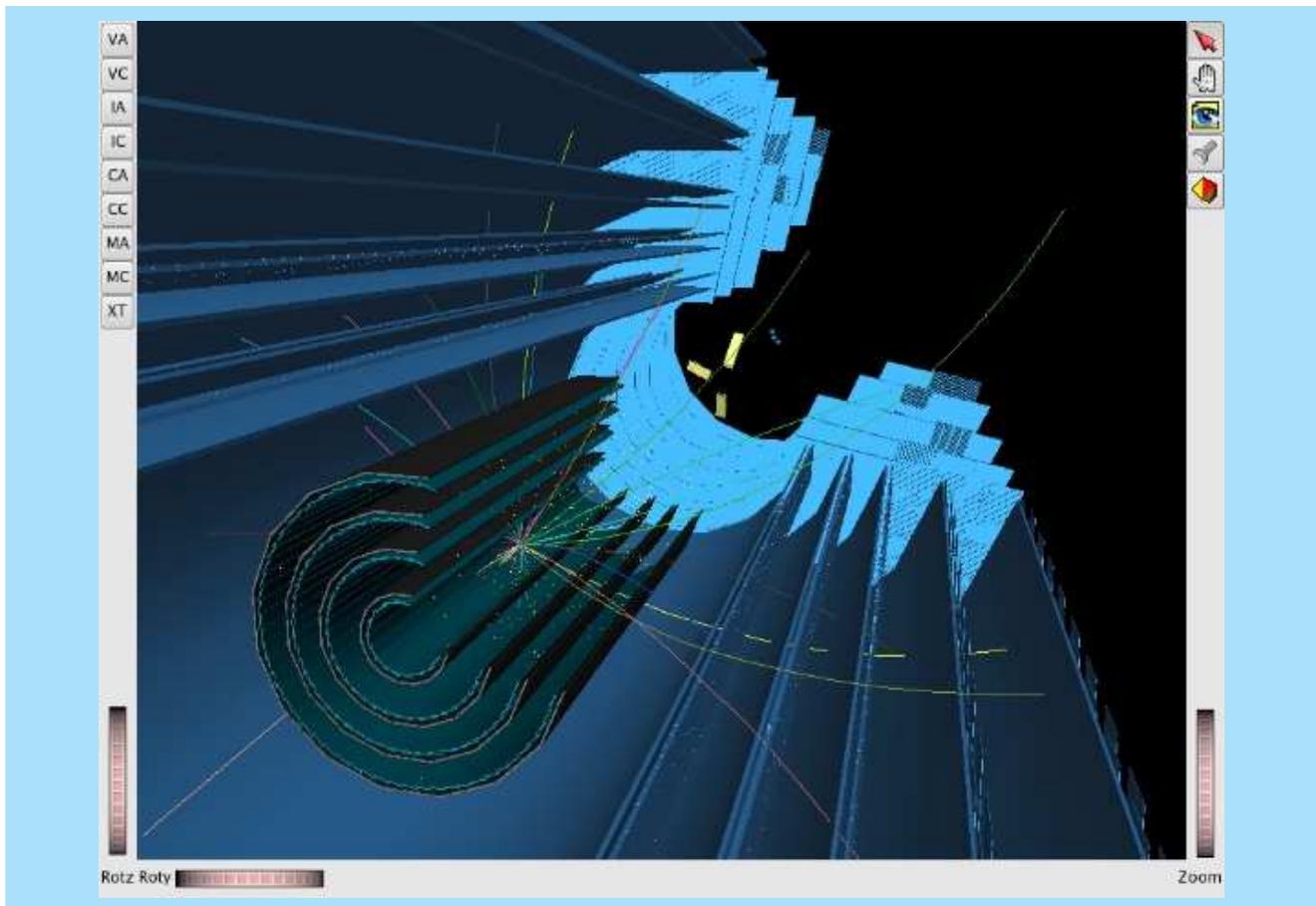


Abbildung 48: Monte-Carlo-Simulation eines  $t\bar{t}$ -Ereignisses in einem Layout für den Inneren Detektor des ATLAS-Experiments mit vier Lagen von Silizium-Pixeldetektoren und fünf Lagen von Silizium-Streifendetektoren.

# 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

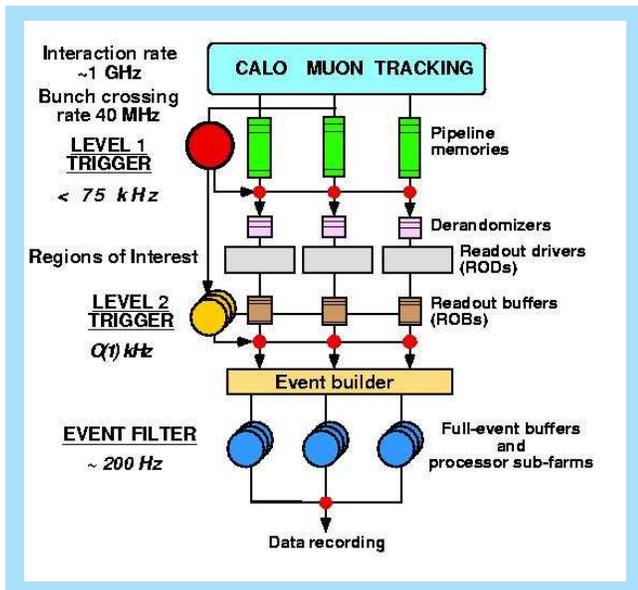


Abbildung 49: Schema des dreistufigen ATLAS-Trigger-Systems.

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

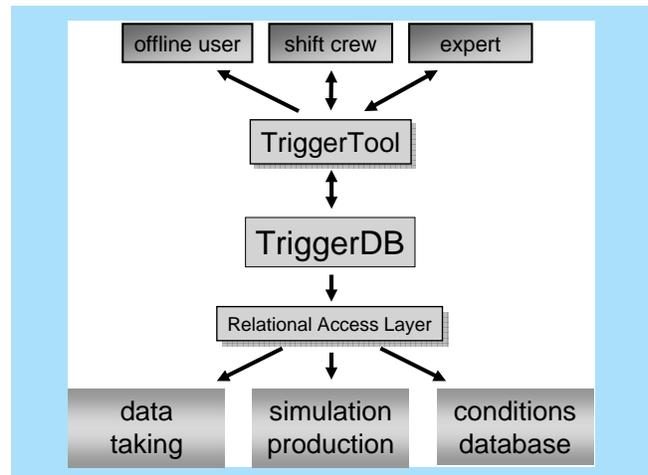


Abbildung 50: Schema des ATLAS-Triggerkonfigurationssystems, mit der TriggerDB als zentrale Quelle für Konfigurationsinformation. Die Information wird verwendet für die Konfiguration des Triggers für Datennahme und Simulation, und für Datenanalyse durch die Konditionsdatenbank.

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 Schlüsselns 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

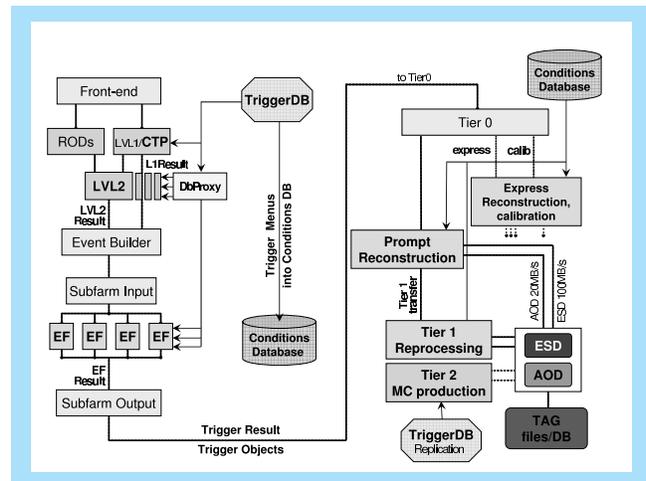


Abbildung 51: Fluss der Konfigurationsinformation von der TriggerDB zur Triggerhardware und Triggersoftware, und zu den Analysezentren für den Benutzer von Triggerdaten.

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

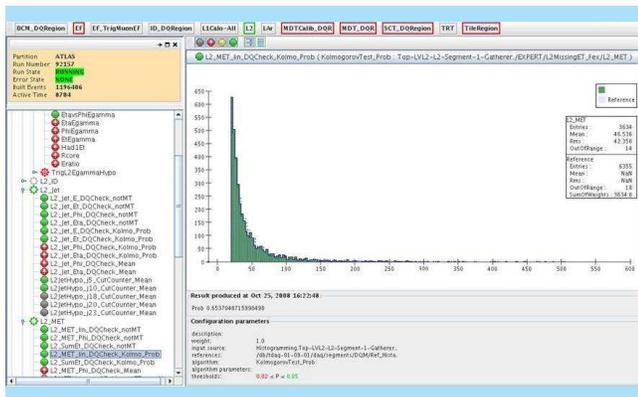


Abbildung 52: Das Datenqualitätsmonitorsystem zeigt übersichtlich die Verteilungen relevanter Triggerdaten und erlaubt so die schnelle Diagnose von Problemen bei der Triggerrekonstruktion.

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

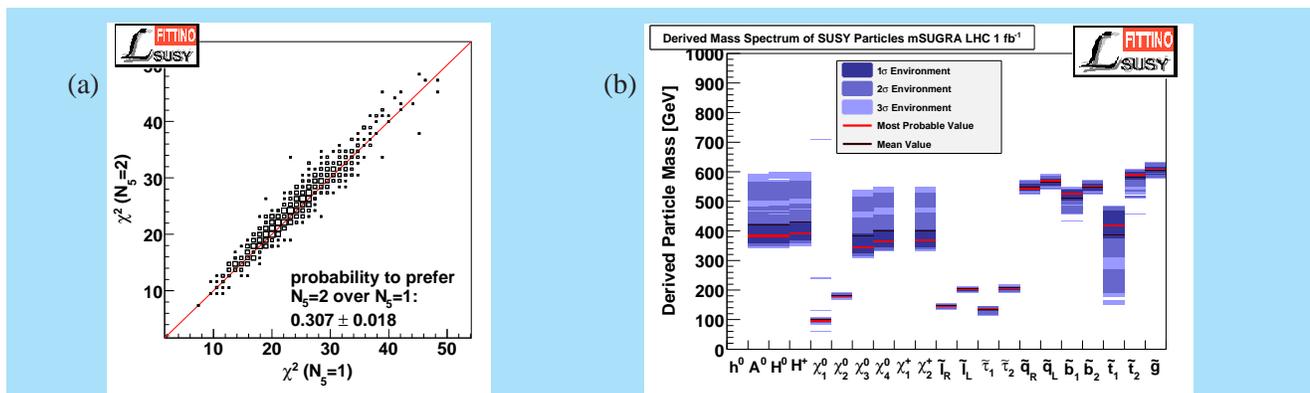


Abbildung 55: a) Beispiel für das Unterscheidungsvermögen zwischen zwei Modellen, die sich durch ganzzahlige Parameter unterscheiden. b) ein Beispiel für die Präzision der Messung eines mSUGRA-Spektrums mit Daten des LHC und anderer Experimente.

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 schnittbasierten 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.

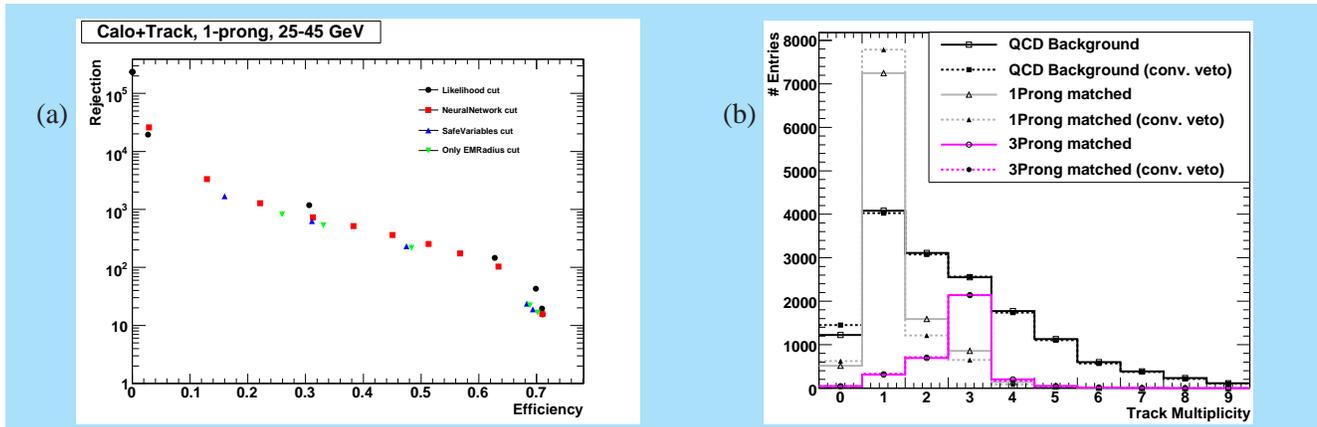


Abbildung 56: In (a) wird die Reinheit und Effizienz verschiedener  $\tau$ -Identifikationen dargestellt. Dabei erreicht die hier entwickelte einfache schnittbasierte Selektion mit wenigen Variablen fast das Niveau der Likelihood-basierten komplexen Identifikation mit mehr Variablen. In (b) ist die Korrektur 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  $\tau \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma \rightarrow \pi^\pm \gamma e^+ e^-$  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.

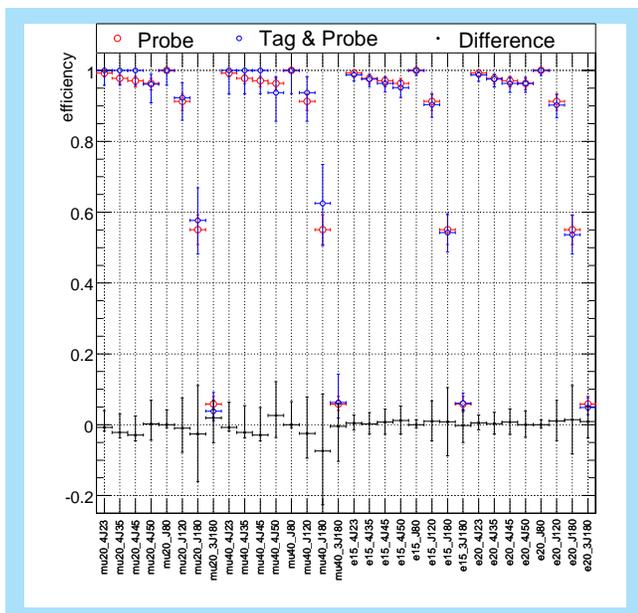


Abbildung 57: Triggereffizienz für verschiedene Jet-Trigger direkt aus der Monte-Carlo-Simulation bestimmt (Probe) und bei Vorhandensein eines Testtriggers (Tag & Probe).

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

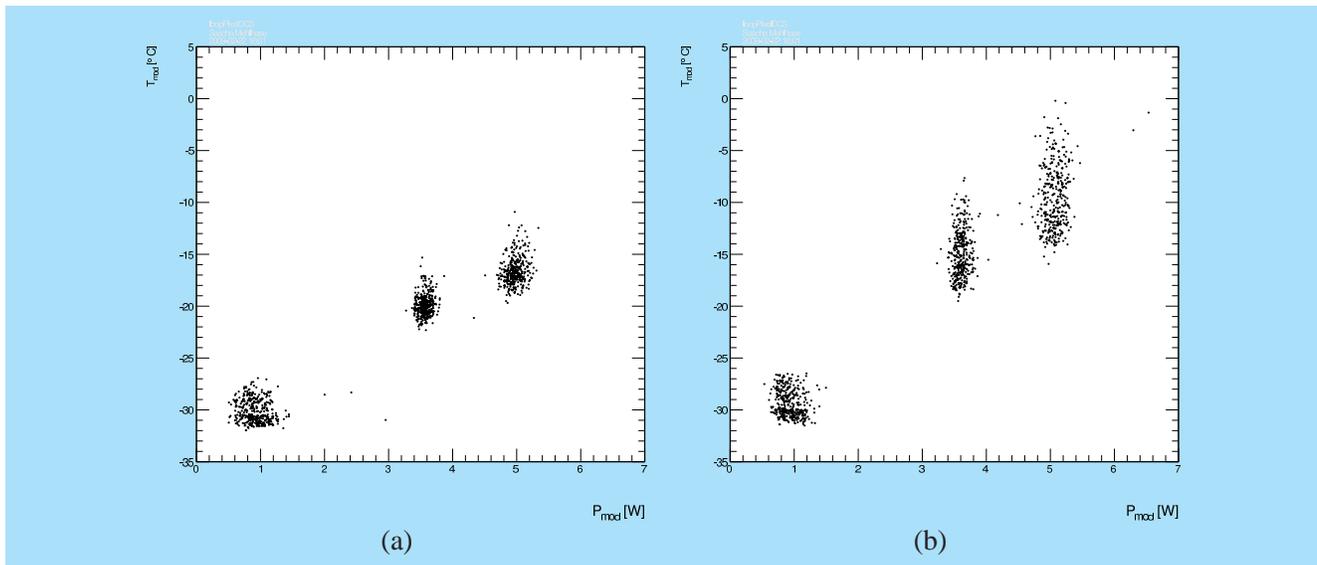


Abbildung 58: Leistungsaufnahme und Temperaturverhalten von ATLAS-Pixeldetektor-Modulen: Fehlerfreie Module (links) und Module mit reduzierter Kühlleistung (rechts).

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 Belegungsdichte 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.



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 Daten, der Erstellung von Simulationssoftware und den 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-

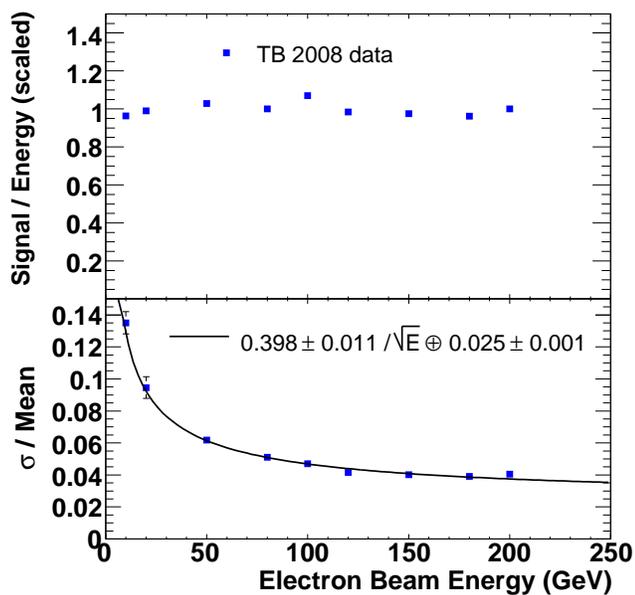


Abbildung 62: Ergebnisse zur Linearität (oben) und Auflösung (unten) in der Energie-Rekonstruktion für Elektronen als Funktion der Energie. Die Daten wurden im Sommer 2008 im Teststrahl am CERN aufgezeichnet.

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.

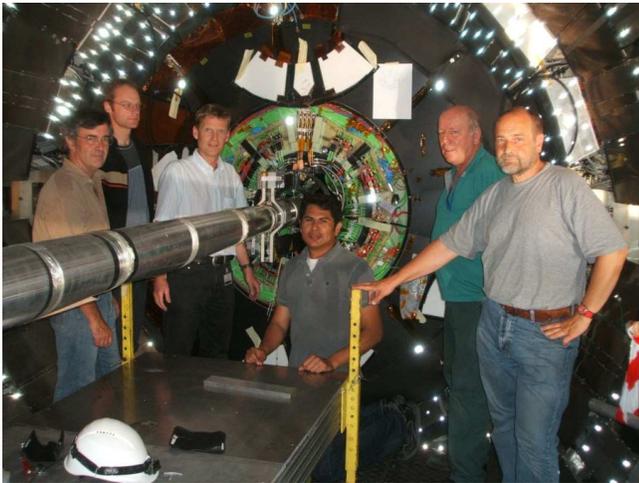


Abbildung 64: Einbau der BCM1F-Detektoren nahe dem Strahlrohr im CMS-Experiment.

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-

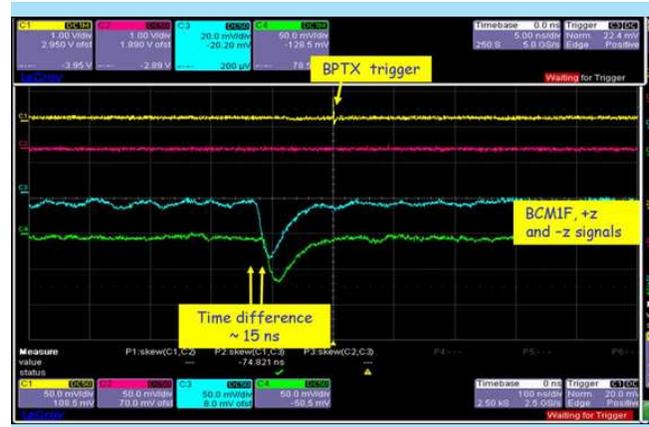


Abbildung 65: Die ersten LHC-Strahl Signale vom BCM1F Strahlmonitor auf dem Schirm eines Oszilloskops am 10. September 2008.

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.

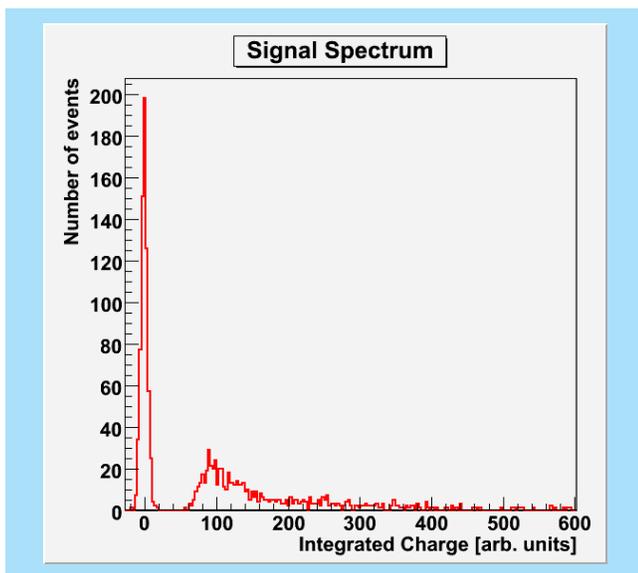


Abbildung 66: Aufgenommenes Signalspektrum eines Kanals des BCM1F-Detektors, unmittelbar nachdem erstmals Protonen in den LHC eingespeist wurden.

## 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.

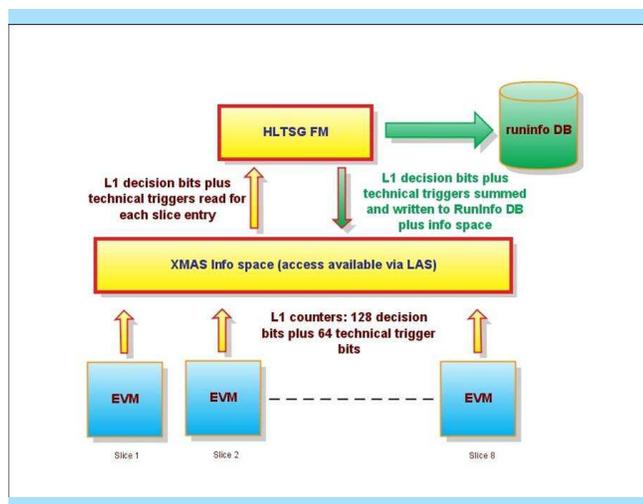


Abbildung 67: Schematische Darstellung der Infrastruktur zur Sammlung und Darstellung der gemessenen Triggerraten.

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).

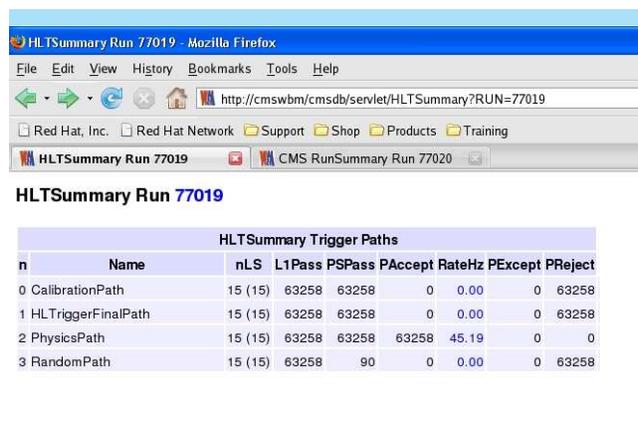


Abbildung 68: Beispiel einer Webseite mit Triggerinformationen.

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

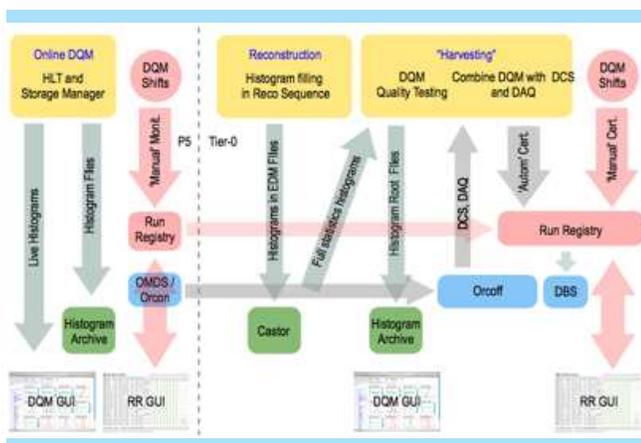


Abbildung 70: Schematische Darstellung der Infrastruktur des CMS DQM Systems (Online, Offline und Zertifizierung).

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-

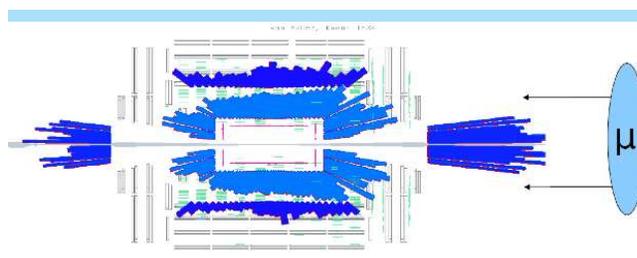


Abbildung 71: Am 10. September 2008 aufgezeichnetes Strahluntergrund-Ereignis. Die einlaufenden Teilchen, größtenteils Myonen, wurden durch eine gezielt herbeigeführte Kollision des Protonstrahls mit einem Kollimator erzeugt.

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.

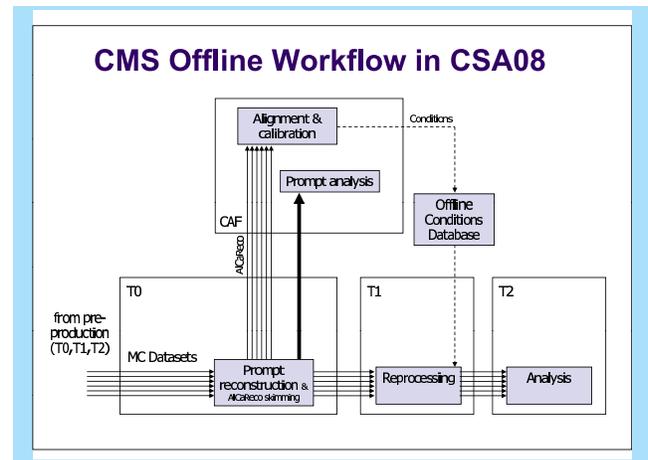


Abbildung 72: Ablaufschema von Alignment und Kalibration im CSA08-Challenge.

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

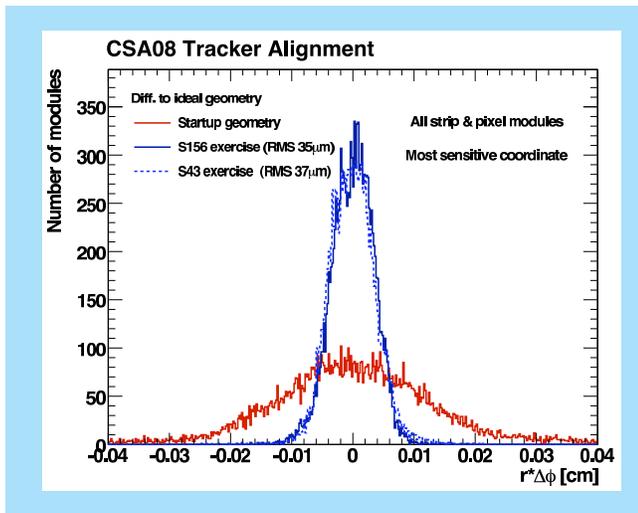


Abbildung 73: Vergleich zwischen durch Alignment bestimmter und wahrer Position der Pixelmodule des CMS Spurdetektors (in tangentialer Richtung).

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.

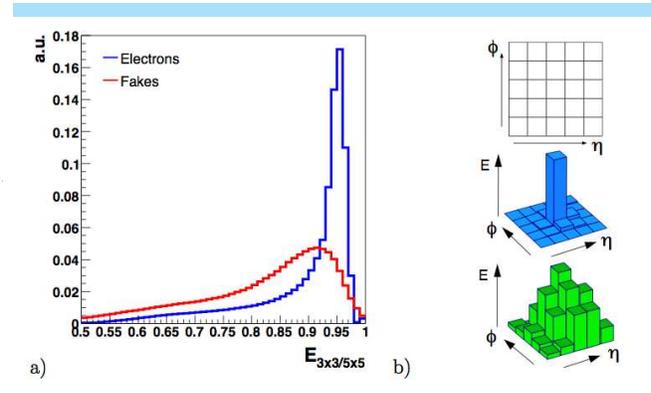


Abbildung 74: Verteilung der Estimatorvariablen  $E_{\frac{3 \times 3}{5 \times 5}}$  zur Unterscheidung von Elektronen und Hadronen im Elektromagnetischen Kalorimeter.

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 eine 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.

