

Forschung Teilchenphysik

Inhalt

H1-Experiment	61
ZEUS-Experiment	73
HERMES-Experiment	87
HERA-B-Experiment	95
ATLAS-Experiment	101
CMS-Experiment	113
ALPS-Experiment	127
Astroteilchenphysik	131
Theoretische Physik	137
Aktivitäten in Hamburg	137
Aktivitäten in Zeuthen	149
International Linear Collider	153
Forschung Linearbeschleuniger-Technologien	169

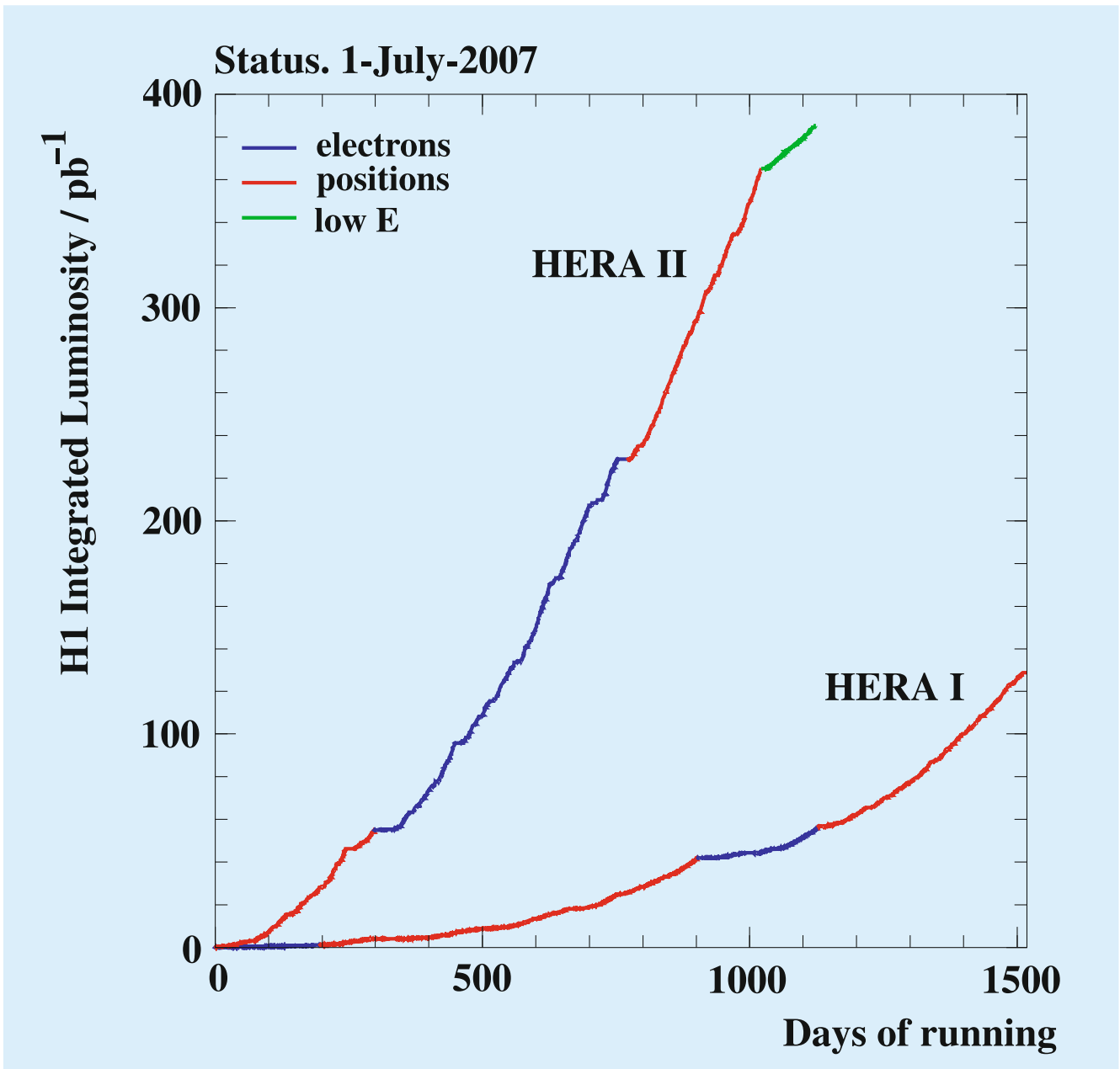


Abbildung 24: Die vom H1-Experiment seit 1992 aufgezeichnete und für Physikanalysen verfügbare Luminosität als Funktion der Anzahl der HERA-Betriebstage getrennt für HERA I und HERA II.

H1-Experiment

Beteiligte Institute: RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Vinca Inst. of Nucl. Sci. Belgrad, Univ. of Birmingham, Inter-Univ. ULB-VUB Brussels, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Inst. for Nucl. Phys. Cracow, Univ. Dortmund, JINR Dubna, CEA Saclay, DESY und 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: Claude Vallée, CPPM Marseille, Frankreich

Nach fünfzehn sehr erfolgreichen Betriebsjahren ging die Datennahme mit dem H1-Detektor am 30. Juni 2007 zu Ende. Die Anstrengungen der H1-Kollaboration konzentrierten sich in der ersten Jahreshälfte darauf, den hervorragenden Zustand des gesamten Detektors aufrecht zu erhalten, um die von HERA mit sehr großer Effizienz gelieferte Luminosität bis zum letzten Tag optimal ausnutzen zu können. Der HERA-Betrieb bei der nominellen Protonenergie von 920 GeV wurde Ende März beendet, da in den verbleibenden 3 Monaten Daten bei halber Protonenstrahlenergie genommen werden sollten. Insgesamt steht der H1-Kollaboration damit eine Luminosität von 480 pb^{-1} bei Protonenergien von 820 bzw. 920 GeV für Analysen zu Verfügung (siehe Abbildung 24). Die Daten bei reduzierter Protonenergie sollen der ersten direkten Messung der longitudinalen Strukturfunktion F_L bei HERA dienen und werden damit eine direkte Bestimmung der Gluondichte sowie eine wichtige Überprüfung unseres Verständnisses der Physik bei kleinen Werten der Skalenvariablen x ermöglichen. Dank sorgfältiger Vorbereitungen, insbesondere von Seiten der Maschinengruppe, erfolgte die Umstellung auf den 460 GeV Betrieb völlig reibungslos, so dass die für

die Messung erforderliche Datenmenge bereits Ende Mai vorhanden war. Aus diesem Grund konnte der letzte Monat sogar dazu verwendet werden, weitere Daten bei einer mittleren Energie von 575 GeV aufzuzeichnen. Insgesamt stehen der H1-Kollaboration für die F_L -Messung daher 12.3 pb^{-1} bei 460 GeV und 6.5 pb^{-1} bei 575 GeV zur Verfügung. Vorläufige Ergebnisse von dieser wichtigen Messung werden für das Frühjahr 2008 erwartet.

Im Berichtsjahr hat die H1-Kollaboration 9 Veröffentlichungen auf verschiedenen Arbeitsgebieten eingereicht, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden. Wie in den vergangenen Jahren wurden darüber hinaus wieder zahlreiche Beiträge mit neuen Resultaten zu den wichtigen Konferenzen und Workshops, wie der DIS-Konferenz in München, der EPS-HEP Konferenz in Manchester, sowie der Lepton-Photon Konferenz in Daegu, Korea geschickt. Von den insgesamt 25 neuen, vorläufigen Ergebnissen befassen sich alleine 10 mit der Suche nach seltenen oder exotischen Prozessen, deren endgültige Veröffentlichung in Kürze erfolgen wird. Alle diese Resultate basieren auf den gesamten bei nomineller Proton-Energie genommenen HERA II Daten, wobei der überwiegende Teil von ihnen auch die HERA I Da-

ten miteinschließt und damit eine Datenmenge von fast 500 pb^{-1} umfasst. Darüber hinaus wurden zu den Sommerkonferenzen zwei gemeinsam von H1 und ZEUS verfasste Beiträge zur Beobachtung von Ereignissen mit isoliertem Lepton und fehlendem Transversalimpuls, sowie von Ereignissen, die mehrere Elektronen enthalten eingereicht. Beide Kollaborationen haben hierfür jeweils ihre gesamte Datenmenge analysiert, so dass diese gemeinsamen Resultate auf einer kombinierten Datenmenge von fast 1 fb^{-1} beruhen. In beiden Fällen stimmen die kombinierten Messungen gut mit den Erwartungen des Standardmodells überein. Zwei weitere vorläufige Ergebnisse, die aus der Kombination der HERA I Resultate von H1 und ZEUS hervorgehen befassen sich mit der Messung des Wirkungsquerschnittes für Ereignisse der tiefinelastische Streuung (DIS) des neutralen Stroms und der Messung der Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung α_s , die gegenüber einer früheren H1-ZEUS Kombination einen fast halbierten Fehler aufweist und in sehr guter Übereinstimmung mit dem Weltmittelwert ist.

Die Zusammenarbeit zwischen H1 und ZEUS im Bereich gemeinsamer Analysen ist weiter vorangeschritten. Für eine Reihe von Analysesthemen werden die Ergebnisse gemeinsam diskutiert mit dem Ziel, durch eine Kombination der Resultate eine möglichst hohe Genauigkeit für die endgültigen HERA-Messergebnisse zu erzielen.

Eine präzise Bestimmung der Partondichteverteilungen (PDF) aus den gesamten HERA Daten wird insbesondere für die Interpretation der Messergebnisse am LHC von großer Bedeutung sein. Dieser Experimentübergreifende Aspekt der HERA-Physik ist daher ein wesentliches Element des entstehenden Analysezentrum im Rahmen der *Terascale-Allianz* der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF). Auf der anderen Seite ist es auch wichtig herauszufinden, in welchen Bereichen des Phasenraumes Verbesserungen unserer Kenntnis der PDFs von der Analyse der LHC-Daten erwartet werden können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des HERA-LHC Workshops die neue Arbeitsgruppe *PDF4LHC* gebildet, in der neben H1 und ZEUS auch die LHC Experimente und die Theorie vertreten sind. Die Bedeutung dieses Forschungsbereichs äußert sich auch darin, dass im Berichtsjahr eine neue HGF-Hochschul-Nachwuchsgruppe bewilligt wurde, die von

einer H1-Physikerin geleitet wird und in diesem Themenbereich arbeiten wird.

Für die meisten angestrebten Präzisionsanalysen sind die Güte von Kalibration und Rekonstruktionssoftware bestimmend für die endgültige Qualität des Ergebnisses. Es wurden daher besondere Anstrengungen unternommen, um weitere Verbesserungen in diesen wichtigen Bereichen zu erreichen. Um von dem so verbessertem Detektor-Verständnis profitieren zu können und einen homogenen Datensatz für die Analyse zu Verfügung zu haben, mussten alle HERA II Daten neu rekonstruiert werden. Dank der im Vorjahr vorbereiteten Änderungen in der Computing-Infrastruktur lassen sich die gesamten HERA II Daten in wenigen Wochen vollständig reprozessieren. Auf diese Weise werden auch zukünftige Optimierungen noch zeitnah in die Physikanalysen einfließen können.

Um in der Genauigkeit der physikalischen Ergebnisse nicht durch unzureichende Statistik von simulierten Ereignissen begrenzt zu sein, erfordern die HERA II Analysen auch die Erzeugung einer erheblich größeren Menge von Monte Carlo Ereignissen. Die Rate der für H1 auf dem LCG GRID simulierten Ereignisse wächst beständig und erreichte im Berichtsjahr Werte von fast 100 Millionen Ereignissen pro Monat. Ein weiteres Anwachsen dieser Zahlen wird angestrebt, um den für die beiden kommenden Jahren geschätzten Bedarf von einigen 10^9 Monte Carlo Ereignissen decken zu können.

Der H1-Detektor

Die letzten Betriebsmonate des H1-Experiments waren durch eine besonders hohe Effizienz der Datennahme und eine hervorragende Datenqualität gekennzeichnet.

Datennahme

Die Datennahme mit Positronen wurde ohne Unterbrechung über den Jahreswechsel weitergeführt. Insgesamt wurden in der letzten e^+p Datennahmepériode bei 920 GeV eine Luminosität von 135.6 pb^{-1} aufgenommen, von der 51.5 pb^{-1} in den ersten drei Monaten

von 2007 aufgezeichnet wurden. Die Gesamteffizienz der Datennahme konnte während des sich anschließenden Betriebs bei reduzierter Protonenergie noch weiter gesteigert werden und erreichte regelmäßig Werte bis 90%, was nach Korrektur der intrinsischen Totzeit-Verluste, die durch das Design des Frontend-Systems von H1 begründet sind, einer reinen Datennahme-Effizienz von 98% entspricht. Den geänderten Erfordernissen des Betriebs bei reduzierter Protonenergie konnte sehr flexibel durch Änderungen der Triggerstrategie entsprochen werden. Insbesondere kam hier der neue *Spacal-Topologische-Trigger* (STT) zum Einsatz, der topologische Information in den Spurdetektoren CIP und BST sowie dem rückwärtigen Kalorimeter Spacal dazu verwendet, um Untergrund sehr wirkungsvoll zu unterdrücken.

Detektor-Abbau

Mit Ausnahme des Eisenjochs, der Muonkammern und der supraleitenden Spule, die gemeinsam für einen zukünftigen Teststand erhalten werden sollen, wurde mit dem Abbau aller Detektor-Komponenten samt der zugehörigen Ausleseelektronik unter Beteiligung der externen H1-Institute im Juli begonnen. Ein Teil der Kosten des Abbaus kann dabei durch den Verkauf von freiwerdendem Material rückfinanziert werden. Zunächst wurden die Tunnelsysteme und die rückwärtigen Detektoren des Hauptdetektors ausgebaut, die zu einem großen Teil als Ausstellungsstücke zurück an die entsprechenden Institute transportiert wurden. Die Hauptarbeit besteht jedoch im Rückbau des Flüssig-Argon Kalorimeters. Das Aufwärmen erfolgte planmäßig innerhalb von 30 Tagen und bis Ende 2007 war das Kalorimeter bereits zu ca. 20% zurückgebaut. Es ist geplant die gesamten Abbauarbeiten bis etwa Mitte 2008 abzuschließen.

Physikerggebnisse

Im Berichtsjahr sind insgesamt 9 Analysen aus den Bereichen Quanten-Chromo-Dynamik, Jet-Physik, Diffraktion und der Suche nach neuer Physik zur Ver-

öffentlichung eingereicht worden. Einige Aspekte dieser Veröffentlichungen werden im Folgenden vorgestellt.

Untersuchungen des hadronischen Endzustandes

Die Frage, ob der nicht-perturbative Prozess der Fragmentation von erzeugten Quarks in beobachtbare Hadronen von der Art des zugrunde liegenden harten Prozesses abhängt, oder ob die Quark-Fragmentation vielmehr universeller Natur ist wurde in einer der Veröffentlichungen untersucht. Hierzu wurden Multiplizitäts- und Impulsverteilungen von geladenen Hadronen in DIS-Ereignissen mit den von verschiedenen e^+e^- Experimenten veröffentlichten Ergebnissen verglichen. Für einen aussagekräftigen Vergleich beschränkt sich die Analyse der DIS-Ereignisse auf die dem gestreuten Quark zugeordnete Hemisphäre im so genannten Breit-Bezugssystem, in dem das ausgetauschte raumartige virtuelle Photon zwar einen von Null verschiedenen Impuls Q aber verschwindende Energie hat. Dies ermöglicht eine wirkungsvolle Abtrennung der mit dem Protonrest assoziierten Teilchen, die sich nicht ohne weiteres mit den in einer e^+e^- Annihilation erzeugten Teilchen vergleichen lassen. In DIS-Ereignissen ist die Energieskala durch das virtuelle Photon bestimmt und hat für die untersuchte Hemisphäre den Wert $Q/2$ im Vergleich zur halben Schwerpunktenergie $E^*/2$ im Falle von e^+e^- Reaktionen. Die Verteilung der auf die jeweiligen Energieskala bezogenen Impulse x_p in Abhängigkeit von x_p und von der Skala zeigt Abbildung 25.

Der Vergleich mit den e^+e^- Daten unterstützt das Konzept der Universalität der Quark-Fragmentation, insbesondere, wenn der Einfluss von DIS Prozessen höherer Ordnung berücksichtigt wird, die bei der e^+e^- Annihilation nicht vorhanden sind. Sehr gute Übereinstimmung findet sich ebenfalls im Vergleich mit Monte Carlo Vorhersagen, die auf Matrixelementen führender Ordnung (LO), kombiniert mit Parton-Schauern (PS) beruhen. Hingegen sind QCD Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO) nicht in der Lage

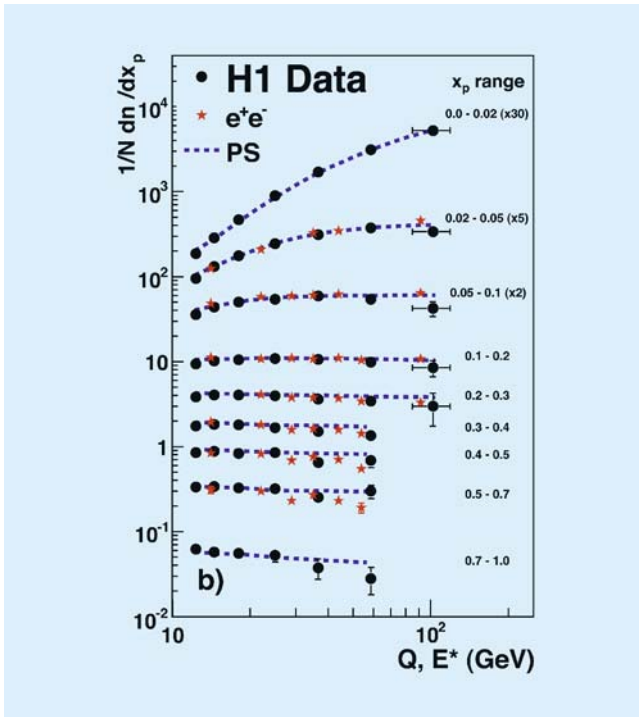


Abbildung 25: Normierte Verteilung des skalierten Impulses x_p als Funktion von Q (bzw. E^* für e^+e^- Annihilation) für verschiedene x_p Intervalle im Vergleich mit Monte Carlo Vorhersagen.

die in den Daten beobachteten Skalenverletzungen zu beschreiben. Damit können diese Daten bisher nicht für eine Bestimmung der Kopplungsstärke der starken Wechselwirkung α_s in NLO verwendet werden.

Jet-Produktion

Sehr viel besser für eine Messung von α_s eignet sich dagegen eine neue Analyse von HERA I Daten zur inklusiven Jet-Produktion im Breit-Bezugssystem, da sie unmittelbar sensitiv auf diese fundamentale Größe ist. Die Analyse profitiert gegenüber früheren Veröffentlichungen nicht nur von einer Faktor zwei höheren Luminosität und einer höheren Schwerpunktennergie, sondern auch von einem verbesserten Verständnis der hadronischen Energieskala. Einzel- und doppel-differentielle Wirkungsquerschnitte in Abhängigkeit von der Jetenergie E_T und von Q^2 im Bereich $150 < Q^2 < 15000 \text{ GeV}^2$

wurden gemessen. Sie werden gut durch Rechnungen der QCD in NLO beschrieben. Durch eine Anpassung der NLO Vorhersagen an die gemessenen Wirkungsquerschnitte lässt sich α_s bestimmen. Es zeigt sich aber, dass sich der Einfluss einiger experimenteller Unsicherheiten und die Abhängigkeit von der verwendeten Partondichtevertellung deutlich reduzieren lässt, wenn stattdessen das Verhältnis von inklusivem Jetquerschnitt zu dem gut bestimmten inklusiven DIS-Wirkungsquerschnitt verwendet wird. Der so ermittelte Wert für $\alpha_s(M_Z)$ ist in guter Übereinstimmung mit dem Weltmittelwert und hat eine Genauigkeit, die vergleichbar ist mit der anderer vor kurzem veröffentlichter Messungen. Der dominierende Beitrag zum Fehler dieser Messung von $\alpha_s(M_Z)$ beruht auf einer Abhängigkeit des Ergebnisses von der Wahl der Renormierungsskala μ_r , die den Einfluss bisher noch unberücksichtigter Beiträge höherer Ordnung widerspiegelt. Abbildung 26 demonstriert sowohl das so genannte "running" von α_s als Funktion von μ_r , als auch die Abhängigkeit des extrahierten Wertes $\alpha_s(M_Z)$ von der Wahl der verwendeten Skala.

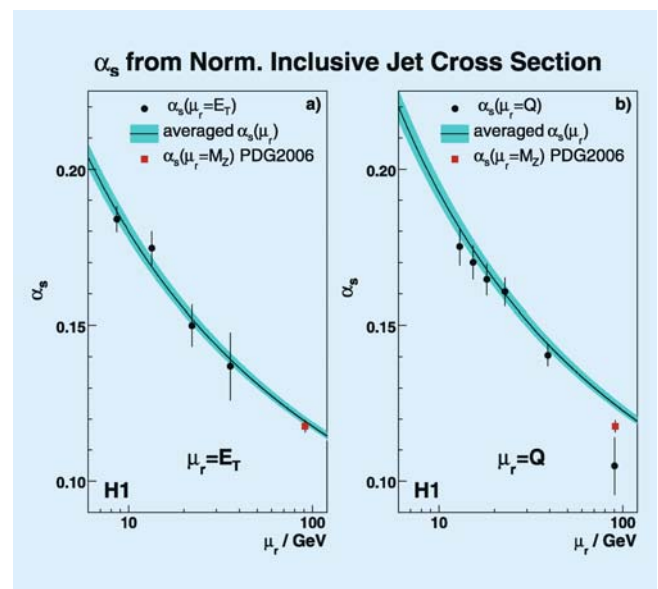


Abbildung 26: Messergebnisse für α_s für die beiden Renormierungsskalen $\mu_r = E_T$ bzw. $\mu_r = Q$. Die Kurve zeigt die Entwicklung von $\alpha_s(M_Z)$, die sich aus der Kombination aller Messpunkte ergibt. Die Breite des Bandes entspricht dem experimentellen Fehler.

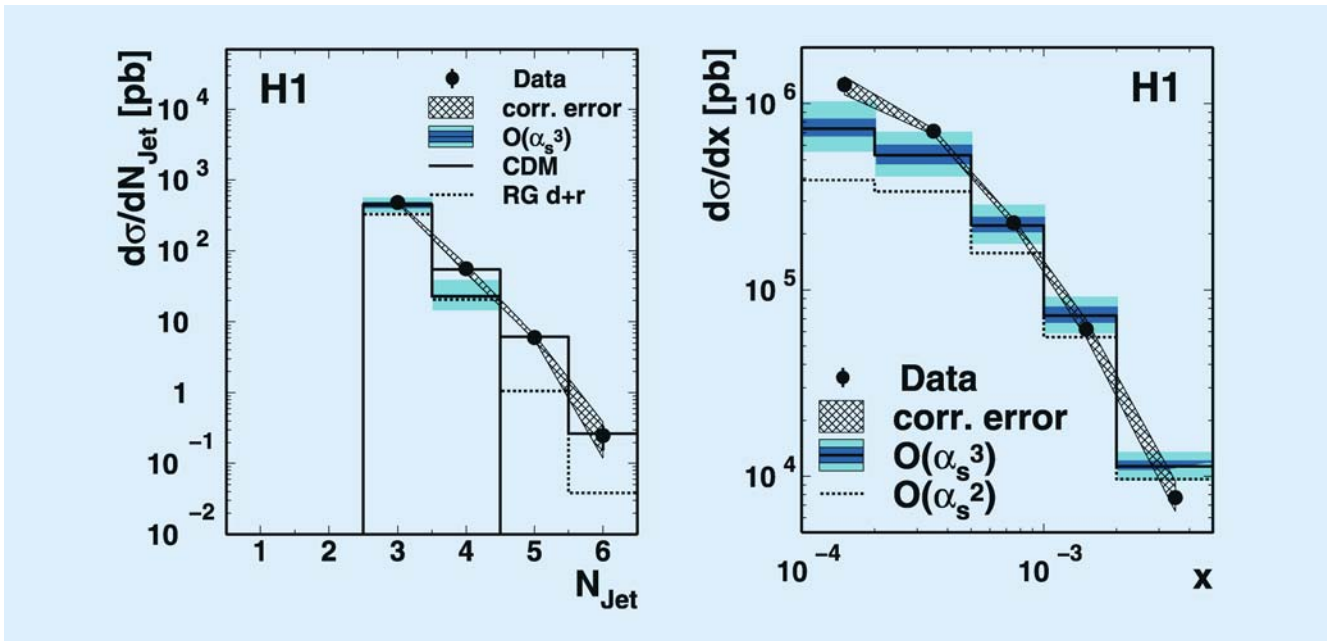


Abbildung 27: Differentieller Multijet Wirkungsquerschnitt als Funktion der Anzahl der Jets und der Skalenvariablen x im Vergleich mit NLO $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$ Rechnungen und Monte Carlo Vorhersagen von RAPGAP bzw. dem Colour Dipole Model (CDM).

Die Messung des Wirkungsquerschnittes für Ereignisse mit mehr als einem Jet bei hohen Transversalimpulsen und bei hohem Q^2 kann direkt mit theoretischen Vorhersagen verglichen werden. Die entscheidende Frage ist, ob die Rate, mit welcher Jets bei HERA produziert werden, von der Theorie korrekt beschrieben wird. Die Produktion von 2- bzw. 3-Jet Ereignissen kann in nächstführender Ordnung in der starken Kopplung α_s als Produktion von 2 bzw. 3 Partonen berechnet werden. Für die Berechnung der Produktion von Multi-Jet Ereignissen mit mehr als 3 Jets müssen hingegen Näherungen in Form von Parton-Schauern gemacht werden, welche auf QCD-Entwicklungsgleichungen (DGLAP, CCFM oder BFKL) beruhen.

In einer weiteren Veröffentlichung wird die Messung der Wirkungsquerschnitte von 3 bzw. 4 Jets in tiefinelastischer Streuung beschrieben. Während die Rate der 3-Jet Ereignisse mit der Theorie übereinstimmt (siehe Abbildung 27), ist schon bei Ereignissen mit 4 Jets die gemessene Rate etwa dreimal so hoch wie die

Vorhersage ($\mathcal{O}(\alpha_s^3)$). Deutlicher wird der Unterschied im Wirkungsquerschnitt als Funktion der Variablen x , welche den Bruchteil des Partonimpulses vom Protonimpuls angibt (siehe Abbildung 27 rechts). Bei kleinen Werten x , die diesen Prozess dominieren, ist der gemessene Wirkungsquerschnitt deutlich größer als die theoretische Vorhersage.

Während vollständige Rechnungen nur bis zur $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$ verfügbar sind, und die Unterschiede in den Vorhersagen für den Wirkungsquerschnitt zwischen $\mathcal{O}(\alpha_s^2)$ und $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$ besonders bei kleinem x sehr groß sind, ist zu erwarten, dass zur korrekten Beschreibung der Messungen Beiträge höherer Ordnung in α_s notwendig sind. Solche Beiträge sind in Monte Carlo Ereignisgeneratoren in Form der Parton-Schauer implementiert. Es zeigt sich, dass Simulationen, welche über DGLAP hinausgehen, die Messungen besser beschreiben können. Diese Resultate sind auch von großer Bedeutung für die Interpretation zukünftiger Messungen der Jet-Produktion am LHC.

Diffraktion

Eine besondere Klasse von Ereignissen mit Jets, welche zusätzlich in der Richtung der auslaufenden Proton-Fragmente eine Lücke im Teilchenfluss aufweisen (*rapidity gap*), wurde in zwei weiteren Veröffentlichungen untersucht. Das Fehlen von Teilchen in diesem Rapiditätsbereich wird auf den Austausch eines „Farb-neutralen“ Teilchens (auch Pomeron genannt) zurückgeführt. Ähnlich wie bei nicht-diffraktiven Resultaten, wo Jet-Messungen benutzt werden, um die Partondichteverteilungen, im Wesentlichen die Gluon-Verteilung, im Proton zu bestimmen, werden sie hier dazu verwendet die Struktur des Pomerons zu untersuchen. In tiefinelastischer Streuung wurden hierzu Ereignisse mit mindestens 2 Jets mit großem Transversalimpuls und einem *rapidity-gap* selektiert. Aus vorherigen Messungen wissen wir, dass im Wesentlichen Gluonen die Struktur des Pomerons bestimmen. Diffraktive Jet-Ereignisse finden damit hauptsächlich über die Fusion eines Photons und eines Gluons in ein Quark-Antiquark Paar statt. Aus der invarianten Masse der beiden Jets läßt sich die Größe z_P bestimmen, welche ein Maß für den Impulsbruchteil des an der Streuung beteiligten Gluons am Pomeronimpuls ist. Der gemessene differentielle Wirkungsquerschnitt für diffraktive Jet-Produktion als Funktion von z_P ist in Abbildung 28 gezeigt. Die Messung wird mit einer Vorhersage verglichen, welche auf diffraktiven Partondichten, die aus Anpassungen an H1-Daten der inklusiven Diffraktion gewonnen wurden beruht. Während das innere Fehlerband um die Vorhersage nur die Unsicherheiten aufgrund von Partondichte und Hadronisierung wiedergibt, ist im äusseren Band zusätzlich der Einfluss der Skalenunsicherheit enthalten. Es zeigt sich, dass die Daten im Bereich $z_P > 0.3$ signifikant von den Vorhersagen abweichen und damit eine zusätzliche Sensitivität auf die Partondichten in diesem Bereich haben. Durch eine gemeinsame Anpassung an die inklusiven und die 2-Jet Daten wurde die diffraktive Gluondichte neu bestimmt. Das Ergebnis ist zusammen mit den vorherigen Parametrisierungen in Abbildung 29 gezeigt. Man sieht deutlich, dass die Gluondichte in der neuen Parametrisierung bei großem z wesentlich reduziert ist.

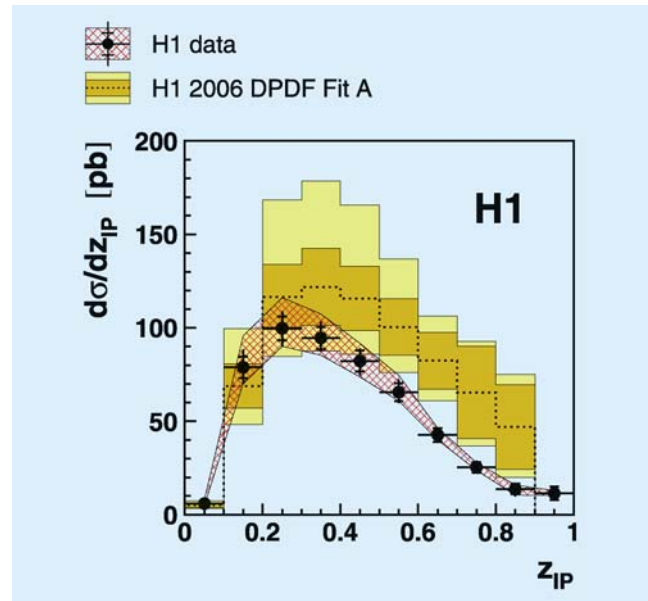


Abbildung 28: Differentieller DIS-Wirkungsquerschnitt von diffraktiven Dijet Ereignissen als Funktion der Skalenvariablen z_P im Vergleich mit NLO Vorhersagen basierend auf einer Anpassung an inklusive Daten von H1.