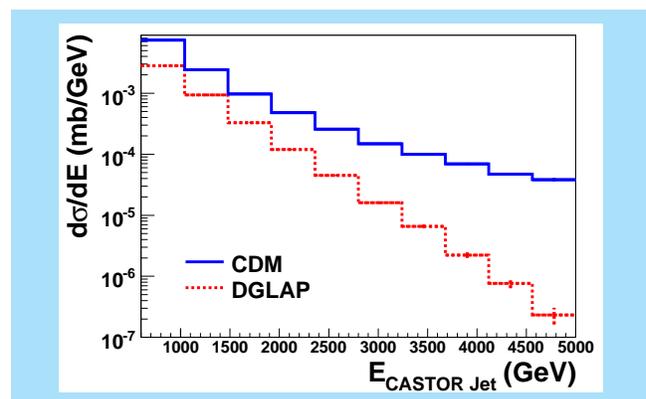


Abbildung 75: Vorhersage von Jet-Energien im CASTOR Kalorimeter unter Verwendung von zwei verschiedenen Modellen zur Entwicklung der Parton-Dichten im Proton.

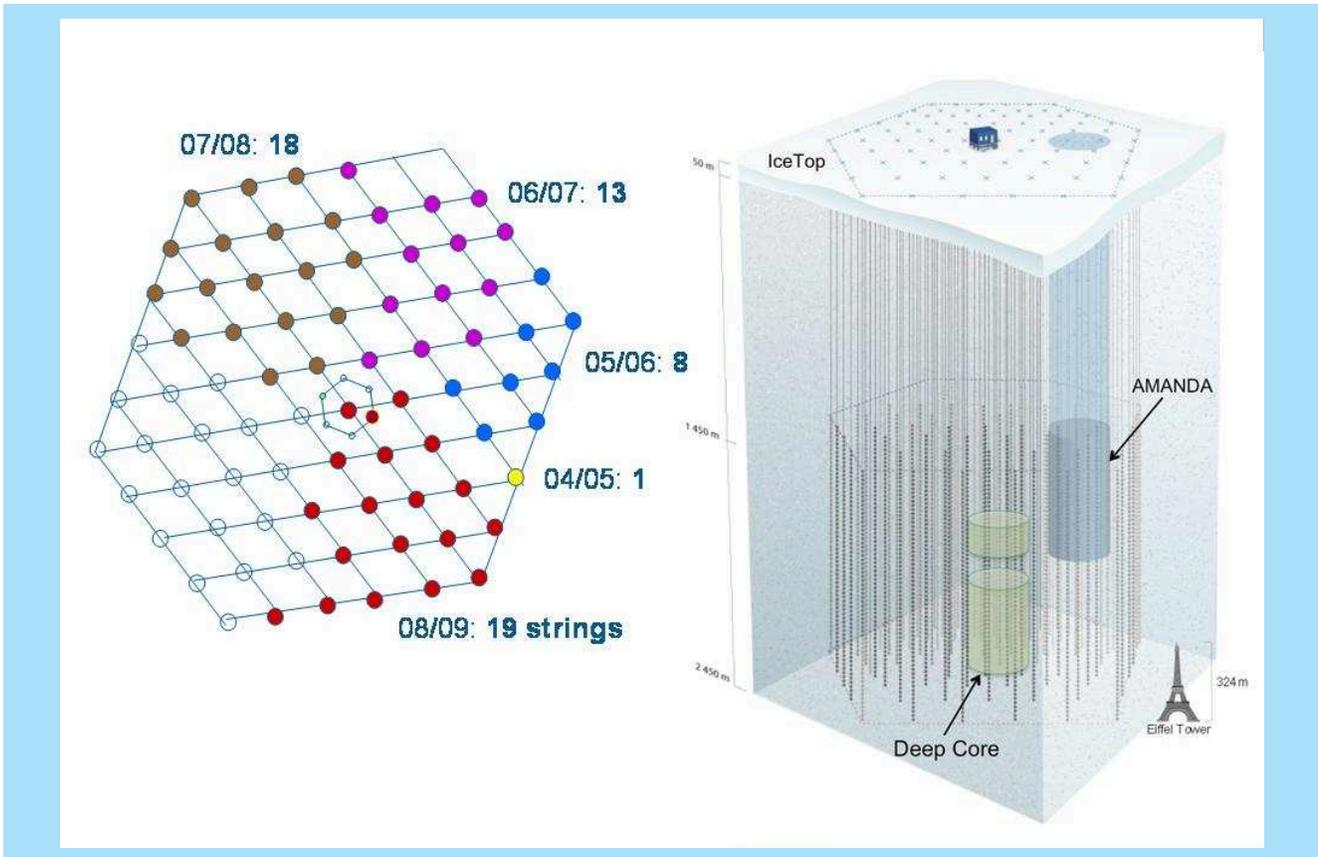


Abbildung 76: links: schematische Ansicht der bisher installierten 59 Trossen. Rechts: perspektivische Ansicht des vollen IceCube-Detektors.

# Astroteilchenphysik

**Gruppenleiter:** S. Schlenstedt

**DESY hat sich im Jahr 2008 an drei Experimenten der Astroteilchenphysik beteiligt: an dem weltweit größten Neutrino-Teleskop IceCube am Südpol, an MAGIC, dem Gamma-Teleskop auf La Palma (über eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe), und – 2008 auslaufend – an dem ersten Experiment der Hochenergie-Neutrinoastronomie, NT200 am Baikalsee. Die Hardware-Beiträge von DESY zu IceCube sind 2008 erfolgreich abgeschlossen worden; die Analyse von IceCube-Daten hat nun die höchste Priorität. Die Untersuchungen zum akustischen Nachweis von Neutrinos in Eis wurden weitergeführt. Darüber hinaus wurde mit Arbeiten an der Entwurfsphase von CTA (Cherenkov Telescope Array), einem Gammateleskop der nächsten Generation begonnen. Die Entwicklung in DESY erfolgt auch im Rahmen der Brandenburger/Berliner Forschungslandschaft, zum Beispiel durch eine gemeinsam mit der Humboldt-Universität getragene Nachwuchsstudien-Gruppe und durch die Besetzung einer gemeinsamen Professur für theoretische Astroteilchenphysik an der Universität Potsdam.**

## IceCube

IceCube wird aus 4800 optischen Modulen bestehen, die an 80 Trossen befestigt sind. Zusätzlich soll ein innerer eng bestückter Kernbereich installiert werden. Dieser *DeepCore* genannte Teildetektor wird die Sensitivität bei geringen Energien entscheidend verbessern und AMANDA ersetzen. AMANDA soll im Jahr 2009 abgeschaltet werden. IceCube wird ergänzt durch den Luftschauer-Detektor IceTop auf der Eisoberfläche.

Nachdem in der Saison 2008/09 neunzehn Trossen installiert wurden, sind jetzt mit insgesamt 59 Trossen etwa 3/4 von IceCube in Betrieb. Die Konstruktion des gesamten Detektors soll im Januar 2011 abgeschlossen sein.

Ein Viertel der digitalen optischen Module (DOMs) wurden bei DESY montiert, davon 233 im Jahr 2008. Der zeitgerechte Abschluss dieser Arbeiten, unter Einhaltung des Kostenrahmens, ist einer der wichtigsten Erfolge der DESY-Gruppe des Jahres 2008. DESY hat auch den Front-End-Teil der Empfangselektronik an der Eisoberfläche (DOR-Card) entwickelt und produziert.

Die Hauptaufgaben der DESY-Gruppe beim Betrieb von IceCube im Jahr 2008 waren a) Massenproduktion von Monte-Carlo-Daten und Vorbereitung von entsprechenden GRID-Werkzeugen, b) Release-Management für Rekonstruktionssoftware, c) Entwicklung von Software für Online-Monitoring und Online-Filtern der Daten am Pol, d) Firmware-Optimierungen für die DOR-Card.

Bei der Analyse liegt das Schwergewicht der Zeuthener Gruppe auf der Suche nach astrophysikalischen Quellen hochenergetischer Neutrinos. Außerdem widmet sich die Gruppe der Vermessung des Spektrums der geladenen kosmischen Strahlung bis  $10^{18}$  eV und der Suche nach exotischen Teilchen wie etwa magnetischen Monopolen.

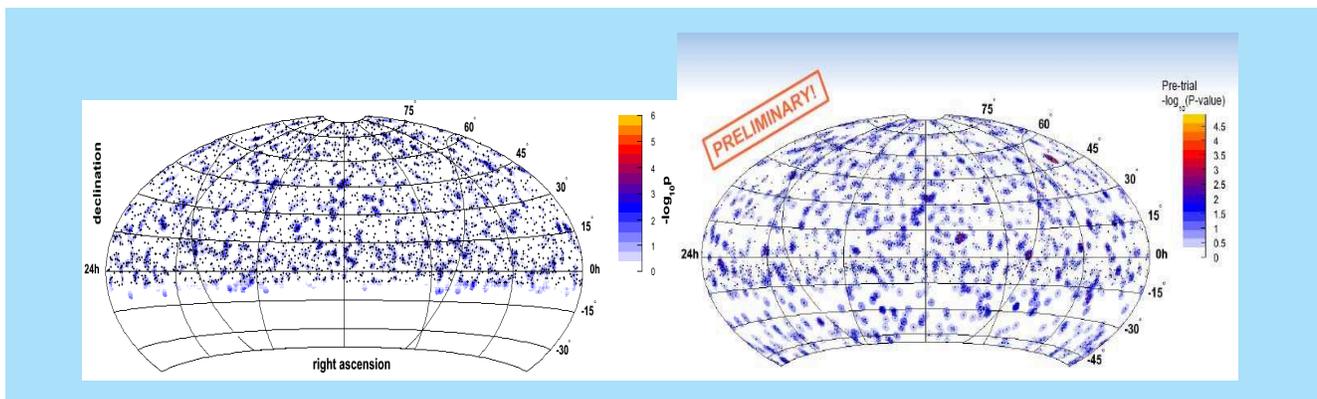


Abbildung 77: Daten des Jahres 2007, links: Neutrino-Himmelskarte (2956 Ereignisse im TeV-PeV-Bereich) für den Nordhimmel; rechts: Himmelskarte für 1885 Ereignisse im PeV-EeV-Bereich unter Einschluss eines großen Teils des Südhimmels.

## Neutrino-Punktquellen und Multimessenger-Physik

Die Suche nach Neutrino-Punktquellen und ihre gezielte Verbindung zu Beobachtungen mit Gamma- oder Röntgenstrahlen (Multimessenger-Methoden) werden innerhalb einer Nachwuchsgruppe durchgeführt. Ihre Aktivitäten können in drei Schwerpunkte gruppiert werden:

- Punktquellen-Analyse für den gesamten Nordhimmel (der Standard-Ansatz)
- Punktquellenanalyse für besonders hochenergetische Neutrinos unter Einschluss eines großen Teils der Südhemisphäre,
- Suche nach transienten Phänomenen und Entwicklung von *Neutrino-Triggerern* für Gammateleskope.

zu a) Im Herbst 2008 wurden in der IceCube-Kollaboration drei unabhängige Analysen abgeschlossen, mit denen anhand der im Jahr 2007 genommenen Daten der Nordhimmel nach Punktquellen durchsucht wird. Die Sensitivität dieser Analysen (1 Jahr mit etwa  $\frac{1}{4}$  des vollen IceCube-Detektors) ist um etwa einen Faktor 2 besser als jene von 7 Jahren AMANDA und demonstriert damit eindrucksvoll den Schritt in eine neue Ära. Eine der Analysen (siehe Abbildung 77, links) wurde am

DESY durchgeführt, die beobachteten Punkthäufungen dieser wie der anderen beiden Analysen sind jedoch mit statistischen Fluktuationen verträglich.

zu b) Bisherige Analysen konzentrierten sich auf Quellen in der nördlichen Hemisphäre, die für den Südpol *von unten* kommenden Myonen entsprechen. Optimiert man die Analyse auf sehr hohe Energien, so kann man jedoch auch oberhalb des Horizonts nach Quellen suchen, und das Zentrum der Galaxis rückt ins Blickfeld. Eine solche Analyse wurde im DESY für die Daten des Jahres 2007 durchgeführt. Abbildung 77 (rechts), zeigt die entsprechende Himmelskarte, die erstmals auch Teile des Südhimmels – insbesondere das galaktische Zentrum und die durch Auger-Ergebnisse favorisierte Region um Centaurus-A – mit einschließt. Auch hier wurden keine eindeutigen Hinweise auf Punktquellen gefunden.

zu c) Die Entwicklung von on-line Analysen soll zur zeitnahen Auswahl von Neutrino-Ereignissen führen, die Folgebeobachtungen durch MAGIC oder durch optische robotische Teleskope auslösen. Es wurde ein System zur on-line-Monitorierung der Stabilität des IceCube-Detektors entwickelt, das sich auf die Raten der getriggerten bzw. der gefilterten Daten stützt. Das System wird 2009 voll in die Datenverarbeitungskette am Südpol integriert werden. In diesem Zusammenhang wurde auch der Aufbau eines Archivs für Signalzeitreihen aus Gammabeobachtungen fortgeführt. Diese Daten helfen, die statistische Signifikanz eines

eventuellen Zusammentreffens eines Gamma-Flares mit IceCube-Neutrinosignalen genauer zu bestimmen.

## Weitere Analysen mit IceCube

### Kaskadenereignisse

Im Gegensatz zu Punktquellsuchen, die sich auf Myonspuren und deren Richtungsrekonstruktion und damit im Wesentlichen auf Myonneutrinos stützen, tragen alle drei Neutrinosorten zu Kaskadenereignissen bei. Diese sind gekennzeichnet durch eine gute Energieauflösung von 30 %, wie sie für Spektren-Messungen wichtig sind. Die Winkelauflösung ist dagegen schlecht, gegenwärtig etwa  $25^\circ$  in Eis, verglichen zu  $5^\circ$  in Wasser. In enger Zusammenarbeit mit der Gruppe an der Humboldt-Universität hat die DESY-Gruppe auf ihren bisherigen Arbeiten für AMANDA aufgebaut und die Analysewerkzeuge für Kaskadenrekonstruktion im Hinblick auf IceCube weiterentwickelt. Das Hauptpotential für Verbesserungen kommt dabei aus zwei Richtungen: a) die Benutzung der vollen Wellenform anstatt der Ankunftszeit des ersten Photons, b) die Fokussierung auf das tiefste Eis, wo die Lichtstreuung geringer und der entsprechende Einfluss auf die Rekonstruktion weniger störend ist. Das Ziel ist dabei die Untersuchung atmosphärischer Elektronneutrinos. Im Mittelpunkt steht die Vorbereitung der Analyse der Daten, die mit 40 Trossen im Jahr 2008 genommen wurden.

### Magnetische Monopole

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 676 (Teilchen, Strings und das frühe Universum) wurden Arbeiten zur Simulation von magnetischen Monopolen in IceCube begonnen. Magnetische Monopole, supersymmetrische Q-balls and Quark-Nuggets sind extrem schwere Kandidaten für exotische Materie im Universum, mit Massen im Bereich von  $10^4$  bis  $10^{27}$  GeV und typischen Geschwindigkeiten von  $10^{-4}$  –  $10^{-3}$  der Lichtgeschwindigkeit. Zusammen mit der Simulation des Monopoldurchgangs durch IceCube wird die Entwicklung eines geeigneten Triggers vorangetrieben.

## IceTop

Die Erweiterung von IceCube durch den Oberflächendetektor IceTop dient hauptsächlich der Bestimmung der Massenzusammensetzung der primären kosmischen Strahlung in einem Energiebereich von  $3 \cdot 10^{14}$  –  $10^{18}$  eV. Die wichtigsten Messgrößen sind dabei die Lage des Schauermaximums und das Verhältnis der elektromagnetischen und myonischen Komponenten eines Schauers. IceCube hat im Vergleich zu ähnlichen Experimenten die einzigartige Möglichkeit, Myonen im tiefen Eis in Koinzidenz mit dem Schauer an der Oberfläche nachzuweisen.

Als Grundlage für die Untersuchungen zur Massenzusammensetzung sind bei DESY und der Humboldt-Universität die Algorithmen für die Rekonstruktion und Energiebestimmung von Luftschauern entwickelt worden. Die Anwendung auf Daten von zwei Monaten des Jahres 2007 lieferte erste Ergebnisse für ein Energiespektrum. Die Analyse wird zurzeit auf alle Daten von 2007 ausgedehnt und soll zu der ersten Publikation physikalischer Ergebnisse von IceTop führen.

Die Messung von IceTop-IceCube Koinzidenzen kann durch andere Verfahren zur Massenbestimmung ergänzt werden. Bei DESY/HU sind interessante alternative Messgrößen gefunden worden, die sensitiv auf die Massenzusammensetzung sind und eine unabhängige Überprüfung der Simulationsmodelle erlauben. Eine der Messgrößen ist die Zenithwinkel-Abhängigkeit des Schauermaximums, die in der oben vorgestellten Analyse zu einer komplementären Bestimmung der Massenzusammensetzung geführt hat. Eine weitere Messgröße ist die Anzahl der Myonen in Schauern, gemessen mit IceTop an der Oberfläche. Für größere Abstände zum Schauerzentrum ist es gelungen, Myon-Signale aus dem elektromagnetischen Untergrund zu isolieren. Da diese Myonen tendenziell viel niederenergetischer als die Myonen im tiefen Eis sind, stellt auch das eine unabhängige Methode zur Überprüfung der Schauermodelle dar.

## R&D zum akustischen Nachweis von Neutrinos

Mit diesen Arbeiten soll untersucht werden, ob das polare Eis geeignet ist, bei einer möglichen späteren Erweiterung von IceCube durch Radio-Sensoren auch akustische Sensoren zum Einsatz zu bringen. Beide Methoden würden von einer großen Abklinglänge von Radio- und Akustikwellen in Eis profitieren und die Überdeckung eines extrem großen Volumens mit einem großen Sensorabstand erlauben – eine Bedingung zum Nachweis der niedrigen erwarteten Neutrinoflüsse bei Energien oberhalb von 100 PeV. In der Saison 2006/07 und im Dezember 2007 wurde darum SPATS, der South Pole Acoustic Test Setup, installiert. SPATS besteht aus vier 500 m langen Trossen mit je sieben akustischen Stationen aus einem Sender und drei Empfängern, die größtenteils bei DESY entwickelt, gebaut und getestet wurden. Außerdem wurde ein mobiler Pinger in mehreren IceCube Bohrlöchern bis zu einer Tiefe von 500 m versenkt und die von ihm emittierten akustischen Pulse von den Sensoren der SPATS-Strings registriert.

Die bisherigen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: a) Die Tiefenabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit wurde mit 0.5 % Genauigkeit vermessen und zeigt, dass Brechungseffekte unterhalb von 200 m vernachlässigbar sind. b) Das akustische Rauschen ist konstant und sinkt leicht mit der Tiefe ab. Da eine Eichung der Sensoren bei 50 bar und  $-50^{\circ}\text{C}$  nicht realisierbar ist, kann der Absolutwert des externen Rauschens im Moment nur unter gewissen Annahmen angegeben werden. Er ist kleiner als 10 mPa, das heißt nahe am internen Rauschen der Sensoren. Transiente Ereignisse mit Amplituden jenseits des gaussischen Rauschens sind selten. c) Die akustische Abklinglänge lässt sich im Moment nur ungenau angeben, denn die Messdistanzen sind geringer als die ursprünglich erwartete Abklinglänge von  $>1$  km und die gegenwärtigen systematischen Fehler groß. Die Daten deuten auf Werte unterhalb eines Kilometers hin. Die Analyse der jüngsten Daten soll ein genaueres Bild liefern und Ende 2009 abgeschlossen sein.

## Baikal

Das Baikal-Experiment war das erste Experiment, dem die Messung hochenergetischer Neutrinos unter Wasser gelang. Es wurde 1998 als NT200 mit 192 Photoröhren an 8 Trossen in Betrieb genommen. Seit seiner Erweiterung auf das Teleskop NT200+ im Jahr 2005/06 erlaubt ein am DESY entwickeltes System eine um zwei Größenordnungen schnellere Datenübertragung zum Ufer. Im Mittelpunkt der Arbeiten der Kollaboration im Jahr 2008 stand die Vorbereitung abschließender Publikationen zu NT200: die Suche nach Punktquellen, die Suche nach Koinzidenzen von Neutrinoereignissen mit Gamma Ray Bursts, die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie und die Suche nach langsamen schweren Teilchen. Die entsprechenden Veröffentlichungen sollen im Jahr 2009 eingereicht werden.

## MAGIC

MAGIC hat im Jahr 2008 eine Reihe wichtiger Entdeckungen gemacht, u. a. den spektakulären Nachweis des veränderlichen Signals des Pulsars im Innern des Krebsnebels. Die DESY-Nachwuchsgruppe hat sich bei der Analyse von Monitoring-Daten aktiver galaktischer Kerne (Markarian 421 und 501, 1ES1959+650) engagiert und insbesondere die Koinzidenzen von Gamma-Ausbrüchen von Mkr 421 (MAGIC, VERITAS) mit Röntgenausbrüchen (SWIFT/XRT) und Variationen im MeV-Bereich (Agile) und im optischen Bereich (WEBT) untersucht. Die abgeleitete zeitabhängige Spektralverteilung lässt sich durch inverse Comptonstreuung an selbst erzeugten Synchrotronphotonen (SSC – Self-Synchrotron Compton Model) beschreiben.

## Cherenkov Telescope Array

Gamma-Strahlen mit Energien oberhalb von 100 GeV werden mit abbildenden Cherenkov-Teleskopen nachgewiesen. Seit dem Nachweis der ersten solchen Quelle

im Jahre 1989 hat diese Technik eine stürmische Entwicklung genommen. Die meisten der inzwischen 75 bekannten Quellen wurden durch H.E.S.S. in Namibia und MAGIC auf La Palma nachgewiesen. So beeindruckend die Ergebnisse, die mit den gegenwärtigen Instrumenten erzielt wurden, auch sind: sie können nur die Spitze des Eisbergs darstellen. Eine weitere astronomische und astrophysikalische Erforschung des Hochenergie-Universums erfordert empfindlichere Anlagen.

In Europa hat sich ein Konsortium zum Bau des *Cherenkov Telescope Array*, CTA, gegründet. Mit CTA werden die Messungen zu hohen wie zu niedrigen Energien erweitert. Gleichzeitig soll die Sensitivität im gegenwärtig zugänglichen Energiebereich um etwa eine Größenordnung gesteigert und die Winkelauflösung verbessert werden. Bei niedrigen Energien wird CTA die Lücke zum Satelliten-Experiment GLAST/Fermi schließen. CTA wird eine Vielzahl astronomisch interessanter Beobachtungsergebnisse liefern und darüber hinaus auch mit Antworten zu kosmologischen Fragen beitragen können.

Abbildung 78 zeigt eine mögliche Konfiguration von CTA. Mehrere dicht angeordnete, sehr große Teleskope in der Mitte sorgen für eine hohe Sensitivität unterhalb 100 GeV, für den Bereich von 0.1-10 TeV sind viele Teleskope mittlerer Größe wichtig. Zum Nachweis der geringen Flüsse oberhalb von 10 TeV muss ein sehr großes Gebiet mit Teleskopen abgedeckt werden. Da bei Gamma-Wechselwirkungen dieser Energien sehr viel Licht erzeugt wird, können die Teleskop-Durchmesser klein und deren Abstände größer sein. Mit CTA wird die Entdeckung von etwa 1000 Quellen erwartet.

CTA wird als Observatorium betrieben werden, bei dem Nutzer wie bei großen optischen Teleskopen Beobachtungszeit beantragen können und bei denen ein starkes Konsortium für den Betrieb der Infrastruktur verantwortlich ist.

Mit der Beendigung der Mitarbeit beim Baikal-Experiment und dem Abschluss der Hardware-Arbeiten für IceCube ergibt sich in Zeuthen die Möglichkeit, Projekte vorzubereiten, die in der nächsten Dekade IceCube

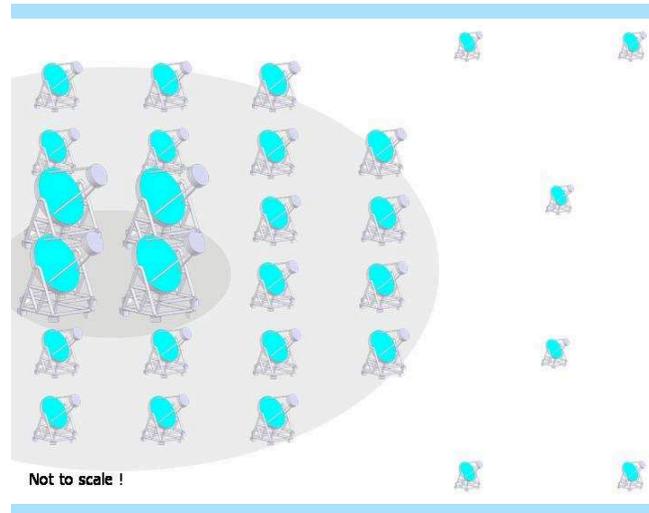


Abbildung 78: Mögliche Konfiguration von CTA

erst ergänzen und danach in seiner Rolle als Hauptaktivität ersetzen. Nach ausführlicher Diskussion der bestehenden Optionen hat sich die Gruppe Astroteilchenphysik für eine Mitarbeit an CTA entschieden. Es bildet eine ideale Grundlage für eine engere Bindung zur Potsdamer Universität und zu den Potsdamer Astronomen sowie zur Humboldt-Universität zu Berlin. Gamma-Resultate liefern wesentliche Informationen für die Interpretation der mit IceCube gewonnenen Befunde. Im Rahmen des *Multi-Messenger*-Ansatzes werden sie in diesem Sinne schon jetzt genutzt.

DESY beteiligt sich in den kommenden Jahren an der Design-Phase für CTA, einschließlich der Entwicklung und des Baus von Prototypen. Die gegenwärtigen Haupt-Aktivitäten sind:

- Mitarbeit bei der Optimierung der CTA-Konfiguration
- Entwurf eines Drive- und Control-Systems zur Bewegung der Teleskope
- Design eines Teleskops mittlerer Größe
- Vorarbeiten zur schnellen Kamera-Auslese.

Eine genauere Festlegung der Aufgaben beim Bau von CTA in den Jahren nach 2012 wird im Verlauf der Design-Phase erfolgen.

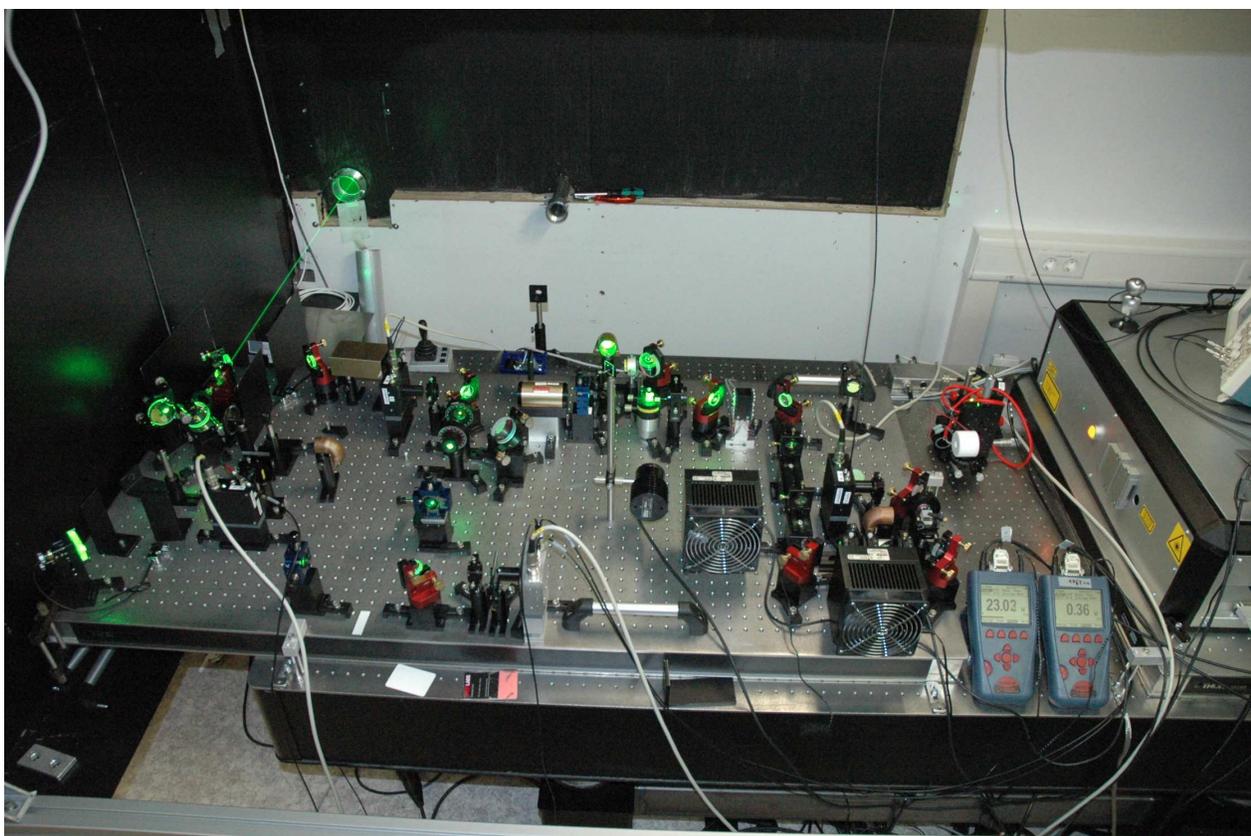


Abbildung 79: *Oben: Herzstück des ALPS Experiment bei DESY ist ein supraleitender HERA Magnet in der ehemaligen Magnetmesshalle 55. Das Foto zeigt auf der linken Seite des Magneten die Laserhütte und auf der rechten Seite den Schrank mit dem Detektoraufbau. Unten: Laseraufbau für den ALPS Fabry Perot Resonator. Rechts ist der geschlossene infrarote Laser zusehen, dessen Frequenz in dem Kristall etwa in der Mitte des Bildes verdoppelt wird. Die Reflexe des grünen Lichtes sind danach deutlich zu erkennen. Ganz links erkennt man den in dem Resonator verstärkten Laserstrahl zum Magneten.*

# ALPS-Experiment

**Beteiligte Institute:** DESY Hamburg, Albert-Einstein-Institut Hannover (AEI), Hamburger Sternwarte, Laser Zentrum Hannover (LZH)

**Sprecher:** A. Lindner, DESY

**Das ALPS-Experiment bei DESY sucht jenseits des Standardmodells nach neuen leichten Teilchen, die sehr schwach an Photonen koppeln. Mithilfe eines supraleitenden HERA Magneten und eines sehr leistungsstarken Lasers wird die Produktion von sub-eV Teilchen in einem *Licht durch die Wand* Experiment untersucht. Das Experiment wurde nach Vorlage des Letter-of-Intent [DESY 07-014] Anfang 2007 vom DESY Direktorium genehmigt. Der experimentelle Aufbau wurde kontinuierlich verbessert und in mehreren Datennahmeperioden wurde die Leistungsfähigkeit des Experimentes untersucht. Im Jahre 2008 wurde erfolgreich ein Fabry Perot Resonator im HERA Magneten aufgebaut und betrieben. Dieser wird derzeit weiter verbessert. Zusammen mit einem neuen Photodetektor kann ALPS dann im Jahre 2009 die weltweit sensitivsten Messungen liefern und in einen bisher unerforschten Parameterbereich dieser hypothetischen neuen Teilchen vorstoßen.**

Die Suche nach neuen Teilchen jenseits des etablierten Standardmodells ist eine der spannendsten Fragen der Teilchenphysik. Am LHC wird demnächst nach neuen Teilchen oberhalb der elektroschwachen Skala ( $\approx 100$  GeV) gesucht. Populäre Erweiterungen des Standardmodells, wie die Stringtheorie, legen aber auch die Existenz von sehr leichten und nur sehr schwach an Materie koppelnde Teilchen nahe. Diese werden oftmals als WISP (Weakly Interacting Sub-eV Particles) bezeichnet, im Gegensatz zu den schweren WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) Teilchen. Ne-

ben den Axion-artigen leichten Spin 0 Teilchen könnte es auch leichte Spin 1 Teilchen, so genannte *Hidden-Sector-Photonen* oder leichte minigeladene Teilchen geben. Es gibt aber keine genauen Vorhersagen über die Masse und Kopplungsstärken der WISP, weshalb experimentelle Messungen, die den großen Parameterbereich einschränken, sehr willkommen sind. Mithilfe sehr präziser Niederenergie-Experimente, die starke elektromagnetische Felder und sehr hohe Photonenflüsse haben, wird nach diesen neuen Teilchen gesucht. Dabei ergänzen Laborexperimente wie ALPS Ergebnisse aus Astrophysik und Kosmologie.

Bei ALPS, dem Axion-Like Particle Search Experiment bei DESY, wird mit einem starken Laserstrahl im hohen Magnetfeld des HERA Dipolmagneten nach neuen leichten Teilchen gesucht. Da das ALPS Experiment auch eine hohe Sensitivität für andere WISP Teilchen hat, steht die Abkürzung ALPS heute für *Any Light Particle Search*. Mit einem *Licht durch die Wand* Experiment wird indirekt nach der Produktion leichter Teilchen, die schwach mit Photonen wechselwirken gesucht. In der Mitte des Magneten ist eine lichtdichte Wand. Vor der Wand können durch die Kopplung der Photonen mit dem Magnetfeld, dem so genannten Primakoff Effekt, neue Axion-artige leichte Teilchen  $\phi$  entstehen. Diese fliegen aufgrund ihrer sehr schwachen Wechselwirkung mit Materie ungehindert durch die Wand und können sich nach dem Hindernis mithilfe des umgekehrten Primakoff Prozesses wieder in Photonen mit den ursprünglichen Eigenschaften zurück wandeln, die dann detektiert werden. Beim AL-

PS Experiment werden zwei Vakuumröhren im Magnet benutzt. Die laserseitige Röhre endet in der Magnetmitte und das Laserlicht wird dort mit Hilfe eines einstellbaren Spiegels zurückreflektiert. Die detektorseitige Vakuumröhre ist in der Mitte des Magnetes lichtdicht verschlossen – das ist die Wand, durch die das Licht scheinen soll. In diesem symmetrischen Aufbau ist die Rate der rekonvertierten Photonen  $R_{\gamma \rightarrow \phi \rightarrow \gamma} \sim (BL)^4$ . Diese Parameter sind durch den HERA Dipol definiert ( $B = 5.30 \text{ T}$ ,  $L = 4.21 \text{ m}$ ). Die Herausforderung des Experimentes liegt in den extrem niedrigen Umwandlungswahrscheinlichkeiten. Das ALPS Experiment will einzelne zurückgewandelte Photonen aus  $10^{22}$  primären Photonen nachweisen. Um dies zu erreichen, ist ein sehr leistungsstarker Laser und ein sehr empfindlicher rauscharmer Detektor notwendig.

Ein erster erfolgreicher Probetrieb des kompletten Aufbaus wurde im Herbst 2007 mit einem grünen (532 nm) 3.5 W Laser durchgeführt. Als Photodetektor wurde die in der Amateurastronomie vielfach benutzte CCD Kamera SBIG ST-402 verwendet. Es wurde gezeigt, dass der Laserspot auf wenige Pixel ( $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ ) fokussiert werden kann. Es wurde die prinzipielle Machbarkeit des Experimentes gezeigt und es konnte bereits eine Photonzählrate von mehr als 80 MHz ausgeschlossen werden. Um Parameterbereiche zu untersuchen, die bisher experimentell nicht zugänglich sind, musste die Leistungsfähigkeit des Experimentes durch einen empfindlicheren Photodetektor und höhere Laserleistungen verbessert werden.

Hierzu wurde Ende 2007 in einem ersten Schritt ein neues sehr leistungsfähiges Lasersystem, analog zu dem beim Gravitationswellen-Experiment (LIGO) eingesetzten, aufgebaut. Die Frequenz des hierbei erzeugten infraroten gepulsten Laserlichtes (1064 nm, 45 W) wurde in einem Kristall verdoppelt, so dass dem ALPS Experiment dann 14 W grünes Laserlicht zur Verfügung standen – das sind etwa  $4 \cdot 10^{19}$  Photonen je Sekunde. Während einer intensive Test- und Betriebsphase im Frühjahr 2008 wurden mehr als 100 h Daten mit Laser und eingeschaltetem Magneten aufgenommen und analysiert. Um den Einfluss des Ausleserausens gering zu halten wurden Aufnahmezeiten von 20 min oder 1 h gewählt. Nach der Korrektur der Drift der CCD ent-

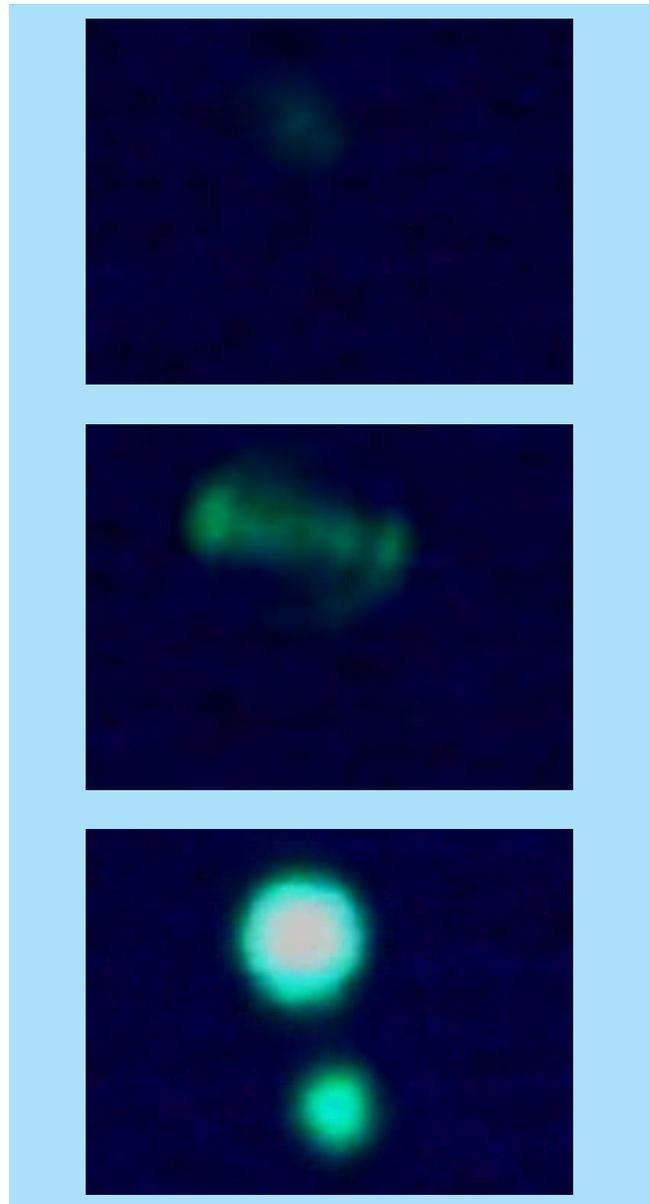


Abbildung 80: Der 8.6 m lange optische Resonator im HERA-Dipol Magneten im Betrieb: Oben: Der Resonator ist nicht abgestimmt und nur der primäre Laserstrahl ist sichtbar. Mitte: Der Resonator ist abgestimmt, aber nicht elektronisch geregelt. Zufällig ergeben sich durch die Längenfluktuationen des Resonators Konfigurationen, die für wenige Millisekunden das Licht verstärken. Unten: Die Frequenz des Laserlichts wird nachgeregelt, um die Längenfluktuationen des Resonators auszugleichen. Deutlich ist die Verstärkung des primären Laserlichts sichtbar.

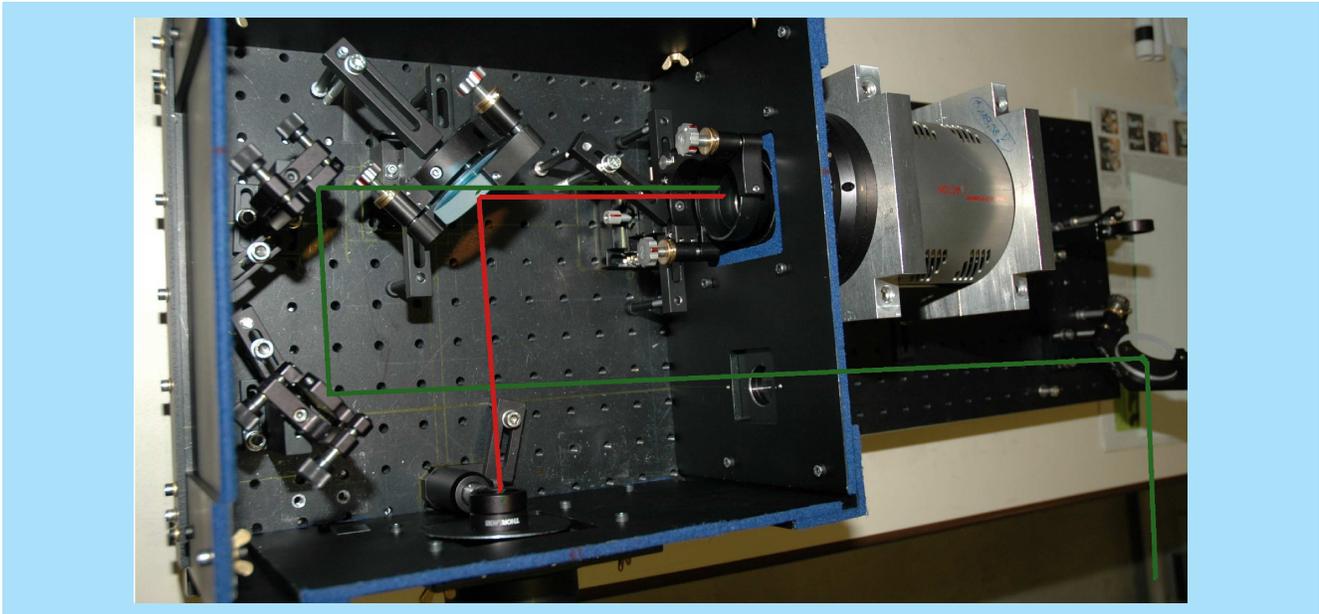


Abbildung 81: ALPS Detektoraufbau: von rechts ist die CCD Kamera PIXIS 1024-BL an die Detektorbox angebaut. In grün ist der Referenz-Strahlengang eingezeichnet, in rot der Strahlengang der rekonvertierten Photonen.

sprechen die Fluktuationen der einzelnen Pixel genau den Erwartungen aufgrund von Dunkelstrom und Ausleserauschen. Als Messsignal wurde die Summe von  $3 \times 3$  Pixelwerten in der Signalregion verwendet, das dann mit dem Signal aus Dunkelaufnahmen verglichen wird. Hiermit konnte eine Sensitivität für die Photonregeneration des ALPS Experimentes  $P_{\gamma \rightarrow \phi \rightarrow \gamma} \approx 10^{-21}$  erreicht werden.

Um den Photonfluss und damit die Empfindlichkeit des Experimentes weiter signifikant zu erhöhen wurde im Jahre 2008 zusammen mit den neuen Kollaborationsmitgliedern vom Albert-Einstein-Institut erfolgreich ein optischer Resonator in der ersten Hälfte des HERA Magneten aufgebaut. Ein vom Laserzentrum Hannover für Gravitationswellen-Experimente entwickelter Laser liefert etwa 35 W infrarotes Laserlicht (1064 nm) mit exzellenten Strahleigenschaften. Dieses wird in einem Kristall in etwa 0.7 W grünes (532 nm) Laserlicht konvertiert, das dann in den 8.62 m langen Fabry-Perot Resonator eingekoppelt wird. Der äußere Spiegel des Resonators befindet sich auf dem optischen Tisch in der Laserhütte, der innere Spiegel am Ende des laserseiti-

gen Strahlrohres. Mithilfe der Anpassung der Frequenz des Lasers werden Längenfluktuationen des Aufbaus so kompensiert, dass zwischen diesen beiden Spiegeln eine kohärente Überlagerung der Lichtwellen und damit eine Verstärkung der Laserleistung in der resonanten Cavity stattfindet. Es wurde eine Leistungsverstärkung von etwa 40 und damit eine effektive Leistung im Resonator von über 30 W erreicht. Dies entspricht den Erwartungen aufgrund der Güte des Resonators, die durch die Verluste, in den beiden Fenstern des evakuierten laserseitigen Strahlrohres zwischen den beiden Spiegeln des Resonators, limitiert ist.

Abbildung 80 demonstriert den Betrieb des Resonators. Fotografiert sind jeweils die 0.017% des Lichts, welches durch den Spiegel in der Mitte des Magneten scheinen. Der schwächere Lichtfleck in dem unteren Bild entsteht durch Mehrfachreflexionen in dem Spiegel in der Mitte des Magneten.

Der sehr erfolgreiche erste Schritt, in dem gezeigt wurde, dass der stabile Betrieb eines optischen Resonators in diesem Umfeld auch mit eingeschaltetem Magnetfeld

möglich ist, wurde Ende 2008 mit einer kurzen Daten-nahmeperiode abgeschlossen.

Als nächster Schritt zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit wurde Anfang 2009 erfolgreich eine zweite resonante Cavity um den Frequenzverdopplungskristall aufgebaut und zusammen mit dem optischen Resonator im Magneten stabil betrieben.

Damit wird eine Verbesserung der rot grün Konversion und eine Erhöhung der grünen Laserleistung um etwa einen Faktor 10 angestrebt. Ein weiter Schritt zur Leistungssteigerung wird zurzeit vorbereitet. Zur Vermeidung der Verluste an den Fenstern des laserseitigen Strahlrohres werden nun die Spiegel des Resonators in das Vakuumsystem gebracht. Hierdurch wird eine Erhöhung der Leistungsverstärkung um eine weitere Größenordnung erwartet.

Parallel dazu wurde der Aufbau auf der Detektorseite im Laufe des letzten Jahres wesentlich verbessert. Die optischen Komponenten wurden mechanisch stabiler aufgebaut und sind jetzt einfacher justierbar. Der Referenzstrahl wird in der Detektorbox auf die Kamera geführt und erlaubt eine pixelgenaue Kontrolle des Alignments (siehe Abbildung 81). Im letzten Jahr wurde eine neue Kamera, eine PIXIS 1024-BL angeschafft. Diese hat eine hohe Quanteneffizienz und ein niedriges Ausleserauschen. Sie wird bei  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  betrieben und hat dann einen sehr geringen Dunkelstrom. Damit wird die Leistungsfähigkeit des ALPS Experimente um eine weitere Größenordnung verbessert. Damit hat das ALPS Experiment das Potential, im ersten Halbjahr 2009 die weltweit empfindlichsten Messungen durchzuführen.

# Theoretische Physik

**Gruppenleiter:** F. Schrempf (bis 29.2.2008); V. Schomerus (seit 1.3.2008) (Hamburg), T. Riemann (Zeuthen)

**Die Forschungsfelder der Theorie-Gruppe in Hamburg und Zeuthen, in enger Vernetzung mit den Instituten für theoretische Physik der Universität Hamburg und der Humboldt-Universität zu Berlin, behandeln die wesentlichen Themen der modernen Teilchenphysik.**

**Durch die Hamburger Aktivitäten wird ein breites Spektrum abgedeckt: von der Phänomenologie im Rahmen des Standardmodells und seiner möglichen Erweiterungen über die Teilchen-Kosmologie bis zur Stringtheorie und der mathematischen Physik.**

**In Zeuthen liegen die Schwerpunkte bei Präzisionsuntersuchungen für die Beschleuniger HERA, LHC und ILC sowie in der Gittertheorie, einschließlich der Entwicklung von Parallelrechnern. Letzteres profitiert von der engen Zusammenarbeit im John von Neumann-Institut am Forschungszentrum Jülich.**

## Aktivitäten in Hamburg

### HERA-Physik und QCD

#### QCD bei hohen Energien

Die Erforschung der Protonstruktur ist ein Hauptgegenstand der Messungen bei HERA. Daten legen nahe, dass die Impulsverteilungen von Gluonen und leichten Quarks bei kleinen Impulsbruchteilen  $x$  im Einklang

mit dem verallgemeinerten *double logarithmic scaling* ein modifiziertes beselartiges Verhalten zeigen. Unter dieser Annahme läßt sich in nächstführender Ordnung (NLO) der Störungstheorie eine kompakte Näherungsformel für das Verhältnis  $F_L^{c,b}/F_2^{c,b}$  der Strukturfunktionen für die inklusive Produktion von Charm- bzw. Bottom-Quarks herleiten, welche die Extraktion von  $F_2^{c,b}$  aus den HERA-Daten wesentlich erleichtert [DESY 08-002]. Dieses Verhältnis zeichnet sich auch durch seine perturbative und parametrische Stabilität aus [DESY 08-081].

Der bei HERA gemessene Wirkungsquerschnitt für die inklusive Erzeugung von  $D^*$ -Mesonen liegt signifikant über der in kollineareren Näherung berechneten NLO-Vorhersage. Dieses Problem wird durch den Übergang zur *Quasi-Multi-Regge-Kinematik* im Zusammenspiel mit der Quark-Reggeisierungshypothese bereits in führender Ordnung beseitigt, wobei unintegrierte (transversalimpulsabhängige) Partonverteilungen für Gluonen und Charm-Quarks eingeführt werden [DESY 08-194].

Unter den Korrekturen zu den QCD-Evolutionsgleichungen (DGLAP, BFKL) sind Multiparton-Wechselwirkungen von besonderer Relevanz. Da ihr experimenteller Nachweis im Rahmen von totalen Wirkungsquerschnitten schwierig ist, ist es wichtig, weniger inklusive Observablen zu untersuchen, z. B. Korrelationen in Multijet-Endzuständen. Die Berechnung von Wirkungsquerschnitten in Gegenwart von Multiparton-Wechselwirkungen ist sehr aufwendig. Bisherige Rechnungen wurden im Rahmen des QCD Dipolmodells bzw. im Hintergrund klassischer starker Farbfelder durchgeführt. In [DESY 08-016] wurde für die tief-

inelastische Elektron-Nukleon-Streuung der ein-Jet inklusive Wirkungsquerschnitt in Impulsraumvariablen berechnet. Dabei wurden Abweichungen von früheren Resultaten im Ortsraum gefunden, deren Klärung Gegenstand gegenwärtiger Diskussionen ist.

Die exklusive diffraktive Produktion von  $J/\psi$  und  $\Upsilon$  Mesonen am Tevatron und LHC bietet einen guten Zugang zur Gluonverteilung bei kleinen  $x$  und kann darüber hinaus zur Kalibration von theoretischen Rechnungen für andere exklusive Endzustände dienen. Im dominanten Reaktionsmechanismus wird von einem der Strahlteilchen (Proton oder Antiproton) ein quasi-reelles Photon abgestrahlt, das mit dem zweiten Strahlteilchen kollidiert. In [arXiv:0805.2113] wurden der hadronische Teil der Reaktion in einem Dipolmodell beschrieben und dessen Parameter an HERA Daten angepasst. Durch kinematische Extrapolation wurden damit Vorhersagen für LHC und das Tevatron gewonnen. Im gleichen Formalismus wurde auch die Produktion eines Z Bosons an diesen Collidern berechnet, für deren Untersuchung bei HERA die vorhandene Kollisionsenergie nicht ausreichend groß war.

## Produktion von Hadronen

Im Rahmen der QCD wird die inklusive Hadronenerzeugung durch Fragmentationsfunktionen beschrieben. Diese enthalten langreichweitige Effekte der starken Wechselwirkung und werden – ähnlich wie Partonverteilungen – aus dem Vergleich von Theorie und experimentellen Daten extrahiert. Die Bestimmung von Fragmentationsfunktionen für  $\pi^+$ ,  $K^+$ ,  $p$ ,  $K_S$ ,  $\Lambda$  und deren Antiteilchen konnte wesentlich verbessert werden. Einerseits wurden erstmals Daten von Hadron-Collidern einbezogen, nämlich von RHIC und vom Tevatron. Andererseits wurden Hadronmasseneffekte konsistent berücksichtigt und führende Logarithmen bei großen  $x$  in den Koeffizientenfunktionen und den Evolutionsgleichungen aufsummiert [DESY 08-058].

Das transversale Impulsspektrum und die azimutale Winkelverteilung produzierter Hadronen enthalten detaillierte Information über den zugrundeliegenden Reaktionsmechanismus. Der Übergang von kleinen

zu großen Transversalimpulsen entspricht dabei dem Übergang von langreichweitiger zu kurzreichweitiger Dynamik und damit von einer nicht-störungstheoretischen zu einer störungstheoretischen Beschreibung. In [DESY 08-023] wurde der Zusammenhang dieser Beschreibungen systematisch untersucht und die Möglichkeit ihrer Kombination im Bereich intermediärer Transversalimpulse diskutiert.

## Strahlungskorrekturen

Die starke Kopplungskonstante  $\alpha_s$  wird üblicherweise im Renormierungsschema der modifizierten minimalen Subtraktion ( $\overline{\text{MS}}$ ) definiert. Da die  $\beta$ -Funktion in diesem Schema massenunabhängig ist, werden effektive Quantenfeldtheorien mit unterschiedlicher Zahl von Quark Flavours eingeführt, die an den Quarkschwellen durch störungstheoretisch zu berechnende Anpassungsbedingungen zusammengefügt werden. Diese Prozedur wird im Impulssubtraktionsschema (MOM) vermieden, wobei die  $\beta$ -Funktion jedoch eine komplizierte Abhängigkeit von den verschiedenen Quarkmassen erhält. Der Zusammenhang dieser beiden Definitionen von  $\alpha_s$  wurde erstmals zu drei Quantenschleifen untersucht [DESY 08-184].

Die Produktion von Gluino- und von Squark-Antisquark Paaren ist ein vielversprechender Kanal für die Suche nach Supersymmetrie am LHC. Der integrierte Wirkungsquerschnitt könnte insbesondere zur Massenbestimmung der neuen Teilchen dienen, was allerdings eine präzise theoretische Beschreibung voraussetzt. Es ist bekannt, dass in der supersymmetrischen QCD große NLO Korrekturen für diese Prozesse auftreten. Verantwortlich dafür sind die Effekte weicher Gluonen, die zu großen Logarithmen führen, wenn der partonische Streuprozess in der Nähe der kinematischen Schwelle für die Produktion der schweren Teilchen stattfindet. In [DESY 08-096] wurden die entsprechenden führenden und nächstführenden Logarithmen (NLL) aufsummiert. Die Schwellenlogarithmen vergrößern den Wirkungsquerschnitt für Gluino-Paar Produktion um ca. 10 % bei Gluionmassen um 1 TeV, und die Resummation liefert

eine deutlich verringerte theoretische Unsicherheit im Vergleich mit der bisherigen NLO Rechnung.

## Instantonprozesse

Instantonen stellen einen grundlegenden nicht-perturbativen Aspekt der QCD dar. Eine besondere Herausforderung ist hierbei das Verständnis der Instanton-Größenverteilung  $d(\rho)$ . Während im Bereich kleiner Instantonen eine parameterfreie Übereinstimmung von Gitterergebnissen mit der Instanton-Störungstheorie gefunden wurde, findet man für größere Instantonen schnell eine dramatische Diskrepanz. In der Instanton-Störungstheorie wächst das Gewicht größerer Instantonen unbegrenzt an, während die Gitterdaten einen scharfen Peak bei  $\rho = \langle \rho \rangle \approx 0.6$  fm aufweisen, gefolgt von einer starken Unterdrückung großer Instantonen jenseits des Peaks.

Vor diesem Hintergrund wurde eine residuelle konforme Raum-Zeit Inversionssymmetrie ausführlich untersucht [DESY 08-17]. Diese wird nahegelegt sowohl durch die empirische Symmetrie der Gitterdaten für  $d(\rho)$  unter einer Inversion  $\rho \rightarrow \langle \rho \rangle^2 / \rho$  der Instantongröße, als auch durch die bekannte Gültigkeit dieser Symmetrie im klassischen Instanton-Sektor. Der Instanton-Calculus wurde zunächst auf die vierdimensionale Oberfläche einer fünfdimensionalen Kugel projiziert. Diese Projektion auf eine kompakte, gekrümmte Geometrie vermeidet Divergenzen und dient zur Einführung der mittleren Instantongröße  $\langle \rho \rangle$  aus den Gitterdaten als neue Längenskala. Dabei wird  $\langle \rho \rangle$  mit dem Radius  $b$  der fünfdimensionalen Kugel identifiziert und spielt die Rolle des konformen Inversionsradius. Für  $b = \langle \rho \rangle$  konnte eine fast perfekte  $\rho \rightarrow \langle \rho \rangle^2 / \rho$  Inversionssymmetrie der Größenverteilung gezeigt werden, in guter qualitativer Übereinstimmung mit den Gitterdaten. Für  $\rho/b \rightarrow 0$  erhält man die bekannten Ergebnisse der Instanton-Störungstheorie für die flache vierdimensionale Raumzeit zurück. Es wurde gezeigt, dass eine (schwach gebrochene) konforme Inversionssymmetrie auch attraktive Konsequenzen für die QCD jenseits von Instantonen hat. Als weiterer erfolgreicher Symmetrietest wurden überraschende Implikationen

für eine weitere Instanton-dominierte Gitterobservable vorgestellt [DESY 08-17].

## QCD und Stringtheorie

Die Hypothese einer Dualität zwischen der  $N = 4$  supersymmetrischen Quantenfeldtheorie und einer  $AdS_5$  Stringtheorie ist Gegenstand zahlreicher aktueller Untersuchungen. In [DESY 08-044] wurden Korrelationsfunktionen von sog. R-currents eingeführt, die sowohl in der Quantenfeldtheorie als auch in der Stringtheorie definiert sind. In einem ersten Schritt wurde der Hochenergie-Grenzwert auf der feldtheoretischen Seite analysiert. Am dualen Analogon auf der String-Seite wird zurzeit gearbeitet.

Basierend auf dieser Dualitätshypothese ist von Bern, Dixon und Smirnow eine Vermutung formuliert worden, nach der die  $n$ -Gluon Streuamplitude in der  $N = 4$  supersymmetrischen Feldtheorie in der planaren Näherung zu allen Ordnungen der Kopplung eine besonders einfache (exponentielle) Form hat, und es wurde eine explizite Formel angegeben. In [DESY 08-015] und [DESY 08-073] wurde dieser Vorschlag mit aus der QCD bekannten Resultaten verglichen. Dabei wurden Diskrepanzen gefunden, aus denen sich erste Anhaltspunkte für eine Korrektur dieser Formel ergeben könnten.

## Gittereichtheorie

Die numerische Lösung der starken Wechselwirkung im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) hat in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte gemacht. Die Kombination von verbesserten Gitter-Wirkungen mit der Weiterentwicklung von numerischen Algorithmen und mit neuen Computern im mehreren hundert TeraFlops- bis PetaFlops-Bereich macht es möglich, die Ziele zu erreichen, die zum Teil schon vor dreißig Jahren formuliert wurden. Das heißt, es ist jetzt möglich, die Effekte der dynamischen Quarks in der Nähe der physikalischen Quarkmassen zu berücksichti-

gen, und dabei auch die Fehler von Gitterartifakten und vom endlichen Volumen zu kontrollieren.

In einer großen europäischen Kollaboration (*European Twisted Mass Collaboration: ETMC*) mit mehr als 40 Teilnehmern aus 9 Ländern wurden numerische QCD-Simulationen begonnen, die außer den u-, d- und s-Quarks auch dynamische c-Quarks berücksichtigen. Dabei wird die sog. *Twisted-Mass-Formulierung* verwendet, die eine verbesserte chirale Symmetrie bei nicht-verschwindender Gitterkonstante aufweist und damit eine leichtere Extrapolation zum Kontinuumslimit ermöglicht. In einem ersten Schritt wurden verschiedene verbesserte Gitter-Wirkungen ausprobiert und nach der Auswahl der Wirkung die Simulationsparameter festgelegt [DESY 08-137].

In einer Kollaboration mit dem Institut für Theoretische Physik der Universität Münster wurde QCD mit einem Quark-Flavour ( $N_f = 1$ ) und die Supersymmetrische Yang-Mills (SYM) Theorie untersucht. Das Spektrum der Hadronen hat in diesen beiden Theorien gewisse Ähnlichkeiten miteinander [DESY 08-143,08-144]. Die Struktur der Singularitäten bei verschwindender Fermionmasse und die daraus folgenden Phasenübergänge stellen interessante Fragen für die numerischen Simulationen. In unseren Arbeiten haben wir verbesserte Wilson-Wirkungen verwendet. Das ermöglicht die Bestimmung des Hadron-Spektrums in wesentlich grösseren Gitter-Volumina als in unseren früheren Arbeiten und in den Berechnungen anderer Gruppen mit der Domainwall-Wirkung.