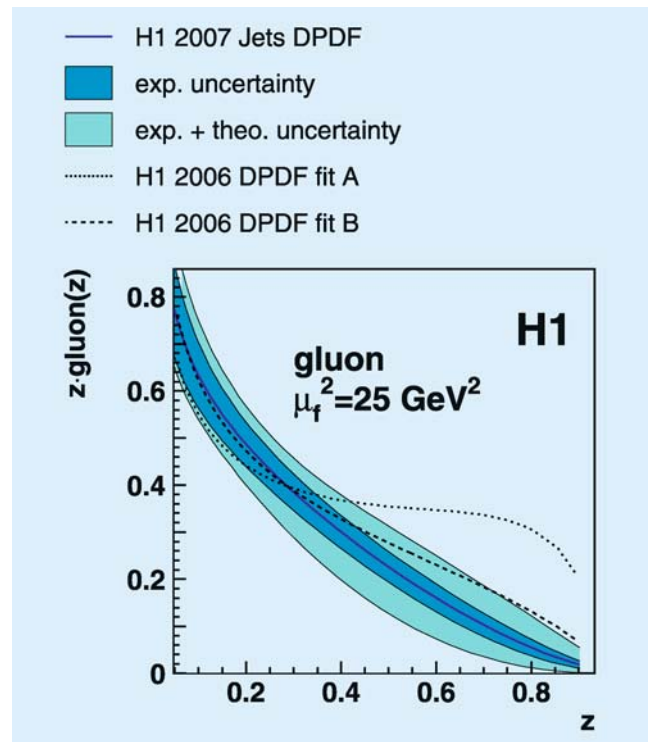


Abbildung 29: Diffraktive Gluondichte als Funktion des Gluonimpulsbruchteils z .

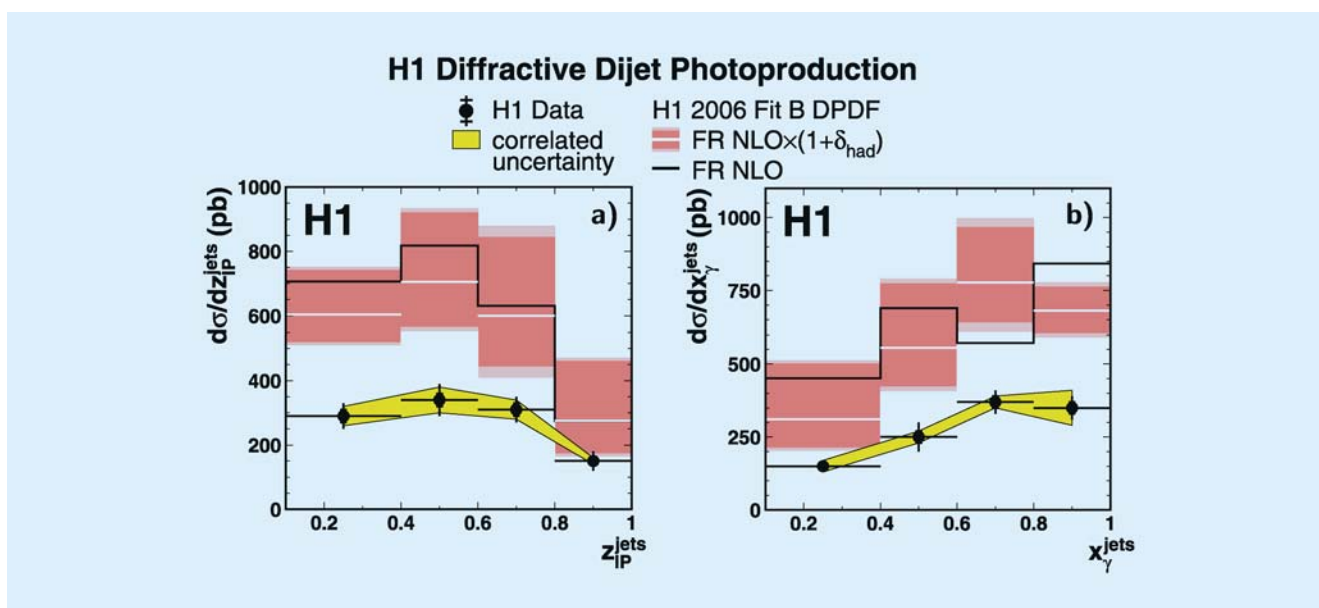


Abbildung 30: Differentieller Wirkungsquerschnitt der diffraktiven Dijet Photoproduktion als Funktion des Gluonimpulsbruchteils z_P und des Photonimpulsbruchteils x_γ .

Eine wesentliche Voraussetzung zur theoretischen Beschreibung der Messungen von Jet-Produktion ist das sogenannte Faktorisierungstheorem, welches besagt, dass sich der Photon-Proton Wirkungsquerschnitt aus dem Produkt von universeller Partonendichte des Protons und Wirkungsquerschnitt des partonischen Subprozesses (hier der Photon-Gluon Fusion) ergibt. Obwohl dieses Faktorisierungstheorem bisher nur für wenige Prozesse theoretisch bewiesen werden konnte, wird es dennoch zur Beschreibung von vielen Prozessen angewandt. Die Annahme der Existenz universeller Partondichten bedeutet zum Beispiel, dass Partondichten, welche in tiefinelastischer Streuung bei HERA bestimmt wurden, für die Berechnung von anderen Prozessen bei TeVatron und LHC ebenfalls Gültigkeit haben. Da diese Annahme eine zentrale Rolle bei der Interpretation von Messergebnissen spielt, ist es wichtig, sie experimentell zu überprüfen.

In einer weiteren Veröffentlichung wurde die Faktorisierungshypothese getestet, indem die Messung von diffraktiven Jet-Ereignissen auch auf den Bereich der Photoproduktion ($Q^2 \rightarrow 0$) ausgedehnt wurde. In quasi-reeller Photoproduktion kann das Photon nicht nur als

punktförmiges Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen, sondern vorher in ein Quark-Antiquark Paar fluktuieren, wodurch es wie ein Hadron mit innerer Struktur erscheint. In Ereignissen der diffraktiven Dijet Produktion kann man sowohl den Impulsanteil z_P eines Partons am Impuls des Targets (hier Pomeron), als auch den Impulsanteil x_γ eines Partons am Impuls des Photons rekonstruieren. Der gemessene Wirkungsquerschnitt als Funktion dieser Größen ist in Abbildung 30 gezeigt und wird mit der theoretischen Vorhersage unter Benutzung der vorher beschriebenen diffraktiven Partondichten verglichen. Man sieht deutlich, dass die Vorhersage etwa doppelt so hoch ausfällt wie die Messung und interpretiert dies als Indiz für die Brechung des Faktorisierungsansatzes in Photoproduktion. Eine ähnliche Beobachtung wurde schon bei diffraktiver Jet-Produktion am TeVatron gemacht, allerdings ist dort der Unterschied zwischen Experiment und Theorie noch wesentlich größer. Modelle, in denen diese Abweichungen der TeVatron Messungen durch Sekundärwechselwirkungen mit den Proton-Fragmenten erklärt werden sind jedoch nicht mit der hier gemachten Beobachtung verträglich, dass die Unterdrückung unabhängig von x_γ ist. Ein genaueres Verständnis die-

ses Unterdrückungsmechanismus ist aber wichtig auch für die Interpretation von Multi-Jet Produktion bei LHC und erfordert weitere theoretische Untersuchungen.

Die diffraktive Wechselwirkung ist auch bei exklusiver Produktion von Photonen von großer Bedeutung. In einer weiteren Veröffentlichung wird der Prozess $\gamma^* + p \rightarrow \gamma + p$ bei hohem Q^2 untersucht, wobei das Photon im Detektor nachgewiesen wird und das elastisch gestreute Proton den Detektor unter kleinem Winkel unbeobachtet verlässt. Dieser Prozess wird "Deeply Virtual Compton Scattering" (DVCS) genannt. Er ist das Pendant zur exklusiven Vektor Meson Produktion (z. B. $\gamma^* + p \rightarrow J/\psi + p$), hat allerdings wesentlich kleinere theoretische Unsicherheiten, da man keine Wellenfunktion des Vektormesons berücksichtigen muss. Wie schon die diffraktive Jet-Produktion ist auch der DVCS-Prozess direkt von der Gluondichte des Targets abhängig. Der Wirkungsquerschnitt steigt sehr stark als Funktion der Photon-Proton Schwerpunktsenergie W an (Abbildung 31), was eine direkte Konsequenz der zu kleinen x -Werten stark ansteigenden Gluondichte ist.

Die eindeutige experimentelle Signatur des Prozesses erlaubt es, den Impulsübertrag t am Proton Vertex zu bestimmen. In weichen diffraktiven Wechselwirkungen

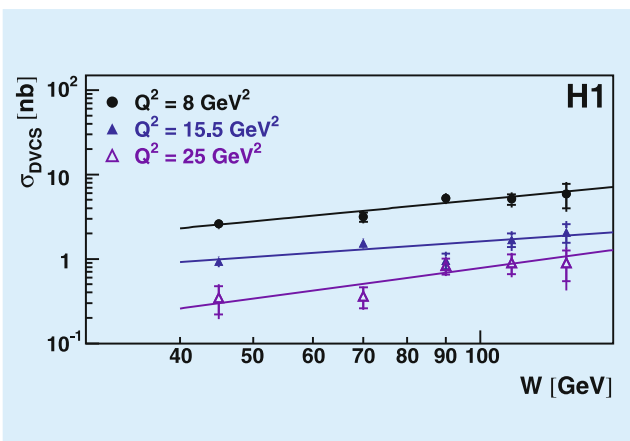


Abbildung 31: Totaler Wirkungsquerschnitt für DVCS als Funktion der Photon-Proton Schwerpunktsenergie W für verschiedene Werte von Q^2 .

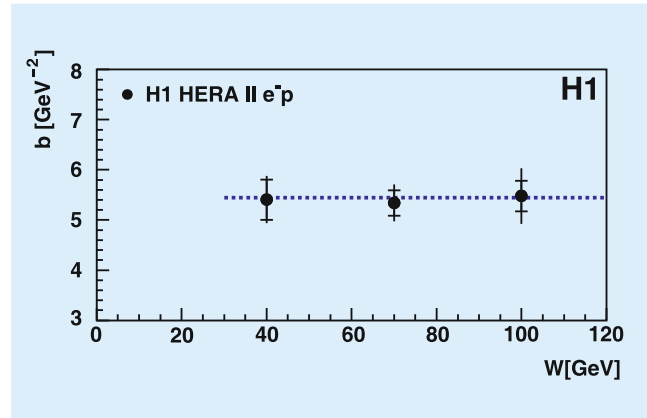


Abbildung 32: Abhängigkeit des für den DVCS-Prozess gemessenen Parameters b als Funktion von W .

gen beobachtet man üblicherweise das als *shrinkage* bezeichnete Verhalten: die durch den Parameter b charakterisierte exponentielle Verteilung des Impulsübertrages $d\sigma/dt \sim \exp(-b|t|)$ wird mit steigender Energie W zunehmend steiler. Abbildung 32 zeigt jedoch, dass sich der gemessene Parameter b in dieser Messung nicht signifikant mit der Schwerpunktsenergie W ändert. Dies wird als ein Hinweis darauf gedeutet, dass die DVCS Produktion bei hohem Q^2 nicht durch weiche Diffraction beschrieben ist, sondern ein perturbativer Prozess ist, bei dem die Gluondichte im Protontarget eine entscheidende Bedeutung hat.

Erzeugung isolierter Photonen

Lässt man nun in tiefinelastischer Photon Produktion die Bedingung für Diffraction (keine weiteren Teilchen zusätzlich zum Photon) fallen, dann gelangt man zur so genannten prompt-Photon Produktion in DIS, $ep \rightarrow e\gamma X$. Dieser Prozess ist wesentlich schwieriger theoretisch zu beschreiben, da erheblich mehr Subprozesse zum Endzustand beitragen können. Auch die experimentelle Messung ist komplizierter, da man das Photon nun zwischen weiteren Teilchen isolieren und identifizieren muss. Verlangt man zusätzlich zum Photon bei hoher Transversalenergie noch einen Jet, dann ergibt sich der gemessene Wirkungsquerschnitt wie in Abbildung 33 dargestellt.

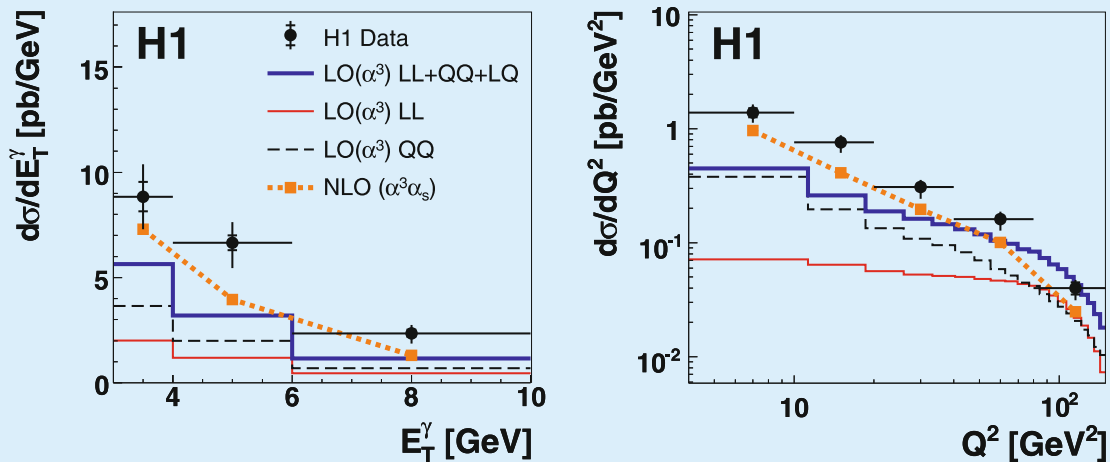


Abbildung 33: Differentieller Wirkungsquerschnitt für Photon plus Jet Produktion in DIS als Funktion der Photon Transversalenergie und von Q^2 .

Man erkennt, dass alle theoretischen Vorhersagen signifikant unter den Messungen liegen, wobei die Vorhersagen in nächstführender Ordnung, d. h. in $\alpha^3\alpha_s$ die Daten am besten beschreiben.

Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Im Berichtsjahr wurden zwei Veröffentlichungen publiziert, in denen nach Physik jenseits des Standardmodells gesucht wurde. Die erste bezieht sich auf leptonenzahlverletzende Prozesse und die zweite auf die Suche nach spezifischen aus fünf Quarks aufgebauten Teilchen.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik postuliert die Erhaltung der Leptonenzahl separat für Leptonen des Elektron-, Muon- und Tau-Types. Experimentell hat man jedoch schon Abweichungen von diesem Postulat für die neutralen Leptonen (Neutrinos) durch Nachweis der Neutrinooszillationen beobachtet. Von großer Bedeutung für die Physik jenseits des Standardmodells wäre die Beobachtung von leptonenzahlverletzenden Prozessen auch im Bereich der geladenen

Leptonen. In Experimenten bei relativ niedrigen Energien hat man solche Prozesse bisher nicht beobachtet und Grenzen auf ihre Häufigkeit abgeleitet. HERA erlaubt die Suche nach leptonenzahlverletzenden Prozessen bei sehr hohen Energien. Der häufigste im Standardmodell vorhergesagte Streuprozess bei HERA ist $ep \rightarrow eX$, d. h. im Endzustand findet sich das gestreute Elektron wieder, balanciert durch einen hadronischen Endzustand X. Sollte die Leptonenzahl nicht erhalten sein, würde man auch Prozesse wie $ep \rightarrow \mu X$ oder $ep \rightarrow \tau X$ erwarten. Die Suche nach diesen Prozessen ist die Thematik der hier beschriebenen Publikation. Solche leptonenzahlverletzenden Prozesse könnten z. B. durch Leptoquarks vermittelt werden, die an die Leptonen verschiedener Generationen koppeln.

Der H1 Detektor eignet sich sowohl hervorragend dafür den hadronischen Endzustand X, als auch Elektronen und Muonen zu vermessen. Taus werden entweder durch ihre leptonischen Zerfälle in e bzw. μ plus die entsprechenden Neutrinos nachgewiesen, oder durch die Charakteristika ihrer hadronischen Zerfälle. Eine wesentliche Aufgabe bei der Suche nach seltenen Prozessen ist es, Ereignisereignisse zu definieren, die bei möglichst hoher Effizienz für den gesuchten Prozess

den Untergrund aus Standardmodellprozessen minimieren. Dieses gelang bei dieser Analyse sowohl im μ -, als auch im τ -Kanal. Im $ep \rightarrow \mu X$ -Kanal erwartete man nach allen Analyseschritten ungefähr ein Ereignis, konsistent mit der Tatsache, dass kein Ereignis in den Daten gesehen wurde.

Im $ep \rightarrow \tau X$ Kanal wurde ein Ereignis beobachtet bei einer Erwartung von ungefähr fünf Ereignissen. Diese Zahlen zeigen, dass bei HERA keine Evidenz für leptonenzahlverletzenden Prozesse gefunden wurde. Quantitativ kann man dann Ausschlussgrenzen auf die Kopplungsstärke λ des hypothetischen leptonenzahlverletzenden Leptoquarks als Funktion der Leptoquarkmasse bestimmen. Dies ist am Beispiel der $e \rightarrow \mu$ verletzenden skalaren Leptoquarks der Fermionenzahl $F = 0$ in Abbildung 34 dargestellt. Kopplungsstärken oberhalb der dargestellten Linien sind mit 95% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Nimmt man zusätzlich

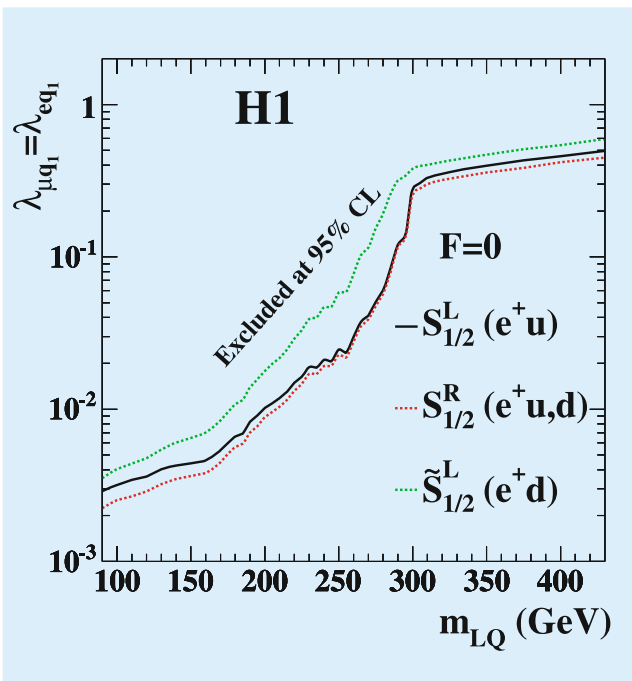


Abbildung 34: Grenzen auf die Kopplungskonstante leptonzahlverletzender ($e \rightarrow \mu$) skalarer Leptoquarks der Fermionenzahl $F = 0$ als Funktion der Leptoquarkmasse.

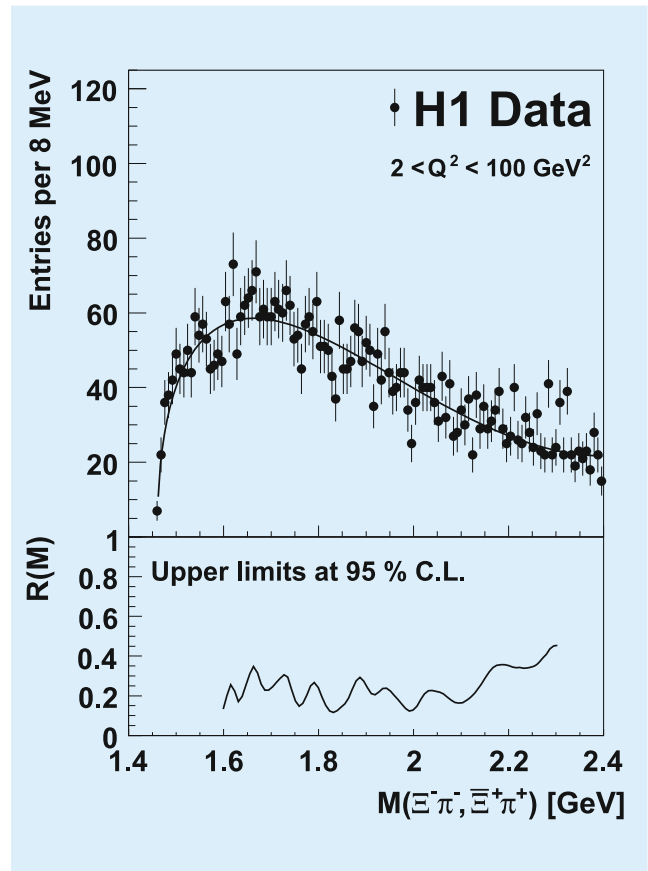


Abbildung 35: Invariante Masse des $X \rightarrow \Xi\pi$ Systems. Im unteren Teil ist die relative (siehe Text) obere Grenze auf den Produktionswirkungsquerschnitts gezeigt.

an, dass die Kopplungsstärke so groß ist wie die elektromagnetische Kopplung ($\lambda = 0.3$), kann man bei Betrachtung aller verschiedenen Typen von Leptoquarks für $e \rightarrow \mu$ ($e \rightarrow \tau$) verletzende Prozesse Leptoquarks bis zu Massen von 459 (379) GeV ausschließen. Die gefundenen Ausschlussgrenzen sind vergleichbar mit den Resultaten aus Experimenten bei niedrigeren Energien, in vielen Fällen, besonders für die $e \rightarrow \tau$ Leptonzahlverletzung, jedoch noch restriktiver.

Alle stark wechselwirkenden Teilchen, die bisher experimentell beobachtet wurden lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Zum einen sind dies die Mesonen, die aus einem Quark und einem Antiquark aufgebaut sind, und zum anderen die Baryonen, die aus drei Quarks zu-

sammengesetzt sind. Für Aufregung sorgten die im Jahr 2003 und danach in einigen Experimenten gemachten Beobachtungen eines relativ langlebigen Teilchens Θ_s , das im Rahmen des Quarkmodells nur als Bindungszustand von fünf Quarks (Pentaquark) aufgebaut werden kann. Obwohl einige andere Experimente keine Evidenz für dieses Teilchen fanden, startete eine intensive Suche nach weiteren Pentaquarkzuständen. Im Rahmen verschiedener auf QCD basierender theoretischer Modelle existieren Pentaquarkzustände in Multipletts und es werden neben dem Θ_s weitere Teilchen mit spezifischen Quantenzahlen vorausgesagt. Eines von Ihnen ist das als X bezeichnete Teilchen mit einer zweifach negativen Seltsamkeit, das sowohl im zweifach negativ geladenen Zustand X^{--} als auch im neutralen Zustand X^0 existieren sollte. In Proton-Proton-Streuung wurde von dem NA49 Experiment am CERN Evidenz für diese Zustände bei einer Masse von 1863 MeV gefunden. Die Suche nach diesen Teilchen bei HERA ist Inhalt der zweiten in diesem Abschnitt beschriebenen Veröffentlichung.

Das X^{--} wird gesucht über den Zerfall $\Xi^-\pi^-$ und das X^0 über den Zerfall in $\Xi^-\pi^+$. Das Ξ^- wird über den bekannten Zerfall $\Lambda\pi^-$ und das Λ über den $p\pi^-$ Zerfall nachgewiesen. Insgesamt gilt es den Zerfall $X \rightarrow p\pi\pi$ mit den Zwischenstufen des Ξ^- und des Λ zu analysieren. Dieses gelingt mit sehr guter Rekonstruktionsauflösung durch genaue Vermessung der Teilchenspuren im zentralen Spurdetektor des H1 Experiments. Abbildung 35 zeigt die gemessene Anzahl selektierter Ereignisse als Funktion der Masse des X Systems. Über einem kontinuierlichen Untergrund (eingezeichnete Linie) ist kein Anzeichen einer Resonanzüberhöhung zu beobachten, auch nicht bei der von NA49 berichteten Masse $M_X = 1863$ MeV. Aus den Daten kann man dann eine obere Grenze auf den Produktionswirkungsquerschnitt des hypothetischen X Teilchen bestimmen. Diese ist relativ zum Produktionswirkungsquerschnitt des wohlbekannteren $\Xi(1530)$ Teilchens im unteren Teil der Figur dargestellt. Die H1 Daten bestätigen damit nicht die NA49 Beobachtung eines potentiellen Pentaquarkzustandes zweifach negativer Seltsamkeit.



Abbildung 36: Der Vorwärtsbereich des ZEUS Detektors während des Ausbaus einer der großen inneren Myonkammern. Links im Bild orange erkennt man das Eisenjoch und im rechten Teil die Rückseite des Vorwärtskalorimeters, aus dem bereits die Photoröhren entfernt wurden.

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: E. Gallo, INFN Firenze, Italien

Das Jahr 2007 markiert einen wichtigen Einschnitt in der Teilchenphysik: Der weltweit einzige Elektron-Proton Collider HERA wurde nach 15 Jahren erfolgreicher Betriebszeit und mehr als 500 pb^{-1} integrierter Luminosität am 30. Juni abgeschaltet. Damit ging auch die Datennahme des ZEUS Experimentes zu Ende über dessen Arbeit und Ergebnisse in 2007 hier berichtet werden soll.

HERA Betrieb und ZEUS Datennahme

Über die HERA Gesamtlaufzeit von 15 Jahren konnte das ZEUS Experiment $\sim 500 \text{ pb}^{-1}$ integrierte ep Luminosität mit guten Detektorbedingungen aufnehmen, etwa 300 pb^{-1} in Positron-Protonkollisionen und 200 pb^{-1} in Elektron-Protonkollisionen, zusammen fast eine Milliarde ep-Streureaktionen¹. Weitere Details der in den verschiedenen Datenperioden genommenen Luminositäten sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die abschließende Datennahme im ersten Halbjahr 2007 hat dazu folgendermaßen beigetragen. Der HERA Betrieb in 2007 schloss nahtlos an das sehr erfolgreiche Jahr 2006 an. Bis Ende März lief HERA im normalen Hochenergiebetrieb mit Protonen mit einer Energie von 920 GeV und Positronen von 27.6 GeV. In diesem Zeitraum konnte das ZEUS Experiment 40 pb^{-1} inte-

		Luminosität [pb^{-1}]	
		e^+p	e^-p
HERA I	1992–2000 unpolarisierte Elektronen	120	19
HERA II	2003–2007 polarisierte Elektronen	180	190

Tabelle 3: Vom ZEUS Detektor in den HERA Hochenergie-Runs (mit Protonenergien von 820 GeV oder 920 GeV) aufgezeichnete integrierte Luminositäten.

¹Im folgenden wird der Begriff Elektronen übergreifend für Elektronen und Positronen verwendet, außer es kommt auf die Unterscheidung an.

grierte Luminosität aufzeichnen. Zur Erweiterung des Messprogrammes wurde HERA in den letzten drei Monaten mit verringerten Protonenergien betrieben. ZEUS konnte etwa 13 pb^{-1} gute Daten bei 460 GeV Protonenergie aufnehmen und knapp 8 pb^{-1} bei 575 GeV. Der gesamte Betrieb von HERA in 2007 verlief bis auf einige Ausfallperioden weitgehend störungsfrei und mit guten Strahlbedingungen.

Das ZEUS Experiment lief bis zum Schluss von HERA mit ausgezeichneter Datennahmeeffizienz, die 2007 im Mittel etwas über 90% lag. Der Detektor zeigte keine größeren Ausfalls- oder Alterserscheinungen, alle wesentlichen Komponenten konnten weitgehend problemlos betrieben werden.

Abbau des ZEUS Detektors

Bereits einen Monat nach Ende der Datennahme, im August 2007, wurde mit dem systematischen Abbau des ZEUS Experiments begonnen. Ziel dieser Maßnahme ist es, den Experimentaufbau bis Ende 2008 vollständig zu entfernen. Dabei können große Teile des Experiments wiederverwendet werden. Einige besonders eindrucksvolle Komponenten sollen als Ausstellungsstücke dienen. Zum Beispiel wird die zentrale Spurkammer im *Science Museum* im Zentrum von London ausgestellt und eine Hälfte des Mikrovertexdetektors wird als Exponat im Eingangsbereich des *Nationaal instituut voor subatomaire fysica* in Amsterdam verwendet.

Aufgrund dieser Tatsache muss auch beim Abbau mit großer Sorgfalt vorgegangen werden, um die wiederverwertbaren Komponenten nicht zu beschädigen. Abbildung 36 zeigt wie eine der großen Myonkammern im Vorwärtsbereich des ZEUS Detektors herausgezogen wird. Der Abbau des Uran-Szintillator Kalorimeters stellt eine besondere Herausforderung dar. Das Kalorimeter wird in einzelne Module zerlegt und jeweils bis zu drei Module werden in Standardcontainern zum Transport verpackt. Da das enthaltene abgereicherte Uran vom *US Department of Energy* ausgeliehen war, müssen die Module wieder in die USA zurücktransportiert werden. Mit dieser Maßnahme wird im März

2008 begonnen und sie wird über einen Zeitraum von fast vier Monaten andauern. Im Anschluss werden die inneren Komponenten, die Spurkammern, der Mikrovertexdetektor und das zentrale Strahlrohr entfernt. Als letzter Schritt wird das 2000 t schwere Eisenjoch zerschnitten und verschrottet. Der Abbau soll gegen Ende des Jahres 2008 abgeschlossen sein.

Datenverarbeitung

Auch in 2007 konnte die Rechenleistung für Rekonstruktion, Simulation und Analyse der Daten bei ZEUS wieder deutlich gesteigert werden. Hier sei nur erwähnt, dass die für die Daten-Korrekturen benötigten simulierten Ereignisse in einer neuen Rekordmenge produziert wurden: 581 Millionen im Vergleich zu 429 Millionen in 2006. Die *Gridsite Facility*, über die in den letzten Jahren schon berichtet wurde, hat einen stetig steigenden Anteil an dieser Produktion von zurzeit 80%.

Physikalische Ergebnisse

Auch 2007 war wieder ein überaus fruchtbares Jahr bezüglich neuer Physikergebnisse des ZEUS Experimentes. Insgesamt 13 Analysen konnten publiziert werden. Über 25 neue *preliminary measurements* wurden auf internationalen Fachtagungen vorgestellt, darunter einige unter Verwendung der gesamten HERA Datenstatistik inklusive der neuen Daten in 2007. Im Folgenden soll nun eine Auswahl dieser Resultate präsentiert werden, angefangen von inklusiven ep Reaktionen bis zu Prozessen mit exklusiven Endzuständen wie schweren Quarks.

Glossar

Die grundlegenden kinematischen Größen der ep-Streuung im Quark-Parton-Modell für den kinematischen Bereich von HERA sind in Abbildung 37 definiert.

Die Streuung des Elektrons an einem Quark im Proton wird durch drei kinematische Größen beschrieben:

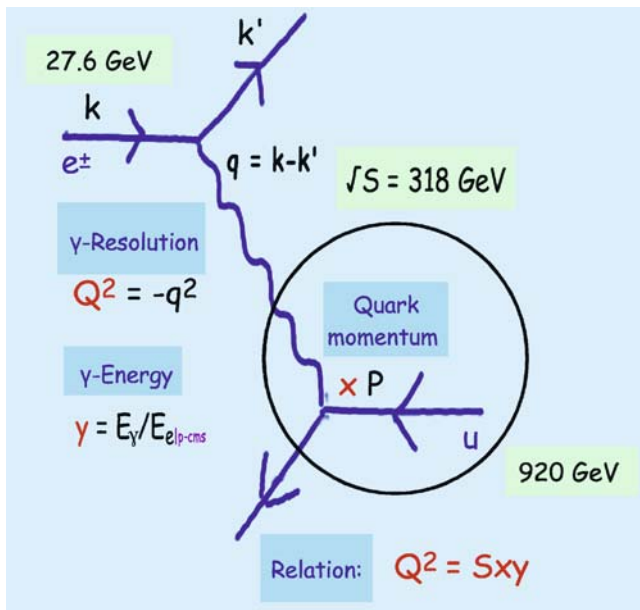


Abbildung 37: *ep*-Streuung im Quark-Parton-Modell.

Dem Quadrat des Viererimpulsübertrags Q^2 des ausgetauschten Bosons, die Inelastizität y , d. h. den Anteil der Elektronenergie der vom Boson übernommen wird (im Protonruhesystem) und *Bjorken* x , den Anteil des Protonimpulses, den das Quark trägt. Nur zwei dieser Größen sind unabhängig. Die dritte ist bestimmt durch die Relation $Q^2 = sxy$, wobei \sqrt{s} die Schwerpunktsenergie des *ep* Systems ist. Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

Parton Synonym für ein Quark oder Gluon

DIS (*deep inelastic scattering*) *ep*-Streuung mit einem Q^2 von mindestens einigen GeV^2

Photoproduktion *ep*-Streuung bei der das ausgetauschte Photon quasireell ist, d. h. $Q^2 \sim 0 \text{ GeV}^2$

NC (*neutral current*) das ausgetauschte Boson ist ein Photon oder Z-Boson

CC (*charged current*) das ausgetauschte Boson ist ein W-Boson

PDF (*Parton Distribution Functions*) Parametrisierungen der Teilchendichten von Quark und Gluonen in einem Hadron, wird hier vorwiegend für das Proton verwendet

NLO (*Next-to-Leading Order*) Berechnung der Störungsreihe der QCD eine Ordnung (in der Kopplungskonstanten α_s) höher als die führende Ordnung der gegebenen Reaktion

Suche nach neuer Physik

Mit der *ep*-Schwerpunktsenergie von 318 GeV bietet der HERA Collider gute Möglichkeiten nach *neuer Physik jenseits des Standardmodells* wie zum Beispiel nach neuen schweren Teilchen an der Hochenergiegrenze zu suchen. Eine geeignete experimentelle Signatur sind höchstenergetische Elektronen und Myonen, die in vielen Szenarien neuer Physik in Raten auftreten, welche diejenige aus Standardmodellprozessen bei weitem übertreffen können. Um eine solche potenzielle aufregende Entdeckung nicht zu verpassen, haben die beiden Experimente ZEUS und H1 innerhalb kürzester Zeit die gesamten von HERA angelieferten Daten nach Ereignissen mit solchen Leptonkandidaten untersucht und ihre Ergebnisse kombiniert. Abbildung 38 zeigt als Beispiel die Verteilung der invarianten Masse von

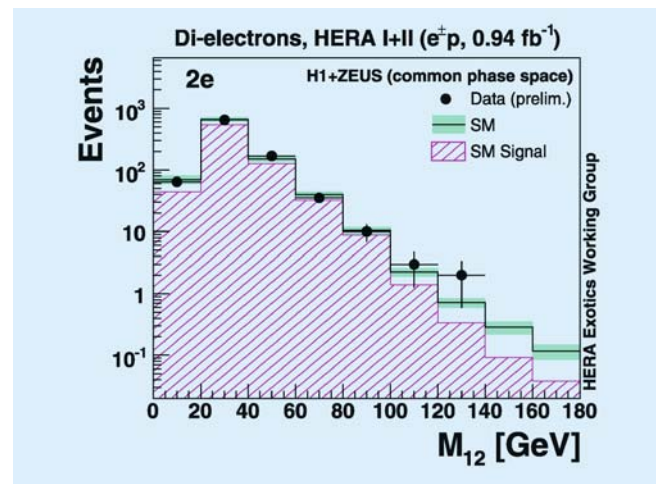


Abbildung 38: *Gemeinsame Analyse von ZEUS und H1 von höchstenergetischen Elektronenpaaren in der gesamten bei HERA aufgezeichneten Datenmenge. Die Verteilung der invarianten Masse der Paare in den Daten ist mit den Vorhersagen von Standardmodellprozessen verglichen (Signal bezeichnet die Prozesse mit echten Elektronenpaaren).*

Elektronpaaren in der kombinierten Datenmenge von $\sim 1\text{fb}^{-1}$ integrierte Luminosität. Zusammenfassend gesagt wurden weder in dieser noch in anderen solcher Verteilungen in Analysen mit einzelnen oder mehreren Elektronen und/oder Myonen signifikante Abweichungen von den vorhergesagten Raten aus Standardmodellprozessen gefunden. Daraus ergeben sich erhebliche Einschränkungen für viele Modelle neuer Physik. Weitere Datenanalysen, die zurzeit stattfinden wie zum Beispiel die Suche nach neuen Bindungszuständen aus Quarks und Elektronen, den Leptoquarks, werden zeigen ob vielleicht doch noch Anzeichen für neue Physik in den HERA Daten zu finden sind.

Die inklusive ep-Streuung bei HERA mit longitudinal polarisierten Elektron- oder Positronstrahlen bietet faszinierende Möglichkeiten, den *elektroschwachen Sektor* des Standardmodells zu testen. Abbildung 39 zeigt neue ZEUS Messungen der NC Wirkungsquerschnitte als Funktion von Q^2 . Diese Messungen nutzen die gesamten bei HERA II in den Jahren 2004–2006 aufgenommenen e^-p Daten. Die Resultate sind getrennt gezeigt für Daten mit positiver und negativer longitudinaler Elektronpolarisation. Der steile Abfall der Wirkungsquerschnitte mit Q^2 ist im Wesentlichen durch die *Rutherfordstreuung* $\sim 1/Q^4$ der Elektronen an den Quarks in den Protonen zu erklären. An der unteren Q^2 Grenze der Daten ist der Austausch von Photonen dominant, zu höheren Q^2 trägt der Z-Austausch signifikant bei. Die Tatsache dass das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für die zwei verschiedenen Polarisierungen von *eins* abweicht ist ein klarer Hinweis auf Paritätsverletzung, die hier zum ersten Mal in einem Experiment mit raumartigen Auflösungen bis hinunter zu 10^{-18} m beobachtet wird. Dieser Effekt wird im Standardmodell erklärt durch paritätsverletzende Terme die hauptsächlich in der Interferenz zwischen dem Photon und dem Z-Austausch auftreten. Die in der Abbildung 39 gezeigte Standardmodellvorhersage *SM (ZEUS-Jets)* beschreibt die Daten hervorragend. Vor allem bei höchsten Impulsüberträgen Q^2 sind die Daten sensitiv auf eine mögliche räumliche Ausdehnung der Quarks, die sich über einen Formfaktor als zusätzliche Abschwächung der Wirkungsquerschnitte mit Q^2 bemerkbar machen würde. Aus den Daten ist eine solche

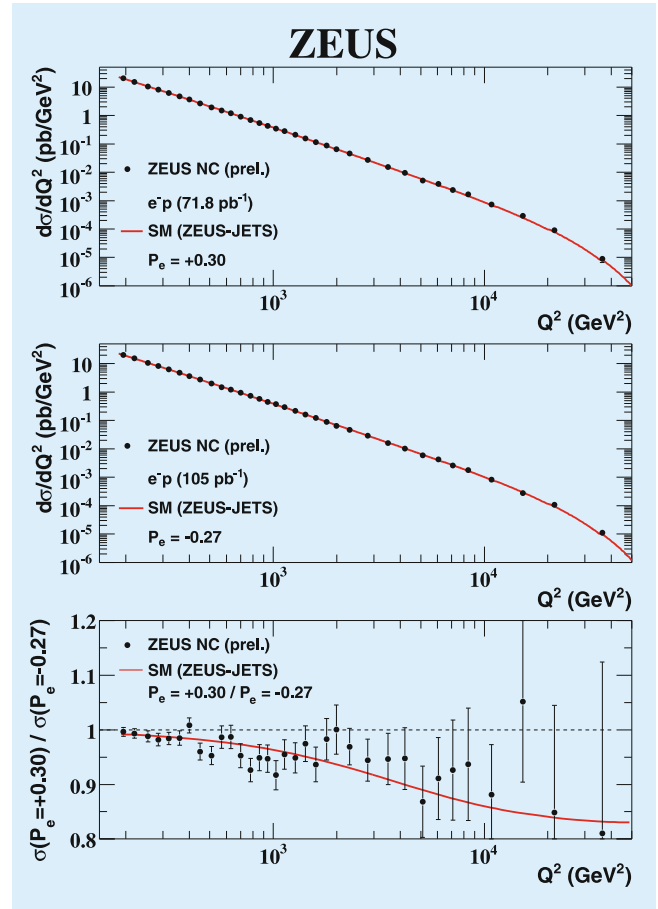


Abbildung 39: Wirkungsquerschnitte $d\sigma/dQ^2$ für Wechselwirkungen des neutralen Stroms in der e^-p -Streuung für (oben) positive und (mitte) negative mittlere Elektronpolarisierung und (unten) das Verhältnis der beiden. Die Vorhersagen des Standardmodells sind als durchgehende Kurven gezeigt.

Abschwächung nicht zu ersehen. Aus der Analyse eines großen Teils aller HERA $e^\pm p$ -Daten wurde eine Obergrenze für den möglichen Quarkradius bestimmt zu $r_Q > 0.62 \cdot 10^{-18}$ m (mit 90% Konfidenz).

Im Standardmodell koppeln die geladenen Ströme nur an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen. Deshalb erwartet man eine direkt proportionale Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte von der Polarisation der Strahlelektronen. Dieser maximal paritätsverletzende Effekt wird sehr schön bei HERA beobachtet (siehe Abbildung 40). ZEUS konnte dazu einen neu-

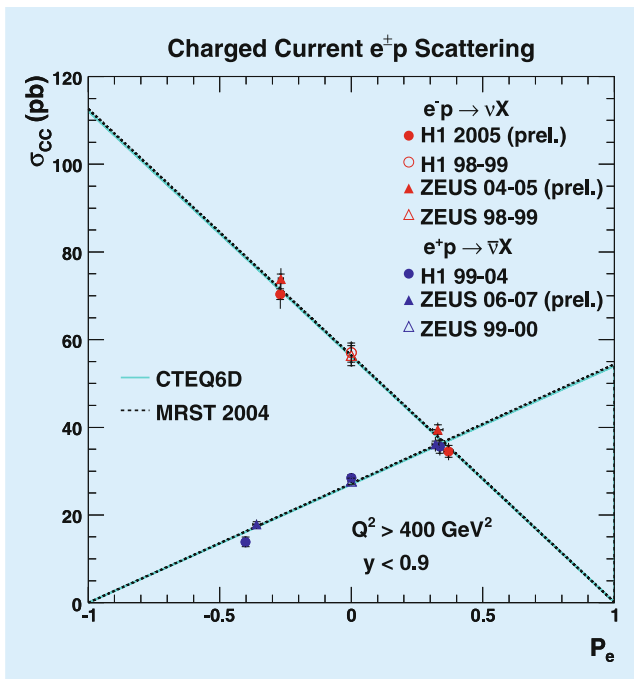


Abbildung 40: Totaler Wirkungsquerschnitt für Wechselwirkungen des geladenen Stroms in e^+p - und e^-p -Streuungen, in Abhängigkeit vom mittleren Polarisationsgrad der Elektronen. Die ZEUS und H1 Messungen sind mit Linien verglichen, welche die Standardmodellvorhersage zeigen (mit zwei verschiedenen Proton PDFs “CTEQ6D” und “MRST2004”).

en präzisen Punkt ZEUS 06-07 (prel.) beisteuern, für den die gesamte Statistik der in 2006 bis 2007 aufgezeichneten e^+p Daten verwertet wurde. In den Daten sind keinerlei signifikante Abweichungen von der Standardmodellvorhersage zu sehen.

Protonstruktur aus inklusiven Messungen

Neutrale und geladene Ströme sind direkt sensitiv auf die Quarkdichten im Proton. Die Analyse der inklusiven tiefunelastischen Lepton-Nukleon Streuung, bei der nur gezählt wird wie häufig das Strahllepton in einen bestimmten Winkelbereich mit einer bestimmten Energie gestreut wird (woraus man Q^2 und x eindeutig bestimmen kann), hat historisch gesehen die meisten In-

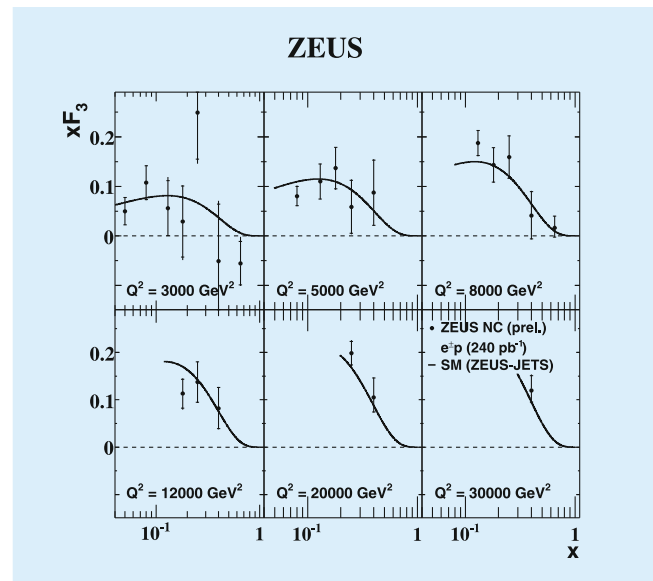


Abbildung 41: Strukturfunktion xF_3 , gezeigt als Funktion von x für verschiedene Q^2 Bereiche. Die ZEUS Daten sind mit einer Standardmodellvorhersage verglichen.

formationen über die Dichten von Quarks und Gluonen im Proton erbracht. Der Photonaustausch in den neutralen Strömen alleine ist allerdings blind gegenüber dem Vorzeichen der elektrischen Ladung der Quarks und erlaubt es damit nicht, zwischen Valenz- und Seequarks direkt zu unterscheiden. Einen Ausweg bietet hier der Austausch eines Z-Bosons der bei HERA kinematisch zugänglich ist. Der Interferenzterm zwischen Photon- und Z-Austausch wechselt sein Vorzeichen, wenn man von Elektronen zu Positronen als Strahlleptonen wechselt. Dies erlaubt einen einzigartigen direkten Zugriff auf die Valenzquarkdichten u_v und d_v mittels der Strukturfunktion $xF_3 \propto \sigma_{NC}^{e^+p} - \sigma_{NC}^{e^-p} \propto 2u_v + d_v$. Abbildung 41 zeigt neueste ZEUS Ergebnisse die erheblich präziser sind als frühere, weil die Statistik der e^-p Daten bei HERA II um einen Faktor 10 gegenüber HERA I gesteigert werden konnte.

ZEUS und H1 haben im Jahr 2007 ihre früheren inklusiven HERA I Messungen von neutralen und geladenen Strömen kombiniert. Dazu wurde eine Methode gewichteter Mittelwerte verwendet, bei der gleichzeitig Parameter mitbestimmt wurden, wie z. B. die Energie-

skalen in den Kalorimetern, die experimentelle systematische Unsicherheiten repräsentieren.

Es konnte dadurch eine wechselseitige Kalibration mit deutlich reduzierten systematischen Unsicherheiten der ZEUS und H1 Detektoren erzielt werden. Die entsprechenden NC Resultate sind in Abbildung 42 als reduzierte Wirkungsquerschnitte gezeigt. Diese sind über weite Bereiche in Q^2 und x identisch mit der Strukturfunktion F_2 die im Quark-Parton-Modell direkt mit der Summe der Quark- und Antiquarkdichten im Proton verknüpft ist. Die beobachtbaren Skalenverletzungen des reduzierten Wirkungsquerschnittes, d. h. die Abhängigkeit bei festem x von der Auflösungsskala Q^2 , kann man mit Effekten von Gluonabstrahlungen $q \rightarrow qg$, $g \rightarrow gg$ und Paarerzeugung $g \rightarrow q\bar{q}$ im Proton erklären, die bei großen x (> 0.1) zu einer Verkleinerung der Valenzquarkdichten im Proton führen und bei

kleinen x zu einer Vergrößerung der hier dominanten Seequarkdichten. Von der QCD Analyse der kombinierten Daten ist ein erheblich verbessertes Verständnis der Dichten von Quarks und Gluonen im Proton zu erwarten.

Die bislang betrachteten inklusiven ep Wirkungsquerschnitte sind nur indirekt sensitiv auf die Gluondichte über die diskutierten Skalenverletzungen. Einen direkteren Zugang erhält man über die Strukturfunktion F_L , welche die Streuung longitudinal polarisierter Photonen beschreibt. Diese Photonen können nicht an Quarks im Proton ankoppeln die wie im Quark-Parton-Modell parallel zum Proton laufen, wohl aber an solche die aus $g \rightarrow q\bar{q}$ stammen und einen Transversalimpuls zum Proton haben. Der F_L Beitrag im reduzierten NC Wirkungsquerschnitt ist helizitätsunterdrückt. Er trägt nur dann signifikant bei, wenn das Proton einen großen Teil der Elektronenergie übernimmt, d. h. bei großen y (vergleiche Abbildung 37). Die in den letzten drei Monaten der HERA Laufzeit genommenen Daten mit niedriger Protonenergie dienen im Wesentlichen dazu, eine direkte Messung von F_L zu ermöglichen. Dazu muss man in diesen Daten bei möglichst hohem y messen. Als eine vorbereitende Messung hat ZEUS die reduzierten NC Wirkungsquerschnitte in den HERA II Hochenergiedaten in einem erweiterten y Bereich gemessen. Das gestreute Elektron wurde bis zu kleinen Energien von 5 GeV identifiziert. Das ist eine experimentelle Herausforderung, weil der Untergrund von misidentifizierten Elektronkandidaten aus Photoproduktionsereignissen bei kleinen Elektronenergien sehr groß ist. In diesen Ereignissen läuft das wahre gestreute Elektron unerkant im Strahlrohr weiter. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 zu sehen. Diese zeigt das Verhältnis der Daten zu einer QCD Vorhersage. Es ist klar zu sehen, dass in vielen Q^2 Bereichen höhere y erreicht wurden als in der ebenfalls gezeigten älteren Messung mit HERA I Daten.

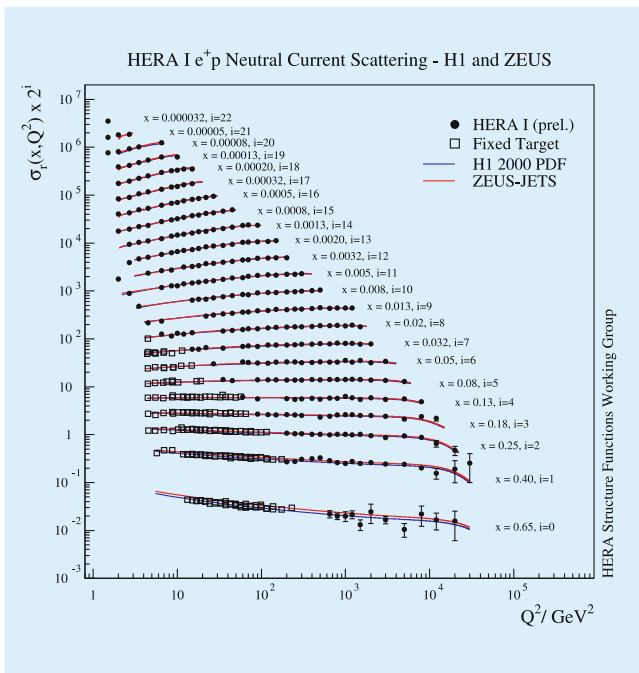


Abbildung 42: ZEUS und H1 kombinierte reduzierte NC Wirkungsquerschnitte HERA I (prel), basierend auf publizierten HERA I Daten, als Funktion von Q^2 für verschiedene Werte von x . Die Resultate früherer Fixed Target Experimente sind ebenfalls dargestellt. Die Kurven zeigen NLO QCD Anpassungen von ZEUS und H1 an ihre separaten Daten.

Produktion von zwei Jets

Quarks und Gluonen, die mit großen Impulsen aus der harten Streuung kommen, fragmentieren typischerwei-

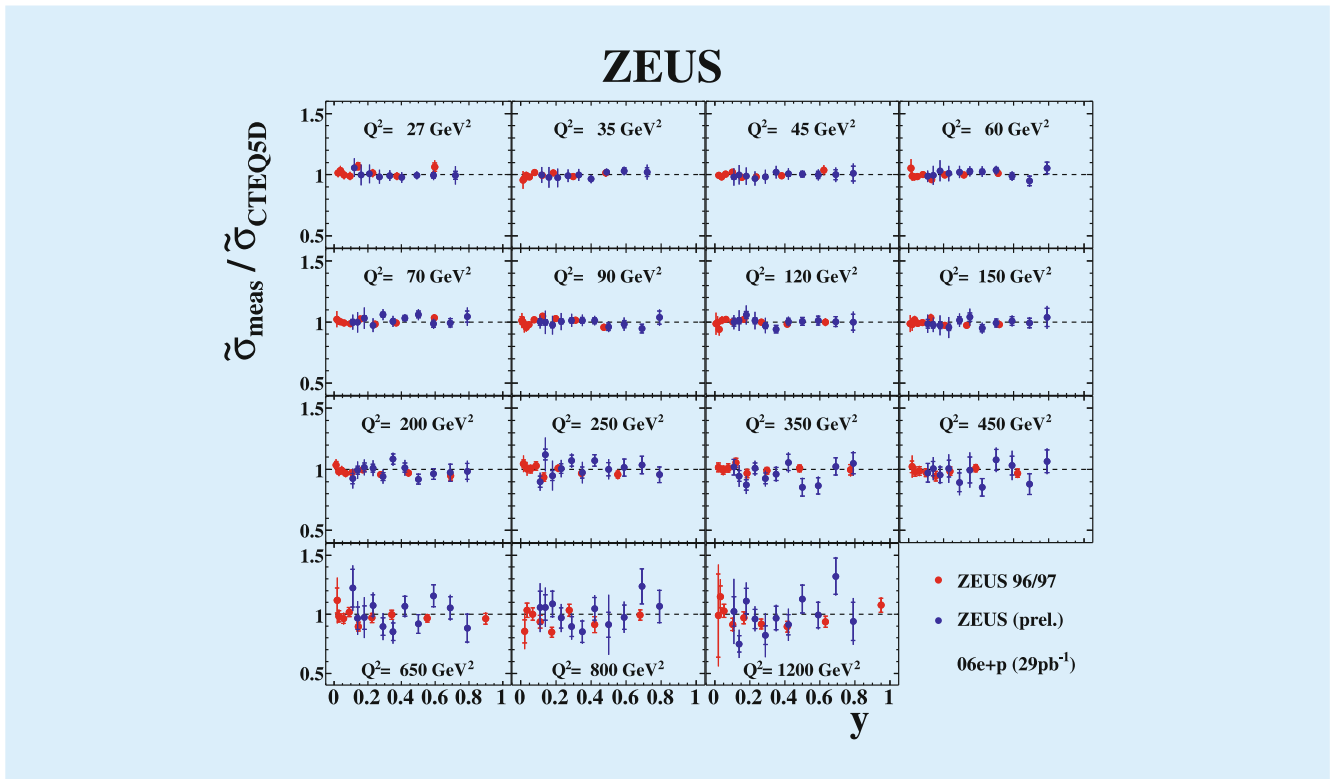


Abbildung 43: Reduzierte NC Wirkungsquerschnitte für verschiedene Q^2 als Funktion von y , geteilt durch eine QCD Vorhersage. Gezeigt sind zwei ZEUS Messungen: eine neue ZEUS (prel.) mit HERA II Daten und eine ältere basierend auf HERA I Daten.

se als kollimierte Bündel von Hadronen, den sogenannten Jets, die im Detektor nachgewiesen werden können. Ereignisse mit zwei Jets bei HERA sind über weite kinematische Bereiche durch den Boson Gluon Fusion (BGF) Prozess dominiert (siehe Abbildung 44 links). Dies ermöglicht einen direkten Zugang zur Gluondichte im Proton. ZEUS hat in diesem Jahr eine Messung von Ereignissen mit zwei hochenergetischen Jets in Photoproduktion veröffentlicht. In Photoproduktion erwartet man neben dem direkten BGF Prozess auch signifikante Beiträge von Reaktionen, bei denen das Photon zunächst in ein $q\bar{q}$ -Paar fluktuiert, das sich dann in Zeit und Raum wie ein Hadron weiterentwickelt. Ein Parton aus dieser Fluktuation nimmt dann an der harten Wechselwirkung teil (siehe Abbildung 44 rechts). Aus den Winkeln und den Transversalenergien der zwei Jets und dem Rest des Ereignisses kann man die Größe x_γ berechnen, die den Photonimpulsbruchteil charakterisiert,

den dieses Parton trägt. Die Verteilung der Wirkungsquerschnitte als Funktion von x_γ erlaubt Einblicke in die Struktur des aufgelösten Photons. Abbildung 45 zeigt

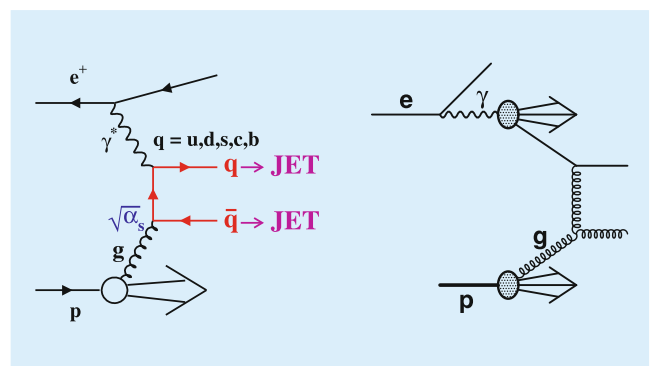


Abbildung 44: (Links) Direktes Boson Gluon Fusion Diagramm für Zweijetproduktion und (rechts) ein beispielhaftes Diagramm mit einem aufgelösten Photon.

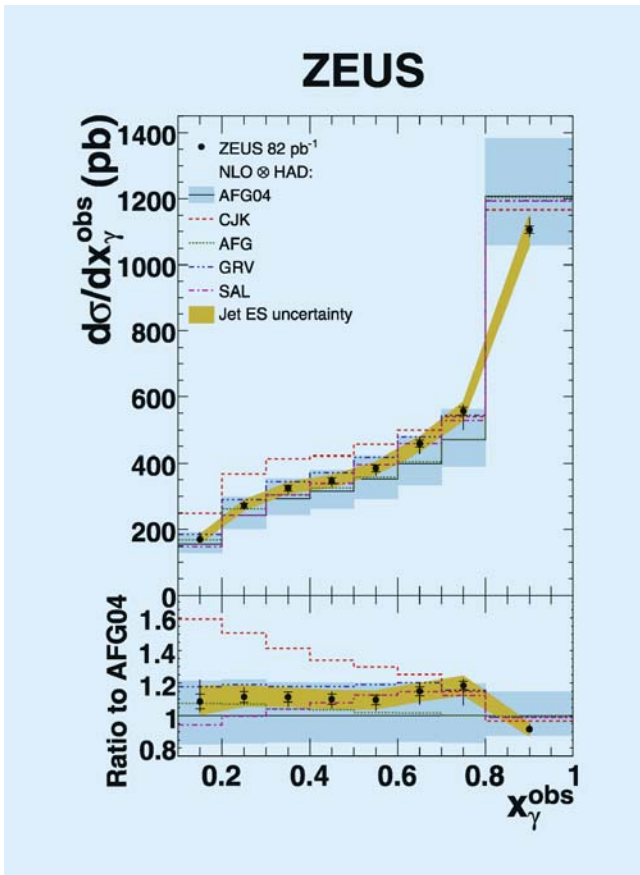


Abbildung 45: Gemessene Wirkungsquerschnitte für Photoproduktion von Zweijets als Funktion der Observablen x_γ . Die ZEUS Daten sind mit NLO QCD Vorhersagen verglichen die mit verschiedenen Strukturfunktionen für das aufgelöste Photon erzielt wurden. Im unteren Teil ist das Verhältnis der Ergebnisse zu einer der Vorhersagen dargestellt.

die gemessenen Wirkungsquerschnitte zusammen mit NLO QCD Vorhersagen, die mit verschiedenen Photonstrukturfunktionen gemacht wurden. Man erkennt deutlich, dass die Daten in der Lage sind, zwischen diesen Vorhersagen zu unterscheiden und damit wertvolle Hinweise auf die Struktur des Photons zu geben.

Produktion schwerer Quarks

Die Produktion von Charm-(c)- und Beauty-(b)-Quarks bei HERA ist ebenfalls durch den BGF Prozess (siehe

Abbildung 44) dominiert. Die große Masse der c- und b-Quarks liefert eine harte kinematische Skala, die dafür sorgt, dass die Kopplungskonstante der starken Kraft α_s genügend klein ist, so dass man QCD Störungstheorie anwenden kann. Wie schon in früheren Jahresberichten diskutiert, wurde der ZEUS Detektor für HERA II für verbesserte Charm und Beautymessungen erheblich aufgerüstet. Das Spurkammersystem wurde mit *Mikrovertexdetektoren* ergänzt, die es erlauben, die Ortsposition geladener Teilchen in der Nähe der ep Wechselwirkung sehr präzise zu bestimmen. Dies ermöglicht es, die schweren Quarks über ihre lange Lebensdauer zu identifizieren, d. h. die sekundären Zerfälle von Charm- und Beauty-Hadronen zu rekonstruieren. Methoden und Signale wurden bereits in den vergangenen Jahresberichten ausführlich diskutiert – an dieser Stelle soll über erste Physikergebnisse berichtet werden. In 2007 hat ZEUS mit verschiedenen untersuchten D-Mesonen eine umfassende Analyse der Strukturfunktion F_2^{cc} durchgeführt (siehe Abbildung 46). F_2^{cc} greift den Teil der Protonstrukturfunktion F_2 heraus, der durch Ereignisse mit Charmquarks im Endzustand zustandekommt. Dieser Anteil erreicht bei HERA bis zu 30% was auf die Dominanz der BGF Prozesse in DIS bei kleinen x zurückzuführen ist. Besonders bemerkenswert bei den neuen ZEUS Resultaten sind die Messungen mit D^+ Mesonen, die im Zerfallskanal $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ vollständig rekonstruiert wurden. Durch die Identifizierung des dazugehörigen Sekundärvertex konnten Untergrundprozesse stark unterdrückt und zum ersten Mal eine sehr gute statistische Signifikanz erzielt werden, vergleichbar mit der für den bis dato fast ausschließlich genutzten *goldenen Zerfall* $D^{*+} \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$. Die F_2^{cc} Resultate sind in Abbildung 46 mit zwei NLO QCD Vorhersagen verglichen. Die beiden Vorhersagen unterscheiden sich deutlich im Bereich kleiner x, wo die Gluondichte nicht so gut bekannt ist. Die HERA Charm Daten haben genügend Präzision, um hier zu einem besseren Verständnis zu gelangen.