## B-Physik

Die Physiker Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa wurden 2008 mit dem Physik Nobelpreis geehrt. Kobayashi und Maskawa erhielten den Preis für die Entdeckung des Mechanismus zur Brechung der CP Symmetrie in der elektroschwachen Wechselwirkung, welcher die Existenz von mindestens drei Quarkfamilien, nämlich den Quark-Doublets (u,d), (c,s) und (t,b), vorhersagt. Der KM-Mechanismus für CP-Verletzung erfordert die Einführung einer  $(3 \times 3)$ -

Quarkmischungsmatrix, die als Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix bekannt ist. In den vergangenen Jahren standen Arbeiten zur CP-Verletzung in Zerfällen von B-Mesonen im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses [Physik J. 7N12:22-25,2008]. Außerdem haben die Experimente BELLE am KEK und BABAR am SLAC, sowie Experimente am Fermilab ein reiches Forschungsprogramm absolviert, das unter anderem Präzisionsmessungen der CKM Matrixelemente  $V_{ub}$ ,  $V_{cb}$ ,  $V_{td}$ , und  $V_{ts}$  ermöglicht hat. Die LHC-Experimente (ATLAS, CMS und LHC-B) werden ein genaues Bild der Physik von  $B_s$ -Mesonen und b-Baryonen liefern, sowie das Matrixelement  $V_{tb}$  und andere Eigenschaften des t-Quarks quantitativ untersuchen.

Flavourphysik, vor allem B-Physik, ist auch ein fester Bestandteil der theoretischen Arbeiten in der Theoriegruppe, die sich in der Auswertung der experimentellen Ergebnisse bewährt haben. Grundlage dieser Untersuchungen sind effektive Theorien, die eine störungstheoretische Formulierung der starken Wechselwirkung (QCD) zulassen. Eine dieser Theorien ist die sogenannte *Heavy Quark Effective Theorie (HQET)*, die es erlaubt, für die B-Zerfälle, eine systematische  $1/m_b$ -Entwicklung der QCD-Lagrangedichte und der Übergangmatrixelemente durchzuführen. Im Berichtszeitraum wurden die next-to-next-to-leading order (NNLO) störungstheoretische Effekte für den Zerfall  $B \rightarrow X_u \ell \nu_\ell$  berechnet [DESY 08-145, arXiv:0810.0987, arXiv:0810.2921]. Diese Arbeiten erlauben es, theoretische Unsicherheiten in der Bestimmung des Matrixelements  $V_{ub}$  erheblich zu reduzieren und eine Präzisionsmessung durchzuführen.

Die auf effektiven Theorien basierten Methoden wurden auch dazu benutzt, eine präzise Theorie der Pinguin-induzierten Übergänge zu erzielen, die einerseits die Quantenstruktur des Standardmodells (SM) festlegen und andererseits für die Suche nach der Physik jenseits des Standardmodells (BSM) von größtem theoretischen Interesse sind. In diesem Zusammenhang wurden die Zerfälle  $B \rightarrow K^* \gamma$  und  $B_s \rightarrow \phi \gamma$  in  $O(\alpha_s^2)$  im SM berechnet [arXiv:0806.4846], wobei die Ergebnisse mit den experimentellen Messungen gut verträglich sind. Diese Methoden wurden auch für die Untersuchung der Zerfälle  $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$  in NNLO erweitert. Hier-

bei liefern die sog. Annihilations-Amplituden wichtige Beiträge, die früher nur in der führenden Ordnung (LO) bekannt waren. Effektive Theorien haben es erlaubt, die Faktorisierung der Annihilations-Amplituden (in lang- und kurzzeitigen Teilen) in NLO durchzuführen. Diese Arbeit wird es ermöglichen, vor allem die CP- und Isospin-verletzenden Asymmetrien in den Zerfällen  $B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma$  genauer zu quantifizieren.

Wie schon berichtet, wurden theoretische Abschätzungen für die Zerfälle  $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$  in NNLO in der Gruppe Theorie unternommen und wurden über die Jahre verbessert [DESY 99-146, hep-ph/9910221, DESY 01-217, hep-ph/0112300, DESY 06-002, hep-ph/0601034]. Diese theoretische Vorhersagen wurden im Jahre 2008 nun erstmals durch die Experimente BABAR und BELLE geprüft. Hier spielen die Verteilungen in der dileptonischen invarianten Masse  $dBF(q^2)/dq^2$  sowie in der sog. Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie  $A_{FB}(q^2)$  eine wichtige Rolle. Ein Vergleich der BELLE Messungen für die letztere Verteilung mit den obengenannten theoretischen Arbeiten (SM und eine Variante von Supersymmetrie) ist in Abb. 82 zu sehen. Das LHC-B Experiment wird  $A_{FB}(q^2)$  viel genauer unter die Lupe nehmen und könnte wichtige Beweise für die BSM-Physik liefern.

Die Erzeugung von B-Hadronen in der  $e^+e^-$ -Annihilation auf der Z-Boson-Resonanz bei LEP und SLC ermöglichte eine Präzisionsmessung der  $Zb\bar{b}$ -Kopplung, welche effektiv durch den elektroschwachen Mischungswinkel  $\theta_{\text{eff}}^{b\bar{b}}$  charakterisiert wird. Diese Messung kann mit einem zukünftigen  $e^+e^-$ -Linearbeschleuniger, welcher für gewisse Zeit auf der Z-Boson-Resonanz betrieben wird (GigaZ), noch deutlich verbessert werden. Die Klasse von elektroschwachen Quantenkorrekturen mit zwei Schleifen, die eine geschlossene Fermionschleife enthalten, wurden erstmals berechnet. Hierzu wurden drei verschiedene Methoden unabhängig angewandt und miteinander verglichen: die asymptotische Entwicklung, der seminumerische Bernstein-Tkachov-Algorithmus und ein auf Dispersionsrelationen basierendes Verfahren. Für eine Higgsmasse nahe der unteren Schranke,  $M_H \approx 115$  GeV, ist die Korrektur relativ groß,  $\mathcal{O}(10^{-4})$  [DESY 08-037].

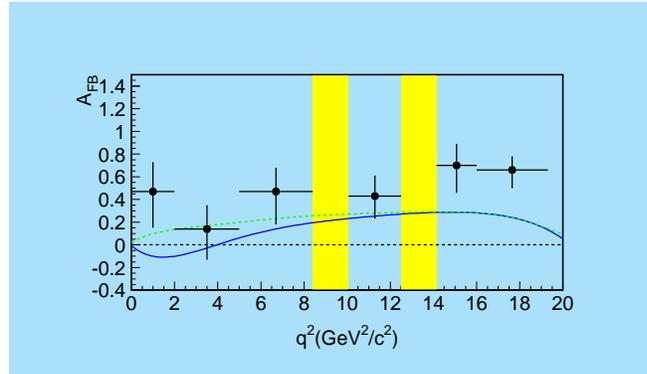


Abbildung 82: Die von BELLE gemessene Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie  $A_{FB}$  als Funktion von  $q^2$  (Punkte mit Fehlerbalken) und deren Vergleich mit der Vorhersage des Standardmodells (durchgezogene Linie) bzw. mit einer supersymmetrischen Erweiterung (gepunktet).

## Collider Physik

Verteilungen durch super-QCD-Strahlungskorrekturen beeinflusst, die theoretisch berechnet worden sind, um die maximale experimentelle Auflösung der Spektren zu gewährleisten [DESY 09-030].

Die Yukawa-Kopplung von Gluinos an Squarks und Quarks in der super-QCD kann an  $e^+e^-$ -Linearcollidern in Quark-Squark-Gluino-Endzuständen gemessen werden. Der Vergleich mit Standard-QCD-Prozessen erlaubt es, die Identität von Yukawa- und Eich-Kopplungen zu prüfen, eine der fundamentalen Vorhersagen der Supersymmetrie [DESY 08-076].

Gluinos sind selbst-konjugierte Majorana-Teilchen in der minimalen  $N = 1$ -Supersymmetrie. Diese Eigenschaft erlaubt mannigfache Reaktionen, die in der Dirac-Darstellung der Gluinos verboten wären. Ein klassisches Paradigma ist die Produktion von Squark-Squark-Paaren in Quark-Quark Kollisionen am LHC, die durch Gluino-Austausch vermittelt wird. Für Majorana-Theorien, im Gegensatz zu Dirac-Theorien, wird damit eine hohe Anzahl gleichnamig geladener Lepton-Paare vorhergesagt, deren Beobachtung al-

so den Majorana-Charakter der Gluinos signalisiert [DESY 08–113].

Dirac-Gluinos können in der erweiterten  $N = 2$ -Supersymmetrie auftreten. Sie werden begleitet von skalaren Farb-Oktett-Teilchen, die sowohl einzeln als Resonanz-Formation wie paarweise mit hohen Raten in Gluon-Gluon-Kollisionen erzeugt werden können. Die Paarproduktion führt zu hohen Jet-Multiplizitäten und einem hohem Defizit im Transversalimpuls. Diese Signaturen, wie auch die Resonanz-Formation, weichen in spektakulärer Weise von der minimalen Supersymmetrie ab [DESY 08–188].

## Teilchenphysik und Kosmologie

### Inflation und Moduli-Stabilisierung in der Stringtheorie

Das Problem von Moduli-Stabilisierung in einem de Sitter Vacuum und die Realisierung von Inflation in der Stringtheorie sind sehr stark miteinander verknüpft. In der Tat, in beiden Fällen hat man eine positive Vakuumenergie und das Potential muß entweder ein lokales Minimum oder eine sehr flache Region ausweisen. Dieses Problem wurde im Berichtszeitraum in den  $N=1$  4D Supergravitationmodellen untersucht, die in orientifold oder heterotischen Kompaktifizierungen realisiert werden können. Es wurde gezeigt, dass eine notwendige Bedingung für die Existenz von de Sitter Vakua, nämlich die Positivität der Massenmatrix in der Goldstino-Feldrichtung, eine Schranke für die sektionale Kählerkrümmung bedingt, die nur vom Kählerpotential abhängt. Für den Spezialfall eines no-scale Kählerpotentials wurden Modelle mit zwei Feldern studiert, wobei einige gefunden wurden, die obige Bedingung entsprechen erfüllen [DESY 08-038]. Es wurde in diesem Rahmen ein lokales Superpotential konstruiert, das ein de Sitter metastabiles Minimum hat [DESY 08-198]. Eine sehr ähnliche Analyse ist auch für die inflationäre Phase möglich und erlaubt eine Reformulierung des Eta-Problems in eine noch stärkere Bedingung für die sektionale Krümmung [DESY 08-59].

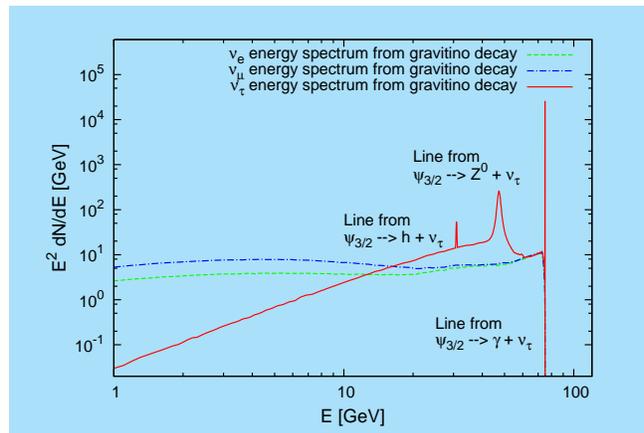


Abbildung 83: Neutrinospektren vom Gravitinozerfall, für eine Gravitinomasse von 150 GeV und eine Lebensdauer von  $10^{26}$  s. Die drei Linien resultieren aus den drei Zweikörperzerfällen des Gravitino in ein Tau-Neutrino und ein leichtes Higgsboson, in ein Tau-Neutrino und ein Z-Boson, bzw. in ein Tau-Neutrino und ein Photon. Das kontinuierliche Spektrum folgt aus der Fragmentation von Z-Bosonen, W-Bosonen und Taus.

### Gravitino als Dunkle Materie

In Falle des Gravitinos als Dunkle Materie Kandidat mit erhaltener R-Parität kann das nächst-leichteste supersymmetrische Teilchen auch ein geladenes Skalar teilchen sein. Dann ist die Frage, wie groß die Dichte von einem solchen Teilchen nach der Entkopplung ist und ob die Nukleosynthese in Gefahr ist, wenn es zerfällt. Im Berichtszeitraum wurde daher die Dichte von einem elektromagnetisch- oder farbgeladenen Skalar neu gerechnet, inklusive dem Sommerfeld Faktor [DESY 08-035]. Für Szenarien mit R-Parität Brechung wurde hingegen das Signal aus dem Gravitino Zerfall in Neutrinos berechnet [DESY-08-122] und mit dem atmosphärischen Neutrino-Hintergrund und den experimentellen Sensitivitäten aktueller und zukünftiger Neutrinodetektoren verglichen (siehe Abb. 83).

### Kosmische Strahlung

Ursprung und Ausbreitung hochenergetischer geladener kosmischer Strahlung sowie neutraler Sekundärteilchen wie hochenergetische gamma-Strahlung und Neu-

trinos bilden einen wichtigen Aspekt der Theorie in Hamburg. Hierzu wird CRPropa, ein unter der Adresse <http://apcauger.in2p3.fr/CRPropa/index.php> öffentlich verfügbarer numerischer Code, weiterentwickelt. Insbesondere wurde 2008 Release dieses Codes steht kurz bevor. Dies soll einen wichtigen Beitrag zum Pierre Auger Experiment liefern, das Hinweise von Kernen in der hochenergetischen kosmischen Strahlung gefunden hat und an dem ein Teil der Gruppe als assoziierte Mitglieder beteiligt sind [arXiv:0806.4302].

Ferner wurden neue Einschränkungen an mögliche Verletzungen der Lorentz-Symmetrie aus der chemischen Zusammensetzung höchstenergetischer kosmischer Strahlung abgeleitet [arXiv:0807.1210]. Diese Schranken sind wegen der extremen Lorentz-Faktoren oft wesentlich stärker als frühere Schranken, die auf Laborexperimenten basieren.

Ein weiteres wichtiges Thema besteht in der indirekten Detektion von dunkler Materie. Die Annihilation von dunkler Materie in Form von noch nicht entdeckten schwerer Teilchen, deren Existenz aber von vielen Erweiterungen des Standard-Modells der Elementarteilchenphysik vorausgesagt werden, können zu interessanten und detektierbaren Signaturen in den Flüssen hochenergetischer geladener kosmischer Strahlung, elektromagnetische Strahlung und Neutrinos führen. Insbesondere produzieren dabei erzeugte Elektronen und Positronen in kosmischen Magnetfeldern auch Synchrotronstrahlung, deren Leistungsspektrum auf kleinen Winkelskalen im Hinblick ihrer Unterscheidbarkeit von astrophysikalischen Quellen untersucht wurde [arXiv:0807.3429].

Supernovae des Typs II bilden eine wichtige Quelle von Neutrinos, insbesondere für zukünftigen Detektoren der Megatonnen-Skala. Wegen der hohen Dichte von Materie und Neutrinos in diesen Quellen oszillieren Neutrinos verschiedener Flavours in komplexer, nichtlinearer Weise. Hierzu wurde insbesondere die Dekohärenz solcher Oszillationen näher untersucht [arXiv:0807.0659].

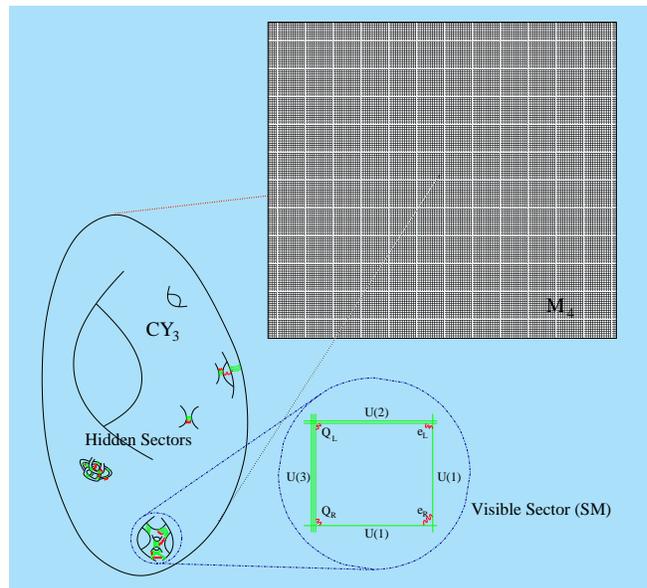


Abbildung 84: In Kompaktifizierungen von Typ-II Stringtheorien wird das Standardmodell (SM) durch D-Branen realisiert, welche sich in den extra Dimensionen überschneiden. Im allgemeinen gibt es auch versteckte Sektoren, welche in den extra Dimensionen vom sichtbaren Sektor separiert sind [DESY 08-149].

## Vereinheitlichte Theorien

### Axionen und andere Leichtgewichte

Vereinheitlichte Erweiterungen des Standardmodells sagen oft neue Symmetrien und Teilchen voraus, welche elegante Lösungen unserer theoretischen Bedenken (*Natürlichkeit, Hierarchie von Energieskalen, ...*) sowie Kandidaten für den *dunklen Sektor* liefern. Interessanterweise gibt es in diesen Erweiterungen oft viel mehr Teilchen als ursprünglich gefordert. Darüber hinaus könnten diese neuen Teilchen auch sehr leicht sein, sofern sie nur sehr schwach, über Strahlungskorrekturen, welche schwere Vermittlerteilchen involvieren, mit den Teilchen des Standardmodells wechselwirken, d.h. einem *versteckten Sektor* angehören. Solche Sektoren ergeben sich in natürlicher Weise in Einbettungen des Standardmodells in die Stringtheorie (siehe Abbildung 84). Die Suche nach Effekten von leichten, versteckten Teilchen, wie z. B. Axionen, versteckten

Photonen, und minigeladenen Teilchen, in astrophysikalischen und kosmologischen Umgebungen [DESY 08-045,08-130,08-128,08-154,08-183], sowie im Labor [DESY 08-046,08-069,08-105], wie etwa beim ALPS Experiment am DESY, liefert eine zum LHC komplementäre Weise, etwas über eine eventuelle Vereinheitlichung der fundamentalen Kräfte zu erfahren [DESY 08-061,08-149]. So hängt etwa die Stärke der Mischung von sichtbaren und versteckten Photonen in Stringkompaktifizierungen von der Geometrie der extra Dimensionen, insbesondere vom Volumen und damit vom Wert der Stringskaala, sowie von der Raumverzerrung ab [DESY 08-026].

## Majorana Neutrino-Physik

Die Natur der Neutrinos (Majorana versus Dirac) ist bisher experimentell nicht geklärt. Es gibt aber theoretische, insbesondere auf Vereinheitlichten Theorien basierende Überlegungen, die Neutrinos als Majorana-Teilchen zu betrachten, da die winzig kleinen Neutrinomassen, die aller Wahrscheinlichkeit nach im Milli-elektron-Volt (meV) Bereich liegen, auf einen anderen Mechanismus für die Erzeugung ihrer Masse hinweisen (Seesaw-Mechanismus) als demjenigen, der für die üblichen Fermionenmassen verantwortlich ist (Higgs-Mechanismus). Der experimentelle Nachweis des sog. neutrinolosen Doppelbetazerfalls ( $0\nu 2\beta$ ) eines Nukleons,  $N_i(A, Z) \rightarrow N_f(A, Z + 2) + e^- + e^-$ , wird hier eine entscheidende Rolle spielen. In Modellen der Physik jenseits des Standardmodells (BSM) könnten aber winzige nichtrenormierbare Terme vorhanden sein, die die Leptonzahl verletzen und als Folge davon auch den  $0\nu 2\beta$ -Zerfall bewirken. Beispiele der BSM-Physik sind R-Paritäts-verletzende SUSY Prozesse, Leptoquarks und doppelgeladene Higgs-Teilchen  $H^{++}$  und  $H^{--}$ . Daher müssen Messungen unternommen werden, die es ermöglichen, die unterschiedlichen Mechanismen des  $0\nu 2\beta$ -Zerfalls zu unterscheiden. In diesem Zusammenhang wurde die Winkelverteilung  $d\Gamma/d\cos\theta \propto (1 - K \cos\theta)$ , wobei  $\theta$  der Winkel zwischen den Elektronen im Ruhesystem des zerfallenden Nukleus ist, ausgearbeitet. Die Abschätzung von  $K$  ist weitgehend unabhängig von den kernphysikalischen,

und damit schwer zu quantifizierenden Aspekten des Zerfalls, hängt aber stark von den unterliegenden Mechanismen ab (Majorana-Neutrino versus BSM Effekte). Die Werte des Winkelkorrelators  $K$  wurden für fünf verschiedenen relevante Kerne, ( $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{130}\text{Te}$  und  $^{136}\text{Xe}$ ), berechnet [arXiv:0801.2512 und arXiv:0706.4165]. Diese Winkelkorrelators werden in einigen der geplanten Experimente, z. B. NEMO3, gemessen werden, falls die Lebensdauer des ( $0\nu 2\beta$ -Zerfall messbar ist.

## Stringtheorie

Im Vordergrund der stringtheoretischen Forschung am DESY stand im vergangenen Jahr wieder die sogenannte AdS/CFT Dualität. Dabei handelt es sich um eine hochinteressante Beziehung zwischen gewöhnlichen Eichtheorien auf der einen, und Stringtheorien auf der anderen Seite. Um mit Hilfe der AdS/CFT Dualität Einsichten in eichtheoretische Größen bei endlicher Eichkopplung zu erhalten, müssen ganz neuartige Stringtheorien konstruiert werden. Eine zentrale Herausforderung ist die Quantisierung von Strings in dem 10-dimensionalen Hintergrund  $\text{AdS}_5 \times S^5$ . Dieser setzt sich zusammen aus einer 5-dimensionalen Sphäre  $S^5$  und dem Anti-de-Sitter Raum  $\text{AdS}_5$ , einem nicht-kompakten Raum mit konstanter negativer Krümmung. Über die AdS/CFT Korrespondenz ist die Stringtheorie in  $\text{AdS}_5 \times S^5$  verknüpft mit einer speziellen supersymmetrischen Eichtheorie, der  $N = 4$  super Yang-Mills Theorie.

Im Berichtszeitraum waren Mitarbeitern der DESY Theorie maßgeblich an den Entwicklungen dieses Gebietes beteiligt. Ein zentraler Ansatzpunkt war dabei unter anderem die Untersuchung von Modellen, die die Bewegung von Strings auf Sphären und deren supersymmetrischen Verallgemeinerungen beschreiben. Als exemplarisch für eine zukünftige Behandlung der Stringtheorie auf  $\text{AdS}_5 \times S^5$  gilt insbesondere die Analyse in [DESY-08-193]. In dieser Arbeit wurden nichtlineare Integralgleichungen zur Berechnung des Energiespektrums des nichtlinearen Sigma-Modells zur Gruppe  $O(4)$  hergeleitet. Solche Integralgleichungen

dienen als Ausgangspunkt für eine außerordentlich effiziente numerische Bestimmung des Energiespektrums. Frühere Ergebnisse anderer Gruppen konnten mit den neu entwickelten Techniken reproduziert und dann auf beliebige Zustände des Modells erweitert werden.

Ganz andere Techniken kamen bei der Untersuchung von supersymmetrischen Varianten der  $O(N)$  Modelle zum Einsatz [DESY-08-123]. In diesem Falle gelang es, gewisse Spektren vollständig analytisch zu bestimmen. Bei der Analyse der resultierenden Spektren wurde dann eine erstaunliche Beobachtung gemacht: Es stellte sich heraus, dass die supersymmetrischen  $O(N)$  Modelle bei sehr starker Kopplung eine duale Beschreibung als schwach gekoppelte Feldtheorie zulassen. Beziehungen dieser Art sind in der Theorie 2-dimensionaler Quantensysteme grundsätzlich nicht neu und haben weitreichende Konsequenzen. Auch in einem anderen Fall gelang Mitarbeitern der DESY Theoriegruppe im vergangenen Jahr der Beweis einer solchen Dualität [DESY-08-062]. Hier allerdings kam die Beziehung nicht unvermutet: Die so genannte FZZ-dualität zwischen dem 2-dimensionalen Euklidischen schwarzen Loch und der so genannten Sine-Liouville Theorie war vor über zehn Jahren als Vermutung formuliert worden, hatte sich aber einer vollständigen Herleitung seither widersetzt. Im Zusammenhang mit der AdS/CFT Korrespondenz könnten derartige Dualitäten den Zugang zur störungstheoretischen Eichtheorie auf eine völlig neue Grundlage stellen.

Ein Teil der in den beiden letzten Absätzen beschriebenen Entwicklungen wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 676 so weit vorangetrieben, dass sich bereits wichtige Anwendungen auf die  $N=4$  super Yang-Mills Theorie ergaben. In [DESY-09-018] gelang es in eindrucksvoller Weise, die anomalen Dimensionen von Operatoren der super Yang-Mills Theorie bis in beliebig hohe Ordnung zu berechnen. Damit ist ein entscheidender Durchbruch zur Anwendung stringtheoretischer Techniken auf die Eichtheorie gelungen.

Sehr zentralen Anteil an den Entwicklungen der Arbeitsgruppe hatte auch das durch die EU finanzierte Marie-Curie Exzellenz-Team von Jörg Teschner. Ende 2007 wurde das Team durch die Postdoktoranden

G. Niccoli und D. Ridout vervollständigt. Auch dieser Teil der String-Theorie Arbeitsgruppe befasst sich mit der Lösung von integrablen Modellen, die neben ihrer Anwendung auf Stringhintergründe auch für die Theorie der kondensierten Materie relevant sind (z. B. [arXiv:0803.3305 [hep-th]], [arXiv:0810.2920 [hep-th]]). Dabei stehen skaleninvariante Sigma-Modelle im Vordergrund. Obwohl in den vergangenen Jahrzehnten bereits leistungsstarke Techniken zur Lösung solcher Modelle entwickelt wurden, stellen die aktuellen Anwendungen gänzlich neue Herausforderungen. Tatsächlich besitzen viele der relevanten Modelle nicht genug Symmetrien, um sie mit den klassischen Methoden der konformen Feldtheorie lösen zu können. Ein wesentlicher neuer Aspekt des Programms ist es daher, die Methodik der integrablen Modelle auf die konformen Feldtheorien anwendbar zu machen. Das ist hochgradig nichttrivial, da sich mithilfe der traditionellen Methoden wie z. B. dem Bethe-Ansatz die konforme Invarianz nur sehr schwer nachweisen und ausnutzen lässt. Ein wichtiger erster Schritt in dem Programm zur Lösung der Sigma-Modelle ist daher die Entwicklung von effizienten Techniken, welche Integrabilität und wesentliche Aspekte der konformen Invarianz in einem einheitlichen Rahmen zu beschreiben und auszunutzen erlauben. In diesem Kontext stehen insbesondere die Arbeiten [arXiv:0811.3688 [hep-th], arXiv:0902.4825 [hep-th]].

Gerade für die Beschreibung nicht-kompakter Stringhintergründe, wie z. B.  $AdS_5$ , ist ein allgemeineres Verständnis nichtrationaler konformer Feldtheorien unabdingbar. In der Arbeit [arXiv:0803.0919] wird zu diesem Zwecke ein allgemeiner Formalismus zur Ausnutzung der chiralen Faktorisierung der konformen Feldtheorien für die Konstruktion von Korrelationsfunktionen entwickelt. Dieser Formalismus verallgemeinert und vereinheitlicht verschiedene Formalismen für rationale konforme Feldtheorien welche u. a. von Friedan und Shenker sowie Moore und Seiberg eingeführt worden sind. Ein zentrales Ergebnis dieser Arbeit ist die Identifizierung hinreichender Kriterien für die Existenz eines Skalarproduktes auf dem Raum der chiralen *Bausteine* der Korrelationsfunktionen, welches für die Theorie eine fundamentale Rolle spielt.

Neben der Untersuchung nichtrationaler konformer Feldtheorie spielten auch die Untersuchung nicht-unitärer Modelle eine zentrale Rolle. Die in derartigen Theorien generisch auftretenden logarithmischen Singularitäten erschweren die Konstruktion signifikant. Von der Lösung der für dieses Arbeitsfeld typischen Probleme [arXiv:0808.3530 [hep-th], arXiv:0808.3530 [hep-th]] erwartet man kurzfristig wichtige Anwendungen auf Probleme der statistischen Physik, wie z. B. auf die 2-dimensionale Perkolation. Auch Anwendungen auf die AdS/CFT Korrespondenz zeichnen sich ab und motivierten eine Serie weiterer Veröffentlichungen [DESY-08-062, arXiv:0809.0468 [hep-th], DESY-08-195].

Sehr erfolgreich waren Mitarbeiter der Theoriegruppe im vergangenen Jahr auch bei der Klassifikation und Konstruktion neuer Stringhintergründe, die den dreidimensionalen  $AdS_3$  enthalten [DESY-08-104, DESY-08-104]. Dazu wurden verschiedene neue Methoden entwickelt, um Lösungen der Feldgleichungen der 10- und 11-dimensionalen Supergravitation zu konstruieren. Anwendungen, z. B. auf die Beschreibung nichtrelativistischer Quantensysteme [DESY-09-006], wurden ebenso verfolgt wie methodische Aspekte.

Nicht unerwähnt bleiben sollen schliesslich auch die Beiträge der Arbeitsgruppe *Stringtheorie* am II. Theoretischen Institut der Universität Hamburg. Diese arbeitete im Berichtszeitraum an Fragen der Supersymmetrie und Supergravitation, an verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen sowie an Fragen der Stringkosmologie. Konkret wurden Kompaktifizierungen auf Mannigfaltigkeiten mit  $SU(3)$  und  $SU(2)$  Struktur untersucht [ZMP-HH/08-2], [JHEP 0805:023, 2008, arXiv:0801.1160 [hep-th]], [ZMP-HH/08-8], [JHEP 0812:052, 2008, arXiv:0810.4699 [hep-th]]. Die Stabilität von de Sitter Grundzuständen in supersymmetrischen Feldtheorien stellt sich als eine nicht-triviale Einschränkung sowohl in  $N=1$  Theorien [DESY 08-038], wie auch in  $N=2$  Theorien [ZMP-HH/08-16] heraus. Dadurch werden auch inflationäre Modelle insbesondere in Stringtheorien eingeschränkt [DESY 08-059].