In 2007 konnte ZEUS zum ersten Mal Ergebnisse für die Strukturfunktion F_2^{bb} präsentieren. Die Resultate wurden mit einem kleinen Teil der HERA II Statistik erzielt. Für die Identifizierung der relativ seltenen Be-

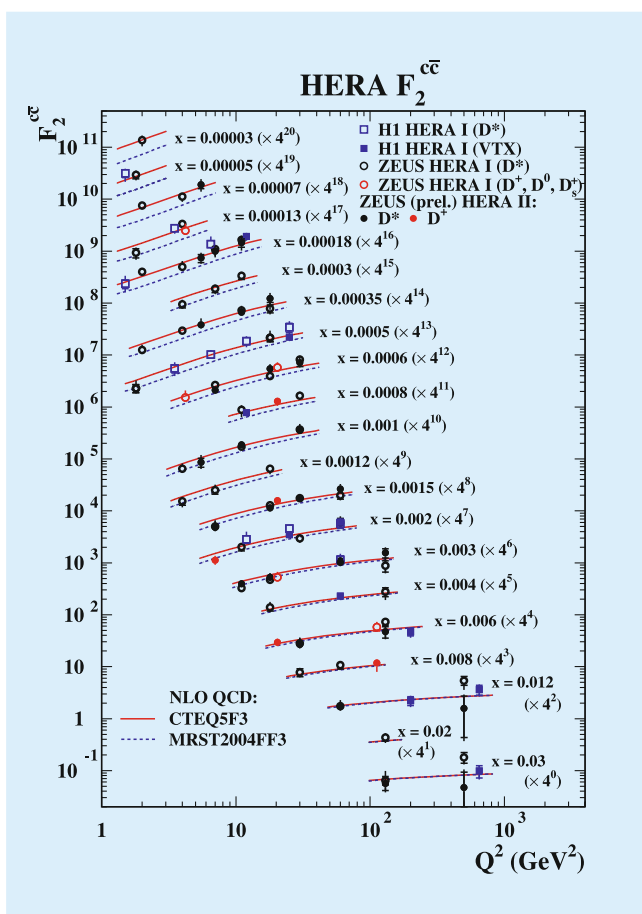


Abbildung 46: Resultate von ZEUS und H1 für die Beiträge von Charm Ereignissen zur Strukturfunktion F_2 , der Observablen F_2^{cc} , im Vergleich mit QCD Vorhersagen.

auty Quarks wurden Ereignisse mit Myonen und einem assoziierten Jet im Endzustand ausgewählt. Das Beauty Signal wurde dann aus der Verteilung des Myontransversalimpulses relativ zur Jetachse bestimmt. Die F_2^{bb} Ergebnisse sind in Abbildung 47 gezeigt. F_2^{bb} ist allgemein sehr viel kleiner als F_2^{cc} , außer bei den höchsten Q^2 -Werten. Dies ist auf die kleinere elektrische Ladung des b-Quarks zurückzuführen sowie auf kinematische Schwelleneffekte durch die große b-Quarkmasse. Durch die Analyse der vollen Datenstatistik wird es möglich sein, die Präzision der ZEUS F_2^{bb} Messungen noch erheblich zu steigern. Ein genaueres Verständnis der b-Quarkproduktion in DIS ist auch wichtig für viele Vorhersagen von Prozessen am LHC bei denen

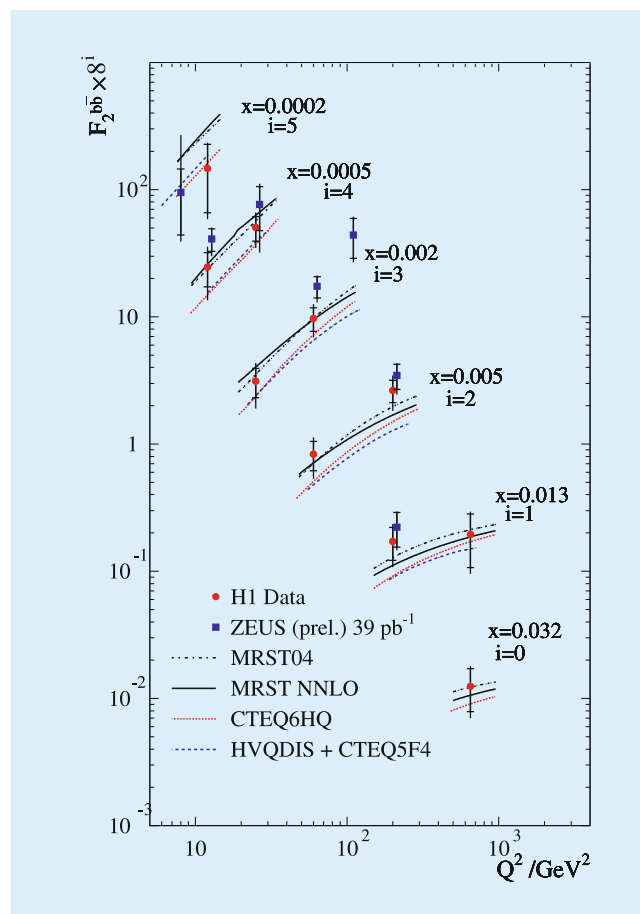


Abbildung 47: Resultate von ZEUS und H1 für die Beiträge von Beauty Ereignissen zur Strukturfunktion F_2 , der Observablen F_2^{bb} , im Vergleich mit QCD Vorhersagen.

b-Quarks involviert sind wie zum Beispiel Higgsproduktion in der Reaktion $b\bar{b} \rightarrow H$.

Diffraktion

Hadron-Hadron Streuungen sind durch *weiche Wechselwirkungen* dominiert. Bei einem wesentlichen Teil der Ereignisse bleibt mindestens eines der beiden Hadronen intakt. Diesen Prozess bezeichnet man als *Diffraktion*. Die zu Grunde liegende partonische Natur der diffraktiven Wechselwirkung ist nur unzulänglich bekannt.

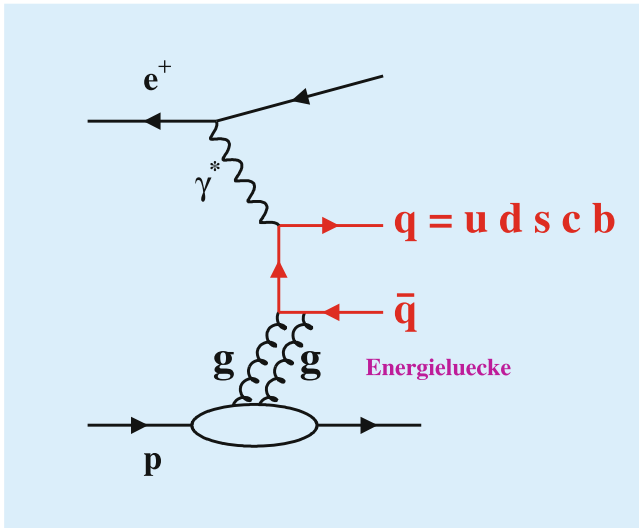


Abbildung 48: *Diffraktion durch den farblosen Austausch zweier Gluonen.*

Eine wichtige Entdeckung bei HERA ist der mit einer Größenordnung von nahezu 10% überraschend große Anteil von diffraktiven Streuprozessen $ep \rightarrow epX$, bei dem das Proton intakt bleibt, obwohl man es mit einem tiefvirtuellen Boson beschossen hat. Experimentell identifiziert man diffraktive Ereignisse bei HERA entweder über den Nachweis des gestreuten Protons in speziellen Vorwärts-Spektrometern nahe dem Strahlrohr oder über Eigenschaften des im Zentraldetektor beobachteten hadronischen Systems, z. B. durch den Nachweis einer sogenannten großen Energilücke. Im Rahmen der QCD kann man diesen Prozess durch den Austausch von zwei Gluonen beschreiben, die sich in einem „farblosen“ Zustand befinden wie in Abbildung 48 dargestellt. Dieses Diagramm beschreibt allerdings nur den einfachsten von einer Vielzahl möglicher Prozesse dieser Art bei HERA.

Wie von J. Collins bewiesen, kann man die Wirkungsquerschnitte für diffraktive ep Streuung in DIS faktorisieren in universelle diffraktive Partonverteilungsfunktionen (DPDFs) des Proton und prozessabhängige Koeffizienten für den harten partonischen Streuprozess (siehe Abbildung 49). Die Faktorisierung erlaubt es einem auf elegante Art Vorhersagen zu berechnen; es ist daher eine interessante Frage inwieweit man diesen Ansatz auch für andere diffraktive Prozesse benutzen

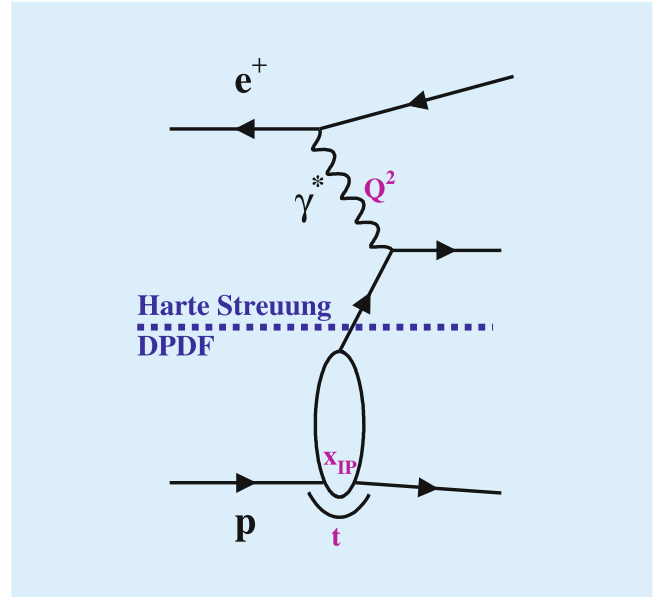


Abbildung 49: *Faktorisierung diffraktiver DIS Prozesse in zwei unabhängige Teile: diffraktive Protonstruktur (DPDF) und harte Streuung.*

kann. Ein weitgehendes Versagen wurde für die diffraktive Produktion von zwei Jets in $p\bar{p}$ Kollisionen am Tevatron beobachtet, wo die experimentellen Raten einen Faktor ~ 10 unter den entsprechenden Vorhersagen liegen. Es wäre wünschenswert ein insgesamt besseres Verständnis der diffraktiven Prozesse zu erlangen, auch in Hinblick auf das LHC, wo es Hoffnungen gibt, dass man das Higgsboson relativ untergrundfrei in der diffraktiven Produktion $pp \rightarrow ppH$ studieren kann. Auch darum ist es wichtig bei HERA, wo man eine „saubere“ elektromagnetische Probe (das Photon) mit variabler Auflösung Q^2 hat, die Anwendbarkeit der Faktorisierung möglichst umfassend zu testen. ZEUS hat dazu in 2007 einen wesentlichen Beitrag geleistet mit der Veröffentlichung von drei Messungen die sich diesem Thema widmen. In diesen Messungen wurden Zweijet- und D^* -Endzustände untersucht, die insbesondere sensitiv auf die Gluondichten in den DPDFs sind. Abbildung 50 zeigt die Messung mit D^* -Mesonen in Photoproduktion als Funktion des Impulsanteils x_{IP} den das Proton in der diffraktiven Wechselwirkung verloren hat. Die Messungen stimmen gut mit der Theorievorhersage überein, die auf dem Faktorisierungsansatz

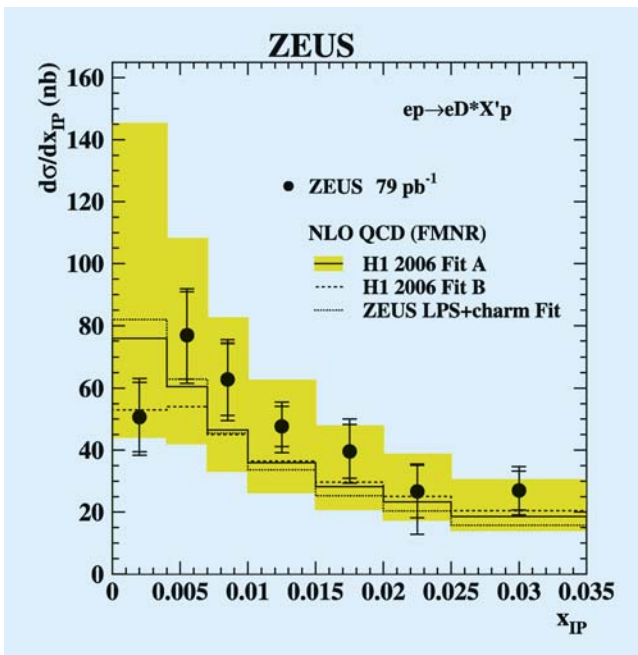


Abbildung 50: Wirkungsquerschnitte für diffraktive Photoproduktion von D^* Mesonen als Funktion des Impulsanteils x_{IP} , den das Proton in der diffraktiven Wechselwirkung abgegeben hat. Die ZEUS Daten sind mit einer Vorhersage verglichen die auf dem QCD Faktorisierungsansatz (siehe Text) beruht.

basiert. Die Daten haben eine deutlich größere Präzision als die der Theorievorhersage (deren Unsicherheit als Band gekennzeichnet ist). Für die Messungen mit Zweijets wurde beobachtet, dass die Raten in DIS wie erwartet eine gute Übereinstimmung mit der Faktorisierungshypothese zeigen. In Photoproduktion, wo man aus theoretischen Überlegungen eine Unterdrückung der Ereignisse mit aufgelösten Photonen erwartet, weil diese den rein hadronischen Wechselwirkungen am Tevatron ähneln, wird eine schwache Unterdrückung gesehen, die innerhalb der Fehler mit Null verträglich ist. Die deutlich stärkere Unterdrückung die man in einer vergleichbaren Analyse bei H1 gesehen hat, wird nicht bestätigt.

Diffraktive Produktion von Vektormesonen

Die diffraktive Produktion von Vektormesonen bei HERA $\gamma^*p \rightarrow Vp$ ist ein weiteres ausgezeichnetes Test-

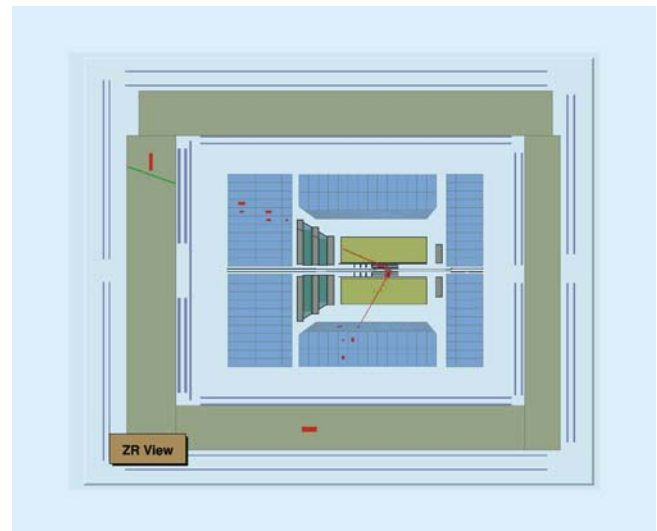


Abbildung 51: Ereigniskandidat für die diffraktive Produktion $\gamma^*p \rightarrow Yp$ mit anschließendem Zerfall $Y \rightarrow \mu^+\mu^-$.

gebiet der QCD. ZEUS konnte in 2007 neue Resultate für die Familie der mit Abstand schwersten Vektormesonen erzielen können, den Ypsilon-Resonanzen, die durch ihren Zerfall in zwei Myonen identifiziert wurden. Ein Beispielergebnis ist in Abbildung 51 zu sehen. Man erkennt sehr schön, dass der Detektor bis auf die beiden Myonen vollkommen „leer“ ist, d. h. keine weiteren Signale zu finden sind – das gestreute Proton und das Elektron laufen in der Strahlröhre weiter. Der gemessene Impuls des Vektormesons erlaubt es, den Viererimpulsübertrag t auf das Proton zu bestimmen sowie die Energie des (einlaufenden) virtuellen Photons. Dies verschafft einem Information über den *dreidimensionalen* Aufbau des Protons. Abbildung 52 zeigt das Signal der relativ selten produzierten Ypsilon-mesonen in der gesamten HERA Datenmenge. Durch die Auswertung aller Daten ist es ZEUS zum ersten Mal gelungen, eine signifikante Messung der Abhängigkeit der Upsilon-Produktion von der Proton-Photonschwerpunktsenergie zu erreichen. Der beobachtete Anstieg mit der Energie (hier nicht gezeigt) ist sehr steil.

Eine weitere wichtige neue ZEUS Publikation in 2007 darf hier nicht unerwähnt bleiben: die Analyse diffraktiver ρ -Produktion in DIS. Das Studium der Produktion

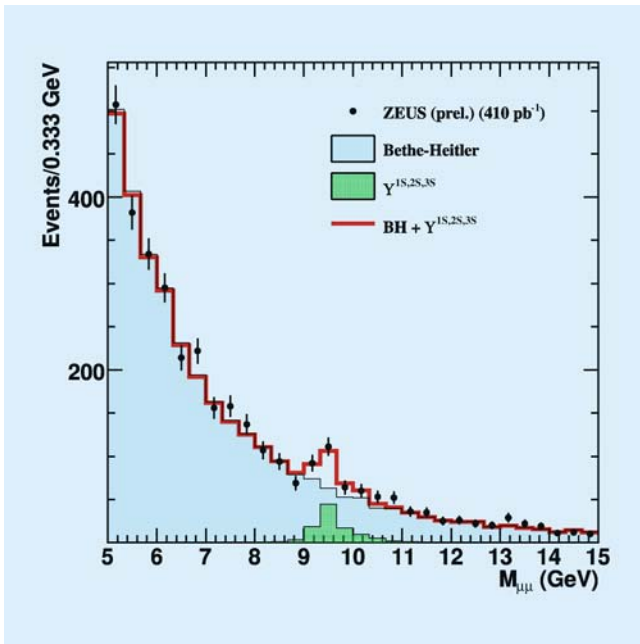


Abbildung 52: ZEUS γ -Signal in der invarianten Myon-Myon Massenverteilung, basierend auf der vollen HERA Datenstatistik.

dieser leichten Resonanz als Funktion verschiedener kinematischen Skalen (Q^2 , y , t) gewährt einen umfassenden Einblick in die Dynamik der diffraktiven Streuung.

Fragmentationsstudien

Quarks und Gluonen treten nicht als *freie Teilchen* auf, sondern fragmentieren in Hadronen, die man im Experiment beobachten kann. Dieser Übergang von Partonen zu Hadronen entzieht sich bis heute einem detaillierten Verständnis und kann nur phänomenologisch beschrieben werden. Dabei nimmt man allgemein an, dass die Fragmentation eines Quarks oder eines Gluons unabhängig von seinem Produktionsmechanismus, d. h. universell ist. ZEUS hat die Gültigkeit dieser Annahme in einer Analyse der Impulsverteilung geladener Hadronen in DIS Ereignissen untersucht. Die Teilchenimpulse wurden im sogenannten *Breitruhesystem* ausgewertet. Dieses Ruhesystem ist so konstruiert, dass für Streuungen im Quark-Parton-Modell das wechselwirkende Quark um 180° zurückgestreut wird

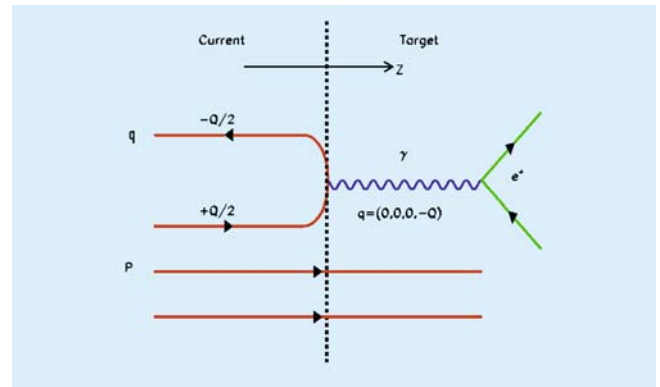


Abbildung 53: Quark-Parton-Modell Prozess bei HERA im Breitssystem. Man beachte die Ähnlichkeit des harten Streuprozesses mit Quark-Antiquarkproduktion in e^+e^- Annihilation.

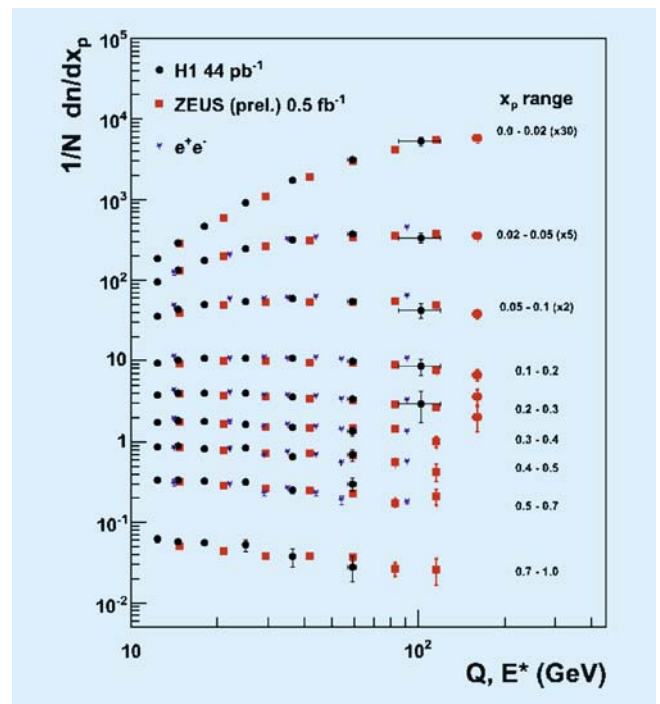


Abbildung 54: Resultate für die normalisierten Verteilungen der skalierten Impulse x_p . Die Messungen von ZEUS sind verglichen mit Resultaten von H1 und von e^+e^- Experimenten. Die Daten sind gezeigt in Bereichen von x_p als eine Funktion der Skala des ausgetauschten Bosons, die bei HERA durch Q gegeben ist und bei den e^+e^- Collidern durch die Schwerpunktsenergie E^* .

(siehe Abbildung 53). Der skalierte Impuls $x_p = 2p/Q$ eines geladenen Teilchens, das aus diesem Quark fragmentiert, ist ein direktes Mass für den transferierten Impulsanteil. Die Verteilung von x_p kann mit dem Anteil der Quarkenergie, die in e^+e^- Annihilationen von geladenen Spuren übernommen wird, verglichen werden. Abbildung 54 zeigt normalisierte Verteilungen von x_p als Funktion der Skala des ausgetauschten Bosons. Die ZEUS Messungen verwenden die volle HERA Datenstatistik und sind damit erheblich präziser als die ebenfalls dargestellten H1 Resultate. Ferner sind Resultate aus e^+e^- Annihilationen gezeigt. Die Messungen zeigen erhebliche Skalenverletzungen mit Q , d. h. bei großen Q nimmt der Anteil von Spuren mit kleinem x_p deutlich zu, während er für große x_p sinkt. Dies erinnert an die Skalenverletzungen in den inklusiven ep Wirkungsquerschnitten (siehe Abbildung 42). Obwohl im Detail durchaus Unterschiede zu sehen sind, bestätigen die Daten im Großen und Ganzen die Universalität der Quarkfragmentation in ep - und e^+e^- -Reaktionen.

Ausblick

2007 war das letzte Datennahmejahr des ZEUS Experimentes. In 2008 sind die ersten Ergebnisse für die direkte Messung der Strukturfunktion F_L zu erwarten für die man HERA in den letzten drei Monaten seiner Betriebszeit erfolgreich mit niedrigeren Protonenergien betrieben hat. Insgesamt wird die abschließende Datenanalyse der HERA II Daten je nach untersuchtem Physikkanal noch einige Jahre dauern. Außerdem gibt es noch viele Möglichkeiten *ganz neue Messungen* mit den Daten zu machen, z. B. im Bereich der Produktion schwerer Quarks. Dabei geht es insbesondere darum, das Potenzial des für HERA II deutlich aufgewerteten Spurkammersystems voll auszuschöpfen. Für einige Detektorkomponenten ist die endgültige Detektorkalibration höchster Güte noch abzuschließen. Die verbesserten Kalibrationen werden erlauben, die bestmöglichen Physikresultate zu erzielen, über die in den zukünftigen Jahresberichten zu lesen sein wird.



Abbildung 55: Die HERMES-Kollaboration vor der Osthalle am letzten Tag des HERA Betriebs am 30. Juni 2007.

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: J. Stewart, DESY (bis Juni 2007); E.R. Kinney, University of Colorado (seit Juli 2007)

Die Datennahme am HERMES-Experiment verlief sehr erfolgreich bis zum Ende des HERA Betriebs im Juni 2007. Zusätzlich zum voll funktionsfähigen HERMES Spektrometer kam ein neu installierter Rückstoß-Detektor zum Einsatz. Von den über 100 Millionen tief-inelastischen Streuereignissen (*Deep Inelastic Scattering, DIS*), die seit Beginn des HERMES-Experiments im Jahre 1995 aufgezeichnet wurden, stammt fast ein Drittel aus dem letzten Jahr des HERA Betriebs (Abbildung 56 zeigt die gesammelte Statistik aus den Jahren 2006 und 2007). Dieser sehr große Datensatz, welcher die aufgezeichneten Streuereignisse zwischen polarisierten Positronen und unpolarisiertem Wasserstoff und Deuterium enthält, wird viele neue Analysen mit großer Präzision ermöglichen.

Die Analysen dieses Datensatzes werden sich vor allem auf harte, exklusive Reaktionen, in denen alle Teilchen im Endzustand der Reaktion gemessen werden, konzentrieren. Vor der Installation des Rückstoß-Detektors mussten die Energie und der Impuls des langsamen Rückstoß-Protons aus den gemessenen kinematischen Größen der anderen Teilchen berechnet werden. Die Genauigkeit dieser Methode ist durch die Energieauflösung des HERMES-Spektrometers begrenzt. Daher kommt es vor, dass zusätzliche Teilchen produziert werden, die jedoch weder detektiert noch anhand der

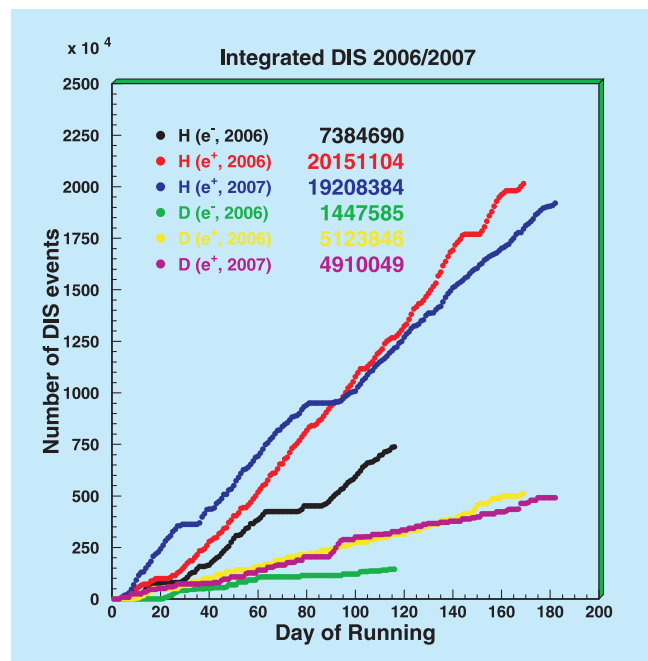


Abbildung 56: Die von HERMES gesammelte Statistik in den Jahren 2006 und 2007. Gezeigt sind die Anzahl der tief-inelastischen Streuereignisse des HERA Elektron- bzw. Positron-Strahls mit unpolarisiertem Wasserstoff bzw. Deuterium Targets.

berechneten kinematischen Größen aufgelöst werden können. Der Einbau des Rückstoß-Detektors erlaubt nun einerseits die direkte Messung von Energie und

Impuls des Rückstoß-Protons und kann andererseits viele der zusätzlich produzierten Teilchen direkt nachweisen, so dass exklusive Reaktionen eindeutig identifiziert werden können.

Die Messung exklusiver Reaktionen ist vor allem dadurch motiviert, dass sie zum erstenmal die Möglichkeit bietet, die Impulsverteilung der Quarks im Nukleon in Abhängigkeit von ihrem Ort zu studieren. Insbesondere ermöglicht dies den ersten Zugang zum Bahndrehimpuls der Quarks im Nukleon, welcher einen wichtigen Beitrag zum Gesamtdrehimpuls des Protons liefern kann. Die im Rahmen der Theorie einfachste, exklusive Reaktion ist die tief-virtuelle Compton Streuung (*Deeply Virtual Compton Scattering*, DVCS), in der der Endzustand der Reaktion aus dem gestreuten Positron, dem Rückstoß-Proton und einem hochenergetischen Photon besteht.

Die Analyse der Daten, die mit dem transversal polarisierten Wasserstoff Target, welches im Jahre 2005 dem Rückstoß-Detektor weichen musste, aufgenommen wurden, nähert sich dem Ende. Dies gilt insbesondere für den Fall der DVCS- und der semi-inklusive DIS-Analyse, in welcher azimuthale Asymmetrien bezüglich der Richtung des virtuellen Photons gemessen wurden. Der Ursprung dieser azimuthalen Asymmetrien liegt in der quantenmechanischen Interferenz zwischen verschiedenen Amplituden begründet. Im Fall des DVCS-Prozesses ist der Endzustand identisch mit dem des Bethe-Heitler-Prozesses, d.h. die Amplituden interferieren. Im Fall des semi-inklusive DIS-Prozesses interferieren verschiedene Reaktionsmechanismen zwischen dem gemessenen Hadron im Endzustand und den Fragmenten des Nukleons. Man bezeichnet diese Methode auch als *QCD Interferometrie*. Messungen dieser Art, speziell an transversal polarisierten Nukleonen, sind von großem Interesse.

Die Analyse von HERMES Daten, die in der tiefinelastischen Streuung an schweren Kernen genommen wurden, hat wesentlich zu unserem Verständnis der Wechselwirkung von schnellen Quarks mit den sie umgebenden Kernen beigetragen, speziell, wenn man sie mit der Hadronisierung von Quarks im Vakuum vergleicht. Darüber hinaus testen diese Daten verschie-

dene Modelle, welche momentan benutzt werden, um die harten hadronischen Proben eines neuen Zustands der Materie in der *Quantenchromodynamik* (QCD) zu verstehen. Dieser neue QCD Zustand wird momentan in Kollisionen am relativistischen Schwerionenbeschleuniger (*Relativistic Heavy Ion Collider*, RHIC) am *Brookhaven National Laboratory* (BNL) untersucht und soll in Kürze auch in Kollisionen am *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN erzeugt werden. Basierend auf dem sehr großen HERMES Datensatz wurde 2007 ein umfangreicher Artikel in der Zeitschrift *Nuclear Physics B* veröffentlicht.

Hinsichtlich des Beitrages der verschiedenen Quarks, insbesondere der Strange-Quarks, zum Gesamtdrehimpuls des Protons wurden mehrere neue Ergebnisse basierend auf den Daten aus den Jahren 1996–2000, in denen longitudinal polarisierte Wasserstoff und Deuterium Targets verwendet wurden, erzielt. Die Veröffentlichung dieser nahezu vollständigen Analysen wird für 2008 erwartet.

Meilensteine der HERMES-Physik

Semi-inklusive azimuthale Einzelspin-Asymmetrien

In der Feynmanschen Beschreibung der Nukleonstruktur, dem Partonmodell, bestehen Nukleonen (Protonen und Neutronen) aus sich annähernd kollinear bewegenden Partonen (Quarks und Gluonen). Deren Spinausrichtung führt zu drei Verteilungsfunktionen für Quarks und zwei für Gluonen. Von den drei Quarkverteilungen wurden bisher, mit unterschiedlicher Präzision, die spin-unabhängige Quarkverteilung und die Helizitätsverteilung gemessen. Erstere gibt an, wieviele Quarks mit einem bestimmten Impulsbruchteil² x im Nukleon zu finden sind. Bei der Helizitätsverteilung betrachtet man zusätzlich die Spinausrichtung der Quarks, die parallel oder antiparallel zum Nukleonspin liegen kann,

²Skalen- bzw. Bjorken-Variable.

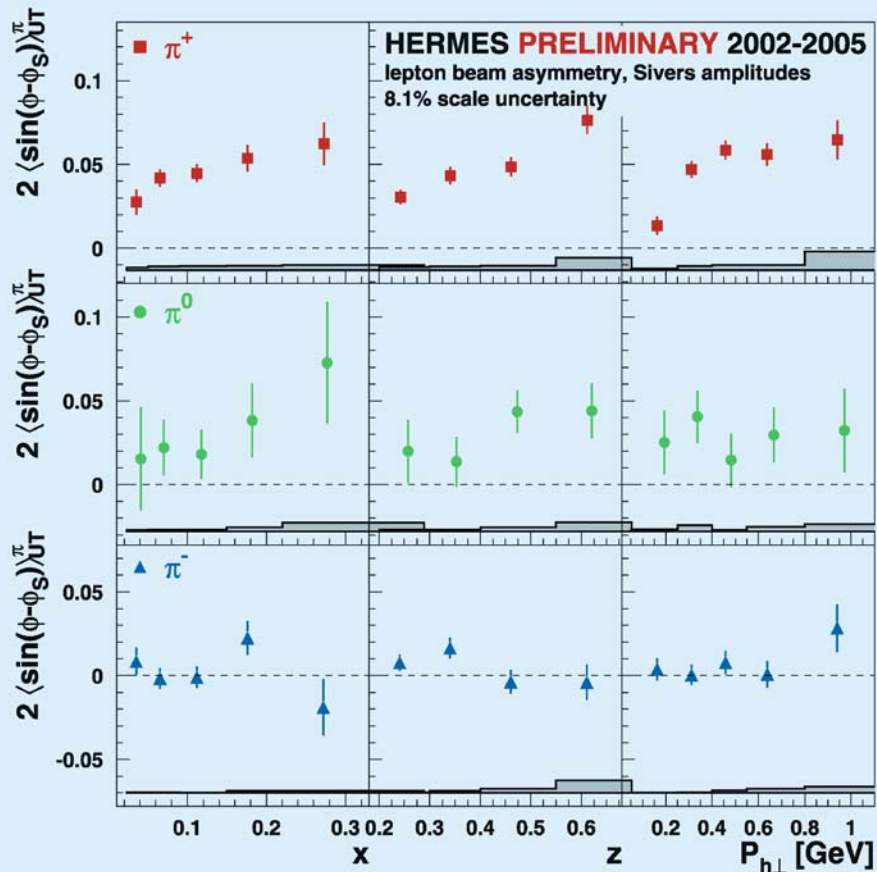


Abbildung 57: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusive azimuthalen Asymmetrien von Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im sogenannten Sivers-Winkel, welche proportional zur Sivers Quarkverteilung sind, in Abhängigkeit von Bjorken- x , dem Energiebruchteil z , der vom virtuellen Photon auf das Hadron übertragen wurde, und dem transversalen Impuls des Hadrons $P_{h\perp}$.

wenn dieser entlang der Bewegungsrichtung zeigt. Die dritte Verteilung, *Transversity*, entzog sich der Aufmerksamkeit für lange Zeit, da transversale Spineffekte als unterdrückt angesehen wurden. Erst in den letzten 15 Jahren bekam die *Transversity*-Verteilung, welche die Differenz in der Anzahl von Quarks mit Spin parallel bzw. antiparallel zum Spin von transversal polarisierten Nukleonen angibt, die verdiente Aufmerksamkeit.

Die Messung der *Transversity*-Verteilung wird dadurch erschwert, dass die Verteilung ungerade unter Chiralitätsumkehr ist. Da in harten Streuprozessen die Chi-

ralität eine Erhaltungsgröße ist, muss die *Transversity*-Verteilung mit einer weiteren chiral-ungeraden Größe kombiniert werden. In der semi-inklusive tiefinelastischen Streuung von Positronen (Elektronen) an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget, wie z. B. am HERMES-Experiment realisiert, können chiral-ungerade Fragmentationsfunktionen diese Aufgabe übernehmen. Fragmentationsfunktionen beschreiben die Entwicklung vom getroffenen Quark zu den verschiedenen produzierten Hadronen. Diese hängt in der Regel nicht nur von der Energie der produzierten Hadronen ab, sondern auch von deren Bewegungsrichtung. Für

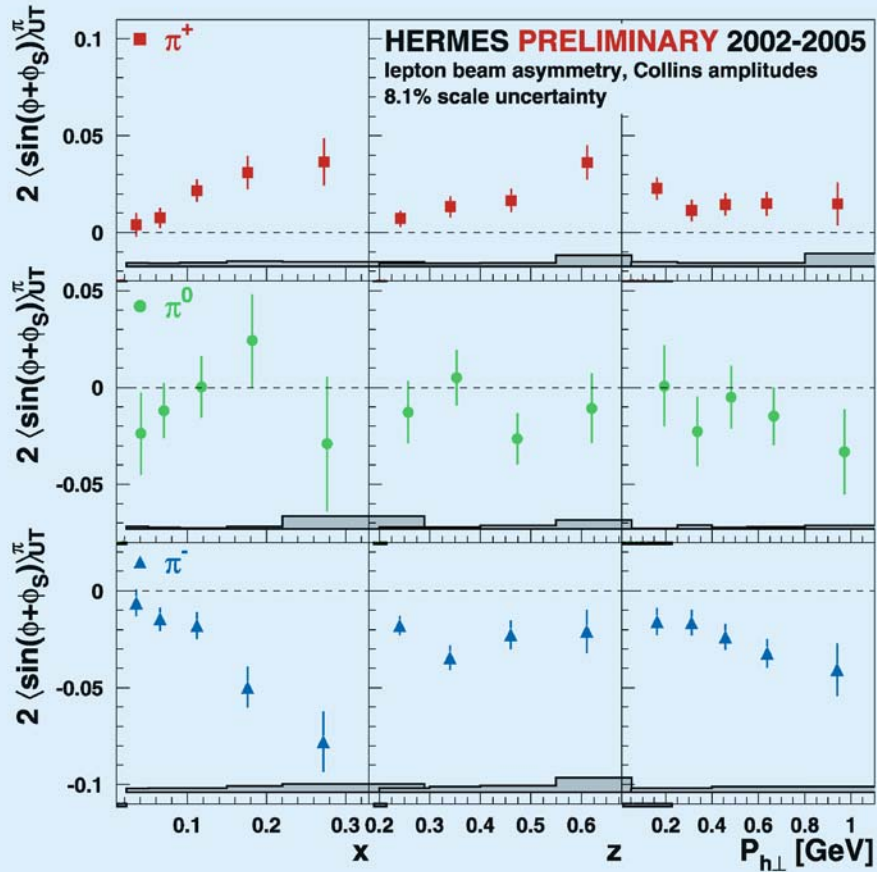


Abbildung 58: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusive azimuthalen Asymmetrien von Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im sogenannten Collins-Winkel, welche proportional zur Transversity-Verteilung sind, in Abhängigkeit von Bjorken- x , dem Energiebruchteil z , der vom virtuellen Photon auf das Hadron übertragen wurde, und dem transversalen Impuls des Hadrons $P_{h\perp}$.

die Messung der *Transversity*-Verteilung benötigt man Fragmentationsfunktionen, die von der Quarkpolarisation abhängen. Diese Abhängigkeit kann z. B. eine Korrelation der Bewegungsrichtung der produzierten Hadronen mit der Richtung des Quarkspins sein. Die Kombination aus *Transversity* und solch einer Fragmentationsfunktion führt zu Einzelspin-Asymmetrien in der azimuthalen Verteilung der produzierten Hadronen. Beispiele dafür sind die sogenannten *Collins*-Asymmetrie (mindestens ein Hadron nachgewiesen) und verschiedene Asymmetrien in der Hadronpaar-Produktion.

Zur Überraschung vieler fand man vor wenigen Jahren heraus, dass nicht nur Fragmentationsfunktionen zu Einzelspin-Asymmetrien führen können, sondern auch eine bestimmte Klasse von Quarkverteilungsfunktionen. Diese Quarkverteilungen berücksichtigen die geringe Abweichung der Bewegungsrichtung der Quarks im Nukleon von der Bewegungsrichtung des Nukleons. Da ein nicht verschwindender Bahndrehimpuls der Quarks innerhalb des Nukleons solch eine transversale Komponente verursachen kann, ist die Hoffnung groß, dass man mithilfe dieser Quarkverteilungsfunktionen einen experimentellen Zugang zum

Bahndrehimpuls erhält. Dies ist besonders interessant, da es nur wenige bekannte Alternativen gibt, die eine Messung des Bahndrehimpulses der Quarks ermöglichen. Folglich wird der Messung z. B. der sogenannten *Sivers*-Asymmetrie in semi-inklusive tiefinelastischer Streuung große Aufmerksamkeit gewidmet. Namengebend für diese Asymmetrie ist die sie verursachende *Sivers*-Quarkverteilung.

Ein Meilenstein des HERMES-Physikprogramms im Jahr 2007 war die Bestätigung der weltweit ersten Ergebnisse für die *Collins*- und *Sivers*-Asymmetrien, die Anfang des Jahres 2005 veröffentlicht wurden, durch die erheblich höhere Präzision der Analyse des vollständigen Datensatzes an einem transversal polarisiertem Target. Zudem wurden erstmalig Asymmetrien für neutrale Pionen vorgestellt. In Abbildung 57 sieht man die vorläufigen Ergebnisse für die *Sivers*-Asymmetrien, welche aus den in den Jahren 2002–2005 aufgenommenen Daten extrahiert wurden. Für positive Pionen (π^+) ist die Asymmetrie signifikant von Null verschieden. Da π^+ Mesonen vorrangig durch Streuung an Up-Quarks entstehen, kann man daraus ableiten, dass auch die *Sivers*-Quarkverteilung für Up-Quarks von Null verschieden sein muss. Die Asymmetrien für negative Pionen (π^-) ist verträglich mit Null; die weltweit erste Messung für neutrale Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget ist verträglich mit den Resultaten für geladene Pionen. Zusätzlich zur Abhängigkeit der Asymmetrie von x und z , dem Energiebruchteil des während der Streuung ausgetauschten virtuellen Photons, der auf das Hadron übertragen wurde, wurde dieses Mal auch die Abhängigkeit vom transversalen Impuls $P_{h\perp}$ des Hadrons untersucht. Wie erwartet, steigt die Asymmetrie für größer werdendes $P_{h\perp}$ an. Die vorläufigen Ergebnisse für die *Collins*-Asymmetrie sind in Abbildung 58 gezeigt. Auch hier wurden die ursprünglichen Ergebnisse bestätigt, die nur auf der Analyse der Daten des ersten Jahres mit transversal polarisiertem Target beruhten. Insbesondere die großen Asymmetrien für negative Pionen überraschten damals und können nur damit erklärt werden, dass Pionen mit unterschiedlicher Ladung vorzugsweise in entgegengesetzte Richtungen emittiert werden, wenn sie in der Fragmentation von Quarks der glei-

chen Sorte entstehen. Auch für die *Collins*-Asymmetrie wurde zusätzlich die $P_{h\perp}$ -Abhängigkeit untersucht, was zusätzliche Einblicke in den Fragmentationsprozess liefert.

Die Analyse des vollständigen Datensatzes mit einem transversal polarisiertem Target ermöglicht das vertiefende Studium der *Transversity*- als auch der *Sivers*-Verteilung.

Hadronisierung in der Umgebung des Kernes

Hadronisierung beschreibt den Prozess, in dem die in der Teilchenreaktion erzeugten Partonen in die experimentell beobachteten Hadronen umgewandelt werden. Theoretischen Abschätzungen zufolge findet dieser Prozess über Längenskalen zwischen weniger als einem Femtometer und einigen zehn Femtometern statt. Auf diesen Längenskalen können perturbative Methoden wegen der Größe der starken Kopplungskonstanten nicht angewendet werden und Gitter-QCD Rechnungen sind noch nicht weit genug fortgeschritten, um neue Erkenntnisse beizusteuern.

Der Prozess der Hadronisierung im freien Raum (Vakuum) wurde ausführlich in e^+e^- Vernichtungsprozessen studiert. Dank dieser Experimente sind die Spektren der produzierten Hadronen und deren kinematische Abhängigkeiten gut bestimmt. Über die raumzeitliche Entwicklung des Prozesses ist hingegen wenig bekannt, da die Reaktionsprodukte nur im Detektor beobachtet werden können, welcher immer einen makroskopischen Abstand zum Wechselwirkungspunkt hat. Im Gegensatz dazu kann das nukleare Medium als Detektor benutzt werden, welcher sich direkt am Ort der mikroskopischen Wechselwirkung befindet. Die Leptonproduktion von Hadronen an Atomkernen bietet daher eine gute Möglichkeit, das raumzeitliche Bild des Hadronisierungsprozesses zu studieren. Die Verwendung von Atomkernen wachsender Größe erlaubt es, die zeitliche Entwicklung des Hadronisierungsprozesses zu studieren. Falls die Hadronisierung schnell von staten geht, d. h. die Hadronen werden auf Längenskalen

produziert, die kleiner sind als die Atomkerne, beruhen die relevanten Wechselwirkungen im nuklearen Medium auf bekannten hadronischen Wirkungsquerschnitten wie die der Pion-Nukleon Wechselwirkung. Falls im Gegensatz dazu die Hadronisierung über große Abstände hinweg stattfindet, sind die relevanten Wechselwirkungen partonisch und beinhalten die Abstrahlung von Gluonen und Quark-Antiquark Paaren. Die beiden Mechanismen führen zu verschiedenen Vorhersagen für die Verringerung der Anzahl an produzierten Hadronen an den Atomkernen, verglichen mit der Produktion an freien Nukleonen. Dieser Effekt wird auch als *attenuation* bezeichnet.

Die HERMES-Kollaboration hat im Jahr 2007 den bisher umfassendsten Datensatz über die Messung semi-inklusiver tief-inelastischer Streuprozesse an Deuterium, Helium, Krypton und Xenon veröffentlicht. Die Ergebnisse sind zum einen wichtig für das Verständnis der Hadronisierung und schränken andererseits die zur Verfügung stehenden phänomenologischen Modelle stark ein. Diese Modelle sind nicht nur für die tief-inelastische Streuung wichtig, sondern werden auch gebraucht, um den Übergang vom Parton zum Hadron in relativistischen Schwerionenkollisionen, und damit die Eigenschaften des in diesen Kollisionen neu entstehenden Materiezustandes, zu verstehen. Die von der HERMES-Kollaboration durchgeführte Messung ist von besonderer Bedeutung, da es möglich war, die *attenuation* als Funktion mehrerer kinematischer Variablen zu messen, wobei die Statistik groß genug war, um zwei-dimensionale Verteilungen zu extrahieren. Alle früheren Messungen hatten die *attenuation* als Funktion einer Variable dargestellt, wobei immer über die anderen Variablen integriert wurde.

Die Hadronen Multiplizitäten an einem Kern A relativ zu denen am Deuteron, R_A^h , wurden gemessen für verschiedene Hadronen (π^+ , π^- , π^0 , K^+ , K^- , p und \bar{p}) als Funktion der Energie des virtuellen Photons ν , als Funktion des Bruchteils dieser Energie z , die auf das produzierte Hadron übertragen wurde und als Funktion der Photon-Virtualität Q^2 und des quadrierten transversalen Impulses des Hadrons p_t^2 (siehe Abbildung 59 für die Definitionen). Auch wenn es noch kein quantitatives Verständnis des Prozesses der Hadronisierung gibt, so

wird im allgemeinen angenommen, dass die folgenden Prozesse von zentraler Bedeutung in der Leptonproduktion von Hadronen sind. Das Quark im Nukleon verliert nach der Absorption des Photons Energie durch die Streuung an anderen Quarks und durch die Abstrahlung von Gluonen, welches die Größe von R_A^h beeinflussen kann. Im Abstand l_c vom Ort der elementaren Wechselwirkung, der sogenannten Formationslänge, kann ein farbloses Objekt (oder ein farblos neutraler Zustand), ein sogenanntes *pre-hadron*, entstehen, welches schon die Quantenzahlen, aber noch nicht die vollständig entwickelte Wellenfunktion des Hadrons besitzt. Der Mittelwert der Formationslänge l_c wird als L_c bezeichnet. Er hängt von den Variablen ν und z ab und ist im Lund Modell durch $L_c = f(z) \frac{\nu}{\kappa}$ gegeben, wobei $f(z)$ eine Funktion mit einem $1 - z$ Verhalten für große Werte von z ist, und κ die *string tension* bezeichnet, welche den Energieverlust des führenden Quarks pro Längeneinheit wiedergibt. Das *pre-hadron* entwickelt sich dann über eine bestimmte Zeitperiode in das physikalische Hadron. Diese Zeitperiode wird im Rahmen des Lund Modells mit L_h/c angegeben, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist und $L_h = L_c + \frac{z\nu}{\kappa}$.

Für den besonders großen Datensatz an gemessenen Pionen wurden zwei-dimensionale Verteilungen ermit-

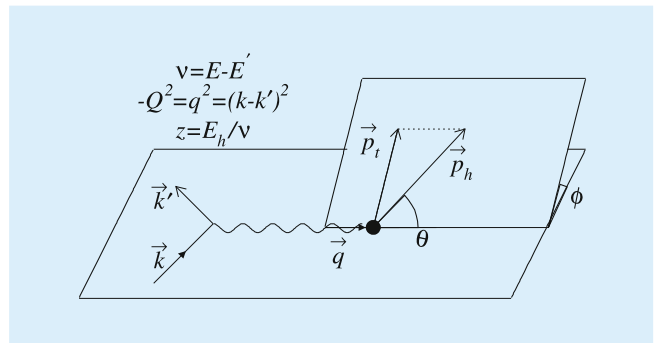


Abbildung 59: Kinematische Ebenen für die Hadron-Produktion in semi-inklusiver tief-inelastischer Streuung, sowie die Definitionen der relevanten Variablen für das Lepton und das Hadron. Die Größen $k = (E, \vec{k})$ und $k' = (E', \vec{k}')$ sind die Viererimpulse des einlaufenden und des gestreuten Leptons, (E_h, \vec{p}_h) ist der Viererimpuls des produzierten Hadrons, und \vec{p}_t ist der transversale Impuls des Hadrons.

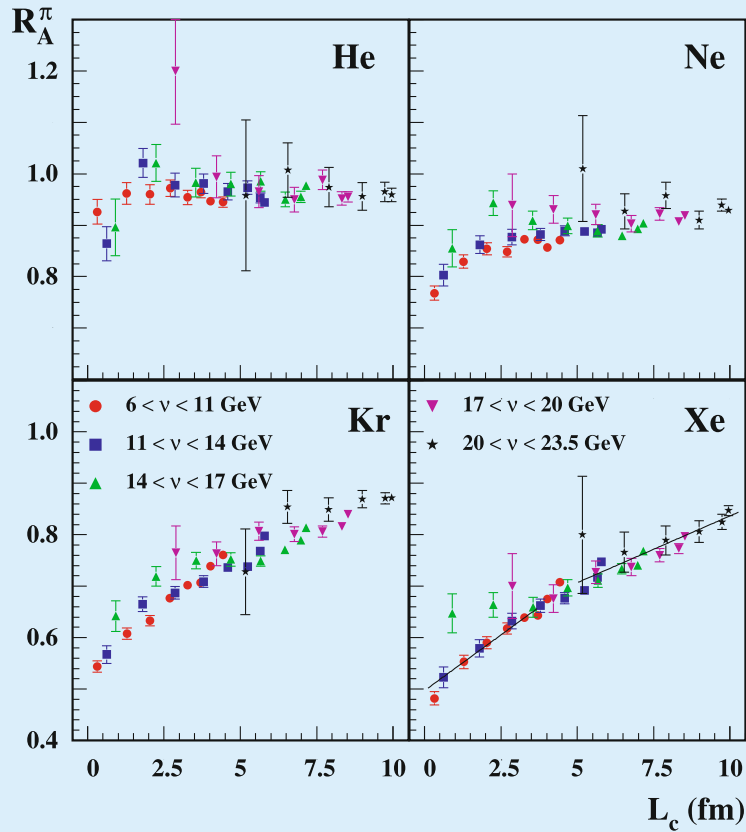


Abbildung 60: Werte für $R_A^\pi(\nu, z)$ für He, Kr, Ne und Xe als Funktion der Variablen L_c . Die verschiedenen ν -Bereiche sind durch verschiedene Symbole verdeutlicht. Die verschiedenen Messungen innerhalb des gleichen ν -Bereichs unterscheiden sich durch den Wert von z in den Grenzen 0.2–0.3–0.4–0.5–0.6–0.7–0.8–0.9–1.0, wobei der Wert von z von links nach rechts abnimmt. Die gezeigten Fehlerbalken sind statistisch. Der dominierende systematische Fehler ist eine Skalenunsicherheit von ca. 3%.

telt. Diese geben Hinweise darauf, dass die Abhängigkeit von R_A^h von ν und z im Wesentlichen als Abhängigkeit von der einzelnen Variable L_c beschrieben werden kann, wie man in Abbildung 60 erkennen kann. Für den Fall $L_c < R$, wobei R der Kernradius ist, wird das *pre-hadron* im wesentlichen innerhalb des Kerns produziert und kann damit Wechselwirkungen im Endzustand erfahren. Als Folge daraus ändert sich das nukleare *attenuation* Verhältnis R_A^h beträchtlich als Funktion von L_c . Im Gegensatz dazu wird im Fall $L_c > R$

das *pre-hadron* im Wesentlichen außerhalb des Kerns produziert und R_A^h ändert sich weit weniger stark als Funktion von L_c .

Die große Statistik in Kombination mit dem großen Spektrum an nuklearen Targets erlaubt weiterhin eine detaillierte Untersuchung der Abhängigkeit von der Kernladungszahl A . Die A -Abhängigkeit von R_A^h wurde als Funktion von ν , z und L_c gemessen. Die Abhängigkeit folgt im Wesentlichen einer Form A^α mit

$\alpha \approx 0.5-0.6$. Die Werte für α sind weitaus kleiner als von Modellen vorhergesagt, die annehmen, dass die *attenuation* vom Quadrat des Weges, den das Parton durch den Kern zurücklegt, abhängt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der sehr große gesammelte Datensatz eine wesentliche Hilfe beim Erstellen von Hadronisierungsmodellen sein wird. Eine

komplette theoretische Beschreibung der Hadronisierung in nuklearer Umgebung in einem konsistenten Rahmen, welche sowohl partonische als auch hadronische (Absorption und Mehrfachstreuungen) Mechanismen beinhaltet, wird dringend gebraucht. Die hier präsentierten Daten werden dazu beitragen, das Verständnis nicht-perturbativer QCD entscheidend zu verbessern.

HERA-B-Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP Beijing, Tsinghua Univ. Beijing, Humboldt Univ. Berlin, Univ. und INFN Bologna, Univ. Cincinnati, LIP and Univ. Coimbra, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, DESY Hamburg, MPI Kernphys. und Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, LIP und Univ. Lissabon, Jozef Stefan Inst. und Univ. Ljubljana, UC Los Angeles, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

Die von der HERA-B-Kollaboration durchgeführten Untersuchungen zur Produktion schwerer Quarks, welche in Kollisionen von Protonen mit Atomkernen erzeugt wurden, werden zum Abschluss gebracht. Diese Studien beinhalten die Messung des Produktionswirkungsquerschnittes von Mesonen, die aus einem schweren Quark mit der Flavour-Quantenzahl Beauty, Charm oder Strangeness sowie einem Antiquark bestehen, wobei das Antiquark leicht oder schwer sein kann.

Das HERA-B-Spektrometer bietet mit seiner großen Akzeptanz, dem hochauflösenden Vertexdetektor sowie der vorzüglichen Teilchenidentifizierung sehr gute Voraussetzungen für die Rekonstruktion komplexer Vielteilchen-Endzustände. Darüber hinaus erlaubt der hochselektive Trigger die Auswahl von Ereignissen mit zwei Leptonen, die z. B. dem Zerfall eines J/ψ -Mesons entstammen können, aus einem milliardenfach größeren Untergrund aus normalen Proton-Kern-Wechselwirkungen. Targetdrähte aus unterschiedlichen Materialien wie Kohlenstoff, Titan und Wolfram ermöglichen es, die Teilchenproduktion in Abhängigkeit von der Massezahl A des Targetkerns zu bestimmen.

Im Berichtsjahr hat sich die Kollaboration im wesentlichen auf den Abschluss der Analysen der Produktion von Mesonen mit Strange- und Charm-

quarks sowie der Produktion des Λ^0 -Baryons konzentriert. Diese Untersuchungen basieren auf zwei großen Datensätzen, die während der letzten Datenahmeperiode 2002/03 aufgezeichnet wurden. Für die Auswertung stehen ein Datensatz mit 150 Millionen Ereignissen, die mit dem Zwei-Lepton-Trigger ausgewählt wurden sowie ein Datensatz mit 200 Millionen Ereignissen, die mit einem einfachen *Minimum Bias* Trigger registriert wurden, zur Verfügung.

Abhängigkeit der J/ψ -Produktion von der Kernladungszahl

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Produktion von J/ψ -Mesonen von der Kernmassenzahl A liefert wichtige Information für Schwerionen-Experimente bei großen Schwerpunktsenergien. Das Hauptziel dieser Experimente besteht in der Erzeugung und dem Verständnis des sogenannten Quark-Gluon-Plasmas. Ein Reihe von charakteristischen Merkmalen wurden für ein solches Quark-Gluon-Plasma vorgeschlagen und untersucht, unter anderem eine anomale Unterdrückung der J/ψ -Produktion. Da das J/ψ eine große Masse hat, kann es nur in sehr harten Stößen von Quarks oder Gluonen in der Anfangsphase einer Kollision von

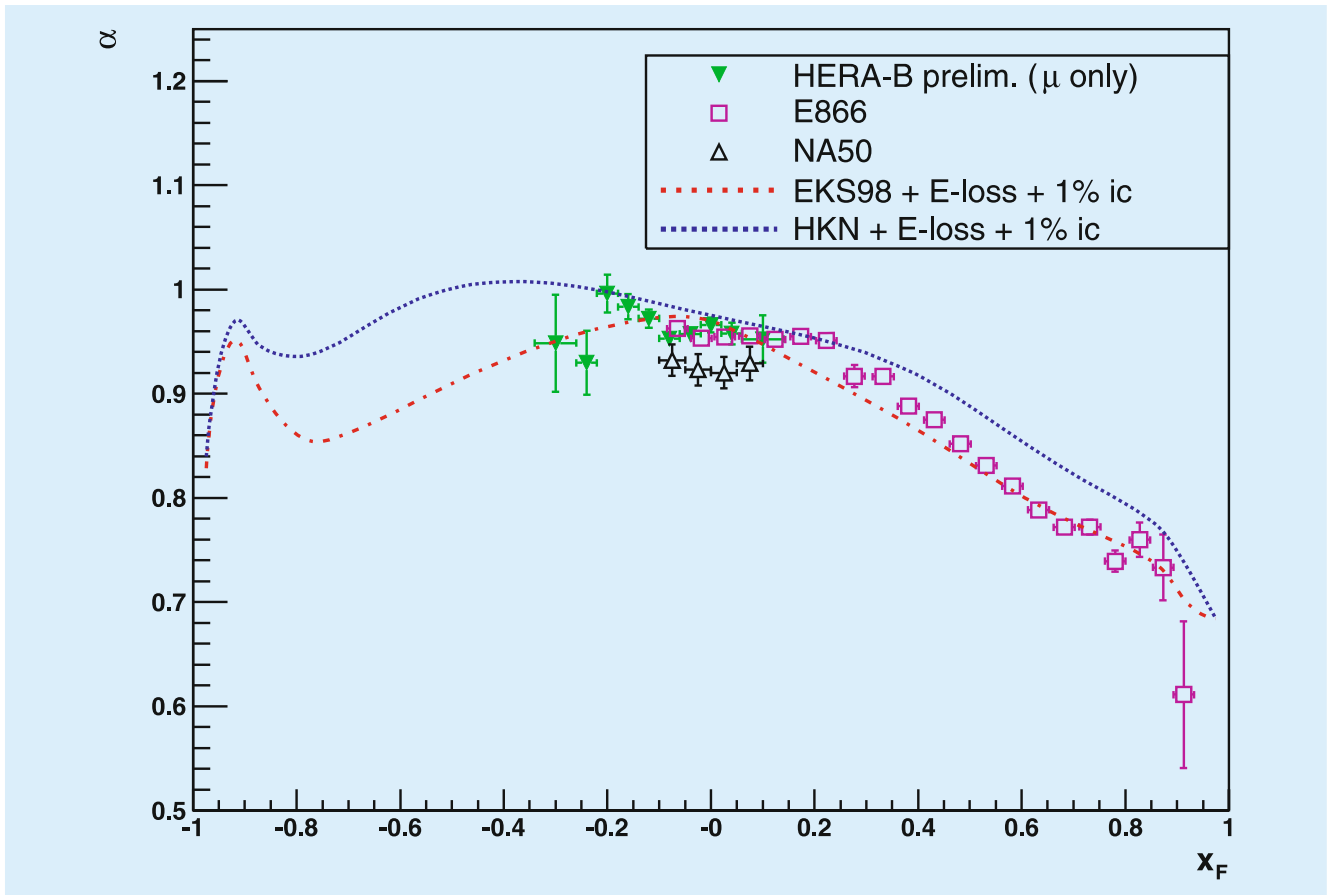


Abbildung 61: Messungen von α als Funktion von x_F von drei Experimenten: vorläufiges HERA-B-Resultat (gefülltes Dreieck) mit Muonen im Endzustand, E866 (offenes Quadrat) und NA50 (offenes Dreieck). Die beiden Kurven stellen Modellvorhersagen von R. Vogt dar.

Kernen produziert werden. Falls in der Reaktion ein Quark-Gluon-Plasma erzeugt wird, wird erwartet, dass das dadurch entstandene starke Farbfeld die Bindung zwischen dem Charm- und Anti-Charmquark, welche das J/ψ -Meson bilden, aufbricht. Letzlich kann diese anomale Unterdrückung der J/ψ -Produktion, im Vergleich zur normalen Produktion, als Hinweis auf die Entstehung eines Quark-Gluon-Plasmas betrachtet werden. Tatsächlich wurde eine solche Unterdrückung z. B. durch das CERN-Experiment NA50 berichtet; allerdings ist die Interpretation dieser Daten noch umstritten und hängt auch davon ab, wie groß die normale Unterdrückung der J/ψ -Produktion bei Kernwechselwirkungen – jedoch ohne Ausbildung eines Plasmas –

ist. Das ideale Umfeld zur Untersuchung solcher Effekte ist die Streuung von Protonen an Targetkernen, da hier eine Ausbildung eines Plasmas unmöglich ist. Mehrere solche Messungen wurden beim CERN und bei Fermilab durchgeführt und kürzlich auch in Brookhaven. HERA-B ist in der Lage, diesem Bild wichtige Information hinzuzufügen, indem die Unterdrückung der J/ψ -Produktion in dem wichtigen kinematischen Bereich untersucht werden kann, in dem die verbleibenden J/ψ 's relativ langsam sind.