## Mathematische Physik

In der Mathematischen Physik gab es im Berichtszeitraum die folgenden Entwicklungen:

Auf Mannigfaltigkeiten mit Flächenmaß wurde das Sonnensystem durch fast-metrische Geometrien modelliert [arXiv:0804.4067]. Es wurde gezeigt, dass die flächenmetrische Materiekopplung im Gegensatz zur metrischen die Konsistenz der  $\omega \rightarrow 0$  Brans–Dicke Gravitation mit der Physik des Sonnensystems impliziert.

Für eine bestimmte Klasse unendlich-dimensionaler Mannigfaltigkeiten wurde gezeigt, wie sich eine endlich-dimensionale Raumzeit als Grenzfall erhalten lässt [arXiv:0809.3111]. Es soll die Idee untersucht werden, ob sich klassische Feldtheorien auf der verfeinerten Geometrie in Quantentheorien auf der klassischen Geometrie übersetzen lassen.

Die Stabilität von Lösungen dynamischer Systeme wurde in geometrischer Formulierung betrachtet [arXiv:0810.5060]. Eine neue Definition von lokaler Stabilität wurde angegeben, die sich für dynamische Systeme zweiter Ordnung auf bekannte Theorie reduziert. Es wurde gezeigt, dass Lagrange-Systeme genügend geometrische Information tragen, um intrinsische Stabilitätskriterien zu definieren.

Die Rolle der Renormierungsgruppe in der perturbativen algebraischen Quantenfeldtheorie wurde analysiert, insbesondere im Hinblick auf Theorien über gekrümmten Raumzeiten. Hierbei wurde insbesondere der Zusammenhang zwischen der Wilsonschen Renormierungsgruppe und der Renormierungsgruppe nach Stückelberg und Petermann untersucht [arXiv:0901.2038].

Es wurde gezeigt, dass das Zeitschichtaxiom von perturbativ definierten Quantenfeldtheorien auf global hyperbolischen Raumzeiten erfüllt ist [arXiv:0802.1642].

Skalare Felder auf Robertson-Walker-Raumzeiten wurden untersucht. Dabei wurde eine neue Methode gefunden, vakuumähnliche Zustände und approximative thermische Gleichgewichtszustände zu konstruieren [DESY 08-006]. Weiter wurde die Freiheit bei der Wahl des Energie-Impuls-Tensors ausgenutzt, um eine

wohl definierte semiklassische Friedmann-Gleichung zu erhalten, und es wurde gezeigt, dass man die beobachtete Raumzeit mit dem gemessenen Wert der dunklen Energie durch dieses Modell beschreiben kann [DESY 08-199].

Die Rolle der Zeit als Observable in Quantentheorien wurde näher untersucht. Insbesondere das Konzept der relationalen Observablen in der Gravitationstheorie und eine intrinsische Zeitobservable in der Quantenkosmologie wurden studiert, mit dem Ergebnis, dass zum Beispiel der Zeitpunkt des Urknalls eine wohldefinierte Quantenobservable wird [DESY-THESIS-2008-045].

Das Konzept der lokal kovarianten Feldtheorie wurde auf konform invariante Quantenfeldtheorien erweitert. Dabei ergab sich, dass die ableitungsfreien Wickpolynome des skalaren Feldes konform kovariant definiert werden können, nicht aber Terme mit Ableitungen, bei denen die konforme Kovarianz durch Anomalien gebrochen ist [DESY 08-070].

## Internationale Zusammenarbeit und Drittmittelprojekte

In Kooperation mit europäischen Universitäten war die Hamburger Theoriegruppe an einem virtuellen Institut der Helmholtz Gesellschaft sowie an einer Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe beteiligt,

- VH-VI-106: *Particle Cosmology (VIPAC)*, Virtuelles Institut
- VH-NG-006: *Particle Physics and Cosmology*, Nachwuchsgruppe

Die Hamburger DESY Theorie ist maßgeblich an einem großen DFG-Sonderforschungsbereich (SFB 676), der Universität Hamburg über *Teilchen, Strings und frühes Universum: Struktur von Materie und Raum-Zeit* beteiligt. Sechs theoretische Projekte werden gemeinsam von Mitgliedern des Hamburger II. Instituts für Theoretische Physik und der Hamburger DESY Theorie geleitet. Vier theoretische Projekte betreffen ausschließlich das II. Institut für Theoretische Physik. In weiteren

SFB 676 Projekten geht es um eine Zusammenarbeit von Theoretikern mit Mitgliedern der experimentellen Institute.

DESY nimmt weiterhin am großen High Energy Physics Latinamerican-European Network (HELEN) zwischen der Europäischen Union und Latein Amerika teil. Hauptziel ist die Förderung der Ausbildung und des akademischen Austauschs von Hochenergiephysikern aus den 36 Mitgliedsinstitutionen. Die Koordination von HELEN bei DESY sowie eine Mitgliedschaft im HELEN Executive Board liegt bei der DESY Theorie in Hamburg.

Außerdem sind die folgenden Drittmittelprojekte zu nennen:

1. Stipendium (MEXT-CT-2006-042695) der EU-Kommission zum Aufbau eines Marie-Curie-Exzellenzteams *Non-linear Sigma Models in String Theory*
2. Marie Curie Excellence Chair für Theoretische Physik, Prof. Dr. Lev Lipatov
3. Helmholtz-Allianz (HA 101) *Physik an der Teraskala*
4. BMBF-Projektförderung (05 HT6GUA): *Theoretische Interpretation von Hochenergieexperimenten mit HERA, LEP und Tevatron sowie Vorhersagen für LHC und TESLA*,
5. DAAD-Programm *PROCOPE* mit École Polytechnique, Palaiseau, Frankreich,
6. Graduiertenkolleg der DFG (GRK 602): *Zukünftige Entwicklungen in der Teilchenphysik*,
7. Stipendium der Alexander von Humboldt Stiftung, Dr. C. Dappiaggi,

sowie zwei Forschungspreise und eine Reihe von DFG-Sachbeihilfen am II. Institut für Theoretische Physik. Die Hamburger Theoriegruppen sind ferner in mehrere Netzwerke der Europäischen Gemeinschaft eingebunden. Eine Reihe von Gastwissenschaftlern wurden durch verschiedene Drittmittel und Stipendien unterstützt. Deren Forschungsaufenthalte bei der Hamburger DESY-Theorie trugen maßgeblich zur stimu-

lierenden Forschungsatmosphäre in der Theoriegruppe bei.

## Organisation von Konferenzen

- ENTApP *European Network of Theoretical Astroparticle Physics*, March 2008, DESY Hamburg
- Workshop on *Brainstorming and Calculation-shop: Physics Case for a Low Energy Frontier*, June 2008, DESY Hamburg
- 22nd Workshop on *Foundations and Constructive Aspects of QFT*, June 2008, Hamburg
- 4th Patras Workshop on *Axions, WIMPs and WISPs*, June 2008, DESY, Hamburg
- Workshop on *Holonomy Groups and Applications in String Theory*, July 2008, Hamburg
- DESY Theorie workshop on *Dark matter at the crossroads*, October 2008, DESY Hamburg
- Workshop on *Applied 2d Sigma Models*, November 2008, DESY Hamburg.

## Aktivitäten in Zeuthen

### Perturbative Quantenfeldtheorie und Physik an Beschleunigern

In der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie standen Untersuchungen für Streuprozesse bei HERA, an  $e^+e^-$ -Collidern und am Large Hadron Collider (LHC) im Vordergrund, insbesondere die Berechnung von Quantenkorrekturen auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung (QCD) und der Quantenelektrodynamik (QED).

Am LHC-Beschleuniger des CERN werden einige Produktionsprozesse mit schweren Teilchen sehr genau gemessen werden, so dass Einschleifenkorrekturen dazu

berechnet werden müssen. Das erfordert die systematische Behandlung von Fünfpunkt- und Sechspunkt-Funktionen mit Tensorstrukturen. In einem konsequent algebraischen Zugang wurden Tensoren bis Rang 5 für die Sechspunkt-Funktionen und bis Rang 4 für die Fünfpunkt-Funktionen berechnet. Der Zugang vermeidet das Auftreten von inversen Potenzen der führenden Gramdeterminante. Ein Softwarepaket (hexagon) in Mathematica ist als Public Domain Software veröffentlicht, und für ein Fortran-Paket wird dies vorbereitet [arXiv:0812.2134, arXiv:0807.2984]. Das infrarote Divergenzverhalten von Fünfpunkt-Funktionen wurde mit der Mellin-Barnes-Integraldarstellung von Einschleifenamplituden untersucht [arXiv:0801.4228].

In der tiefinelastischen Streuung wurden die QCD Korrekturen zur Strukturfunktion  $F_3$  für Streuprozesse mit geladenen Strömen in dritter Ordnung berechnet [arXiv:0812.4168]. Die Effekte von schweren Quarks (Charm, Bottom) in den tiefinelastischen Daten von HERA und in der Bestimmung von Partonverteilungen wurde unter Berücksichtigung der QCD Korrekturen höherer Ordnung studiert [arXiv:0811.1412]. Außerdem wurde über Fortschritte bei der Berechnung der Evolution polarisierter Partonverteilungen zu drei Schleifen in QCD berichtet [arXiv:0807.1238]. Untersuchungen der Skalenevolution von Fragmentationsfunktionen zu NNLO in QCD wurden fortgeführt [arXiv:0807.0321] und Fragmentation im Vakuum und in einem hadronischen Medium studiert [arXiv:0804.2021].

Die Erwartungen am LHC an Vorhersagen der störungstheoretischen QCD wurden zusammengefasst [arXiv:0803.0457]. Theoretische Vorhersagen für die hadronische Produktion von Top-Quarkpaaren am LHC wurden deutlich verbessert, unter anderem durch Resummation [arXiv:0803.0494, arXiv:0804.1476, arXiv:0807.2794] und die Eigenschaften des Produktionsprozesses an der Schwelle wurden analysiert [arXiv:0812.0919]. Aktivitäten zu theoretischen Vorhersagen für Vielteilchen-Produktion zu NLO, beispielsweise am LHC, beinhalten die Automatisierung der Dipolsubtraktion zur Regularisierung von Infrarotdivergenzen [arXiv:0807.3701]. 2-Schleifen QED Korrekturen wurden für den Prozess  $e^+e^- \rightarrow Z^0/\gamma$

berechnet [arXiv:0812.1588]. Weitere Arbeiten betreffen die Extraktion von Beiträgen höheren Twists aus tiefinelastischen Streudaten [arXiv:0802.0408; arXiv:0807.0248] im Bereich großer Bjorken  $x$ . Für eine verlässliche Bestimmung müssen die Beiträge in NN-LO im führenden Twist berücksichtigt werden. Es wurden Korrekturen endlichen Impulsübertrages und von Targetmassen zu tiefinelastischen diffraktiven Prozessen [arXiv:0812.1899] berechnet.

Physikalische Hauptziele für die Kooperation zwischen Experiment und Theorie bei der weiteren Auswertung der tiefinelastischen Daten von HERA wurden in arXiv:0809.0549 formuliert. Einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildete die Berechnung der Korrekturen von Effekten schwerer Quarks in der tiefinelastischen Streuung. Die Kenntnis dieser Beiträge ist für die genaue Bestimmung der starken Kopplungskonstanten und der Parton-Verteilungsfunktionen aus den tiefinelastischen Streudaten bei HERA von Bedeutung. Die Berechnung der Korrekturen von 2. Ordnung in der starken Kopplungskonstanten für hinreichend große Virtualitäten, einschließlich von Renormierungseffekten, wurden abgeschlossen [arXiv:0803.0273, 0806.0451]. Für feste Mellin-Momente wurden erste Korrekturen 3. Ordnung berechnet [arXiv:0806.4613, 0812.2427]. Es wurden die strukturellen Relationen zwischen harmonischen Summen bis Gewicht  $w=6$  ermittelt [arXiv:0807.0700]. Diese Beziehungen erlauben die weitere Vereinfachung von Darstellung 1-skaliger Größen in quantenfeldtheoretischen Berechnungen bis zum 3-Schleifen Niveau.

## Nichtperturbative Quantenfeldtheorien

Die überwiegende Zahl der Eigenschaften der Hadronen ist perturbativen Methoden nicht zugänglich. Hierzu zählen neben dem Spektrum auch insbesondere Übergangsmatrixelemente und Formfaktoren, wie sie in der theoretischen Behandlung von elektromagnetischen Wechselwirkungen und schwachen Zerfällen von Hadronen auftreten. Insbesondere für die mögli-

che Entdeckung neuer Physik in B-Meson Zerfällen und Oszillationen sind diese Größen entscheidend. Die NIC-Gruppe in Zeuthen befasst sich daher mit der Weiterentwicklung und Anwendung von Gittereichtheorien, die einen numerischen, nichtperturbativen Zugang für diese Probleme darstellen.

Sowohl Energieniveau als auch Matrixelemente werden aus dem Verhalten von Korrelationsfunktionen bei großen (euklidischen) Abständen bestimmt. Ein besonders geeignetes Verfahren hierfür ist das sogenannte verallgemeinerte Eigenwertproblem. Es konnten nun erstmals sehr günstige Konvergenzeigenschaften dieser Methode bewiesen werden [arXiv:0808.1017].

Der Beweis zeigt auch auf, wie man das Verfahren am besten anwendet, um die numerische Präzision zu optimieren.

Eine wichtige Fehlerquelle der Gittereichtheorie sind Diskretisierungsfehler, d. h. Abweichungen vom Kontinuumsverhalten aufgrund der endlichen Auflösung der Raumzeit. Ihr theoretisches Verständnis wurde weiterentwickelt [arXiv:0807.1120] und ihre Größe wurde in einer Standarddiskretisierung numerisch untersucht [arXiv:0804.3383]. Solche systematischen Fehler können auch durch die sogenannte perturbative Verbesserung reduziert werden. Zu diesem Zweck wurden perturbative Rechnungen in der Gitterregularisierung durchgeführt [arXiv:0812.0503, arXiv:0808.1791].

Schwere Quarks, insbesondere das b-Quark lassen sich nicht direkt numerisch behandeln, sondern bedürfen einer Beschreibung durch effektive Theorien. Die nicht-perturbative *Heavy Quark Effective Theory* (HQET) wurde in der Vergangenheit in Zusammenarbeit mit der Universität Münster entwickelt. Ihre Anwendbarkeit wurde erneut genau geprüft [arXiv:0810.3166].

Charm Quarks lassen sich hingegen, wenn auch mit besonderem Aufwand, auf direkte Art simulieren. Hierzu wurden erste Rechnungen begonnen [arXiv:0810.0214], insbesondere auch im Hinblick auf leptonische Zerfälle der  $D_s$  Mesonen: zurzeit bestehen Unterschiede zwischen den experimentellen Messungen und ersten Rechnungen in der Gittereichtheorie. Die bei DESY

angesiedelten Rechnungen sollen die systematischen Unsicherheiten deutlich reduzieren.

Eine Serie von Arbeiten und Vorträgen befasste sich mit der Untersuchung von Quark- und Gluon-Korrelationsfunktionen in einer festen Eichung [arXiv:0812.3261, 0809.3741, 0809.2777, 0806.3124, 0804.2371, 0803.1798]. Ziel dieser Rechnungen ist es, die Qualität der verschiedenen Approximationen zu bestimmen, die in Kontinuumsfunktionalmethoden angewendet werden. Beispiele für solche Approximationen sind Trunkierungen der Schwinger-Dyson Gleichungen.

Als eine alternative Formulierung der Gitter-QCD, um Diskretisierungseffekte zu verringern, werden in der Zeuthener Gruppe sogenannte Twisted Mass Fermionen genutzt. Hier reicht die Feineinstellung eines einzigen Parameters aus, um die Diskretisierungsfehler physikalischer Größen von einer linearen Abhängigkeit im Gitterabstand zu einer quadratischen zu reduzieren.

Im Rahmen einer Europäisch angelegten Kollaboration, der *European Twisted Mass Collaboration* (ETMC), wird dieser Zugang zur Simulation der Gitter-QCD genutzt. Im letzten Jahr konnten so Simulationen bei vier Werten des Gitterabstandes mit jeweils 4-5 Quarkmassen und verschiedenen Volumina durchgeführt werden. [arXiv:0810.3807] Dies erlaubt eine Abschätzung der systematischen Effekte zur Erreichung des Kontinuum, des chiralen und des thermodynamischen Limes.

Eine grundlegende Untersuchung in Gitterrechnungen ist die Bestimmung des Baryonspektrums aus der reinen QCD heraus. Hier wurde für den Fall, dass zwei massenentartete Quarks betrachtet werden, gezeigt, dass das experimentell beobachtete Baryonspektrum tatsächlich aus den Simulationen folgt. Ein entscheidender nächster Schritt wird die Berechnung des Einflusses des Strange Quarks auf die Ergebnisse sein [arXiv:0803.3190].

Auf den erzeugten Rohdaten der Simulationen, den Konfigurationen, konnte eine Reihe von physikalischen Größen berechnet werden. Eine besonders interessante Größe ist die  $\eta$ -Mesonmasse. Dieses Meson erhält seine Masse zu einem großen Teil aus topologischen Effekten und es konnte in den Gitterrechnungen demonstriert

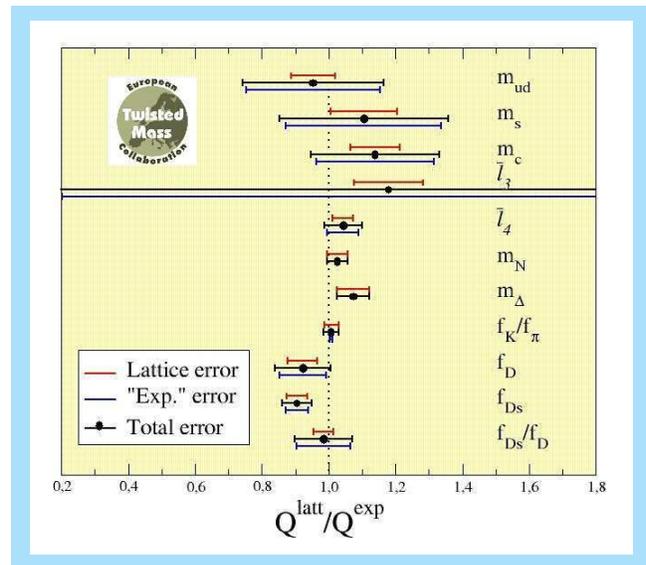


Abbildung 85: Ein Vergleich verschiedener physikalischer Größen aus dem particle data book ( $Q^{\text{exp}}$ ) und den nicht-perturbativen Gitterrechnungen von ETMC ( $Q^{\text{latt}}$ ). Die Gitterrechnung beinhaltet zwei Seequarks.

werden, dass dieser topologische Mechanismus zur Erzeugung der  $\eta$ -Mesonmasse tatsächlich stattfindet [arXiv:0804.3871].

Weitere Arbeiten beinhalten die Untersuchung von Diskretisierungseffekten [arXiv:0802.3637], Simulationen im sogenannten Epsilon-Regime der chiralen Störungstheorie [arXiv:0810.0300] und den Eigenschaften von Twisted Mass Fermionen bei nicht verschwindender Temperatur [arXiv:0809.5228]. Als weitergehender Schritt wurden Simulationen mit twisted mass Fermionen begonnen, die neben dem Up und Down Quark auch das Strange und Charm Quark mit einschließen und damit die Simulationen nahe an die physikalisch realistische Situation bringen.

Große Beachtung fand eine Berechnung der Massen verschiedener Hadronen in einer anderen Diskretisierung der Gittereichtheorie [Science 322:1224-1227]. Es handelt sich um eine der bisher größten Simulationen in der Gittereichtheorie, die Up, Down und Strange Seequarks beinhaltet. Sie wurde von einer Kollaboration unter Beteiligung der NIC-Gruppe auf dem BlueGene/P

Rechner des NIC durchgeführt. Nachdem die Parameter der Theorie durch Vorgabe von drei experimentell bestimmten Hadronmassen fixiert werden, liefert die Berechnung neun Massen in guter Übereinstimmung mit dem Experiment, mit Genauigkeiten zwischen 2 % und 10 %.

Die Gruppe beschäftigt sich weiterhin mit Modellen außerhalb der QCD. So konnte in einem chiral invarianten Higgs-Yukawa-Modell mithilfe nicht-perturbativer Gitterrechnungen untere und obere Schranken an die Higgs-Boson-Masse angegeben werden. Als Ergebnis stellt sich heraus, dass das maximal erlaubte Massenintervall für das Higgs-Boson 80 GeV-700 GeV beträgt. Dieses Ergebnis ist von Relevanz für den LHC, an dem die Higgs-Boson-Physik eine hervorragende Rolle spielt.

Die Gruppe leistete auch erhebliche Beiträge zur Entwicklung des QPACE Rechners. Die Knoten dieses Rechners basieren auf einer erweiterten Version des Cell Prozessors (der z. B. in der Playstation 3 verwendet wird) und werden durch ein speziell entwickeltes Kommunikationsnetzwerk engmaschig verbunden. Während ein einzelner Knoten bereits eine Spitzenleistung von 200 GFlops hat, können Tausende solcher Knoten durch eine ausgeklügelte Mechanik und ein leistungsfähiges Kühlsystem zu einer einzigen Maschine zusammengeschaltet werden. Diese Rechnerarchitektur verspricht sehr gute Energie- und Kosteneffizienz für QCD Rechnungen [arXiv:0810.1559].

## Konferenzen

Die Theoriegruppe war an der Organisation mehrerer Konferenzen und Schulen beteiligt:

- LATTICE PRACTICES 2008, 8.-10. Oktober 2008, Zeuthen
- Loops and Legs 2008, 9th Workshop on Elementary Particle Theory, 20-25 April 2008, Sondershausen, Germany
- CERN/DESY workshop on *HERA and the LHC*, May 2008, CERN, Geneva

- *PDF-School*, Helmholtz-Allianz, November 2008, DESY, Zeuthen

## Internationale Zusammenarbeit, Drittmittel-Projekte, Lehrtätigkeit

Im Berichtszeitraum wurde im DFG-Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR-09 *Computergestützte Theoretische Teilchenphysik* in Kooperation mit Gruppen der RWTH Aachen, der HU Berlin und der Uni(TH) Karlsruhe erfolgreich mitgearbeitet. Antragsteller sind hier J. Blümlein, K. Jansen, S. Moch, R. Sommer und T. Riemann.

Der Bereich Theorie ist Mit Antragsteller bei zwei TMR-Netzwerken zur Nachwuchsausbildung der Europäischen Union: Tools and Precision Calculations for Physics Discoveries at Colliders (MRTN-CT-2006-035505) und Entering the high-precision era of flavour physics through the alliance of lattice simulations, effective field theories and experiment (MRTN-CT-2006-035482).

Wir sind an zwei Einzelprojekten der DFG als Leiter beteiligt: Higgsmodelle auf dem Gitter (mit der HU Berlin) und QCD mit chiral rotiertem Massenterm (mit der Universität Münster). Im Berichtszeitraum wurde S. Moch im Rahmen der Helmholtz-Hochschulnachwuchsgruppe VH-NG-105 Computer algebra and higher orders in particle theory von der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert.

An der Universität Potsdam wurden die Vorlesungen Quantenfeldtheorie und Standardmodell der Elementarteilchen-Theorie gehalten. An der Humboldt-Universität Berlin wurden Vorlesungen über Physik an Hadron-Beschleunigern und Physik am LHC sowie Einführung in die Gittereichtheorie gehalten. Ferner wurden Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie an der Universität Dortmund gelesen. Mitglieder der Gruppe betreuten mehrere Diplom- und Doktorarbeiten.



Abbildung 86: *Photo des TPC Feldkäfigs, unmittelbar nach der Fertigstellung, im geöffneten Zustand.*

# International Linear Collider

**ILC-Projektgruppe:** Mitglieder und Gäste der Gruppen M und FH, darunter insbesondere FLC (DESY, Hamburg – Leiter: T. Behnke, E. Elsen) und LC (DESY, Zeuthen – Leiterin: S. Riemann), inklusive der Emmy Noether Nachwuchsgruppe unter Leitung von J. List, den beiden HGF Nachwuchsgruppen unter Leitung von E. Garutti und P. Bechtle, sowie etwa 66 Instituten aus 17 Ländern (im Rahmen der ECFA Studie).

**Sprecher:** T. Behnke, E. Elsen und N. Walker, DESY

Die Hochenergiephysik steht kurz vor dem ersten Schritt in die Terascale: erste Strahlen konnten bei LHC innerhalb kürzester Zeit gespeichert werden und demonstrierten eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit und gute Auslegung der Strahlführungssysteme dieses komplexen Colliders. Auch wenn technische Probleme im Kältesystem der supraleitenden Magnete einen sofortigen weiteren Fortschritt verhinderten, so sind Hochenergiephysiker umso gespannter auf die zu erwartende Physik, die auch bei der Auslegung der Parameter des International Linear Colliders (ILC) eine Rolle spielen kann. Die gegenwärtige technische Planungsphase für den ILC soll 2012 abgeschlossen sein.

Weltweit konzentrierten sich die Anstrengungen beim ILC auf die Auslegung der kritischen Komponenten. Für den Beschleuniger selbst sind das die Resonatoren, die auch für den European XFEL verwandt werden, beim ILC aber bei deutlich höherem Gradienten betrieben werden sollen. Bei den Detektoren werden ernsthafte Studien angestellt, die darlegen sollen, dass die gewünschte Messpräzision sich mit den Detektoren realisieren lässt. Gleichzeitig soll gezeigt werden, dass sich die Detektoren mit überschaubarem Arbeitsaufwand in den Strahl in eine einzige Wechselwirkungszone hinein und heraus fahren lassen (*Push-Pull* Konzept).

Während in den USA und UK durch Kürzungen im Forschungsetat, von dem auch die Hochenergie-

physik betroffen war, Reduktionen in den Beiträgen zum ILC unumgänglich wurden, konnten in Japan und auch beim DESY durch Drittmittelförderprogramme entscheidende Schritte zur Weiterentwicklung der Forschungsziele unternommen werden. Wegen der offensichtlichen Synergie mit dem XFEL Projekt, aber auch den gemeinsamen Interessen, die FLASH-Anlage in fortgeschrittenere Betriebsmodi zu bringen, fällt DESY im internationalen Konzert der Anstrengungen für den ILC eine besondere Rolle zu. DESY ist weltweit das einzige Labor in dem auf absehbare Zeit Elektronen mit supraleitenden Beschleunigern in den GeV Bereich beschleunigt werden. Es gibt deshalb ein erhebliches Interesse von auswärtigen Physikern, sich an diesen Experimenten zu beteiligen.

Im Berichtsjahr hat die Arbeitsgruppe die Anpassung des relativ breiten Programms bei der Entwicklung des Referenz-Design Reports im Jahr 2007 auf einige Kernthemen während der jetzigen technischen Designphase vollzogen. Vorrangig wird jetzt die Messtechnik für Charakterisierung der Eigenschaft und Qualität supraleitender Resonatoren weiterentwickelt. Gleichzeitig bringt DESY sein Know-how in die Auslegung der Tunnelsysteme ein, wobei selbstverständlich der XFEL auch hier für viele Ideen Pate steht. Diese Aktivitäten werden durch das EU Programm ILC-HiGrade gefördert.

Die Entwicklung von Beschleuniger und Experiment ist eng miteinander verzahnt. DESY hat diese Abhängigkeit früh erkannt und koordiniert die allen Experimenten gemeinsame Arbeitsgruppe Machine-Detector Interface (MDI) in Europa. Zentrale Fragen richten sich auf Studien zum Strahluntergrund in den Detektoren, aber auch auf die Messung der Strahleigenschaften Energie, Polarisation und Luminosität. Die Push-Pull Anforderung für die Detektoren führt zu erheblicher Komplexität.

Ein zentraler Teil der ILC Aktivitäten am DESY sind Entwicklungen neuer Detektortechnologien. DESY ist an mehreren Projekten beteiligt, die alle im Rahmen des ILC angesiedelt sind, aber deutliche Spuren auch außerhalb der ILC Community hinterlassen. Hier soll nur die Arbeit an strahlenharten Vorwärtskalorimetern genannt werden, die unmittelbar im CMS Experiment am CERN Anwendung finden. Das internationale Steering Board der ILC Aktivitäten, ILCSC, hatte im Jahre 2007 die experimentellen Teilchenphysiker eingeladen, in der Form von *letter of intents* (LoI) Konzepte für Experimente am ILC auszuarbeiten und bis Anfang 2009 fertigzustellen. DESY ist führend am ILD Detektor beteiligt, und hat eine zentrale Rolle bei der Erstellung des LoI übernommen. Daneben sind die laufenden experimentellen Arbeiten intensiv weiter verfolgt werden. Arbeiten finden im Bereich der Vertex-Detektorentwicklung, der Zeitprojektionskammer, und der Kalorimetrie statt.

In zunehmender Masse werden die Aktivitäten im Rahmen der Detektorentwicklung durch die HGF Allianz mit anderen deutschen Standorten vernetzt. Gemeinsame Aktivitäten mit der Universität Siegen, Wuppertal und Mainz wurden in diesem Jahr aufgenommen, solche mit der Universität Hamburg, Rostock, Bonn und Heidelberg weitergeführt. Die Detektoraktivitäten profitierten erheblich von der Unterstützung durch das EU-DET Programm, welches erhebliche Finanzmittel zum Ausbau der Infrastruktur im Bereich des Vertex Teleskops, der TPC und des hadronischen Kalorimeters leistete.

Neben den DESY Wissenschaftlern und vor allen den Diplomanden und Doktoranden haben die drei Nach-

wuchsgruppen, die im Bereich der ILC Entwicklungen angesiedelt sind, eine wesentliche Rolle in der erfolgreichen Arbeit der Gruppe gespielt. Eine Emmy Noether Gruppe und zwei Helmholtz Nachwuchsgruppen zeigen die Attraktivität der Feldes und des Umfeldes am DESY auch für junge Nachwuchswissenschaftler.