Die Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte von der Kernmassenzahl wird üblicherweise durch ein Potenzgesetz der Form $\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A^\alpha$ beschrieben, wobei σ_{pN}

der Produktionsquerschnitt des betreffenden Prozesses für die Wechselwirkung eines Protons mit einem einzelnen Nukleon ist. σ_{pA} hingegen bezeichnet den Querschnitt für die Reaktion zwischen einem Proton und einem Kern mit der Kernmassenzahl A und α charakterisiert die Unterdrückung oder Erhöhung des Querschnittes. Falls α kleiner als 1 ist, wird der Wirkungsquerschnitt für schwere Atomkerne unterdrückt bzw. verstärkt, falls α größer 1 ist. In Abbildung 61 ist das vorläufige HERA-B-Ergebnis für α als Funktion von x_F (Feynman- x) dargestellt. Das endgültige Resultat wird auch die Daten mit Elektronen im Endzustand mit berücksichtigen, wodurch die Genauigkeit der Werte verbessert wird. Die Größe x_F ist proportional zum Impuls des J/ψ im Schwerpunktsystem. Ebenfalls dargestellt sind die Resultate des Fermilab Experiments E866 und des CERN Experiments NA50 zusammen mit den Vorhersagen des Modells von R. Vogt. Durch die HERA-B Messung kann der Bereich der bisherigen Messungen in den negativen x_F Bereich ausgedehnt werden. Diese zusätzliche Information ist wichtig, um die verschiedenen theoretischen Modellvorhersagen bewerten zu können.

Produktion von χ_c -Mesonen

χ_c -Mesonen sind ebenfalls ein gebundener Zustand aus einem Charm und einem Anti-Charm-Quark. Jedoch hat er eine etwas größere Masse als das J/ψ und tritt mit drei verschiedenen Drehimpuls-Quantenzahlen auf. Da die verfügbaren Modelle zur Beschreibung der Charmonium-Produktion unterschiedliche Vorhersagen bezüglich des Produktionsverhältnisses von χ_c und J/ψ machen, ist dieses Verhältnis eine wichtige Messgröße. Allerdings ist die Messung schwierig, so dass nur wenige Daten mit beschränkter Genauigkeit vorliegen. Alle Messungen untersuchen den Zerfallskanal $\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma$ und können damit zwei der drei χ_c Zustände (mit χ_{c1} und χ_{c2} bezeichnet) nachweisen. In der Literatur wird als Messgröße der Parameter R_{χ_c} benutzt, welcher das Verhältnis der Summe der Produktionsquerschnitte von χ_{c1} und χ_{c2} – gewichtet mit dem jeweiligen $J/\psi\gamma$ Verzweigungsverhältnis – und

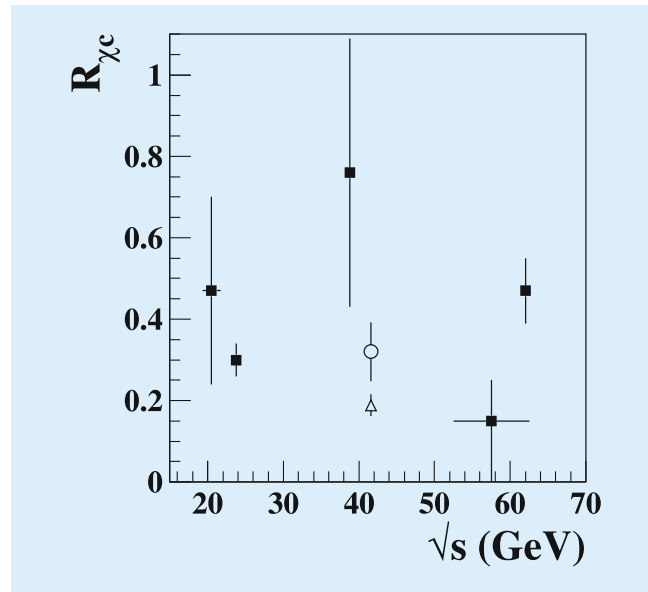


Abbildung 62: Alle verfügbaren Ergebnisse von R_{χ_c} aus Proton Reaktionen mit festem Target als Funktion der Schwerpunktsenergie. Das neueste Ergebnis von HERA-B ist als offenes Dreieck dargestellt.

dem Wirkungsquerschnitt der J/ψ -Produktion angibt. Die in Kollisionen von Protonen mit festem Target erzielten Ergebnisse für R_{χ_c} sind zusammen mit dem HERA-B-Resultat in Abbildung 62 als Funktion der Schwerpunktsenergie dargestellt. HERA-B verfügt mit 15,000 rekonstruierten χ_c -Mesonen über die größte Datenmenge und konnte trotz des erheblichen Untergrundes das genaueste Endergebnis mit dem kleinsten Fehlerbalken erzielen.

Produktion von Mesonen und Baryonen mit Strange-Quarks

Das Strange-Quark als leichtestes unter den schweren Quarks hat eine zu geringe Masse, um im Rahmen der perturbativen QCD genaue Vorhersagen des Produktionsquerschnittes machen zu können. Um so wichtiger ist es, durch Messungen das experimentelle Verständnis der Strangeness-Produktion zu verbessern. Darüber hinaus gibt es Vorhersagen, dass Teilchen mit Strangeness

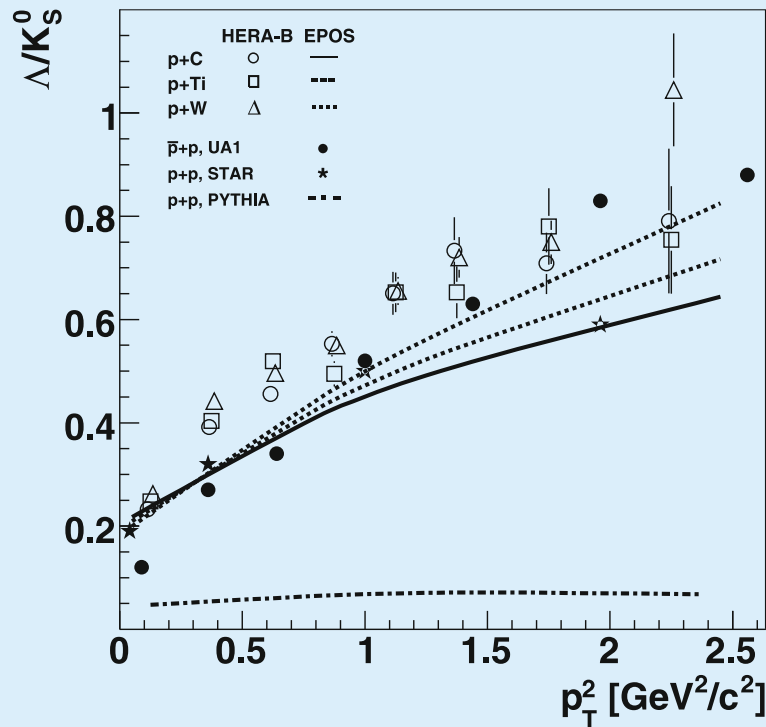


Abbildung 63: HERA-B-Messung des Verhältnisses der Produktionsquerschnitte von Λ und K_s^0 für Kohlenstoff-, Titan- und Wolfram-Targetdrähte bei einer Schwerpunktsenergie von 42 GeV als Funktion des Transversalimpulses im Quadrat. Zum Vergleich sind Ergebnisse der STAR-Kollaboration bei 200 GeV und UA1 bei 630 GeV Proton-Proton-Stößen mit aufgetragen. Die Vorhersagen der Programme Pythia und EPOS sind als Linien dargestellt.

als Indikator für die Bildung des Quark-Gluon-Plasmas in Schwerionen-Experimenten bei hohen Energien dienen können. Dies macht allerdings ein Verständnis von Proton-Kern-Reaktionen, bei denen sich wegen der geringeren Energiedichte kein Plasma ausbilden kann, als Vergleichsreaktion wichtig.

Als Beispiel sei hier das Verhältnis der Produktionsrate von Baryonen und Mesonen mit Strangeness erwähnt, welches von den einschlägigen Simulationsprogrammen falsch wiedergegeben wird. Die HERA-B-Messung des Produktionsverhältnisses von Λ^0 -Baryonen zu K_s^0 -Mesonen ist in Abbildung 63 als Funktion des Transversalimpulses (p_T) für drei ver-

schiedene Targets aufgetragen. Resultate aus Proton-Proton-Kollisionen bei deutlich höherer Energie wurden ebenfalls in die Abbildung mit aufgenommen. Trotz des großen Unterschiedes in der Reaktionsenergie zeigt das Verhältnis die gleiche Abhängigkeit vom Transversalimpuls, während die Vorhersagen des PYTHIA Programms die Messdaten nicht beschreiben können. Im Vergleich dazu passt das neuentwickelte Simulationsprogramm EPOS deutlich besser zu den Daten. Dieses Programm wird zurzeit mit Blick auf zwei verschiedene Anwendungen entwickelt: Die Untersuchung von Schwerionen-Kollisionen und die verbesserte Modellierung von Proton-Kern-Reaktionen in kosmischen Schauern.

Schlussbemerkung

Im Laufe des Jahres 2000 wurde klar, dass HERA-B auf dem geplanten Forschungsgebiet, dem Nachweis der CP-Verletzung im B-System, zu den beiden an e^+e^- Speicherringen durchgeführten Experimenten Belle und Barbar nicht mehr konkurrenzfähig war. Daher wurde eine Neuorientierung des Physikprogrammes beschlossen, welches die einzigartigen Eigenschaften des HERA-B-Detektors benutzen sollte, um vieldiskutierte Fragestellungen im Bereich der Physik schwerer Quarks zu untersuchen. Die Auswertung der Daten, welche im Rahmen dieses Programmes in der Messperiode 2002/2003 registriert wurden, ist nahezu abgeschlossen. Mehrere Analysen wurden bereits veröffentlicht und die letzten Manuskripte werden zur Publikation vorbereitet. Wenn auch die Kollaboration

das ursprüngliche, sehr ehrgeizige Ziel nicht erreichen konnte, so wurden doch wertvolle Beiträge zum Verständnis der Produktion schwerer Quarks in hochenergetischen Reaktionen von Protonen mit Kernen geleistet.

Darüber hinaus hat HERA-B wertvolle Beiträge zur Weiterentwicklung der Technologien im Bereich des Detektorbaus, der Ereignis Selektion und der Datennahme geleistet. Die Anforderungen im Bereich des Detektorbaus waren insbesondere durch die sehr hohen Teilchenflüsse und die damit verbundenen Strahlenschäden geprägt. Diese Erkenntnisse und die beim Betrieb eines Detektors unter diesen extremen Bedingungen gesammelten Erfahrungen haben die Entwicklung der bevorstehenden LHC-Experimente nachhaltig beeinflusst.

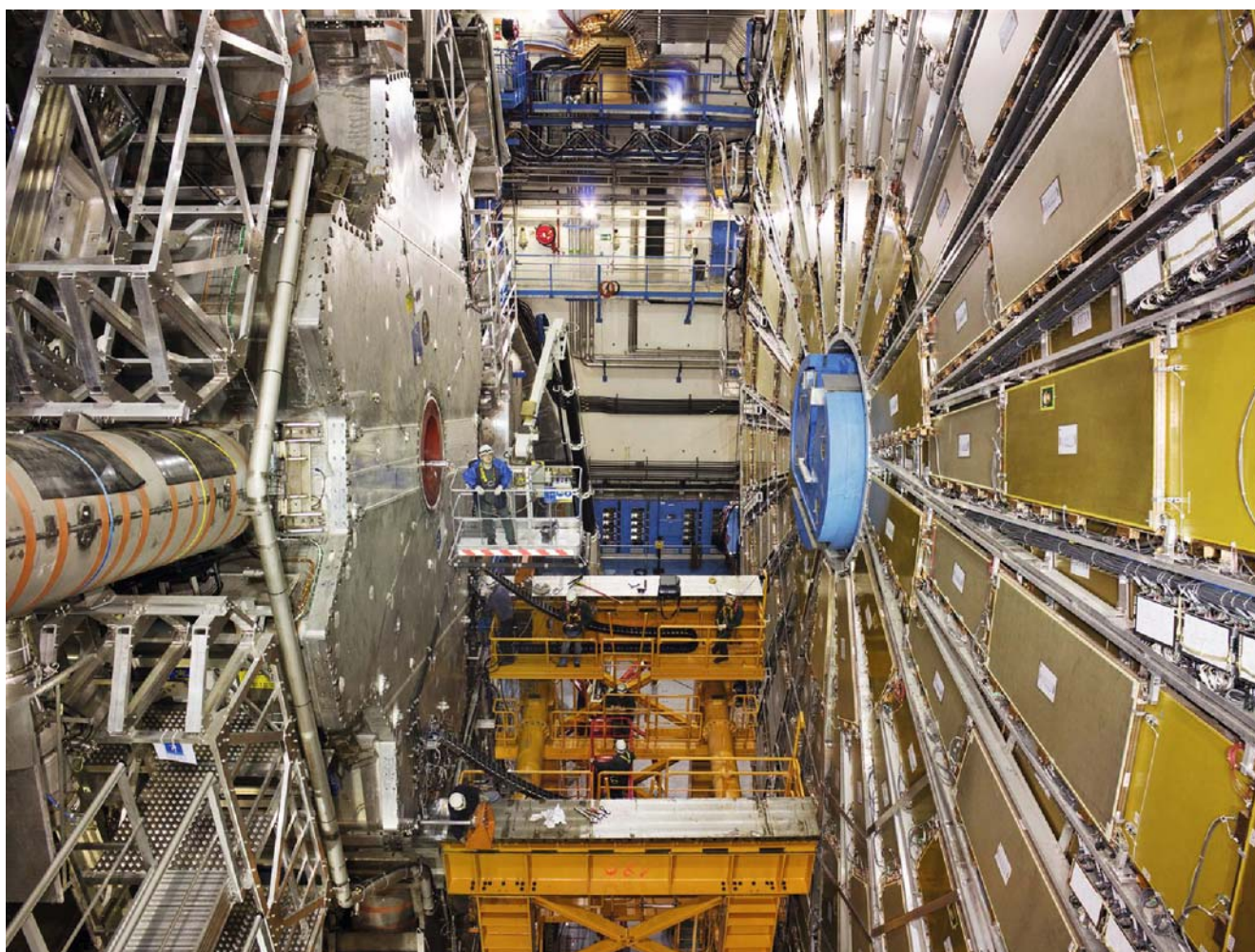


Abbildung 64: *Blick in die ATLAS Kaverne im Dezember 2007. Der Endkappen-Magnet vor der endgültigen Positionierung.*

ATLAS-Experiment

Gruppenleiter: K. Mönig, DESY

DESY war 2007 im zweiten Jahr an dem Experiment ATLAS am Large Hadron Collider am CERN beteiligt. Die DESY-ATLAS-Gruppe hat sich seit 2006 signifikant vergrößert und besteht jetzt aus 11 permanenten Mitarbeitern, 13 Post-Doktoranden und 6 Doktoranden. Darin enthalten ist eine Nachwuchsgruppe 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 an der Öffentlichkeitsarbeit. Diese Aktivitäten werden im Weiteren näher beschrieben.

Der ATLAS-Trigger

Wegen der hohen Wechselwirkungsraten sind die Triggersysteme der LHC Experimente besonders wichtige Komponenten. Das ATLAS-Triggersystem ist in Abbildung 65 skizziert. Für das ATLAS-Experiment ist ein dreistufiges Triggersystem vorgesehen, um die Ereignisraten von der anfänglichen Bunch-Crossing-Rate von 40 MHz auf einige hundert Hz zu reduzieren. Dabei ist die erste Triggerstufe (LVL1) in speziell gefertigter Elektronik (FPGAs und ASICs) gebaut. Sie reduziert die Raten innerhalb von 2.5 Mikrosekunden auf ungefähr 100 kHz. Zur Selektion werden ausschließlich Daten aus den Kalorimetern und den Myon-Systemen

verwendet. Eine wichtige Aufgabe der ersten Triggerstufe ist auch die Zuordnung eines Ereignisses zu dem *bunch crossing*, in dem es erzeugt wurde. 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 der Daten, 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 10 ms zur Verfügung. Erst die dritte Triggerstufe, *Event-Filter* (EF) genannt, läuft nach dem Zusammenführen aller Daten eines Ereignisses (*event building*) und hat somit Zugang zur gesamten Information. Dort wird die Datenrate auf einige hundert Hz reduziert.

Während des vergangenen Jahres wurden große Fortschritte im Aufbau dieses Triggersystems gemacht. Alle Komponenten der ersten Triggerstufe, wie der zentrale Trigger, der Myon-Trigger oder der Kalorimeter-Trigger sind bereits vollständig am Experiment installiert. Das gleiche gilt für einen Großteil der HLT/DAQ-Infrastruktur. Allerdings sind erst ca. 20% der LVL2- und EF-Computerfarm zu Testzwecken aufgebaut. Die restlichen Rechner werden zu einem möglichst späten Zeitpunkt beschafft, um von leistungsfähigerer Computer-Technologie profitieren zu können. Die installierten Komponenten werden in verschiedenen Tests mit simulierten Daten und Daten aus kosmischer Strahlung eingesetzt. Bei diesen Tests steht vor allem die kombinierte Datennahme aller Subdetektoren im

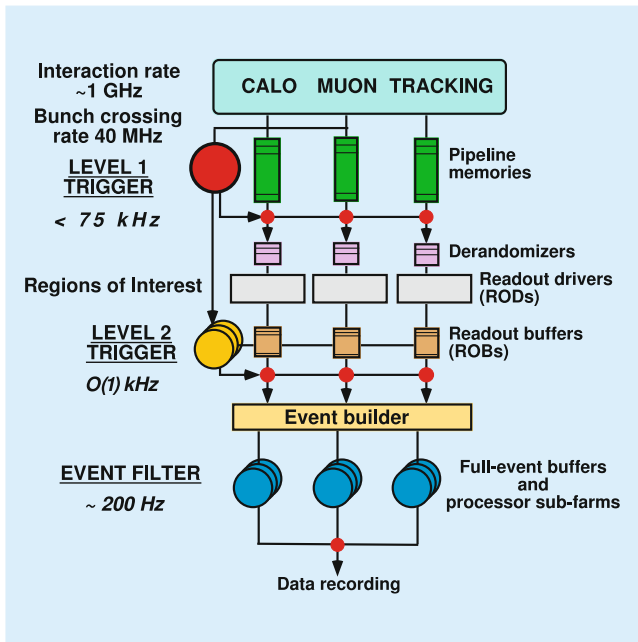


Abbildung 65: Das Triggersystem des ATLAS-Detektors.

Mittelpunkt. Die DESY-Gruppe engagiert sich vorwiegend bei der Implementation von wichtigen Softwarekomponenten zum Betrieb des ATLAS-Triggers. So ist die Gruppe zum Beispiel verantwortlich für das Konfigurationssystem des Triggers und das System zur Überwachung der Datennahme.

Trigger-Konfiguration

Das Konfigurationssystem des ATLAS-Triggers versorgt die verschiedenen Triggerstufen mit allen Parametern, die für die Selektion der interessanten Ereignisse während der Datennahme benötigt werden. Es übernimmt auch die Archivierung dieser Parameter für die spätere Datenanalyse. Dasselbe System soll auch zur Konfiguration der Trigger-relevanten Teile bei der Rekonstruktion und Simulation von Ereignissen eingesetzt werden.

Die zentrale Komponente des Konfigurationssystems ist die Trigger-Datenbank (TriggerDB), in der die gesamte Information, die zur Konfiguration des Triggers nötig ist, gespeichert wird. Die TriggerDB ist eine

relationale Datenbank, die mit ORACLE- und MySQL-Technologie betrieben werden kann und in das ATLAS-weite System von Online-Datenbanken integriert ist. Zu Beginn der Datennahme (oder Simulation) ziehen die Komponenten des Triggers die Konfigurationsdaten aus der TriggerDB. Weil die HLT-Prozesse auf etwa 3000 Rechnerknoten ablaufen sollen, ist vor allem die schnelle Verteilung der HLT-Parameter eine Herausforderung. Während der Datennahme werden die Parameter dann angewendet und in der TriggerDB markiert, so dass sie nicht mehr verändert werden können und für die spätere Datenanalyse zur Verfügung stehen. Auch das Interface zur späteren Datenanalyse, das für die Interpretation der Triggerentscheidung in jedem Ereignis benötigt wird, und damit auch das zugrundeliegende Analysemodell, ist Teil der Arbeit am Konfigurationssystem. Zum Füllen der TriggerDB ist ein grafisches Interface (TriggerTool) in Java entwickelt worden. Dieses erlaubt es, komplizierte Menüs übersichtlich darzustellen und einfach zu verändern, so dass alle Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Die DESY-Gruppe ist an der Entwicklung aller Teile des Systems führend beteiligt. Im Hamburger Rechenzentrum des DESY sind Kopien der TriggerDB installiert, um Tests durchzuführen und die weitere Entwicklung voranzubringen. Das Konfigurationssystem, das direkt am Experiment installiert ist, wird in den bereits erwähnten Tests der kombinierten Datennahme aller Detektoren routinemäßig zur Konfiguration der Triggerselektion eingesetzt. Auch für die Selektion von Signalen kosmischer Myonen werden die Triggerkomponenten bereits durch dieses System konfiguriert. Diese Tests erlauben es, die Funktionalität des Systems im Hinblick auf die erste Datennahme im Sommer 2008 zu verbessern.

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. So sind z. B. verschiedene Optimierungen der Selektion möglich. Die Gruppe beteiligt sich vor allen Dingen an der Optimierung der Selektion des Elektronentriggers. Hier können beispiels-

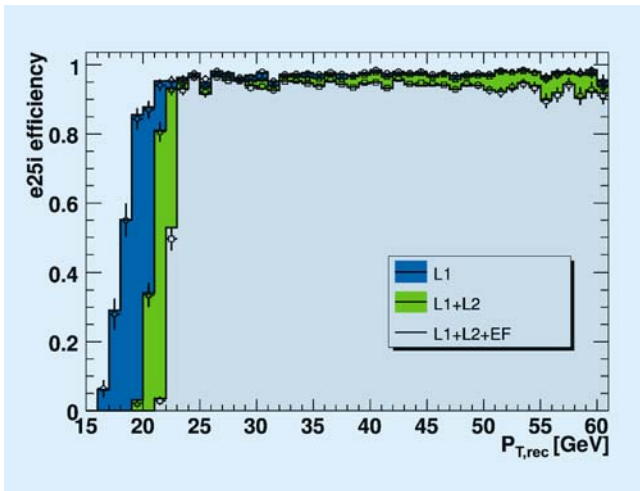


Abbildung 66: Effizienz des ATLAS-Triggers für die Selektion von Elektronen auf den verschiedenen Triggerstufen: Vergleich der Ergebnisse aus der *tag&probe*-Methode (offene Symbole) und aus Monte-Carlo-Information (Histogramme).

weise die Algorithmen, die in der Hardware (FPGA Firmware) der ersten Triggerstufe implementiert sind, im Rahmen der technischen Möglichkeiten verändert und neu angepasst werden (z. B. Schnitt-Parameter). Da die Selektion auf den höheren Triggerstufen als Software implementiert ist, können hier im Prinzip vollkommen neue Algorithmen entwickelt werden. Am DESY werden vor allen Dingen so genannte multivariate Methoden zur Selektion von Elektronen studiert.

Ein wichtiger Aspekt vieler Studien am LHC (z. B. Messung von Wirkungsquerschnitten oder Massen) ist die richtige Berücksichtigung von Triggereffizienzen. Zur Bestimmung von Triggereffizienzen am LHC sind einige Methoden bekannt. Eine Methode, die bereits am Tevatron und anderen Collidern benutzt worden ist, 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 den Elektron-Trigger ausgelöst hat (*tag*). Das zweite Elektron (*probe*) kann dann zur Bestim-

mung der Triggereffizienz für Elektronen benutzt werden. Die DESY-Gruppe ist führend an den Studien zur Leistungsfähigkeit dieser Methode mit simulierten Ereignissen beteiligt. Teile der Ergebnisse der Studie werden im ATLAS-Detektor-Referenz-Papier veröffentlicht und sind in Abbildung 66 gezeigt. Zu sehen ist das charakteristische Schwellenverhalten der Triggereffizienz für die verschiedenen Triggerstufen. Die offenen Symbole zeigen die Ergebnisse aus der *tag&probe*-Methode für eine Datenmenge, die bei einer Luminosität von 100 pb^{-1} genommen würde, während die Histogramme die Effizienz aus Monte-Carlo-Information darstellen. Man erkennt, dass die *tag&probe*-Methode die Effizienzwerte aus Monte-Carlo-Information gut reproduzieren kann und man bereits mit einem relativ kleinen Datensatz recht geringe Unsicherheiten erhält.

Trigger-Monitoring

Für eine erfolgreiche Datennahme ist es wichtig, die Funktion des Triggers und des gesamten Detektors laufend zu überwachen. Zum einen muss der Schichtbesatzung die Möglichkeit gegeben werden, im Falle einer Fehlfunktion schnell eingreifen und die fehlerhaften Komponenten identifizieren zu können, um einen Datenverlust zu minimieren, zum anderen müssen aber auch Perioden, in denen wesentliche Teile des Triggers nicht wie vorgesehen funktioniert haben, von der Datenanalyse ausgeschlossen werden. DESY hat zusammen mit der Gruppe der Humboldt Universität beide Aspekte der Triggerüberwachung übernommen.

Da die höheren Triggerstufen bei ATLAS aus Software bestehen, die auf Standard-Rechnersystemen laufen, kann das Trigger-Monitoring leicht in diese Programme integriert werden. Dies erlaubt einen Zugriff auf alle für die Ereignis Selektion verwendeten Informationen, sowohl für die selektierten als auch für die verworfenen Ereignisse. Dazu wird bei DESY ein Programm entwickelt, das sämtliche Raten des Eventfilters in Form von Histogrammen erfasst und an den *Histogram Server* weitergibt, sowie ein Programm, das diese Raten benutzerfreundlich darstellt. Des Weiteren werden diese Histogramme im so genannten *Data Quality Monito-*

ring Framework (DQMF) analysiert und die Ergebnisse für die weitere Datenanalyse gespeichert. Auch die Analyse der Trigger-Information im 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 wird ein Programm entwickelt (OMD), das beliebige Informationen vom IS darstellen und analysieren kann. Die große Flexibilität dieses Programms macht es besonders nützlich bei der Inbetriebnahme des Datennahmesystems.

Minimum-Bias-Trigger

Mit *Minimum-Bias* werden Ereignisse bezeichnet, bei denen Quarks oder Gluonen mit sehr niedrigen Energien wechselwirken, was für die Mehrzahl der Ereignisse zutrifft. Diese Ereignisse sind zum einen interessant für das Verständnis der starken Wechselwirkung bei kleinen Impulsüberträgen, zum anderen treten bei höheren Luminositäten mehrere solcher Ereignisse pro Strahlkreuzung auf, die dann Untergrund für die interessierenden seltenen Reaktionen sind. Zur Analyse der interessanten Prozesse müssen die Minimum-Bias-Ereignisse daher gut verstanden sein.

Die Schwerpunktsenergie am LHC entspricht der einer Streuung eines Protons mit einer Energie von etwa 10^{17} eV an einem ruhenden Proton. Das ist ein für Experimente mit kosmischer Strahlung besonders interessanter, aber auch experimentell schwieriger Energiebereich. Energie und Masse der primären kosmischen Strahlung werden bei hohen Energien aus der Vermessung von Luftschauern erschlossen. Die Güte der Vermessung hängt von der Zuverlässigkeit von Modellen für die Luftschauersimulation ab, für die Minimum-Bias-Analysen dringend benötigte Eingabedaten liefern können.

Bei niedrigen Luminositäten kann man Minimum-Bias-Ereignisse einzeln selektieren und analysieren.

Daher wird bei DESY ein Trigger für solche Ereignisse entwickelt. Eine Möglichkeit, bei ATLAS auf solche Ereignisse zu triggern, sind spezielle Szintillationszähler im Endkappenbereich. Diese Zähler sind sehr schnell und können daher schon auf der ersten Stufe ein Signal geben. Andererseits sind sie nur in einem begrenzten Rapiditätsbereich installiert, was die Triggereffizienz einschränkt. Bei DESY wird daher eine alternative Methode verfolgt. Bei einer Luminosität von ca. 10^{31} cm⁻²s⁻¹, wie sie in der ersten Periode erwartet wird, beträgt die Wahrscheinlichkeit für ein Minimum Bias Ereignis ca. 10% pro Strahlkreuzung. Es reicht daher aus, wenn man die gewünschte Triggerrate durch einen Zufallstrigger in der ersten Stufe einstellt und dann die Selektion in den höheren Stufen durchführt. Durch einen einfachen Schnitt auf die Anzahl der rekonstruierten Raumpunkte in Silizium-Streifendetektor können die leeren Strahlkreuzungen mit hoher Effizienz verworfen werden. Eine anschließende Spurrekonstruktion in den Pixel- und Streifendetektoren erlaubt auch eine fast vollständige Abtrennung von Strahl-Gas-Ereignissen.

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. Die hier gewonnenen Erfahrungen werden im Rahmen der Tier-3 Task Force der ATLAS-Kollaboration zur Verfügung gestellt.

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. Die Portierung der ATLAS-Software auf unterschiedliche Plattformen wird am DESY aktiv unterstützt. Dabei steht DESY in enger Zusammenarbeit mit den Entwicklern am CERN.

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

Monte-Carlo-Generatoren

Die DESY-Gruppe hat die Verantwortung für die Einbindung von Monte-Carlo-Generatoren in die ATLAS-Software seit September 2007 übernommen. Neben der Unterstützung der bereits existierenden Software wurde damit begonnen, strukturelle Veränderungen einzuführen und neue Monte-Carlo-Generatoren für ATLAS zu benutzen.

Die ATLAS-Kollaboration verwendete ATLAS-spezifische, teilweise ältere Versionen von Generatorsoftware, was einen höheren Aufwand an Validierung und Unterstützung bedeutet. Es wird jetzt begonnen, die von der LCG-Gruppe *Generator Services* (GENSER) zur Verfügung gestellte Software zu benutzen (LCG = LHC Computing Grid Project). Diese Software soll LHC-weit angewandt werden und wird für alle GRID-Plattformen validiert. Beispielsweise wurde das Paket HepMC, das generatorunabhängige Format zur Speicherung der generierten Teilchen und ihrer Zerfallsprodukte, auf die neueste Version und auf die Benutzung der GENSER-Bibliothek umgestellt.

ATLAS hat damit begonnen, die Dokumentation der verschiedenen Projekte zentral zu validieren. Die Validierung der Monte-Carlo-Generatoren ist für Januar geplant. In diesem Zusammenhang wurde die Generator-Software dokumentiert.

Es wurde damit begonnen, den Monte-Carlo-Generator Herwig++, der in C++ neu geschriebene Generator Herwig, in die ATLAS-Software einzubinden.

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, die in fünf Schritte aufgeteilt ist. Als erstes werden entweder einzelne Teilchen für Detektorstudien oder physikalische Prozesse generiert. Darauf folgt die Simulation des Detektors, Digitalisierung der simulierten Hits und die Rekonstruktion der gemessenen Teilchen. Das Zeitbudget wird durch die reine Detektorsimulation dominiert, die zwischen 10 und 15 Minuten für ein typisches Physikereignis braucht. DESY und die Universität Hamburg arbeiten im Rahmen einer ATLAS-Task-Force an der Reduzierung der Simulationszeit im elektromagnetischen Kalorimeter. Rund 60% der Simulationszeit wird dort aufgewandt. Eine signifikante Reduzierung kann mit der Methode der *Frozen Showers* erreicht werden, die darauf beruht, Elektronen mit niedriger Energie durch vorgefertigte Template-Schauer zu ersetzen. Mit dieser Methode kann die Simulationszeit für Elektronen um einen Faktor 10 bis 20 gesenkt werden. Für typische Physikereignisse liegt die Zeitersparnis zwischen zwei und drei.

DESY hat die Methode der Frozen Showers vorgeschlagen, entwickelt und innerhalb der ATLAS-Software implementiert. Der Schwerpunkt der jetzigen Arbeit liegt auf der Erstellung der Template-Schauer. Um Speicherplatz zu sparen, werden die Template-Schauer in kinematischen Variablen des elektromagnetischen Schauers parametrisiert. Für den Barrel- und Endkappenbereich hat sich eine Parametrisierung in der Schauerenergie und der Pseudorapidität als optimal erwiesen. Damit werden typische Schauervariablen auf einige Prozent genau beschrieben. Diese Genauigkeit sollte für die Analyse der Daten ausreichen. Die Methode der Frozen Shower ist offiziell in die ATLAS-Simulation aufgenommen worden und wird zur Zeit validiert. Weitere Studien für ein besseres Verständnis und damit einer

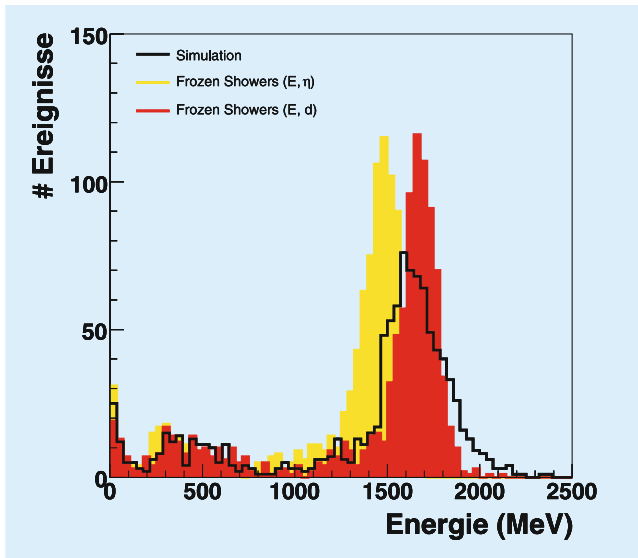


Abbildung 67: Verteilung der deponierten Energie im Vorwärtskalorimeter für die volle Schauer-simulation (schwarze Linie) und Template-Schauer mit η (gelb) bzw. mit d (rot) Parametrisierung.

besseren Beschreibung der Simulation sind jedoch noch nötig.

Weitere Studien zum Zeitverbrauch in der Kalorimetersimulation haben gezeigt, dass die Frozen Shower Methode in bestimmten Energiebereichen auch auf Photonen ausgeweitet werden sollte. Photonen wurden bis jetzt nicht explizit behandelt. Sie wurden implizit durch die Frozen Shower Methode parametrisiert, sobald ein Photon ein Elektron-Positron-Paar erzeugt hat. Die mittlere Weglänge für niederenergetische Photonen (im Bereich der Energieschwelle für Paarerzeugung) ist aber signifikant länger als für mittelenergetische Photonen, so dass eine explizite Parametrisierung dieser Photonen eine signifikante Zeitersparnis ergibt. Template-Schauer für Photonen werden nun standardmäßig erzeugt und zusätzlich zu den Template-Schauern für Elektronen in der Simulation benutzt.

Seit längerem wurde die Methode der Frozen Shower auch auf das elektromagnetische Vorwärtskalorimeter angewandt. Die Parametrisierung der Template-Schauer in der Schauerenergie E und der Pseudorapidität η wurde vom Barrel- auf den Vorwärtsbereich übertragen.

Leider ist die Übereinstimmung in z. B. der deponierten Energie nie besser als 10% (siehe Abbildung 67). Diese Problematik wurde auf einem Simulations-Workshop bei DESY in Hamburg diskutiert. Ausführliche Diskussionen mit Simulations- und Detektorexperten haben ergeben, dass die derzeitige Parametrisierung der Template-Schauer für das Vorwärtskalorimeter nicht optimal ist. Die Geometrie im Vorwärtsbereich unterscheidet sich signifikant von der im Barrel- oder Endkappenbereich. Hier ist eine Parametrisierung in der Pseudorapidität η nicht notwendig. Viel wichtiger ist die Unterscheidung, ob der Schauermittelpunkt im aktiven oder passiven Material des Kalorimeters liegt. Für diese Unterscheidung wird der Abstand d zum Mittelpunkt einer Kalorimeterzelle benutzt. Diese Parametrisierung der Template-Schauer wird zurzeit implementiert und erste Tests haben gezeigt, dass dadurch die deponierte Energie signifikant besser reproduziert wird. Dies ist in Abbildung 67 dargestellt.

ALFA

Seit dem Jahr 2007 nimmt DESY am Bau des ALFA Detektors teil. ALFA ist ein Vorwärts-Spektrometer, das die elastisch oder quasi-elastisch (diffraktiv) gestreuten 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 zylindrischer, 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.

Die ALFA Sensoren bestehen aus dünnen (0.5 mm^2) szintillierenden Fasern, die mit hoher Präzision dicht nebeneinander auf beiden Seiten einer Titanplatte aufgeklebt werden. In einem *Roman-Pot* sind 10 solche Sensoren mit insgesamt 20×64 Fasern installiert. Diese sollen die Position gestreuter Protonen mit einer Präzi-

sion von ca. $30\ \mu\text{m}$ in Bezug auf den Strahl bestimmen. Zusätzlich werden noch drei Platten mit Fasern als sogenannte Überlappdetektoren verwendet.

Alle Fasern werden mit Hilfe von Multi-Anode PMTs (jeweils 64 Kanäle) ausgelesen. Es werden also pro *Roman-Pot* 20 MAPMTs und 3 MAPMTs für die Überlappdetektoren benötigt. Abbildung 68 zeigt die zehn ALFA Sensoren (grau) und die drei Überlappensensoren (hellgrau) mit schematisch eingezeichneten Faserbahnen. Die Fasern werden durch runde Löcher in der oberen Platte zu den MAPMTs geführt.

Der gesamte Detektor besteht aus acht *Roman-Pots*, vier auf jeder Seite des Wechselwirkungspunktes, davon jeweils zwei oben und zwei unten. Jeder *Roman-Pot* wird durch spezielle Triggerszintillatoren getriggert. Die Entwicklung der Triggerzähler ist noch nicht abgeschlossen.

DESY hat zusammen mit der Universität Gießen und der Humboldt Universität die Verantwortung für den Bau wesentlicher Komponenten des Detektors übernommen. Das sind die präzise gefrästen Titanplatten

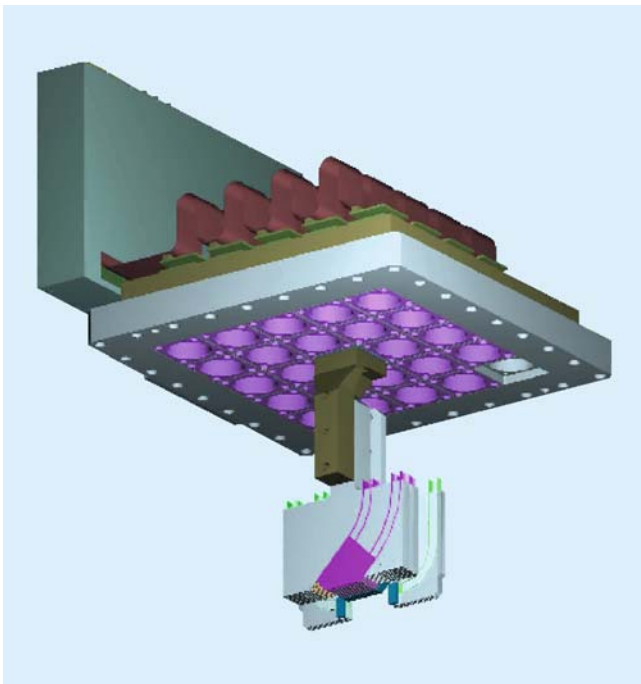


Abbildung 68: Schematischer Aufbau des ALFA-Detektors.

mit aufgeklebten Fasern für den Positionsdetektor, die Überlappdetektoren und die MAPMTs. Alle Teile werden bei DESY vermessen um die Position jeder Faser innerhalb des Detektors mit einer Präzision von besser als $5\ \mu\text{m}$ zu bestimmen. Auch die MAPMTs müssen mit ähnlicher Genauigkeit positioniert werden, um eine optimale Lichtausbeute zu gewährleisten. DESY ist zusammen mit der Universität Gießen außerdem führend am Aufbau der Analyse- und Simulationssoftware beteiligt.

Die primäre Aufgabe des Detektors ist die Messung der elastischen Proton-Proton Streuung. Die Messung soll in den Bereich der Coulomb-Streuung ausgedehnt werden ($t \sim 6 \cdot 10^{-4} \text{GeV}^2$), um die absolute Luminosität aus der gut bekannten elektromagnetischen Wechselwirkung zu bestimmen. Darüber hinaus kann die Luminosität auch aus dem Vergleich des elastischen und des totalen Wirkungsquerschnittes bestimmt werden. Mit dem Detektor kann auch, bei nicht zu hoher Luminosität, diffraktive Streuung untersucht werden. Theoretische Untersuchungen zu der Bedeutung der Diffraktion für die LHC Physik werden zurzeit bei DESY durchgeführt. Längerfristig ist die Messung der Elastischen Streuung als erster Schritt zu einem Programm der Vorwärtsphysik beim LHC zu sehen.

Physikstudien

Nachdem die Gruppe sich im ersten Jahr im Wesentlichen auf Servicearbeiten konzentriert hat, wurden in diesem Jahr auch die Studien zu Vorbereitung der Physikanalyse intensiviert. Dabei 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 τ -Leptonen. Während die Top- und SUSY-Studien schon weiter fortgeschritten sind, stehen die Standardmodell-Analysen noch am Anfang. Hier haben Arbeiten zur Rekonstruktion von Ereignissen mit W- und Z-Bosonen sowie von Minimum-Bias-Ereignissen begonnen.

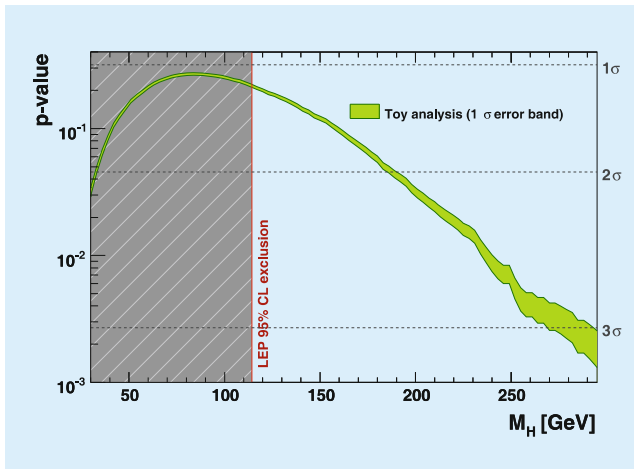


Abbildung 69: *P-Value* des Standardmodells als Funktion der Higgs-Masse.

Die Suche nach dem Higgs-Boson, dem letzten noch fehlenden Baustein des Standardmodells (SM), steht im Fokus der Arbeit der Kollaboration. Bisher kann man nur indirekte Rückschlüsse auf die Masse des Higgs-Bosons ziehen, in dem χ^2 -Anpassungen an bereits verfügbare Präzisionsmessungen von LEP- und Tevatron-Experimenten durchgeführt werden. In Zusammenarbeit mit CERN und der Universität Hamburg werden diese Studien in der DESY-Gruppe im Rahmen eines neuen Software-Frameworks, Gfitter, durchgeführt. In Abbildung 69 ist der Verlauf des so genannten *p-Value* des SM – der Wahrscheinlichkeit im Rahmen der Unsicherheiten der einzelnen Messungen einen χ^2 -Wert zu erhalten, der größer als der tatsächlich beobachtete Wert des globalen SM Fits ist – als Funktion der Higgs-Masse zu sehen. Es zeigt sich, dass diese Messungen kleine Massen des Higgs (etwa 100 GeV) bevorzugen.

Rekonstruktion von τ -Leptonen

Um Messungen mit τ -Leptonen im Standardmodell und insbesondere die geplanten Analysen zur Entdeckung und präzisen Vermessung von SUSY durchführen zu können, ist eine effiziente τ -Lepton-Rekonstruktion mit guter Untergrundunterdrückung und ein sehr präzises Verständnis der Eigenschaften dieser Rekonstruktion

notwendig. Die DESY-ATLAS-Gruppe engagiert sich daher mit drei Schwerpunkten an der Studie von τ -Leptonen, nämlich den notwendigen Umgebungen zur Entwicklung der Rekonstruktionsalgorithmen, der Verbesserung der Rekonstruktionsalgorithmen selbst und im Bereich der Analyse der Leistungsfähigkeit und Auflösung der Algorithmen unter Verwendung der ersten Daten.

Entwicklung der τ -Rekonstruktionsalgorithmen

Die von der DESY-ATLAS-Gruppe geplanten SUSY-Analysen erfordern eine möglichst gute Effizienz und Untergrundunterdrückung der τ -Identifikationsalgorithmen gerade für τ -Leptonen mit kleinem Transversalimpuls. Daher werden in der DESY-ATLAS-Gruppe verschiedene Verbesserungen der Identifikationsalgorithmen studiert.

Um solche Algorithmen effizient entwickeln zu können, wurden zunächst Datenstrukturen geschaffen, die einen schnellen Zugriff auf die relevante Information erlauben. Dazu wurde der TauDPMaker entwickelt, der als eines der ersten Werkzeuge das neue ATLAS-Analysemodell mit so genannten DPDs, *Derived Physics Data*, implementiert. Dabei werden die detaillierten Daten nur für die Ereignisse und nur die Bereiche des Detektors gespeichert, in der ein wahres (im Fall von Simulationsdaten) oder rekonstruiertes τ -Lepton erwartet wird. Auf dem in der Größe stark reduzierten DPD kann dann effizient und genau eine Entwicklung und eine Messung der Eigenschaften der Algorithmen vorgenommen werden. Ein zusätzlicher Mechanismus zum parallelen oder ausschließlichen Erstellen von n-Tupeln erlaubt den quasi-automatischen Vergleich von Algorithmen und Messungen der Eigenschaften der Algorithmen.

Ein wichtiges Kriterium zur Auswahl der hadronisch zerfallenden τ -Leptonen ist ihre Eigenschaft, meist ein oder drei Spuren zu enthalten. Die Nutzung dieser Information wird dadurch erschwert, dass in vielen Fällen ein von einem π^0 -Zerfall aus dem Zerfall des τ -Leptons stammendes Photon in ein Elektron-Positron-Paar kon-

vertiert und die Zahl der Spuren erhöht. Eine spezifische Rekonstruktion der Konversionen kann die Zahl der mit der korrekten Zahl von Spuren rekonstruierten τ -Leptonen stark vergrößern, insbesondere für kleine Transversalimpulse, wo die Trennung der Spuren und die Identifikation der Vertizes der Konversionen aufgrund des Magnetfelds klar möglich ist.

Unabhängig von den Photon-Konversionen ist die Qualitätsselektion der π^\pm -Spuren eine wichtige Eigenschaft der Identifikation. Harte Schnitte auf die Spurrekonstruktion verbessern die Zuordnung von 1- und 3-Spurzerfällen und die Energie- und Richtungsauflösung, verschlechtern aber die Untergrundunterdrückung, da bei harten Qualitätsschnitten die mittlere Zahl der Spuren von QCD-Jets sinkt. Die DESY-ATLAS-Gruppe studiert mögliche Verbesserungen, in denen für die Identifikation und Untergrundunterdrückung eine lose Spurrekonstruktion verwendet wird, während die Energie- und Richtungsinformation mit härteren Schnitten berechnet wird.

Messung der Eigenschaften von τ -Rekonstruktionsalgorithmen aus ersten ATLAS-Daten

Die Bestimmung der Eigenschaften der τ -Rekonstruktion erfolgt bislang meist aus dem Vergleich zwischen Rekonstruktion der Monte-Carlo-Ereignisse und der Monte-Carlo-Wahrheit. Sobald erste Daten des ATLAS-Experiments verfügbar sind, sollten experimentelle Parameter, wie Energieauflösung, Winkelauflösung, Effizienz und Untergrundunterdrückung sowie der fehlerhaften Identifikation von Untergrund als τ -Leptonen (*fake rate*), direkt aus den Daten ohne Verwendung der Monte-Carlo-Simulationen bestimmt werden. Zur Vorbereitung dieser Messungen simuliert die DESY-ATLAS-Gruppe die Bestimmung der fake rates von QCD-Jets und der Effizienzen und Untergrundunterdrückung aus echten Daten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationen.

Als Beispiel sind in Abbildung 70 fake rates von QCD-Jets gezeigt, die aus Monte-Carlo-Daten mit der für echte Daten entwickelten Methode bestimmten wur-

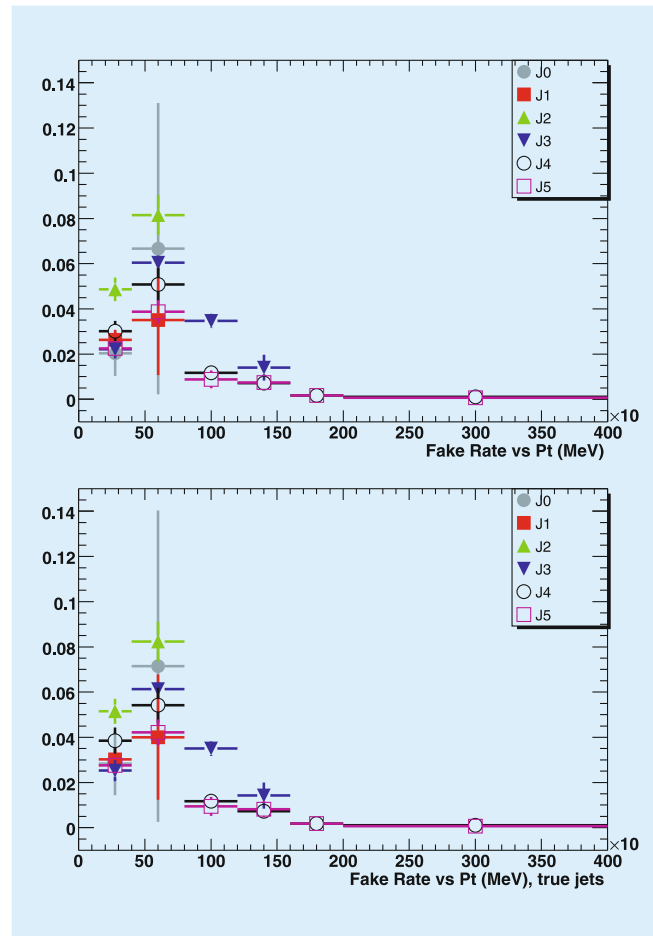


Abbildung 70: *Fake rates* verschiedener Monte-Carlo-Datensätze, die mit dem TauIP3P-Algorithmus bestimmt wurden. Man sieht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen rekonstruierten (oben) und generierten (unten) Jets.

den, im Vergleich mit fake rates, die direkt aus der Monte-Carlo-Wahrheit bestimmt wurden.

Supersymmetrie

Zur Vorbereitung der ATLAS-Datenanalyse untersucht die DESY-Gruppe schwerpunktmäßig das Entdeckungspotenzial für supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells. Supersymmetrie (SUSY) ist eine Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen. Teilchen, die sich unter einer SUSY-Transformation

ineinander umwandeln, werden Superpartner genannt. 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 Argumente 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 Schwerpunktenenergie 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 τ -Leptonen in den Endzuständen. Eine HGF-Nachwuchsgruppe am DESY beschäftigt sich deshalb mit der Rekonstruktion von τ -Leptonen im ATLAS-Detektor und mit dem speziellen Studium von Endzuständen mit τ -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 in weiten Bereichen des Parameterraumes das Neutralino, das supersymmetrische Teilchen mit der zweitleichtesten Masse (*next-to-lightest-supersymmetric particle*, NLSP). Da das Gravitino das leichteste SUSY Teilchen (LSP) ist, zerfällt das Neutralino in ein Gravitino und ein Photon. Da in R-Paritätserhaltenden Modellen SUSY-Teilchen nur paarweise in pp-Kollisionen produziert werden können, führen diese

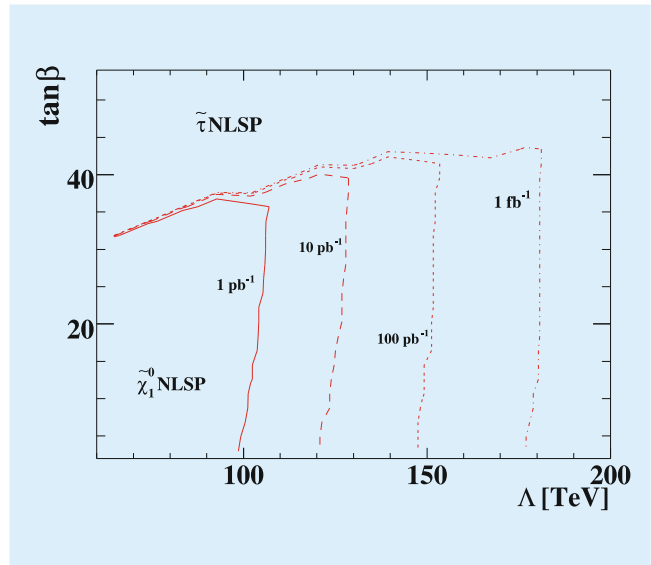


Abbildung 71: Messbare Bereiche für verschiedene Luminositäten für GMSB-SUSY-Modelle mit Endzuständen mit zwei hochenergetischen Photonen.

Modelle zu zwei hochenergetischen Photonen im Endzustand. In Abbildung 71 sind die messbaren Bereiche im GMSB Parameterraum für verschiedene integrierte Luminositäten bis 1 fb^{-1} gezeigt, was selbst bei geringen Anfangsluminositäten in weniger als einem Jahr zu erreichen wäre. Es zeigt sich, dass bereits die ersten Daten ausreichen könnten, um diese Modelle zu entdecken (Signalsignifikanz > 5), wenn sie in der Natur realisiert sind.

Top-Quark Physik

Mit dem LHC wird ab Mitte 2008 erstmals eine Maschine bereit stehen, 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 daher 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.

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 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 ΣE_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 Untersuchungen der Jet-Trigger beschäftigten sich im Konkreten mit der Fähigkeit des Systems, speziell Ereignisse mit höheren Jet-Multiplizitäten zu selektieren, sowie der Bestimmung der Triggereffizienz als Funktion der Jet-Energie, -Rapidität und Azimutwinkels. Weiterhin wurde die systematische Effekte bei der Bestimmung der Jet-Energie auf dem ersten Trigger-Level untersucht und es wurden Effizienzen und Raten der im Physikprogramm relevanten Trigger abgeschätzt.

Bei den Analysen der \cancel{E}_T und ΣE_T Trigger ging es in erster Linie um eine Abschätzung ihrer Selektivität. Dabei wurde festgestellt, dass \cancel{E}_T Trigger erst ab Schwellen von etwa 50 GeV und in Kombination mit anderen Triggern sinnvoll nutzbar sind. Dies ist hauptsächlich bedingt durch die sehr grobe Messung von \cancel{E}_T , die in den ersten Tagen von ATLAS sicherlich zusätzlich fehlerhaft sein wird. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass

sich der ΣE_T Trigger, bedingt durch den enormen QCD-Untergrund, lediglich für die Detektor-Inbetriebnahme und in der Anfangsphase (kein Pile-Up) nutzen lässt.

Die Studien zur Redundanz und dem Überlapp verschiedener Trigger galten dem Auffinden und der Charakterisierung der Korrelation zwischen den verschiedenen Triggerobjekten. Dabei wurde eine Auswahl relevanter Trigger gegenüber gestellt 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.

Zusätzlich zu den Untersuchungen auf dem Gebiet der Auswahl von Top-Ereignissen, 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

Zwei weitere Analysen im Rahmen des Standardmodells wurden begonnen. 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. Studien zu Selektion dieser Ereignisse wurden begonnen. 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.

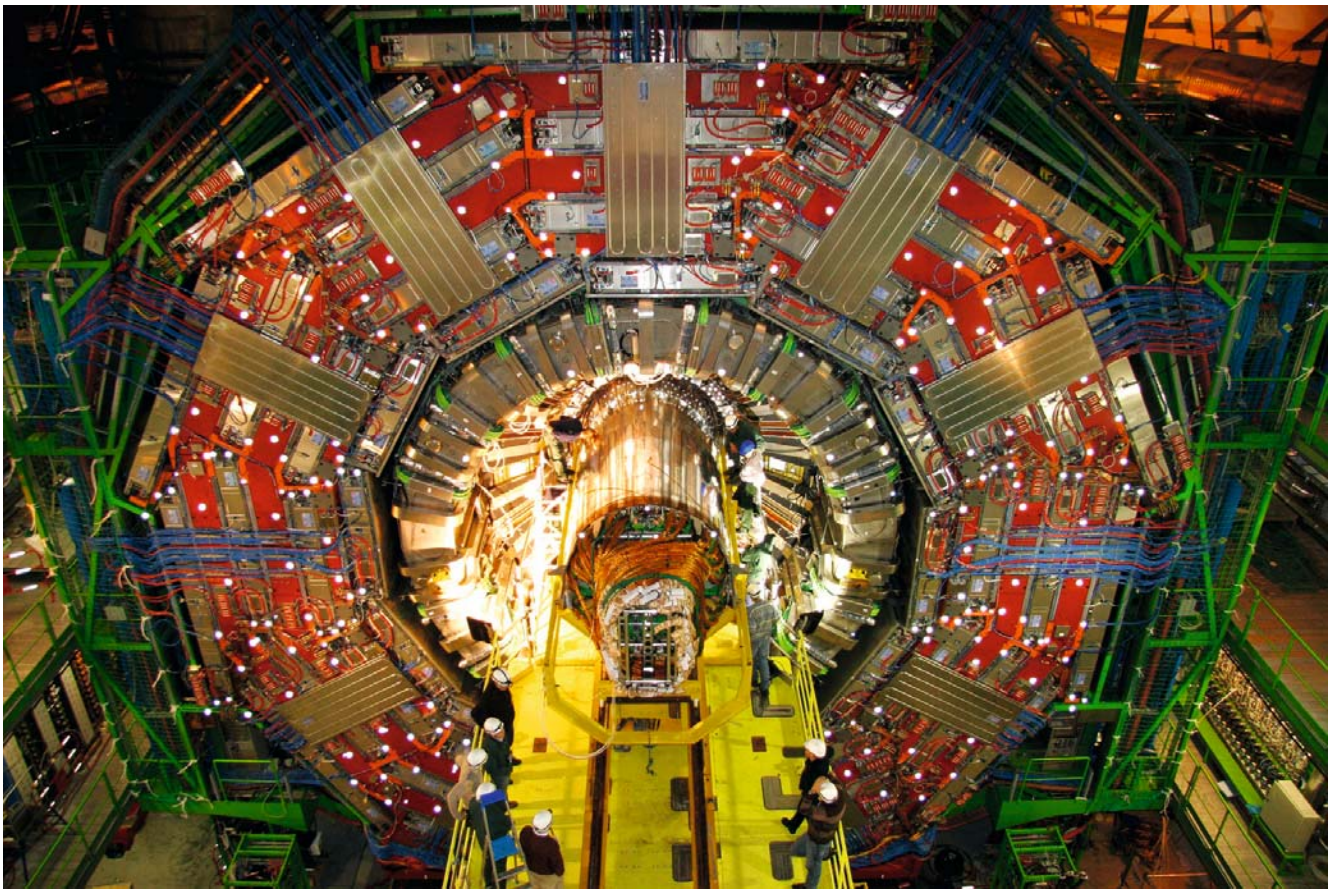


Abbildung 72: Vom 15.12. bis in die frühen Morgenstunden des 16.12. wird der CMS Silizium-Spurdetektor in den Vakuumtank des Solenoiden eingebaut.

CMS-Experiment

Gruppenleiter: J. Mnich, DESY

Seit dem Beitritt von DESY in die CMS Kollaboration im Jahre 2006 hat sich die CMS Gruppe am DESY und ihre Beteiligung am CMS Experiment stetig erweitert. Mittlerweile umfasst die CMS Gruppe 19 Physiker, 7 PostDocs, 5 Doktoranden und 3 Diplomanden, die voll oder zeitweise für CMS arbeiten. Sie werden von einem Ingenieur und drei Technikern unterstützt. Mit dem Zugang von neuen Mitgliedern wurde auch die Bandbreite der Aktivitäten erweitert. Die anfänglichen Tätigkeitsbereiche wurden erweitert und ergänzt.

Aufgrund ihrer Erfahrungen mit dem Aufbau und Betrieb von Großexperimenten und der Physik-Analyse von Daten übernahmen viele Mitglieder der DESY CMS Gruppe wichtige und sehr sichtbare Verantwortlichkeiten in der Koordination unterschiedlicher Gebiete. Ein DESY Mitarbeiter ist als Stellvertreter des Technischen Koordinators tätig, weitere als Koordinatoren im Computing, im Data Quality Monitoring, im Alignment der Spurdetektoren, in der Top-Physik Analysegruppe, in der Projektleitung für das CASTOR Kalorimeter und in der Computing Integration. Zwei dieser Koordinatoren sind aufgrund ihrer Funktion im Management Board der CMS Kollaboration vertreten. Die übernommenen Verantwortlichkeiten verleihen der DESY Gruppe eine sehr achtbare Rolle innerhalb der CMS Kollaboration.

In Ergänzung zu den oben erwähnten Bereichen gibt es Beteiligungen am High Level Trigger und des Beam Condition Monitors, sowie die Vorbereitung eines Remote Operation Centers für das CMS Experiment am DESY. Mit Hilfe dieses Cen-

ters wird es möglich sein, den Detektorbetrieb und Entwicklungen am Experiment von DESY aus zu verfolgen und zur Sicherung der Datenqualität beizutragen.

Die DESY CMS Gruppe ist eng vernetzt mit den CMS Gruppen an deutschen Universitäten, und eingebettet in die Struktur der Helmholtz-Allianz. In monatlich stattfindenden Videokonferenzen werden Aktivitäten vorgestellt und gemeinsame Lösungen und Vorgehensweisen besprochen. Einmal im Jahr treffen sich alle deutschen CMS Gruppen an einem der Institute. Im Berichtszeitraum fand dieses große jährliche Treffen erfolgreich in Zeuthen statt. 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 auf täglicher Basis statt, wie auch die gemeinsame Betreuung von Studenten.