DESY Wissenschaftler haben sowohl im Bereich der Maschine als auch im Bereich der Detektorentwicklung wichtige Positionen im internationalen ILC Management inne. DESY stellt einen der drei Projekt Manager des ILC Projektes, und einen der Sprecher des ILD Projektes. DESY Wissenschaftler sind in vielen wichtigen Gremien sowohl des GDE als auch des RD vertreten. Unter Führung eines DESY Wissenschaftlers wurde eine international besetzte Kontrollstruktur für den ILC Beschleuniger aufgesetzt (AAP).

Die weltweit koordinierten Anstrengungen in der Technischen Design Phase I konzentrieren sich auf einige Kernthemen zur Realisierung des International Linear Colliders (ILC). Für DESY bedeutet das vor allem die Mitarbeit an der Weiterentwicklung der Höchstgradienten für supraleitende Resonatoren. Die Sonderstellung DESY's bei diesem Thema begründet sich in der parallelen Entwicklung der gleichen Resonatoren für den European XFEL, mit der Ergänzung, dass für den ILC ein deutlich höherer Beschleunigungsgradient eine Kosteneinsparung mit sich bringt.

Hohe Beschleunigungsgradienten (35 MeV/m und mehr) sind mehrfach im Labor demonstriert worden. Mit deutlichen Fortschritten bei der Hochdruckreinigung mit ultrareinem Wasser und der Behandlung nach der Elektropolitur ist die gradientbegrenzende Feldemission weitgehend unter Kontrolle. Damit verlagert sich der Schwerpunkt jetzt darauf, den etablierten Prozess auf eine industrielle Skala zu übertragen. Wenn der Prozess mit ausreichender Sorgfalt industriell nachvollzogen wird, sollte die Produktion von Resonatoren mit hoher Qualität mit dem gegenwärtig bekannten Verfahren möglich sein.

Unter dieser Voraussetzung ist im Februar des Berichtjahres das Projekt ILC-HiGrade mit Fördermitteln der europäischen Union am DESY gestartet. Innerhalb die-

ses Programms werden bis zu 30 Resonatoren nach den Spezifikationen der Serie für den XFEL industriell gefertigt werden. Die Vorbereitungen für eine erfolgreiche Produktion wurden aufgenommen: Abbildung 87 zeigt die Darstellung eines Gestells, mit dem gleichzeitig vier Resonatoren ihren Abnahmetest im so genannten vertikalen Teststand bei DESY durchlaufen können. Die vier Resonatoren werden beim Hersteller in den Insert eingehängt, zum DESY transportiert und direkt vom Fahrzeug in das Heliumbad hinabgelassen. In einem eigens in einem externen Institut durchgeführten Rütteltest wurde die strukturelle Stabilität des Gestells, aber auch die Krafteinwirkung auf die Resonatoren, überprüft (Abbildung 88). Die Resonatoren werden mit diesem Gestell den Transport unbeschadet überstehen. Ein solcher Aufbau ermöglicht den schnellen Test der Resonatoren ohne weitere Arbeitsschritte.

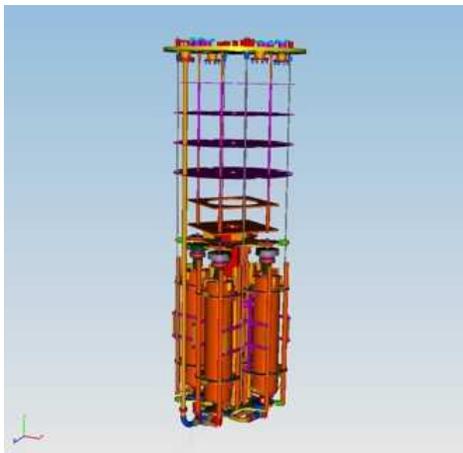


Abbildung 87: CAD Skizze des vertikalen Inserts zum Transport von 4 Resonatoren

Wichtig für die Messung der Eigenschaften der Resonatoren ist Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, aber auch Schnelligkeit der Messung. Die ILC Projektgruppe versucht deshalb unter Nutzung der hochintegrierten Elektronik für den XFEL den Messprozess für die Resonatoren vollständig zu optimieren.

Bei der Diagnose der Eigenschaften der Resonatoren gab es entscheidende Fortschritte bei der optischen Inspektion der Resonatoren. Eine geschickte Beleuchtung der Oberfläche des Resonators mit variablem Lichtein-



Abbildung 88: Simulation des Transports des Resonators im Institut in Bergedorf.

fallswinkel lässt Strukturen im Bereich von gut  $10\ \mu\text{m}$  erkennen. Nicht alle erkennbaren Strukturen führen zu einem Quench der Resonatoren, dem Zusammenbruch der Supraleitung. Gerade im Bereich der Schweißnaht zwischen den Hälften des Resonators sind aber mehrfach Oberflächenstrukturen nachgewiesen worden, die bei anschließender Diagnose des Temperaturprofils beim Zusammenbruch der Supraleitung die Schwachstellen offenlegen. Abbildung 89 zeigt die Korrelation des Temperaturprofils mit Strukturen auf einem Foto der gleichen Stelle auf der Innenseite des Resonators, das mit einer neuen Kamera aufgenommen wurde.

Diese von der University of Kyoto entwickelte Kamera nimmt im Forschungsprogramm für den ILC-Resonator eine wichtige Rolle ein. Es wird erwartet, dass durch systematische Studien der Oberflächenbeschaffenheit der Resonatoren die Schwachstellen des Produktionsprozesses aufgespürt werden können. Die Kamera selbst wird in Zusammenarbeit mit Kyoto und KEK weiter optimiert. DESY konzentriert sich auf die Mechanik, um den aufwändigen Messprozess zu beschleunigen.

All diese Aktivitäten stellen einen wichtigen Bestandteil des EU Förderprojektes ILC-HiGrade. Dieses von DESY koordinierte Programm umfasst Arbeitspakete aus Frankreich, Italien, UK und CERN und DESY. Aus Frankreich kommen Beiträge zu den Resonatoren

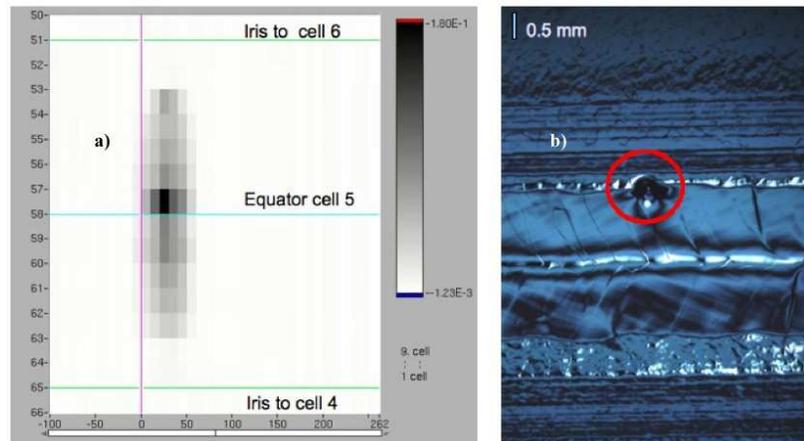


Abbildung 89: Temperaturprofil beim Quench des Resonators und b) die Strukturen, die an gleicher Stelle auf der Oberfläche zu erkennen ist.

und den Leistungskopplern; Italien fertigt die mechanischen Tuner.

Neben den Aktivitäten für die Beschleunigungskomponenten enthält ILC-HiGrade auch ein Programm zur Studie von Tunnelkonfigurationen. Der Referenz-Design Report geht von einem Doppeltunnel in mehr als 100 m Tiefe im Gestein aus. Der XFEL wird mit einem Einzeltunnel nah der Oberfläche in Sand realisiert. Eine solche Auslegung bietet vor allem Kostenvorteile, womöglich jedoch Einschränkungen in der Betriebsverfügbarkeit für den ILC. Mit dem Bau des XFEL ist DESY wiederum in einer einzigartigen Position, reale Erfahrungen zum Bau eines Tunnels einzubringen. Die entsprechende Arbeitsgruppe wird bei DESY koordiniert.

In Zeuthen wird die Positronenquelle weiter erforscht. Hier geht es vor allem darum zu erkennen, ob der erforderliche Positronenfluss mit dem bisherigen Design zu erreichen ist. Diese Anforderungen sind besonders kritisch, wenn gleichzeitig die Positronen polarisiert werden sollen.

FLASH ist mittlerweile zu einem wahren Arbeitspferd für Nutzer der erzeugten Strahlung geworden. Gleichzeitig ist es weltweit die einzige Anlage mit der Elektronen in supraleitenden Resonatoren auf bis zu 1 GeV beschleunigt werden. Eine international zusammengesetz-

te Gruppe von Wissenschaftlern hat deshalb ein Testprogramm konzipiert, mit dem der Betrieb von Resonatoren an der Leistungsgrenze überprüft werden kann: höchste Ströme, lange Pulse und höchste Gradienten. Dieser Betriebsmodus stellt hohe Anforderungen an das Kontroll- und Feedback-System und ist auch für den erfolgreichen Betrieb des European XFEL von außerordentlicher Wichtigkeit. Erste Tests wurden im Berichtsjahr durchgeführt. Sie zeigten jedoch, dass die Extraktion der intensiven Strahlen bei FLASH zunächst modifiziert werden muss, bevor der Routinebetrieb aufgenommen werden kann.

Im Kontext des *Global Design Efforts* (GDE) stellt DESY einen der drei Projektmanager, der die Entwicklungsarbeiten zu allen Beschleunigersystemen koordiniert. Darüber hinaus trägt DESY zu mehreren technischen Systemen bei, wobei die Entwicklung der supraleitenden Resonatoren wieder im Vordergrund steht. Im internen Review-Panel (AAP) ist DESY ebenfalls führend vertreten.

## Studien zur Instrumentierung am ILC

### Messung der Strahlenergie am ILC

Die genaue Kenntnis der Schwerpunktenenergie der  $e^+e^-$ -Wechselwirkungen am ILC ist eine Grundvoraussetzung für viele Analysen. Die Strahlenergie  $E_b$  der einfallenden Strahlen kann in einem Magnetspektrometer bestehend aus Dipolmagneten und Strahllagemonitoren (Magnetschikane) gemessen werden. Um nachzuweisen, dass eine Messpräzision  $\Delta E_b/E_b \leq 10^{-4}$  unter realistischen Bedingungen möglich ist, wurde das so genannte Endstation A Experiment T-474 Anfang 2006 am SLAC (USA) aufgebaut. In den Jahren 2006 und 2007 wurden erfolgreich Daten aufgezeichnet, die gegenwärtig analysiert werden.

In enger Zusammenarbeit mit Gruppen in Dubna und in Yerevan wurden verschiedene alternative Methoden untersucht, die Energie zu messen. Die gemeinsam mit Dubna entwickelte Methode, die Strahlenergie mithilfe von Synchrotron Strahlung zu messen, führte zu einem neuartigen Detektor mit extrem hoher Ortsauflösung für niederenergetische Photonen. Prototypen dieses Detektors wurden in Dubna gebaut und getestet. Für 2009 ist vorgesehen, diese Detektoren im Teilchenstrahl zu untersuchen.

Eine andere Methode beruht auf der Nutzung von von Comptonstreuung von Laserlicht an Strahlelektronen. Diese Methode erwies sich in wachsendem Maße als ausgezeichnete Alternative zur Magnetschikane. Umfangreiche Simulationen zeigten, dass eine Präzision der Strahlenergie von  $5 \cdot 10^{-5}$  durchaus erreichbar sein sollte, wenn Probleme mit der Strahlenbelastung der Detektoren gelöst werden können. Ein experimenteller Test dieses System ist in Novosibirsk geplant, wo ein entsprechender Experimentierorschlag eingereicht wurde.

Im Rahmen der Messung der Strahlenergie mittels Resonanzabsorption von Laserlicht in einem statischen toroidalen Magnetfeld, vorgeschlagen von Kollegen in

Yerevan, wurde ein Experimentierorschlag entwickelt und publiziert.

### Polarisation am ILC

#### Polarisierte Positronenquelle

Das Physikpotenzial eines künftigen Internationalen Linearbeschleunigers (ILC) wird erheblich erweitert, wenn sowohl Elektronenstrahl als auch Positronenstrahl polarisiert sind. Die Kenntnis des Anfangszustandes bis hin zur Polarisation erhöht u. a. die Sensibilität bei der Suche nach neuen Phänomenen und ist notwendig zum Verständnis komplexer LHC Resultate. Allerdings ist die Erzeugung polarisierter Positronen deutlich schwieriger als die Erzeugung polarisierter Elektronen durch Photoemission an GaAs-Strukturen. Eine favorisierte Methode beruht auf dem Konzept von Balakin und Mikhailichenko aus dem Jahre 1979: Ein hochenergetischer Elektronenstrahl wird durch einen wendelförmigen Undulator geschickt und erzeugt dabei einen Strahl zirkular polarisierter Photonen. Diese treffen auf ein dünnes Target und generieren Elektron-Positron Paare, von denen in der nachfolgenden Strahloptik lediglich die hochenergetischen Positronen eingefangen werden. Auf diese Weise können Polarisationsgrade von 60 % und mehr erreicht werden.

Die Produktion polarisierter Positronen mit einem wendelförmigen Undulator wurde erstmals mit dem E166-Experiment am Stanford Linear Accelerator (USA) experimentell demonstriert. Dabei wurde der Polarisationsgrad der erzeugten Positronen mit einem Comptontransmissionspolarimeter gemessen. Es besteht aus einem Rekonversionstarget, einem Analysiermagneten (Verantwortung DESY, Hamburg) und einem CsJ(Tl) Kalorimeter (Verantwortung DESY, Zeuthen). Die polarisierten Positronen werden in einem Rekonversionstarget in polarisierte Photonen konvertiert, die im Eisen des Analysiermagneten abhängig von dessen Magnetisierungsrichtung gestreut werden. Die Positron-Polarisation wird aus der Asymmetrie der Signale im CsJ(Tl)-Kalorimeter bei Umpolung der Magnetisierung im Eisen bestimmt. Allerdings erfordert diese Analyse eine detaillierte Simulation der Prozesse von der

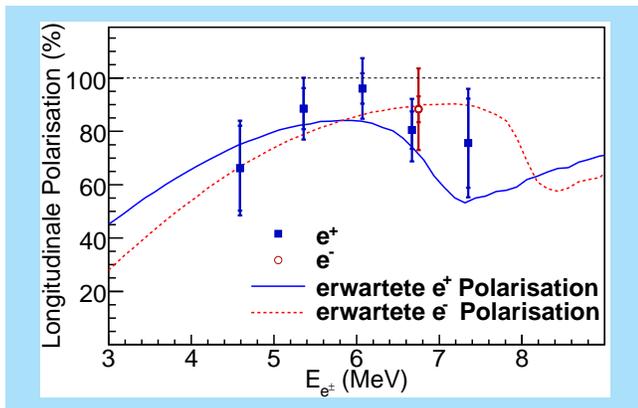


Abbildung 90: Die Polarisation von Positronen und Elektronen gemessen mit dem Comptontransmissionspolarimeter am E166 Experiment in Abhängigkeit von ihrer Energie. Die Energie wurde mit einem Doppeldispersionspektrometer eingestellt. Die erwartete Polarisation, berechnet mit Geant4 ist ebenfalls angegeben.

Erzeugung der Photonen im Undulator, der Produktion von Positronen sowie der Polarisationsmessung im Transmissionspolarimeter. Zu diesem Zweck wurde das Simulationspaket Geant4 um die entsprechenden polarisationsabhängigen Beiträge erweitert.

Im Jahr 2005 wurde der wendelförmige Undulator erfolgreich in Betrieb genommen und das Messprogramm durchgeführt. Die Resultate wurden nach sehr gründlicher Prüfung 2008 veröffentlicht und sind in Abbildung 90 zusammengefasst: Der Polarisationsgrad ändert sich wie erwartet mit der Energie der Positronen und es werden Polarisationsgrade von mehr als 80 % erreicht. Zum Vergleich wurde auch der Polarisationsgrad der Elektronen bei 7 MeV gemessen und mit den Vorhersagen verglichen.

Für das Design einer Positronenquelle des ILC wurden Untersuchungen zur Optimierung der Quelle bezüglich Positronenausbeute und -polarisation durchgeführt. In 2008 konzentrierten sich die Studien auf alternative Methoden. Eine Idee ist die Verwendung einer flüssigen Lithium Linse an Stelle eines Fluxkonzentrators. Dafür wurden Berechnungen zur Aktivierung (FLUKA) und Positronenausbeute (Geant4) durchgeführt. Kritische Frage ist die Wärmedeposition im Lithium und in den Fenstern. Dazu wurden mit Finite-Elemente-Methoden

Wärmetransport, magnetisches Feld und Stromverteilung in der Lithium-Linse mit der Simulationssoftware FlexPDE bestimmt.

Eine wichtige Frage beim Design des ILC ist das Zusammenwirken der Komponenten, um optimale Messungen und hohe Präzision zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurde im April 2008 ein Workshop durchgeführt, der die drei Kollaborationen zusammenführte, die die polarisierte Positronenquelle entwickeln, die Präzisionspolarimetrie am Wechselwirkungspunkt vorbereiten und die genaue Energiemessung planen. Ergebnis waren konkrete Vorschläge zur Optimierung des ILC Designs.

#### Geant4: Validierung und Verbesserung

Geant4 ist ein Monte Carlo Simulationspaket zur Beschreibung der Wechselwirkung von Teilchen mit Materie. Es dient als Grundlage für viele Detektorsimulationen und findet Verwendung in Medizin-, Astro-, Kern- und Teilchenphysik. In Zusammenarbeit mit dem NC PHEP Minsk wurde Geant4 um Wechselwirkungen polarisierter Elektronen, Positronen oder Photonen mit polarisierter Materie erweitert. Diese Entwicklungen sind inzwischen Teil der offiziellen Geant4 Version.

Ein anderer wesentlicher Beitrag war im Jahr 2008 die Validierung und Optimierung der elektromagnetischen Prozesse in Geant4. Ein neues relativistisches Modell zur Beschreibung von Bremsstrahlung wurde in Geant4 eingebunden. Besonderes Augenmerk lag auf einer verbesserten Berücksichtigung von Materialeffekten: dem LPM Effekt und der dielektrischen Suppression. Das neue Modell kann für Elektronen und Positronen ab einer Energie von 1 GeV verwendet werden. Ein Vergleich des simulierten Bremsstrahlungsspektrums mit Daten dedizierter Messungen an dünnen Targets am SLAC und am CERN zeigte gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 91).

Die Entwicklungen in Geant4 waren die Voraussetzung für die Entwicklung mehrere Simulationsprogramme, die im Zusammenhang mit Polarisationsgrad und -ausbeute entwickelt worden sind und inzwischen zur Verfügung stehen.

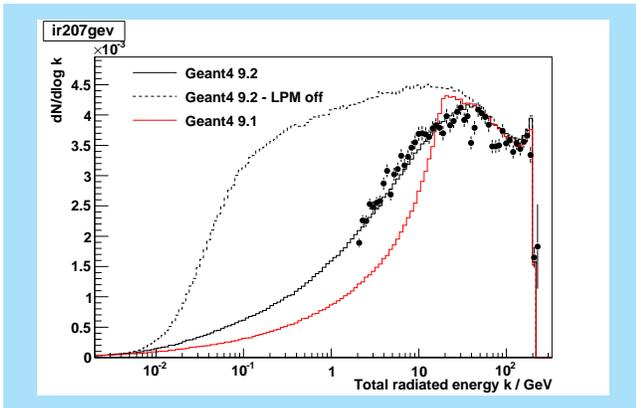


Abbildung 91: Bremsstrahlungsspektrum von 207 GeV Elektronen in einem 0.128 mm dicken Iridium Target. Die volle Linie beruht auf neuen Geant4 v.9.2 Simulationen mit LPM Effekt und stimmt gut mit den Daten überein. Zum Vergleich ist auch das Bremsstrahlungsspektrum mit der Version Geant4 v.9.1 gezeigt.

## Messung der Polarisation am ILC

Physik mit polarisierten Strahlen ist eine Stärke des ILC. Es wird angestrebt, die Polarisation auf 0.25 % genau zu messen. Das ist ein Faktor zwei besser als die bisher weltbeste Polarisationsmessung an hochenergetischen Elektronenstrahlen, die am SLAC im Rahmen des SLD-Experimentes erreicht wurde. Am DESY wird zu diesem Zweck ein Polarimeter entwickelt, das die Comptonstreuung von Laserphotonen an den Elektronen (oder Positronen) des Strahls ausnutzt. Pro Teilchenpaket werden dabei 1000-2000 Elektronen gestreut, deren Energiespektrum polarisationsabhängig ist. In einer magnetischen Schikane werden die gestreuten Elektronen aufgefächert, und die Rate der gestreuten Elektronen ortsabhängig gemessen. Als Detektor wird ein Cherenkov-Detektor entwickelt. Aufgrund der sehr intensiven Wechselwirkung der beiden Leptonen Strahlen im Wechselwirkungspunkt muss die Polarisation vor und hinter der Wechselwirkungszone gemessen werden, um mögliche systematische Effekte aufgrund dieser Wechselwirkung kontrollieren zu können. Ein genaues Verständnis der Extrapolation vom Standort der Polarimeter zur Wechselwirkungszone ist entscheidend für die Genauigkeit der Messung. Deshalb wurde am DESY ein Programm begonnen, um den Spin-

Transport im Beschleuniger zu simulieren, und zwar speziell unter Beachtung einer nicht-perfekten Ausrichtung der Beschleunigerkomponenten und von Erdbewegungen und -Erschütterungen, wie man sie an den verschiedenen für den ILC diskutierten Standorten erwarten würde.

Gegenwärtig wird in der Arbeitsgruppe ein Cherenkov-Detektor entwickelt, der eine ausreichende Genauigkeit der Polarisationsmessung garantieren soll. Ein wesentliches Kriterium hierbei ist die Linearität des Detektors. Ziel ist es, die Nichtlinearität auf besser als 0.1 % zu kontrollieren. Im Jahre 2008 wurde ein System entwickelt, welches die Vermessung von Photodetektoren auf besser als 0.1 % Genauigkeit ermöglicht, wie Abbildung 92 exemplarisch zeigt.

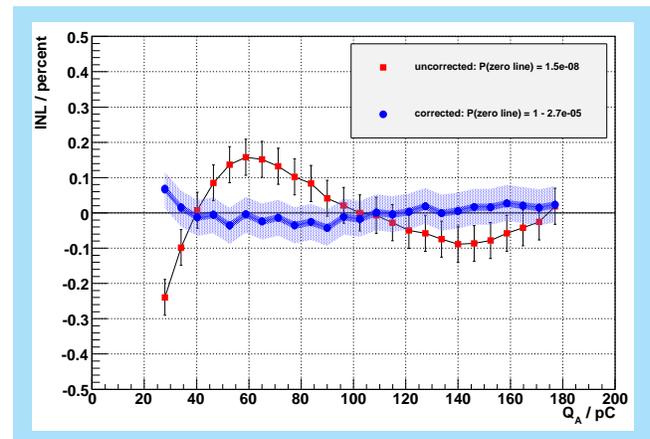


Abbildung 92: Integrierte Nichtlinearität eines Hamamatsu R5900U-03-M4 Photodetektors vor und nach der Korrektur mit einer einige Tage vorher aufgezeichneten Referenzmessung.

Als nächstes soll diese Präzision nicht nur mit einzelnen von LEDs beleuchteten Photodetektoren, sondern auch in einem Cherenkov-Detektor erreicht werden. Daher erfolgte in 2008 Entwurf, Simulation und Bau eines Prototypen für die Cherenkov-Detektoren, wie sie für die ILC-Polarimeter vorgesehen sind (siehe Abbildung 93). Dieser Prototyp wird im Jahre 2009 zunächst am DESY und später im Rahmen der Helmholtz-Allianz bei ELSA in Bonn im Teststrahl betrieben werden.

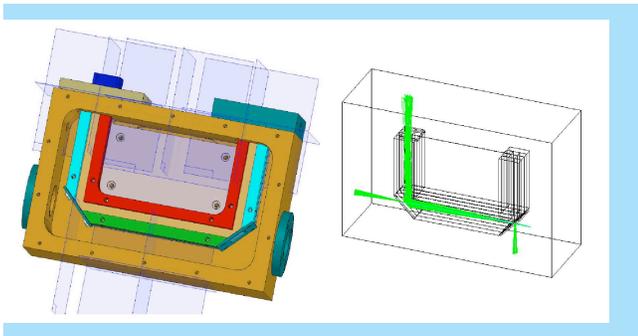


Abbildung 93: Prototyp für Polarimeter-Detektor: CAD-Zeichnung und Simulation eines durchfliegenden Elektrons und seiner Cherenkov-Strahlung.

## Detektorentwicklung für einen Linearbeschleuniger

### Das ILD Detektor Konzept

Physik am ILC ist Präzisionsphysik, und braucht entsprechend anspruchsvolle Detektoren. Im Jahre 2007 haben sich das europäisch dominierte und wesentlich vom DESY initiierte LDC Konzept und das weitgehend asiatisch dominierte GLD Konzept zu einem gemeinsamen Konzept, dem ILD Konzept, zusammengeschlossen.

ILD ist ein Detektor, der um die Annahme, dass eine Rekonstruktion der Physik am ILC extreme Präzision der Event Rekonstruktion in Ereignissen mit vielen Jets bedarf, herum aufgebaut ist. Eine großvolumige TPC kombiniert mit einigen Lagen von Silikon Streifendetektoren ergibt einen sehr leistungsfähigen und robusten Spurdetektor. Ein granulares elektromagnetisches und ein hadronisches Kalorimeter sind unmittelbar außerhalb des Spurdetektors angesiedelt, und alle zusammen sind in einem 3.5 T starken solenoiden magnetischen Feld angeordnet.

Im Jahr 2008 wurden durch systematische Simulationsstudien und Untersuchungen die Parameter des ILD Detektors weitgehend bestimmt. Durch den starken Fokus auf die Rekonstruktion der Ereignisse ergab sich ein relativ großer Detektor. Anhand von so genannten Benchmark-Analysen und realistischer Simulationen

des Detektors wurden die Eigenschaften des vorgeschlagenen Gerätes umfassend untersucht und optimiert.

Ein Bild des Detektors ist in Abbildung 94 gezeigt.

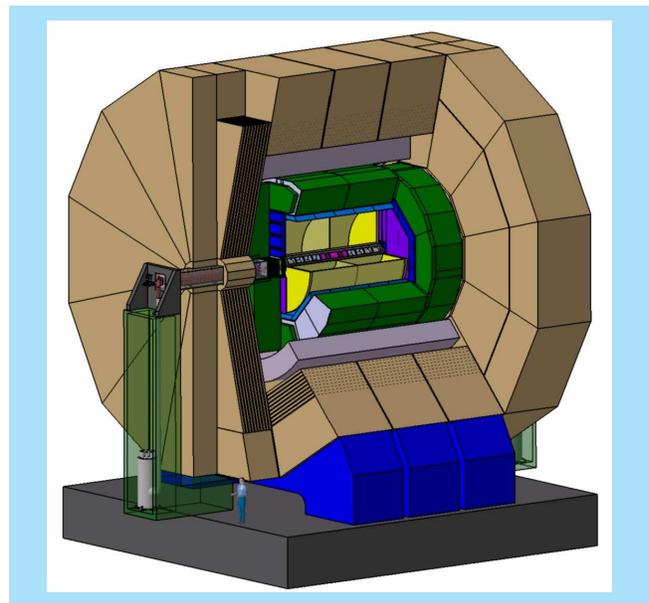


Abbildung 94: Dreidimensionale Ansicht des ILD Detektors

### Maschine-Detektor Schnittstelle (MDI) und Detektorintegration

Im Jahr 2008 wurden die Entwicklungen für die Schnittstellen zwischen den geplanten Experimenten und dem ILC-Beschleuniger weiter vorangetrieben. Am DESY wurden dabei schwerpunktmäßig Untersuchungen zur Detektorintegration und zur Realisierung des sog. *Push-pull* Konzepts, in dem sich am ILC zwei Detektoren eine Wechselwirkungszone teilen sollen, durchgeführt.

Die Zusammenführung der Detektorkonzepte LDC und GLD zum ILD-Detektor wurde auch auf der technischen Ebene realisiert. Ein gemeinsames CAD-Modell des ILD-Detektors dient als Grundlage der technischen Studien, die in Japan, Frankreich und am DESY durchgeführt werden.

Im Rahmen der Detektorintegration lag dabei der Schwerpunkt am DESY auf einem konzeptionellen Design des Eisenjochs am ILD-Detektor. Die magnetischen Kräfte auf die Endkappen des Jochs liegen im Bereich von 18000 Tonnen. Das mechanische Design muss diese Kräfte auffangen, ohne dass sich die Jochstruktur, die die Aufhängung für den gesamten Detektor darstellt, stark deformiert. Abbildung 95 zeigt das Resultat einer FEM-Berechnung, in der die Verbiegung eines Segments einer Endkappe unter Einfluss der magnetischen Kräfte modelliert wurde. Die resultierende Verformung der Endkappe liegt in diesem Design bei weniger als 3 mm.

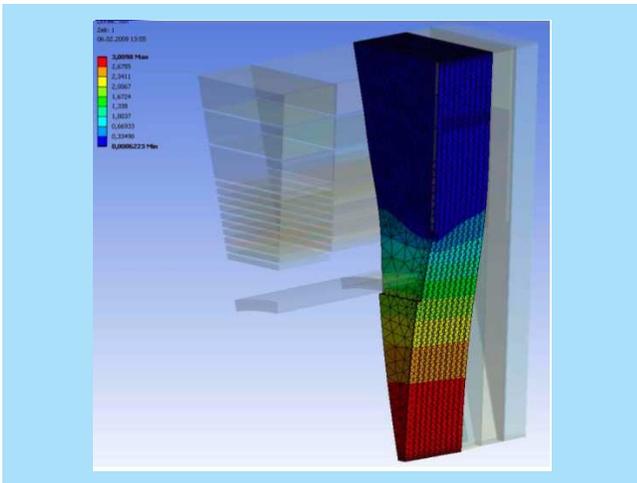


Abbildung 95: *Magnetische Verformung eines Segments der Endkappe des Eisenjochs.*

Die technische Realisierung des *Push-pull* Konzepts erfordert Absprachen zwischen den verschiedenen Detektorkonzepten und der ILC-Maschinengruppe, um die gemeinsamen Randbedingungen zu definieren. Im Rahmen der gemeinsamen Arbeitsgruppe für die Maschinen-Detektoren-Schnittstellen, die dem ILC Forschungsdirektor S. Yamada berichtet, wurde ein Papier erarbeitet, das die technischen Randbedingungen festlegt. Die Anforderungen, die sich aus dem sicheren Betrieb der Maschine und dem störungsfreien Miteinander zweier Detektoren in der Halle ergeben, sind dort definiert worden. Die technische Umsetzung dieser Anforderungen bleibt die Hauptaufgabe im MDI-Bereich des ILC-Projekts. Abbildung 96 zeigt eine Studie des IL-Detektors in der unterirdischen Experimenthalle.

Der Detektor ist dabei auf einer Betonplattform installiert, um eine schnelle und vibrationsarme Bewegung zu ermöglichen. Die vom Detektor benötigten Versorgungsleitungen werden in Kabelketten mitgeführt.

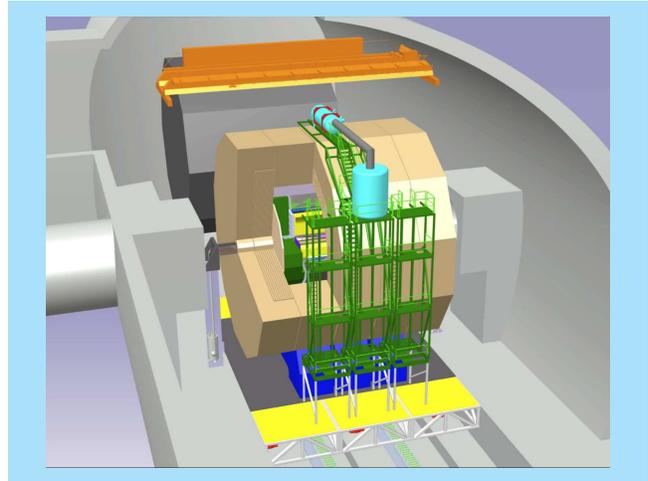


Abbildung 96: *Der IL-Detektor in der unterirdischen Detektorhalle.*

## Vertex Detektor

DESY ist über das EUDET Projekt an den Entwicklungen für einen Vertex Detektor an einem zukünftigen Linearbeschleuniger beteiligt. Neben der Koordination dieses Projektes hat DESY Verantwortung im Bereich der Chiptests, der Systemintegration und der Datenanalyse übernommen. Im Rahmen dieses Projekts soll die Erfahrung mit Pixelsensoren in den Bau eines neuartigen Pixelteleskops und einer damit einhergehenden Teststrahlinfrastruktur am 6 GeV Elektronenteststrahl am DESY einmünden. Ein solches Pixelteleskop dient zur Bestimmung von Teilchenspuren mit einer Genauigkeit von bis zu einem Mikrometer. Die so erhaltene Spurinformation wird genutzt, um weitere hochauflösende Teilchendetektoren im DESY Teststrahl zu studieren (siehe Abbildung 97).

Im Jahre 2008 wurde der Prototyp des Pixelteleskops am DESY und am CERN getestet und von anderen Forschungsgruppen für spezielle Studien an verschiedenen Pixeltechnologien genutzt. Insgesamt wurden

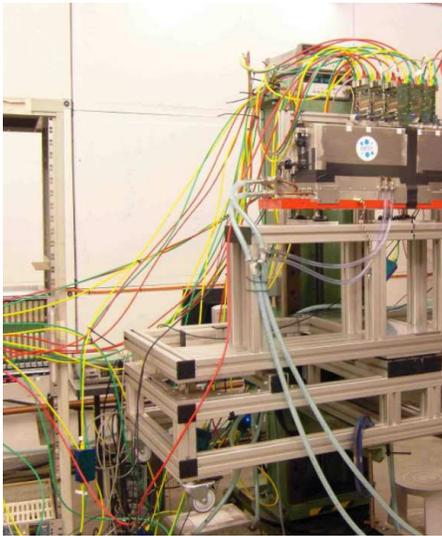


Abbildung 97: Das EUDET Teleskop am DESY Teststrahl.

13 Wochen lang Daten genommen und in den Monaten danach detailliert analysiert. Unter Beteiligung des DESY ist im Berichtszeitraum in vielen Bereichen eine Optimierung des Systems durchgeführt worden. Die grafische Darstellung der Ereignisse während der Datennahme (online) wurde den jeweiligen Nutzern angepasst. Die Auslese der Pixelsensoren wurde so modifiziert, dass das System jetzt mit mehreren Hundert Hz betrieben werden kann. Darüber hinaus ist die Datenanalyse im Rahmen der ILC Software MARLIN für die Analyse von Teleskop erweitert worden. Das Objektorientierte Programm kann jetzt Daten verschiedenster Pixel-Technologien lesen und anschließend gemeinsam analysieren. Dies ist ein wichtiger Schritt für die anstehende Vergleichsmessung zur Vorbereitung einer Technologieauswahl.

Ein zentraler Teil des Spurdetektors des ILD Detektor Konzeptes ist eine Zeitprojektionskammer (TPC). Zusammen mit Partnern im Rahmen der LC-TPC Kollaboration und im Rahmen des EUDET Projektes wird am DESY ein Testexperiment entwickelt, um die Machbarkeit einer TPC am Linearbeschleuniger zu zeigen.

Ein zentraler Teil dieses Aufbaus ist der Prototyp einer TPC, der so ausgelegt ist, dass er mit vielen verschiedenen Auslesetechnologien betrieben werden kann. Im

Rahmen des EUDET Programmes hat DESY die Verantwortung für die TPC und die Infrastruktur, die zum Betrieb der TPC notwendig ist, übernommen. Nach einigen Verzögerungen konnte im August des Jahres 2008 der Feldkäfig am DESY in Empfang genommen werden. Nach kurzer Zeit konnte er elektrisch in Betrieb genommen werden. Zusammen mit einer Endplatte, die von der Cornell University (USA) entwickelt worden ist, und mit Auslesemodulen, die vom Saclay-Institut kamen, konnten bereits im Oktober erste Ereignisse aufgezeichnet werden. Der Inbetriebnahme vorangegangen waren ausführliche Vermessungen des Feldkäfigs, um seine elektrischen und mechanischen Eigenschaften zu verstehen. Dabei stellte sich heraus, dass er im Wesentlichen den Anforderungen entspricht, bis auf eine kleine Scherung des Feldkäfigs von etwa 1 mm über die Länge der Kammer, die zu einer Verzerrung des Feldes führt, die etwas größer als angestrebt ist. Mit einem Gesamtmaterial von 1.3 % einer Strahlungslänge konnte das angestrebte Ziel einer sehr leichten Struktur erreicht werden. In Abbildung 98 ist der fertige Feldkäfig ohne Endplatte zu sehen.

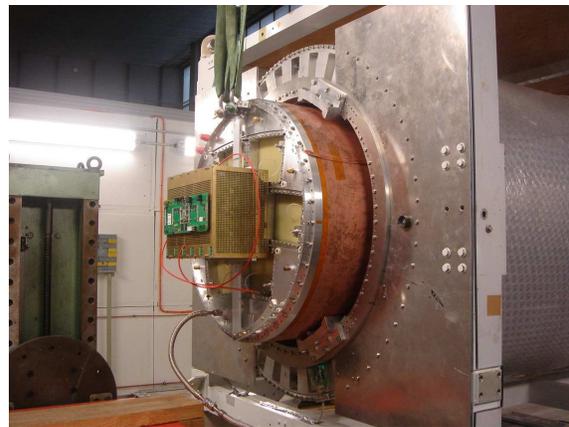


Abbildung 98: Photo des fertigen TPC Feldkäfigs beim Einschieben in den Magneten am DESY.

Neben der Inbetriebnahme des großen Prototyps gingen systematische Messungen am kleineren, schon länger vorhandenen, MediTPC Prototypen weiter. In einem Magnetfeld von 4 T konnte eine Punktauflösung von unter 100  $\mu\text{m}$  über 60 cm Drift erreicht werden. Bei einer Extrapolation auf die angestrebte Driftstrecke von 2.5 m ergibt sich eine Auflösung von etwa

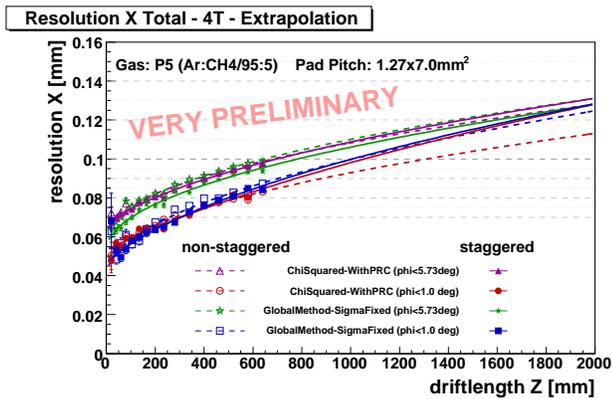


Abbildung 99: Gemessene Auflösung in der TPC, und Extrapolation auf die volle Driftlänge in der TPC.

120  $\mu\text{m}$ , etwas schlechter als die verlangten 100  $\mu\text{m}$  (siehe Abbildung 99). Die kleine Testkammer hat sich auch als Testkammer für verschiedene Auslesesysteme sehr bewährt. Als Vorbereitung auf ein zu entwickelndes Auslesem modul für den großen Prototypen wurde eine GEM Struktur entwickelt und getestet, die auf einer neuartigen Keramik Haltestruktur beruht, die geringes Material mit einer großen Festigkeit kombiniert.

Als Teil des Aufbaus der Infrastruktur für den großen Prototypen wurden umfangreiche Arbeiten am DESY Teststrahl durchgeführt und die Experimentiermöglichkeiten dort wesentlich verbessert. Der supraleitende Magnet PCMAG wurde endgültig in Betrieb genommen, und in ein neu entwickeltes Überwachungssystem eingebettet.

## Hadronisches Kalorimeter

Ein weiterer Schwerpunkt der FLC-Aktivitäten in 2008 war die Weiterführung der Entwicklungen für ein hochgranulares Hadron-Kalorimeter (HCAL) auf Szintillatorbasis für den ILC. Die Aktivitäten umfassen grundlegende Studien zur Anpassung der Auslese-Elektronik an neue Photosensor-Typen (SiPMs), die technische Unterstützung und Durchführung größerer Teststrahl-Kampagnen, die Analyse der bereits gesammelten Da-

ten, die Entwicklung neuer, realistischer und skalierbarer Prototypen, und schließlich die Optimierung der Detektorauslegung für einen zukünftigen Detektor am ILC.

Die Arbeiten finden im Rahmen der internationalen R&D-Kollaboration für Kalorimeterentwicklung an künftigen Linear-Collidern (CALICE) statt und sind eng mit den Konzept-Studien für den ILD-Detektor abgestimmt. Sie werden innerhalb des EUDET-Konsortiums von der EU unterstützt. Die Helmholtz-Gemeinschaft fördert die Aktivitäten in Form einer Nachwuchsgruppe (E. Garutti) und einer Gemeinsamen Helmholtz-Russischen Forschungsgruppe (HRJRG, K. Borras) im Verbund mit HERA- und LHC-Studien. Die Zusammenarbeit mit deutschen Partner-Instituten wird im Rahmen der Allianz *Physics at the Terascale* gestärkt.

Ein Höhepunkt der CALICE-Aktivitäten in 2008 war die Aufnahme des Teststrahlbetriebs am Fermilab (siehe Abbildung 100). Nach den erfolgreichen Datennahmeperioden am CERN im Jahre 2006 und 2007 bietet sich dort die Möglichkeit, auch den Energiebereich unterhalb von 10 GeV an einem hadronischen Teststrahl zu studieren, der für die Modellierung der Detektorantwort wichtig ist.

Darüber hinaus sollen am Fermilab verschiedene Technologien miteinander verglichen werden. Unter mög-



Abbildung 100: Installation des CALICE-Aufbaus am Fermilab

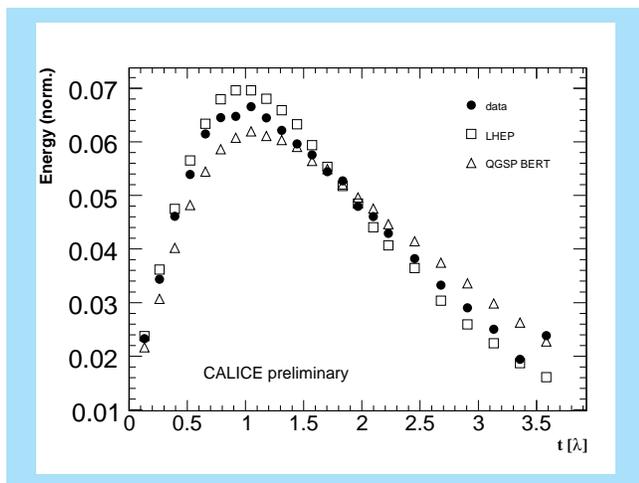


Abbildung 101: Vergleich des am CERN gemessenen HCAL Schauerprofils mit Geant4-Simulation.

lichst gleichen Randbedingungen (Absorberstruktur, Strahlparameter, Datennahmesystem etc.) werden Daten mit verschiedenen ECAL und HCAL Technologien aufgezeichnet.

Zunächst wurde die bereits am CERN erprobte Kombination aus elektromagnetischem Kalorimeter (ECAL) mit Siliziumdioden-Auslese und hadronischem Kalorimeter mit Szintillator und SiPM Auslese in dem erweiterten Energiebereich getestet; dann folgte im Sommer der Austausch gegen ein Szintillator-basiertes ECAL. Die Photosensor-Technologie des in Japan gebauten Detektors ist der des am DESY gebauten hadronischen Kalorimeters sehr ähnlich; daher wurden die hier bereitgestellten Auslese- und Kontroll-Systeme für die Integration des japanischen ECALs erweitert. Ein *remote control room* mit moderner Kommunikationstechnologie wurde am DESY eingerichtet.

Für 2009 ist dann der Austausch der aktiven Lagen des HCALs gegen im benachbarten Argonne gebaute resistive plate chambers (RPCs) geplant. Damit soll auch das Konzept eines digitalen HCALs getestet werden.

Die Analyse der CERN-Daten hat sich zunächst auf die elektromagnetische Antwort des HCALs konzentriert, um das Verständnis des Detektors und die Kalibrations- und Korrekturprozeduren zu etablieren. Damit sind dann erste stichhaltige Vergleiche mit verschiede-

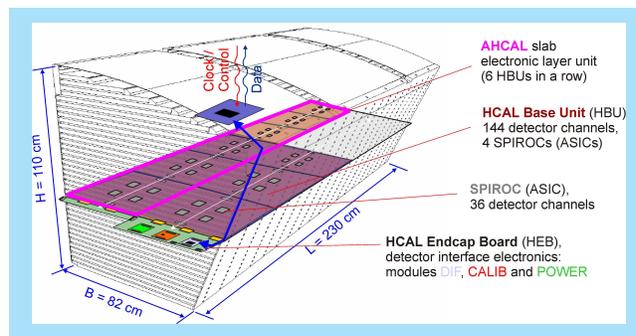


Abbildung 102: Design eines halben Sektors des hadronischen Kalorimeters.

nen Ansätzen zur Modellierung von Hadron-Schauern möglich geworden (Abbildung 101), die ihrerseits die Optimierung des ILC-Detektors experimentell stützen. Erste Ergebnisse der Fermilab Daten sind bereits auf Konferenzen gezeigt worden, detailliertere Analysen sind in der Vorbereitung.

Im Rahmen des EUDET Programms wird an der Entwicklung eines größeren, realistischeren Prototyps gearbeitet. Wesentliche Fortschritte konnten bei der Entwicklung einer mechanischen Struktur gemacht werden, die sich auf den ILC Detektor skalieren lässt. Eine wesentliche Herausforderung ist es, die notwendigen Toleranzen bei gleichzeitiger Minimierung toter Regionen zu erreichen. Unterstützt von EUDET, wurde die von ILC vorgeschlagene Variante in extensiven Finite-Elemente-Rechnungen untersucht. Es wurden Modul-Prototypen konstruiert und Infrastruktur zur Handhabung und Vermessung schweren Edelstahlstrukturen vorbereitet (siehe Abbildung 102).

Im Unterschied zum momentanen Prototypen wird die nächste Generation mit einer voll-integrierten Elektronik ausgestattet sein. Die Entwicklung der notwendigen Systeme wurde wesentlich von der Gruppe FE am DESY vorangetrieben. Dort wurde eine hochkompakte Elektronik entwickelt, die gemischte Analog- und Digitalchips sowie ein LED-Kalibrationssystem im stark begrenzten Detektorvolumen unterbringt.

Die zentrale Rolle von DESY bei der Integration der verschiedenen Kalorimeteraktivitäten spiegelt sich auch in der Führung der CALICE-Kollaboration wi-

der. Im Jahre 2008 wurden N. Meyer zum Software-Koordinator und F. Sefkow zum Sprecher gewählt.

## Instrumentierung der Vorwärtsrichtung

FCAL ist eine weltweite Kollaboration von Physikern aus 12 Ländern mit dem Ziel, neue Technologien für den Bau von speziellen Kalorimetern bei kleinen Polarwinkeln, d. h. in Vorwärtsrichtung der Strahlen, zu entwickeln. Diese Kalorimeter sollen im geplanten ILD Detektor um die Strahlrohre herum installiert werden. Eine der Aufgaben dieser Kalorimeter ist die Messung der Luminosität, einer wichtigen Kenngröße jedes Beschleunigerexperiments, die die Rate interessanter Kollisionen beschreibt. Das innere Kalorimeter, BeamCal, dient dabei sowohl der schnellen Messung der Luminosität als auch zusätzlich der Strahl diagnose. Das äussere, LumiCal, ermöglicht die präzise Messung der Luminosität.

Die Anforderungen an beide Kalorimeter erfordern neue Lösungen für Sensoren und Elektronik. Die Sensoren im BeamCal müssen extremer intensiver ionisierender Strahlung widerstehen. Beide Kalorimeter müssen im 100 ns-Takt mit hoher Präzision ausgelesen werden. Sensoren aus CVD-Diamant und Galliumarsenid wurden am 10 MeV-Teststrahl des DALINAC-Beschleunigers in Darmstadt untersucht. Ein neues Arbeitsregime für die Diamantsensoren verspricht eine höhere Belastbarkeit durch ionisierende Strahlung. Partner des Sibirischen Instituts für Technologie haben neue Sensoren, die mit unterschiedlicher Konzentration von Chrom dotiert sind, hergestellt. Es wird erwartet, dass die Strahlungsfestigkeit von der Chromkonzentration abhängt.

Mit Unterstützung des EUDET-Programmes konnten die Apparaturen für die Messungen am DALINAC vervollständigt werden. Die Messungen wurden im Dezember vorgenommen, so dass die Auswertung der Daten im Jahre 2009 stattfinden wird. Mit Unterstützung von EUDET wird gemeinsam mit der Universität für Science and Technology in Krakow parallel an der Entwicklung der Ausleseelektronik gearbeitet. Die ersten

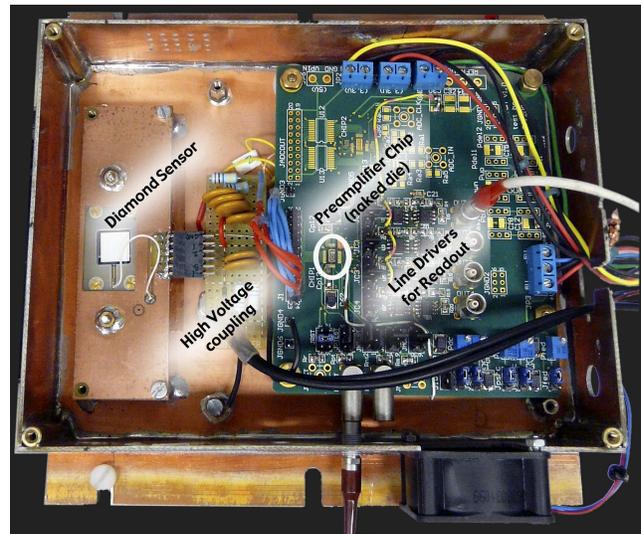


Abbildung 103: Prototyp eines Auslesechips für die Vorwärtskalorimeter.

Prototypen des entsprechenden Analog- und Digitalchips standen 2008 zur Verfügung (Abbildung 103). Im Moment werden die elektrischen Eigenschaften im Labor vermessen. Mithilfe eines  $\beta$ -Strahlers wurden Spektren aufgenommen, die ein sehr gutes Signal-zu-Untergrund-Verhältnis zeigen.

## Software

Das zentrale Thema des Jahres 2008 im Bereich der Software Entwicklung war die Vorbereitung des *Letter of Intents* des ILD Detektor Konzeptes. Die DESY ILD Software Gruppe spielte eine zentrale Rolle in der Vorbereitung und der Durchführung einer massiven Produktion von vielen 10 Millionen Ereignissen, die sowohl für die Optimierung des ILD Detektor Konzeptes verwendet wurden, als auch die Basis für eine Reihe von *Benchmark* Reaktionen waren.

Sowohl die Simulation des Detektors als auch die Rekonstruktion der Ereignisse wurden grundlegend überarbeitet. Die Simulation des ILD Detektors wurde entscheidend weiterentwickelt, und ist jetzt erheblich detaillierter und realistischer geworden. Die simulierten Strukturen der einzelnen Unterdetektoren sind weitgehend realistisch dargestellt, und beinhalten auch totes

Material, Aufhängungen und andere Dinge, die einen Einfluss auf das Verhalten des Detektors haben können.

Die Rekonstruktion wurde soweit entwickelt, dass sie die Grundlage für viele Analysen bilden konnte. Wesentliche Fortschritte konnten bei der Implementation der Spurrekonstruktion erzielt werden. Von Gruppen außerhalb des DESY kamen neue Methoden zur Vertex Rekonstruktion, und wesentliche Verbesserungen der Particle Flow Rekonstruktion. So konnte insgesamt ein Rekonstruktionspaket geschnürt werden, welches eine realistische Studium des ILD Detektors erlaubt.

Unter Verwendung des GRID Computer Netzwerkes konnten im Laufe mehrerer Monate etwa 30 Millionen Ereignisse komplett simuliert und rekonstruiert werden. Sie wurden auf dem GRID der Konzept Gruppe zur Verfügung gestellt, und bildeten die Grundlage für vielfältige Analyseaktivitäten.

Aufgrund der Anforderungen der Produktion wurden nur wenige grundlegende Entwicklungen in der Software im Jahre 2008 vorangetrieben. Allerdings erlaubte die große Produktion, umfassende Erfahrungen mit dem Software System zu sammeln und Stärken und Schwächen viel besser zu verstehen. Nach einer sorgfältigen Analyse werden diese Erfahrungen in die Weiterentwicklung der Software einfließen. Als besonders fruchtbar hat sich hier auch die enge Zusammenarbeit mit den japanischen Gruppen, speziell vom KEK, erwiesen, die nach dem Zusammengehen der beiden Konzepte LDC und GLD deutlich verstärkt wurde.

## Physikalische Studien

Die DESY ILC Gruppe spielte eine zentrale Rolle bei der Durchführung der Physikanalysen für den *Letter of Intent* (LoI) des ILD Detektor Konzepts. Dabei wurden nicht nur die in der vorigen Sektion erwähnten 30 Millionen Signal- und Untergründereignisse simuliert, sondern detaillierte Analysen unter möglichst vollständiger Berücksichtigung von Detektoreffekten, der Rekonstruktion und von maschineninduziertem Untergrund durchgeführt. Dies dient folgenden essentiellen Zielen des LoI:

- Das Ergebnis der vollständigen Analysen mit präzise abgeschätzten Unsicherheiten auf die endgültigen Möglichkeiten stellt einen wichtigen Test dar, ob der vorgeschlagene Detektor einen breiten Bereich verschiedener Anforderungen erfolgreich abdecken kann.
- Die Analysen haben klar aufgezeigt, wo Detailverbesserungen notwendig sind.
- Die fortlaufende Pflege der Analysen ermöglicht es, den Physics Case des ILC möglichst schnell

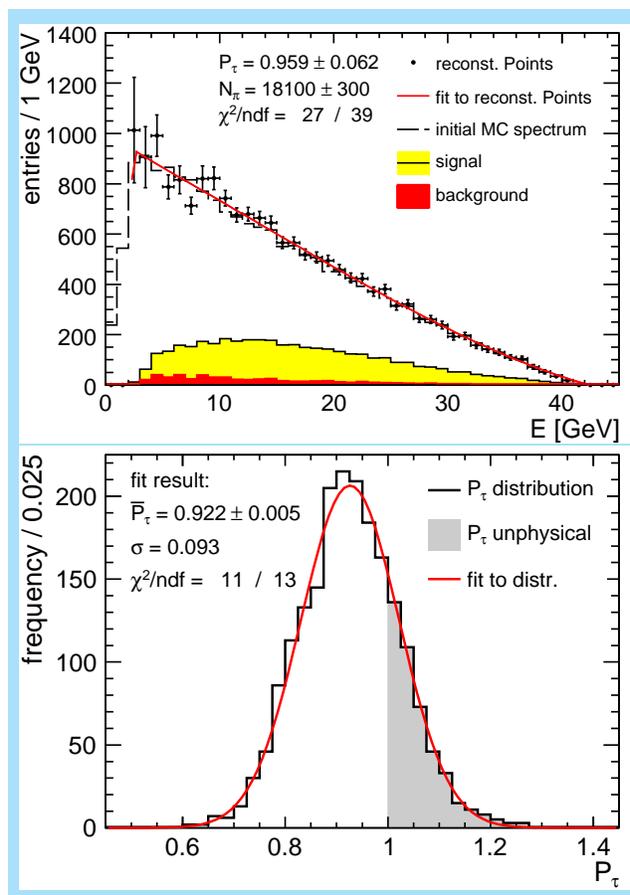


Abbildung 104: (a) Pion Impulsspektrum aus  $\tau$ -Zerfällen. Aus einem Fit an die Verteilung kann auf die mittlere Polarisation der  $\tau$ -Mesonen geschlossen werden. (b) Verteilung der Polarisation in einer Monte Carlo Studie, in der viele Experimente simuliert wurden. Die Breite der Verteilung gibt den erwarteten Fehler der Polarisation (9 %) an.

im Licht der zu erwartenden LHC-Resultate zu präzisieren.

- Sie sind unerlässlich für die genaue Studie der Abhängigkeiten zwischen Maschine und Detektor. Die Auswirkungen der zu erwartenden Strahlenergieunsicherheiten, Strahlpolarisationen und des Detektoruntergrunds kann nur anhand der Ergebnisse der Analysen abgeschätzt werden.

Dazu wurden mehrere Analysen im Bereich der Präzisionsmessung der Kinematik von SUSY-Zerfällen durchgeführt, die sehr sensitiv auf die Leistung des Particle Flow, der Spurrekonstruktion und der Teilchenidentifikation, des Erkennens von  $\gamma\gamma$ -Untergrundereignissen und gegenüber der Anwesenheit vom Maschinenuntergrund sind. Zusätzlich wurden Studien zu genauen Auswirkungen des Maschinenuntergrunds auf eine Vielzahl von Endzuständen getestet und eine Methode zur Messung der Strahlpolarisation im Detektor zur Kalibration der Polarimeter vorgestellt und implementiert.

Ein Beispiel für die durchgeführten Analysen findet sich in Abbildung 104. Dabei wird die Polarisation von  $\tau$ -Leptonen aus Zerfällen ihrer SUSY-Partnerteilchen  $\tilde{\tau}_1$  bestimmt, was einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des möglichen supersymmetrischen Modells darstellt.

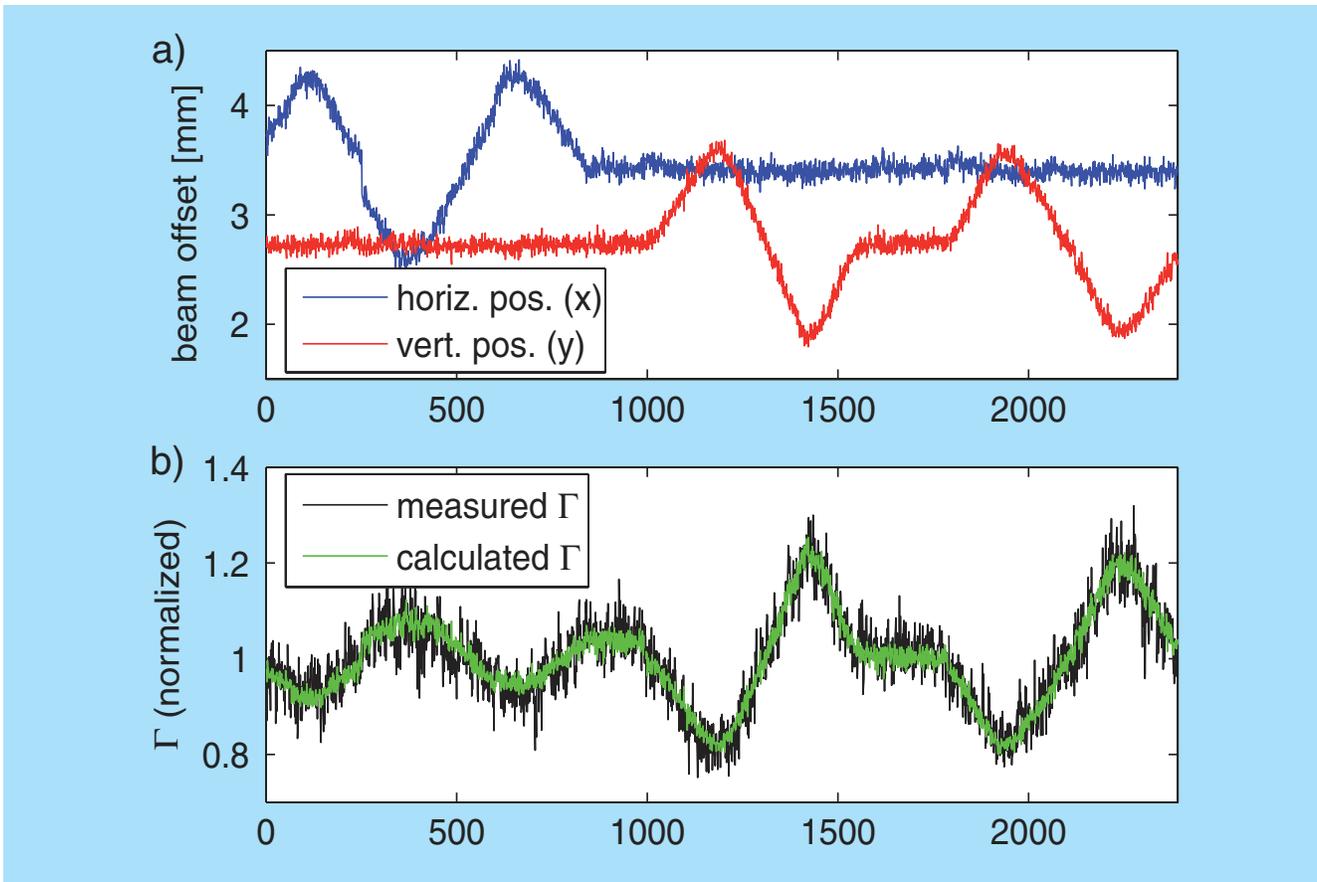


Abbildung 105: Oben: Die horizontalen und vertikalen Verschiebungen des Elektronenstrahls. Unten: Variation des gemessenen und des berechneten EO-Retardationsparameters  $\Gamma$ .

# Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet wie in den Vorjahren an hochauflösenden Strahldiagnosesystemen für FLASH und den XFEL. Ein wichtiges Projekt der Gruppe ist ein optisches Synchronisationssystem für supraleitende Linacs mit Femtosekunden-Genauigkeit, das für den Röntgenlaser XFEL von zentraler Bedeutung sein wird und gegenwärtig am FLASH-Linac erprobt wird.

## Experimente mit elektro-optischen Detektoren

Die schon in den Vorjahren beschriebenen elektro-optischen (EO) Experimente wurden fortgesetzt, um

den Nutzen eines EO-Detektors zur Beschleunigerkontrolle zu demonstrieren.

Um die Abhängigkeit des EO-Signal vom Orbit der Elektronen zu untersuchen, wurde in Testmessungen die Sollbahn systematisch horizontal oder vertikal verschoben, und die Veränderungen des gemessenen EO-Signals (umgerechnet in den Retardationsparameter  $\Gamma$ ) wurden mit den berechneten Änderungen verglichen, siehe Abbildung 105. Man findet eine perfekte Übereinstimmung.

Die Ankunftszeit der Elektronenpakete am EO-Detektor hängt linear von kleinen Phasenänderungen im ersten Beschleunigungsmodul ab. Dies wird in Abbildung 106 gezeigt. Die Steigung der Anpassungsgeraden beträgt 1.79 ps/Grad. Im Normalbetrieb liegt die Messgenauigkeit der Ankunftszeit bei 60 Femtosekunden, wobei

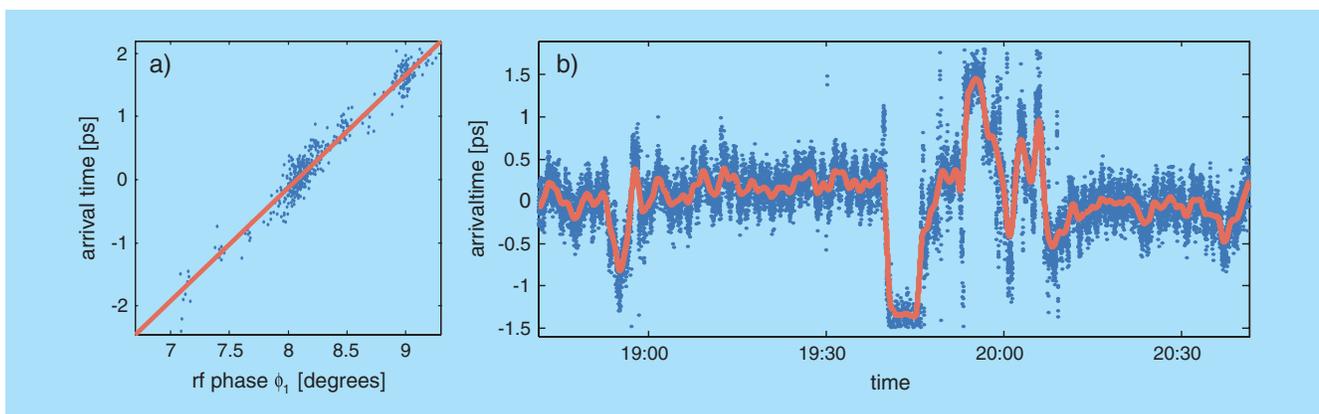


Abbildung 106: (a) Korrelation zwischen der Ankunftszeit der Bunche am EO-Detektor und der Hochfrequenzphase  $\phi_1$  im ersten Beschleunigungsmodul. Die Steigung der Anpassungsgeraden beträgt 1.79 ps/Grad. (b) Gemessener Verlauf der Ankunftszeiten während Einstellung von FLASH für den FEL-Betrieb.

Zeitschwankungen in der Synchronisation zwischen Titan-Saphir-Laser und Hochfrequenz den Hauptbeitrag liefern.

Im FLASH-Linac ist ein Feedback-System installiert, mit dem die Bunchkompression geregelt wird. Zur Steuerung wird das Signal eines pyro-elektrischen Detektors verwendet, der kohärente Diffraktionsstrahlung (coherent diffraction radiation CDR) registriert. Bei korrekter Kompression haben die Bunche minimale Breite und liefern maximale CDR-Signale. Die korrekte Funktion des Kompressions-Feedbacksystems kann aus der Breite der EO-Signale ermittelt werden (Abbildung 107). Nach Abschalten des Feedbacks wächst die Halbwertsbreite von 158 fs auf 181 fs an.

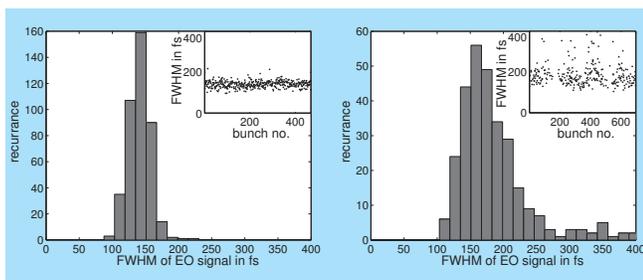


Abbildung 107: (a) Häufigkeitsverteilung der EO-Signalbreite bei korrekter Funktionsweise des Bunch-Compressions-Feedback. Der Mittelwert beträgt  $158 \pm 15$  fs (FWHM). (b) Vergrößerung der Halbwertsbreite auf  $181 \pm 34$  fs nach Abschalten des Feedback-Systems.

Ein neues EO-Experiment wurde an der CTR-Strahlführung aufgebaut, mit deren Hilfe kohärente Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) vom Beschleuniger in das Laserlabor geleitet wird. Abbildung 108 zeigt ein Einzelbunch-Signal, das mithilfe der spektralen Kodierung aufgenommen wurde. Die geringe Breite des Signals beweist, dass die Zeitstruktur der von den komprimierten Elektronenbunchen emittierten CTR-Pulse beim Durchlaufen der 19 m langen Strahlführung weitgehend erhalten bleibt. Die Energie der CTR-Pulse im Fokus der Strahlführung liegt über  $10 \mu\text{J}$ , der erfasste Frequenzbereich erstreckt sich von 200 GHz bis 100 THz. Die CTR-Strahlführung ist damit ein einzigartiges Instrument zur Erprobung

neuartiger elektro-optischer Materialien und Methoden.

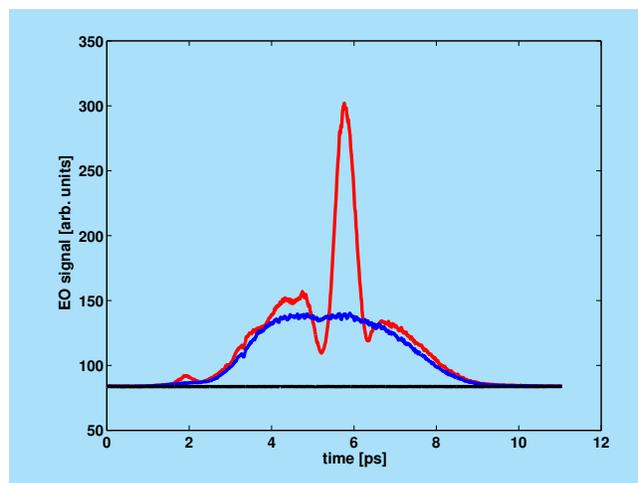


Abbildung 108: EO-Signal eines einzelnen Bunches, aufgenommen im Fokus der CTR-Strahlführung.

## Bau eines Faserlasers für einen elektro-optischen Zeitprofilmonitor

Die elektro-optischen (EO) Experimente zur longitudinalen Strahldiagnostik bei FLASH wurden bisher mit einem Titan-Saphir-(Ti:Sa)-Oszillator durchgeführt, der Pulse mit einer Breite von 30 fs und einer Energie von 5 nJ bei einer Wellenlänge von 800 nm liefert. Ti:Sa-Laser sind wartungsintensiv und teuer. Sie müssen häufig nachgeregelt werden, um im mode-lock-Betrieb zu bleiben. Aus diesem Grund sind sie nicht für die Installation im Linac-Tunnel geeignet. In 2007 wurde ein Ytterbium-Faserlaser entwickelt, der bei einer Wellenlänge von 1030 nm arbeitet und eine Pulsfrequenz von 54 MHz hat. Wichtige Gründe für einen Faserlaser sind seine Kompaktheit und Wartungsfreiheit, die es ermöglichen, das Lasersystem direkt neben der EO-Station im Beschleuniger-Tunnel aufzubauen, so dass aufwendige Strahltransportwege wegfallen. Bei der Wellenlänge von 1030 nm wird aufgrund einer besseren Anpassung der Gruppengeschwindigkeit

des Laserpulse und der Phasengeschwindigkeit der THz-Pulse im Galliumphosphid-Kristall ein besseres Signal-Rausch Verhältnis erwartet, und es können dickere Kristalle benutzt werden, was die Amplitude des EO-Signals erhöht. Es steht ein funktionsfähiger Prototyp eines Ytterbium-dotierter Faserlasers (YDFL) zur Verfügung. Dabei handelt es sich um einen Versuchsaufbau, der auch eine Verstärkerstufe umfasst. An einer kompakten, mechanisch ausgereiften Version wird gearbeitet. Bei diesem Laser handelt es sich um einen stretched-pulse-Faserlaser mit unidirektionaler Ring-Cavity, in dem ein Isolator und polarisierender Strahlteiler gemeinsam als intensitätsabhängiger Absorber fungieren. Das aktive Medium ist eine Ytterbium-dotierte single-mode Faser mit dem Kern-Durchmesser 8  $\mu\text{m}$ . Der Strahlteiler dient auch als Auskoppelport des Lasers, es wird linear polarisiertes Licht emittiert. Zur Kontrolle der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion wird als Bauteil mit negativer Dispersion ein Gitterkompressor eingesetzt, wobei ein Gitterpaar doppelt durchlaufen wird. Der Endspiegel ist zur Anpassung der Länge der Cavity auf einem motorisierten Schlitten montiert. Für eine schnelle Regelung ist zusätzlich ein Piezo-Faserstrecker eingebaut. Die Erzeugung des Regelsignals erfolgt durch eine fasergekoppelte Photodiode. Eine wichtige Eigenschaft des Faserlasers ist, dass er nach dem Einschalten automatisch in den gepulsten Betriebszustand (mode lock) übergeht, was beim Ti:Sa-Laser nicht der Fall ist.

Der Faserlaser emittiert positiv gechirpte Pulse. Vor Eintritt in den Faser-Verstärker werden die Pulse durch einen Gitterkompressor geschickt, wo der positive chirp überkompensiert wird. Mit einem akusto-optischen Modulator (AOM) werden 53 von 54 Pulsen unterdrückt, woraus ein 1 MHz-Pulszug resultiert. So wird eine deutliche höhere Verstärkung in der dotierten Faser erreicht. Der Verstärker ist aus einer polarisationserhaltenden Faser gebaut, so dass linear polarisiertes Licht emittiert wird, wie es für die Experimente gebraucht wird. Die Verstärkerfaser wird entgegen der Ausbreitungsrichtung der Laserpulse gepumpt. Der Gitterkompressor vor dem Verstärker hat einen variablen Gitterabstand, hier kann man die spektrale Verbreiterung optimieren, indem man den Ort des kürzesten Pulses

im Verstärker anpasst. Ein Gitterkompressor am Ausgang bringt die Pulse zurück auf minimale Länge, es wird ein Puls mit 2.5 nJ ausgekoppelt. Die spektrale Breite beträgt mindestens 80 nm. Damit steht jetzt ein funktionsfähiges Lasersystem zur Realisierung eines Echtzeit-Monitor für das zeitliche Profil der Elektronenpakete zur Verfügung.

## Feedbacksysteme zur Stabilisierung der FEL-Pulsenergie

Der von unserer Gruppe gebaute Ankunftszeitmonitor (bunch arrivaltime monitor BAM) ist im Jahresbericht 2006 beschrieben worden. Die Auflösung ist inzwischen wesentlich verbessert worden, und es wurden mehrere BAMs bei FLASH installiert. Die mit dem Elektronenstrahl gemessene Korrelation der Ankunftszeiten in zwei 60 m voneinander entfernten BAMs ist in Abbildung 109 aufgetragen. Aus der sehr geringen Streuung der Daten um die Anpassungsgerade errechnet man eine Zeitauflösung des BAM von 5 fs (rms). Dies ist ein Rekordwert für Zeitmessungen an einem Beschleuniger.

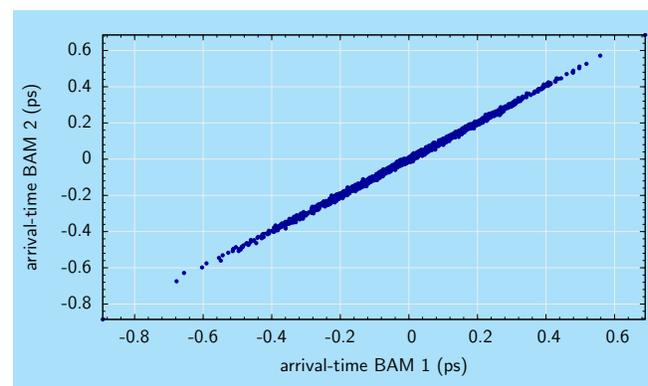


Abbildung 109: Korrelation der Ankunftszeiten in zwei 60 m voneinander entfernten Ankunftszeitmonitoren (BAMs).

Die Feldstärke in ersten Beschleunigungsmodul ACC1 hat einen starken Einfluss auf die Ankunftszeit der Bunche am Ausgang des Bunchkompressors. Die mit einem

BAM gemessene Ankunftszeit ist als Regelgröße in einer Feedbackschleife zur Stabilisierung der Feldstärke verwendet worden. Auf diese Weise konnten die Ankunftszeitschwankungen stark reduziert werden.

Ein zweiter Regelkreis wurde aufgebaut, bei dem das Signal eines Bunch-Compression-Monitors (BCM) zu Regelung der Hochfrequenzphase in ACC1 verwendet wurde. Die Kombination beider Regelkreise resultierte in einer bemerkenswerten Steigerung und Stabilisierung der FEL-Pulsenergie im SASE-FEL-Betrieb. Dies wird in Abbildung 110 gezeigt.

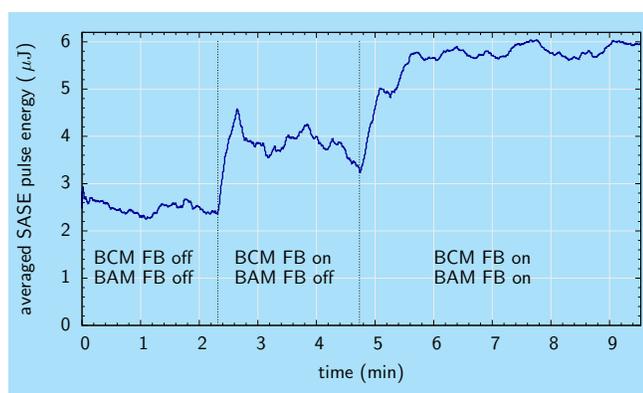


Abbildung 110: Die mittlere Energie der FEL-Pulse ohne Feedback (links), mit Bunch-Compression-Feedback (Mitte) und mit Bunch-Compression-Feedback und Ankunftszeitfeedback (rechts).

Die mittlere FEL-Pulsenergie beträgt bei dieser Messserie  $2.5 \mu\text{J}$  ohne Feedback, sie wächst auf  $4 \mu\text{J}$  nach Einschalten des Bunch-Compression-Feedback, und sie wächst auf  $5.7 \mu\text{J}$  wenn Bunch-Compression-Feedback und Ankunftszeitfeedback beide wirksam sind.

## Optischer Kreuzkorrelator

Das optische Synchronisationssystem von FLASH muss verschiedene Lasersysteme, die über den gesamten Beschleunigerkomplex verteilt sind, mit dem gepulsten Elektronenstrahl mit einer Genauigkeit im Femtosekundenbereich synchronisieren. Dazu gehören die Laser für zeitaufgelöste *pump-probe*-Experimente, der zukünftige Seed-Laser sowie Lasersysteme zur

Strahldiagnose. Eine Schlüsselkomponente des Synchronisationssystems ist der optische Kreuzkorrelator, mit dem die einzelnen Laser an die Zeitreferenz des Beschleunigers, den sogenannten Master-Laser-Oszillator (MLO), gekoppelt werden sollen. Der Kreuzkorrelator nutzt die MLO-Pulse, um in einem nichtlinearen optischen Kristall (Beta-Bariumborat BBO) das Summenfrequenzsignal der MLO- und der betreffenden Laserpulse zu erzeugen, welches als Regelsignal für eine Phasenkopplungsschleife (PLL) verwendet wird. Der Kreuzkorrelator kann so realisiert werden, dass eine hintergrundfreie Detektion des Regelsignals möglich ist.

Nach verschiedenen Testaufbauten konnte ein mechanisches Design gefunden werden, das robust genug für den Einsatz in einer Beschleunigerumgebung erscheint und wartungsarm verspricht. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann die optische Kopplung an einen im Labor installierten Faserlaser allerdings nur auf einer Zeitskala von Minuten aufrecht erhalten werden. An der Verlängerung dieser Zeit wird gearbeitet. Zum Nachweis der Zeitschwankungen sowie zur Messung des Langzeitverhaltens wurde ein zweiter, identischer Kreuzkorrelator aufgebaut, mit dem bei rein optischer, d. h. ausgeschalteter elektronischer Phasenkopplung der Laser ebenfalls das entsprechende Ausgangssignal gemessen werden konnte. Die elektronische Phasenkopplung, die eine wichtige Voraussetzung für das Etablieren der optischen Kopplung darstellt, wurde erweitert und in ihrer Genauigkeit verbessert. Dazu gehört auch ein verbesserter Regel-Algorithmus, mit dessen Entwicklung und Implementierung begonnen wurde. Der Kreuzkorrelator ist so ausgelegt, dass unmittelbar nach der Installation der optischen Glasfaserleitung in das EO-Labor die Pulse des Master-Laser-Oszillators als Eingangssignal verwendet werden können. Damit sind dann Beschleuniger-basierte Messungen möglich. Die Adaption des Kreuzkorrelations-Schemas auf den Photoinjektor-Laser, mit der bereits begonnen wurde, kann für eine Ankunftszeitstabilisierung genutzt werden, um eine weitere Reduktion der Zeitschwankungen im Beschleuniger zu erreichen.

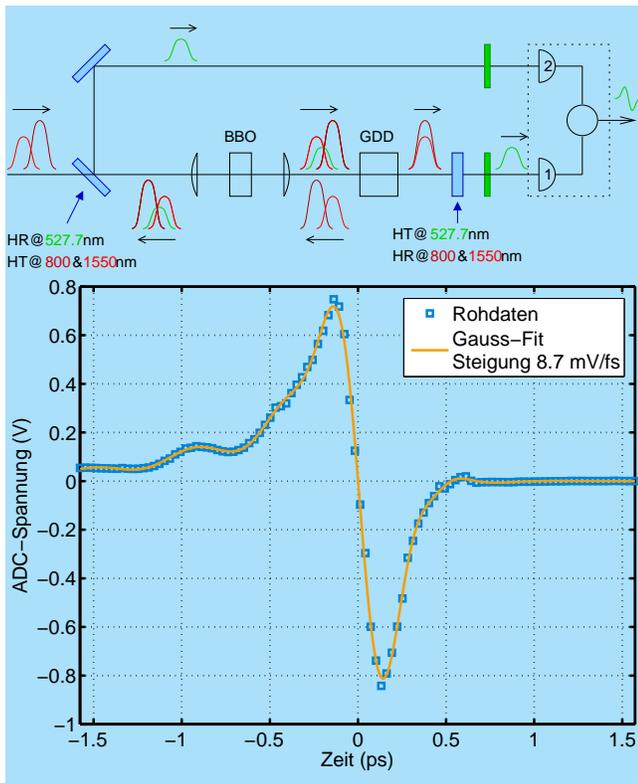


Abbildung 111: Oben: Funktionsweise des balancierten optischen Kreuzkorrelators: Die einlaufenden Pulse der beiden verschiedenen Laser werden nach dem ersten dichroitischen Spiegel auf den BBO-Kristall fokussiert, in dem die Summenfrequenz erzeugt wird. Das Summenfrequenzsignal gelangt durch einen weiteren dichroitischen Spiegel und einen Filter auf Detektor 1. Die an dem zweiten Spiegel reflektierten, fundamentalen Pulse durchlaufen ein Glaselement, in dem die Pulse getauscht und erneut auf den BBO-Kristall fokussiert werden. Das beim Rücklauf erzeugte Summenfrequenzsignal gelangt über den ersten dichroitischen Spiegel auf Detektor 2. Das Differenzsignal der beiden Detektoren ist in der Nähe des Nulldurchgangs höchst sensitiv auf Zeitschwankungen der beiden einlaufenden Laserpulse und dient als Eingangssignal für die Phasenkopplungsschleife. Unten: Gemessenes Differenzsignal der beiden Detektoren als Eingangssignal für die Phasenkopplungsschleife. Die große Steigung in der Nähe des Nulldurchgangs der Kurve verspricht eine Synchronisierung der beiden individuellen Laser auf der Femtosekunden-Zeitskala.

## Experimente mit kohärenter Übergangsstrahlung

Im Linearbeschleuniger von FLASH werden die Bunches in einem zweistufigen Prozess longitudinal komprimiert, damit die für den FEL-Prozess erforderlichen Spitzenströme von einigen 1000 A erreicht werden. Die komprimierten Bunches haben eine stark asymmetrische Struktur, sie sind durch ein sehr scharfes Maximum im Kopfbereich und einen langen Schwanz gekennzeichnet. In den vergangenen Jahren ist das longitudinale Ladungsprofil mit zwei hochauflösenden Zeitmessverfahren untersucht worden, einem elektrooptischen (EO) Detektor und einer transversal ablenkenden Wanderwellenstruktur (transverse deflecting structure TDS). Die bei FLASH installierte TDS erreicht eine Auflösung von 25 Femtosekunden (rms) mit einer auf den FEL-Betrieb optimierten Strahloptik. Die gemessene Breite des scharfen Maximums am Kopfe des Bunches liegt nahe diesem Wert, so dass die wahre Breite wesentlich geringer sein könnte. Zur Zeit gibt es jedoch keine Messmethode im Zeitbereich mit einer Auflösung von deutlich unter 20 fs.

Um den Bereich extrem kurzer Zeiten zu erfassen, bietet sich die Spektroskopie der von den Bunches erzeugten kohärenten Strahlung an. Die CTR-Strahlführung, mit deren Hilfe kohärente Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) vom Beschleuniger in das Laserlabor geleitet wird, ist mit einem neuartigen Gitterspektrometer mit großer Bandbreite ausgerüstet worden. Eine sequentielle Anordnung von Reflexionsgittern wird zur spektralen Zerlegung der Strahlung benutzt. Der Nachweis der THz-Strahlung erfolgt in pyro-elektrischen Vielkanaldetektoren (je 30 Kanäle), die es erlauben, Einzelschuss-Spektren mit Wiederholraten von 1 MHz aufzuzeichnen. 2008 wurde das Spektrometer so modifiziert, dass der Spektralbereich zwischen 3 und 65  $\mu\text{m}$  abgedeckt werden kann. Abbildung 112 zeigt den schematischen Aufbau.

In Abbildung 113 wird das gemessene Spektrum der kohärenten Übergangsstrahlung (CTR) gezeigt, die von den komprimierten Bunches im FEL Betrieb emittiert wird. Zum Vergleich wird auch das CTR-Spektrum un-

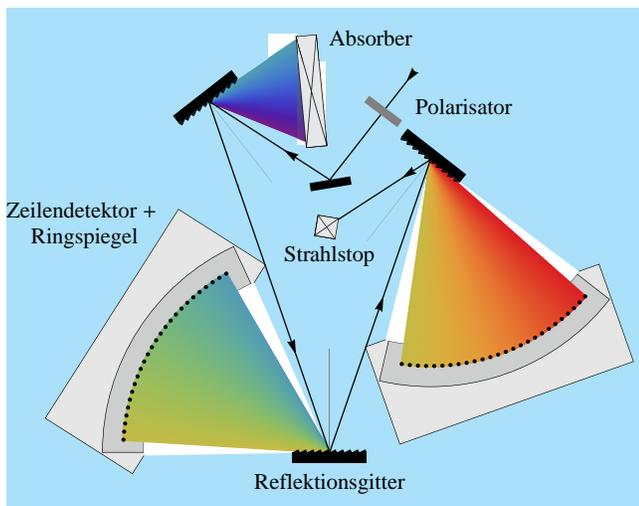


Abbildung 112: Das Gitterspektrometer mit zwei sequentiellen Reflexionsgittern und zwei auf einem Kreisbogen angeordneten Zeilendetektoren mit je 30 pyroelektrischen Sensoren.

komprimierter Bunche gezeigt. Die Unterschiede sind offensichtlich. Im Wellenlängenbereich oberhalb von  $10\ \mu\text{m}$  emittieren die komprimierten Bunche sehr viel CTR, während die nicht komprimierten Bunche hier kaum abstrahlen. Daraus folgt, dass der Spektralbereich  $10 - 65\ \mu\text{m}$  im wesentlichen aus dem scharfen Maximum im Kopfbereich des Bunches stammt. Eine Fourieranalyse dieser Daten ergibt eine Pulslänge des Kopfes von  $15\ \text{fs}$  (rms).

Sehr bemerkenswert ist die relativ starke CTR-Intensität im nahen Infrarot zwischen  $3$  und  $10\ \mu\text{m}$ , die sowohl bei komprimierten wie bei unkomprimierten Bunchen auftritt und in beiden Fällen ungefähr gleich stark ist. Daraus folgt, dass diese Strahlung nicht vorzugsweise aus dem scharfen Maximum im Kopfbereich der komprimierten Bunche stammen kann, denn sonst würde man sie bei unkomprimierten Bunchen nicht beobachten. Wir deuten die CTR-Strahlung in nahen Infrarot als experimentelle Evidenz für die theoretisch postulierte Mikrobunch-Instabilität in magnetischen Bunchkompressoren. Diese Mikrostrukturierung erstreckt sich über das gesamte Elektronenpaket und nicht nur über den Kopfbereich. Die Untersuchungen zu diesem hochaktuellen Thema werden fortgeführt.

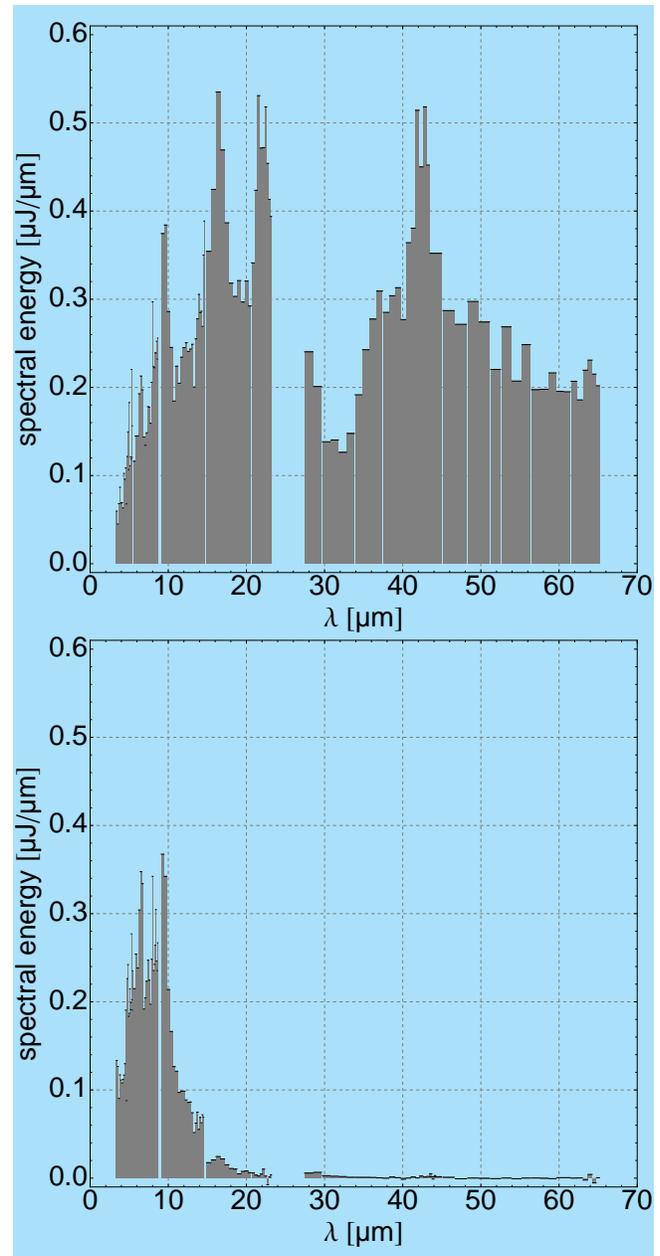


Abbildung 113: Oben: Das CTR-Spektrum der komprimierten Bunche während des FEL-Betriebs. Unten: CTR-Spektrum der unkomprimierten Bunche.

# Forschung mit Photonen