Technische Koordination

Im Berichtszeitraum stand der Aufbau des Detektors in der Untergrund-Kaverne im Vordergrund. Am Anfang des Jahres wurden kurz hintereinander die dritte Endkappe (YE+1) sowie zwei Mittelräder (YB+2 und YB+1) in die unterirdische Halle abgesenkt. Ein Höhepunkt des Jahres für CMS war die Absenkung des Solenoiden mit dem zentralen Jochteil am 28. Februar (Abbildung 73).

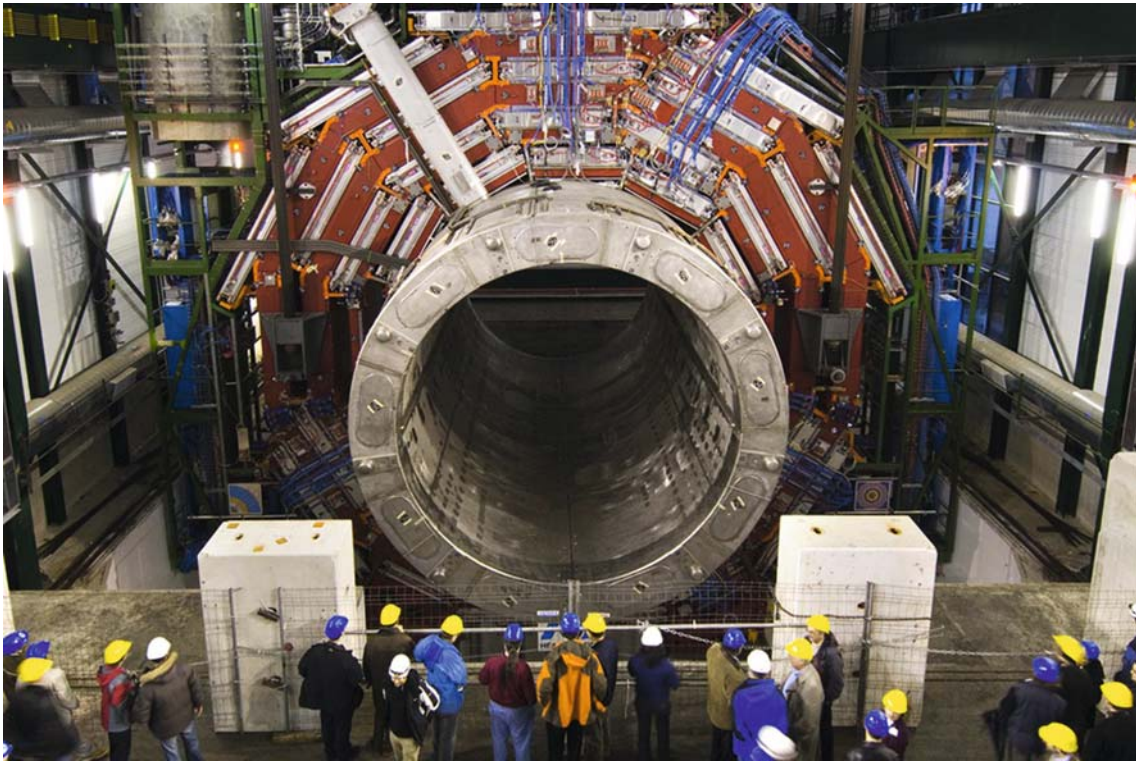


Abbildung 73: Am frühen Morgen des 28. Februars 2007 wird das 1920 Tonnen schwere Mittelteil von CMS in die Untergrund-Kaverne herabgelassen.

Unter großer Beteiligung von internationalen Presse- und Fernsichtteams wurde das 1920 Tonnen schwere Mittelteil von CMS in die Untergrundhalle verbracht. Wenige Tage später wurde es in seiner endgültigen Position parallel zum Strahl ausgerichtet und befestigt. Die Präzision der Ausrichtung ist bemerkenswert: über die volle Länge von 13 m weicht die Mittelachse lediglich um 0.3 mm von der Strahlachse ab. Als nächstes folgte der Einbau des zentralen hadronischen Kalorimeters. Wegen der großen Länge des Magneten sind alle zentralen Kalorimeter bei CMS zweigeteilt und werden von beiden Seiten eingebaut. Die Module des hadronischen Kalorimeters waren in zwei Ringen vormontiert und wurden zusammen in den Vakuumtank des Solenoiden eingebaut. Danach erfolgte die Installation des elektromagnetischen Kalorimeters. Es besteht aus zweimal 18 Modulen, die mit einer speziellen Einbauvorrichtung an Schienen am hadronischen Kalorimeter aufgehängt werden. Kurz vor dem Einbau stellte sich

heraus, dass die langfristige Zuverlässigkeit der Module durch eine Änderung an der Elektronik wesentlich gesteigert werden kann. Deshalb wurde beschlossen, alle Module noch einmal zu öffnen, zu modifizieren und danach wieder zu testen. Um den extrem engen Zeitplan halten zu können, wurde auch ein DESY-Techniker für zwei Monate zum CERN entsandt, der bei der Modifikation der elektromagnetischen Kalorimeters half. Zur gleichen Zeit arbeitete auch eine DESY-Technikerin bei CMS an den komplizierten Verlegungswegen der Glasfasern für die Datenübertragung. Diese Zusammenarbeit war sehr erfolgreich und weitere technische Hilfe ist geplant, damit der Zusammenbau des elektromagnetischen Endkappen-Kalorimeters termingerecht fertiggestellt werden kann. Bei CMS befinden sich alle zentralen Spurdetektoren und Kalorimeter innerhalb der Spule, daher müssen alle Versorgungskabel, Kühlrohre und Glasfasern über den Vakuumtank der Spule und das Joch nach außen geführt werden. Es

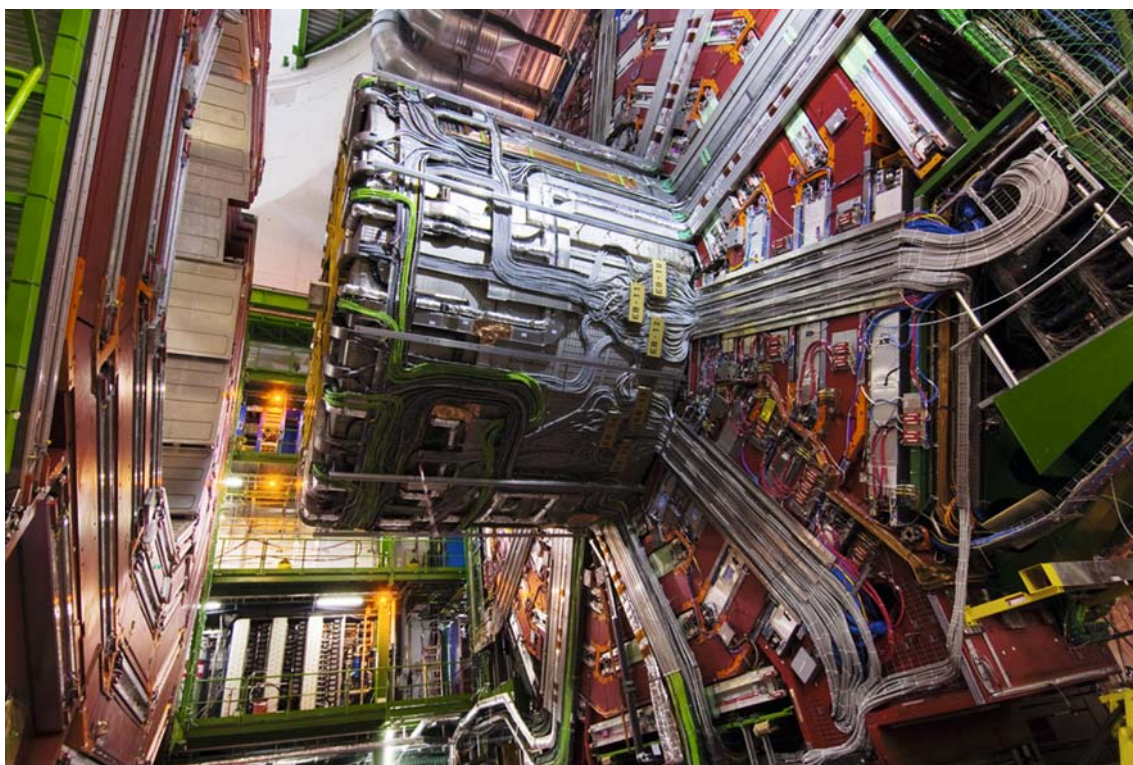


Abbildung 74: Eine Seite des vollständig verkabelten Vakuums tanks von CMS.

handelt sich dabei um etwa 5000 Kabel und Fasern mit einer Gesamtlänge von über 200 km. Weitere etwa 20 km Kühlleitungen, welche zum Teil -30°C kaltes Kühlmittel führen, müssen zudem extrem gut isoliert werden. Die Planung und Installation dieser Versorgungsleitungen war eines der kompliziertesten und aufwändigsten Projekte im Rahmen des Aufbaus von CMS. In etwa 4 Monaten wurde es mit ungefähr 50000 Arbeitsstunden durchgeführt. Zeitweilig arbeiteten bis zu 60 Mitarbeiter im Zwei-Schichtbetrieb an der Realisierung (Abbildung 74).

Nach Ende dieses Projekts war der Weg frei, um die verbleibenden Teile von CMS in die Kaverne zu transportieren und den Einbau des Silizium-Spurdetektors vorzubereiten. Im Oktober wurden zunächst die beiden Mittelräder (YB-1 und YB-2) in die Halle gebracht, an die großen Kabelketten im Hallenboden angeschlossen und über den Vakuums tank geschoben. Gleichzeitig war es an der Oberfläche erforderlich, die Position von

drei Endkappen zu vertauschen, damit die große und sperrige Endkappe YE-1 mit dem angesetzten hadronischen Endkappen-Kalorimeter als letztes abgesenkt werden konnte. Anfang Dezember wurde YE-3 in die Kaverne abgelassen und an die Stirnwand geschoben. Der letzte Höhepunkt des Jahres 2007 war der Einbau des Silizium-Spurdetektors (Abbildung 72). Er wurde nachts mit einem Spezialtransport von Meyrin zur Experimentenhalle in Cessy gebracht, am folgenden Mittag in die Kaverne abgesenkt und für den Einbau vorbereitet. Die Installation erfolgte innerhalb von 16 Stunden und wurde durch eine endgültige Justierung und Vermessung beendet.

Die nächsten Schritte werden die Verkabelung des Spurdetektors und die Absenkung der letzten beiden Endkappen sein. Es ist geplant, die beiden Endkappen bis Ende Januar 2008 in die Kaverne zu verbringen und mit ihrem Anschluss an die Kühlung und die Stromversorgung zu beginnen. Der Spurdetektor soll bis

Ende März verkabelt sein. Danach findet die Strahlrohrinstallation statt, die mit dem zentralen Strahlrohr beginnt und nach außen fortgesetzt wird. Als letztes werden der Pixeldetektor, die Untergrundmonitore und wahrscheinlich zwei elektromagnetische Endkappen-Kalorimeter eingebaut. Im späten Frühjahr sollte dann die erste Version von CMS einsatzbereit sein.

Während der Aufbauarbeiten in der Experimentierhalle sind an der Oberfläche und in der Kaverne bis zu hundert Personen gleichzeitig tätig. Dies erfordert ein hohes Maß an Koordination und Kontrolle der einzelnen Abläufe. Als Vertreter des Technischen Koordinators trägt ein DESY Mitarbeiter die Verantwortlichkeit für diesen gesamten Bereich.

CASTOR Kalorimeter

Im Berichtszeitraum neu hinzugekommen ist eine Beteiligung von Mitgliedern der DESY CMS Gruppe am Projekt des CASTOR Kalorimeters. Dieses Kalorimeter soll rund 14.4 m entfernt vom Wechselwirkungspunkt, direkt anschließend an den zentralen Detektor, eingebaut werden. Es 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 SLHC 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. Dieses Licht, dessen Stärke proportional zur Energie der Primärteilchen ist, wird durch Photonen-Vervielfacher in elektrische Signale umgewandelt und 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 Sättigungseffekten, der Multi-Parton-Wechselwirkungen, sowie Diffraction. Alle diese Fragestellungen sind mit an den HERA-Experimenten erzielten Forschungsergebnissen eng verbunden; die Erfahrungen von HERA können so direkt eingebracht werden und von zentralem Nutzen für die LHC-Physik sein.

Das CASTOR Projekt wurde im Jahr 2003 im Rahmen der Schwer-Ionen-Arbeitsgruppe bei CMS begonnen. Im Januar 2007 beteiligten sich DESY Mitarbeiter erstmalig an einem CASTOR Workshop. Eine Begutachtung aller Projekte im Vorwärtsbereich des CMS Detektors im Februar 2007 gefolgt von einer Einzel-Begutachtung des CASTOR Projektes im Mai führten zur Anerkennung des CASTOR Kalorimeters als offizielle CMS Detektorkomponente. Nach der Fertigstellung eines verkürzten Prototypen des Kalorimeters durch DESY Werkstätten wurde ein Achtel des Kalorimeters im August im Teststrahl am CERN in Genf unter Beteiligung von DESY Physikern und PostDocs getestet.

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 Russland, hier mit den Moskauer Instituten MSU, ITEP und MEPHI. Mitarbeiter, sowohl von DESY als auch aus Russland 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 Teststrahldaten, der Erstellung von Simulationssoftware und den Vorstudien für die Physik-Analysen. Die Projektführung für das CASTOR Kalorimeter teilen sich zwei Physiker. Eine von ihnen ist die DESY Mitarbeiterin, die auch die Mitarbeiter der HRJRG leitet.

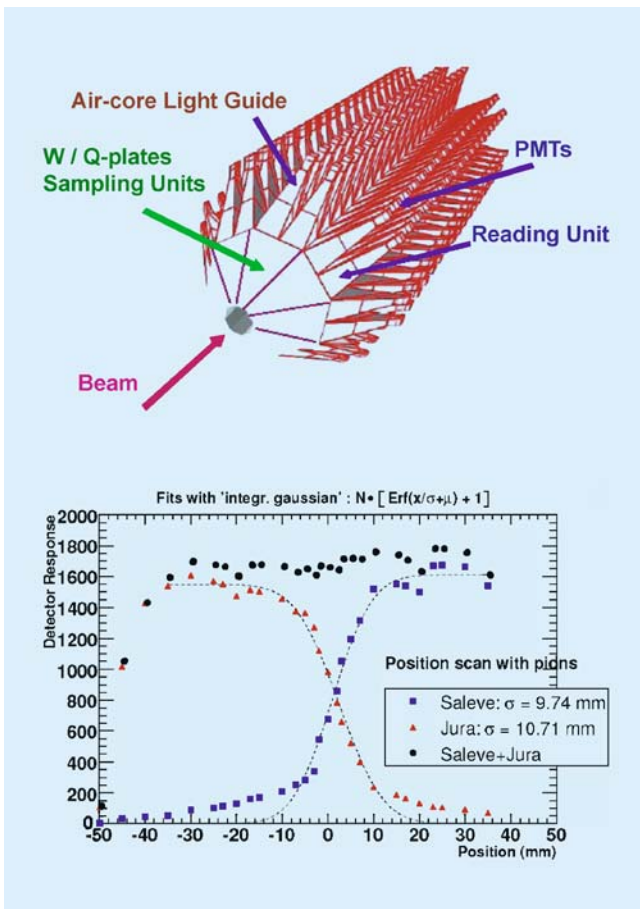


Abbildung 75: Schematische Darstellung des CASTOR Kalorimeters (oben) und Ansprechverhalten als Funktion des Auftreffpunktes von Pionen im Detektor.

Abbildung 75 zeigt oben den Aufbau des CASTOR Kalorimeters mit seinen einzelnen Komponenten und in dem unteren Bild die Variation des Signals in den beiden Ausleseseiten in Abhängigkeit der Einschussposition der Teststrahl-Teilchen. Die Summe der Signale in den beiden Halb-Oktanten verdeutlicht die Gleichmäßigkeit der Gesamtsignale. Aus ihrer Anpassung mit einer Fehlerfunktion lässt sich ableiten, dass die Teilchenschauer für Hadronen hoher Energie in der Tat sehr kompakt sind, nur ca. 10 mm Radius, und damit den Zielen des Designs entsprechen. In Abbildung 76 befindet sich ein Foto vom getesteten Probeaufbau des CASTOR Kalorimeters

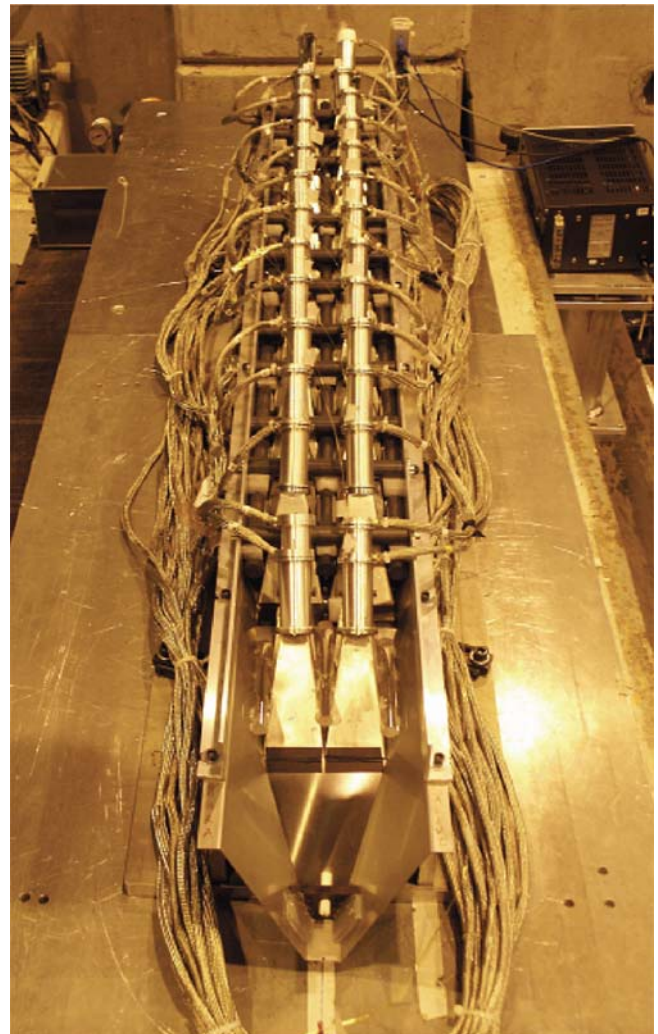


Abbildung 76: Photographie des CASTOR Kalorimeter-Aufbaues für die Messungen im Teststrahl.

Beam Conditions Monitor

Mitte 2007 wurde von Mitgliedern der DESY-Gruppe in Zeuthen die Inbetriebnahme des BCM1-F-Systems, eines Teils des CMS-Beam Conditions Monitors (BCM) übernommen. Der BCM besteht aus mehreren unabhängigen Detektoren, welche Informationen über den Zustand der LHC-Strahlen in verschiedenen Zeitintervallen, von Sekunden bis Nanosekunden, liefern.

BCM1-F hat die höchste Zeitauflösung und erlaubt die Kontrolle einzelner Protonenpakete im Strahl. Es besteht aus acht einkristallinen Diamantsensoren, wovon jeweils vier auf beiden Seiten des Wechselwirkungspunkts von CMS nahe des Strahlrohrs installiert werden. In diesen Sensoren werden die durch Ionisation erzeugten Ladungen mit hoher Effizienz gesammelt, so dass auch minimal ionisierende Teilchen im Strahluntergrund nachgewiesen werden können.

Hardwarebeiträge zum BCM1-F kommen von den Kollaborationspartnern, z. B. der Universität Karlsruhe, sowie von Rutgers und vom CERN. Mitarbeiter aus Zeuthen sind dabei, das BCM1-F-System aufzubauen und zu kalibrieren. Die Installation und die folgenden Funktionstests sollen ebenfalls unterstützt werden. Dazu wurde am CERN ein Datennahmesystem installiert und eine komplette Ausleseketten aufgebaut.

Zunächst wurden die einzelnen Komponenten der Elektronik – Vorverstärker, Laser und optischer Empfänger – einzeln justiert. Das erste komplett bestückte und für den Einbau vorbereitete Modul mit Diamantsensoren, einem Vorverstärker, einer Laserdiode und einer direkt daran angekoppelten Mono-Mode-Lichtleitfaser ist in Abbildung 77 gezeigt.

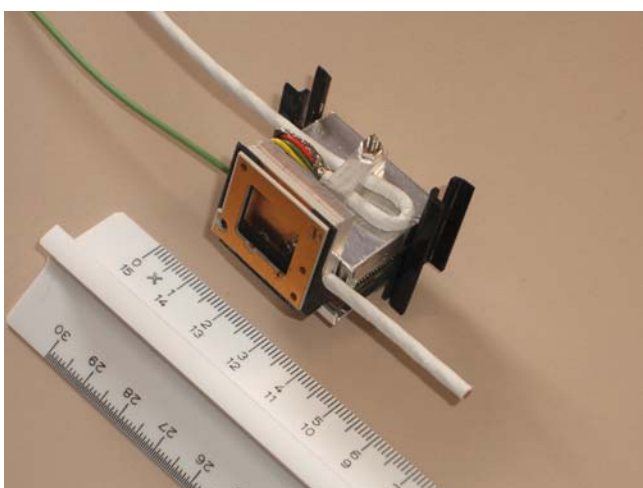


Abbildung 77: Die erste komplette Sensorbaugruppe des BCM1-F und BCM1-L, welche für den Einbau vorbereitet ist.

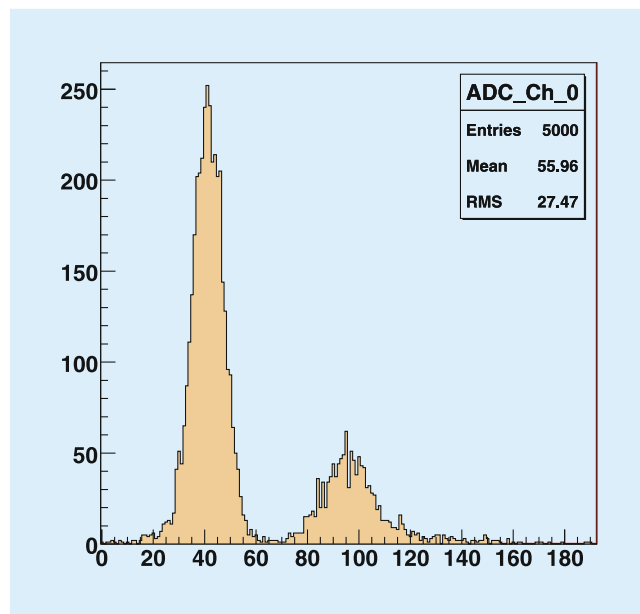


Abbildung 78: Das Spektrum von Signalen am Ende der Ausleseketten. Aufgetragen ist die Anzahl der Trigger gegen die Signalamplitude.

Ein kompletter Kanal vom Sensor bis zum Analog-Digital-Konverter konnte Ende 2007 erfolgreich getestet werden. Der Sensor wurde dabei mit Elektronen aus einer ^{90}Sr -Quelle bestrahlt und die erzeugten Signale aufgezeichnet.

Das Spektrum der Signale ist in Abbildung 78 gezeigt. Die Signale der Elektronen in dem rechts liegenden Maximum, nahe dem Wert 100, sind deutlich getrennt vom Rauschen der Elektronik im linken Maximum im Bereich des Wertes 40.

In dieser Art werden vor dem Einbau im Frühjahr 2008 alle Kanäle des BCM1-F getestet, kalibriert und justiert.

Für ein zweites Detektorsystem im BCM mit geringerer Zeitauflösung, das BCM1-L, haben die Mitglieder der Gruppe in Zeuthen die Qualitätskontrolle der 30 dort zu installierenden polykristallinen Diamantsensoren übernommen. Dabei konnte auf das für die Forschung an Diamantsensoren für die Vorwärtsdetektoren

an Linearkollidern eingerichtete Labor zurückgegriffen werden.

Computing

DESY leistet entscheidende Beiträge im Aufbau des CMS Computing. Ein DESY Wissenschaftler war im Jahr 2007 als Computing Koordinator im CMS-Management in Planung und Koordinierung tätig. Im Jahr 2007 stand die Konsolidierung der Services der verteilten Computing-Ressourcen im Vordergrund. Am DESY wurde dies durch den Neuaufbau und Ausbau des dCache Storage Elements für das Daten-Management und die Speicherung erreicht. Desweiteren wurde ein verbessertes Monitoring für alle weltweit verteilten CMS Zentren eingeführt.

DESY als Tier-2-Zentrum stellt zuverlässig und mit hoher Leistungsfähigkeit Ressourcen im Bereich Rechenleistung und Speicherkapazität für CMS zur Verfügung. Diese wurden bei der Vorbereitung und Durchführung des *Computing, Software und Analysis Challenge* (CSA07) ausgiebig genutzt. Neben der Produktion von Monte Carlo Datensätzen und der Speicherung von ausgewählten Datensätzen zur Vorbereitung der Physikanalyse, war die Inbetriebnahme der Verbindungen zwischen den verteilten Zentren ein wesentlicher Aspekt der CSA07. Die Anforderungen für die Funktionsfähigkeit der Verbindungen konnten von DESY für alle Tier-1-Zentren und dem Tier-2-Zentrum, das DESY zusammen mit der Universität Aachen betreibt, erfüllt werden.

Um die beteiligten Rechenzentren für die CMS Monte-Carlo-Produktion sowie Datenanalyse nutzen zu können, muss dort die CMSSW-Software verfügbar sein. Für die Installation an den Zentren in Europa und Asien ist seit Ende des Jahres ein Mitglied der DESY CMS Gruppe verantwortlich.

Gemeinsam mit den CMS Standorten Uni Hamburg, Karlsruhe und Aachen wurden die Anforderungen an die National Analysis Facility (NAF) in der Helmholtz Allianz *Physics at the Terascale* ausgearbeitet.

Die NAF wird die Physikanalyse der deutschen CMS Benutzerschaft zentral unterstützen.

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 $2.5\mu\text{s}$ 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. Die Protonpakete am LHC kollidieren mit einer Rate von 40 MHz, die von L1 ausgelöste Auslese von Ereignissen findet mit einer Rate von 100 kHz statt. Die Ereignisdaten werden in einem sogenannten Event-Builder Netzwerk aus den Informationen aller Detektorkomponenten zusammengesetzt.

In der zweiten Triggerstufe, dem *High Level Trigger* (HLT), werden die ausgelesenen Ereignisse mithilfe einer Filter-Software weiter untersucht. Die Filter-Units im HLT sind kommerzielle PC Rechner, die mit dem Betriebssystem Linux betrieben werden. Die Event-Builder und HLT Systeme sind skalierbar konzipiert. In der ersten Ausbaustufe wird die HLT-Farm aus etwa 2000 CPU's bestehen, so dass pro Ereignis etwa 40 ms Rechenzeit für die Triggerentscheidung zur Verfügung stehen. Für die Datennahme von realen Physikereignissen wird der HLT so eingestellt, dass nur etwa 1/1000 der Ereignisse akzeptiert und aufgezeichnet werden.

DESY ist an der Entwicklung und Implementierung der Run-Control- und Monitoring-Software des *High Level Trigger Supervisor* (HLTS) beteiligt, sowie an der Entwicklung und Implementierung der Konfigurationsdatenbank. In der Datenbank werden die für eine bestimmte Datennahmeperiode, auch Run genannt, vorgegebenen Parameter gespeichert und archiviert. Um Kohärenz des HLTs mit L1 zu gewährleisten, ist die HLT Datenbank mit der Konfiguration des L1 Triggersystems verbunden. Das HLT Run-Control und Monitoring System wird für den Betrieb der Filter-

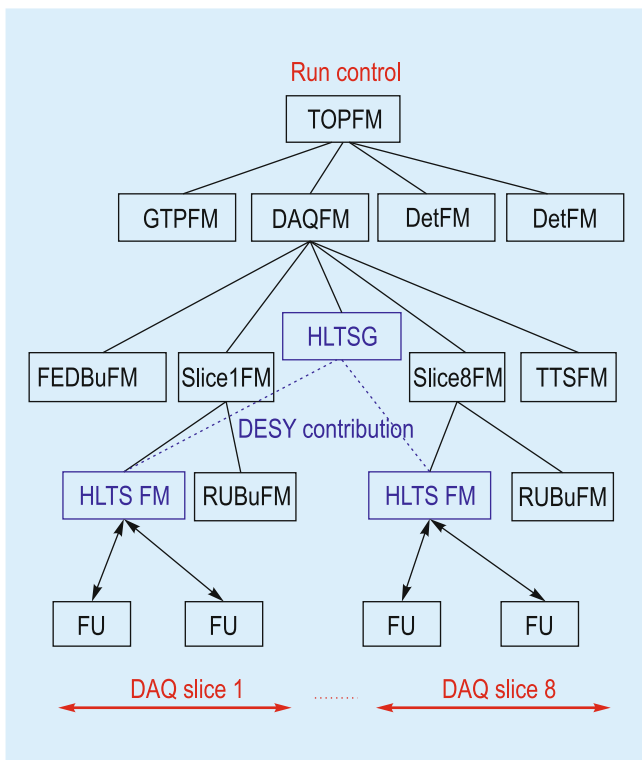


Abbildung 79: Funktionsskizze des CMS Runcontrol-DAQ Systems mit dem HLT Supervisor.

Units verwendet (siehe Abbildung 79). Dafür sind verschiedene Zustände, Initialized, Configured, Enabled, Halted, definiert, die das HLT System synchron mit der Detektorauslese-Elektronik einnimmt. Weitere Aufgaben des HLT Supervisors sind das Auslesen und Summieren von Trigger-Statistiken und Herunterladen von Prescale-Werten während der Runs. Die am DESY entwickelte Kontroll-Software ist in Java geschrieben, wobei Web-Services benutzt werden. Die HLT Supervisor Software ist seit 2006 am CERN in Betrieb, und wurde im Rahmen der im Jahr 2007 regelmäßig durchgeführten Test-Datennahmen (*Global Runs*) kontinuierlich erweitert und verbessert.

Data Quality Monitoring

Die Überwachung und das Echtzeit-Monitoring des Detektorstatus anhand von Ereignisdaten (*Data Qua-*

lity Monitoring, DQM) ist von zentraler Bedeutung, insbesondere während der Inbetriebnahme des Experimentes. Seit Anfang 2007 ist ein Mitglied der DESY Gruppe CMS Koordinator für die Entwicklung und Inbetriebnahme der dafür benötigten Software und Computing Infrastruktur, sowie für die Optimierung der für das Monitoring verwendeten Informationen. Das DQM Projekt umfasst sowohl die Darstellung der Ereignisdaten während der Datennahme in Echtzeit, als auch die Infrastruktur für die Zertifizierung der für Physikanalysen verwendbaren rekonstruierten Daten. Im Jahr 2007 lag das Hauptaugenmerk darauf, die bestehende Software zu vereinheitlichen und zu komplettieren, so dass eine erste Version der entgeltigen Software für das Echtzeit-Monitoring (*online*) am Experiment in Betrieb genommen werden konnte. Darüberhinaus wurde die für die Datenrekonstruktion (*offline*) vorgesehene DQM-Architektur entwickelt und definiert. Die CMS Data Quality Monitoring Software basiert auf dem Physik Analyse Framework *Root* und ermöglicht das Anlegen und Füllen, sowie den Transport von Histogrammen und anderen aus Ereignisdaten gewonnenen Informationen. Im Online-Bereich stehen zwei Quellen von Ereignisdaten zur Verfügung: Eine begrenzte Anzahl von Histogrammen kann in den Filter-Units des Higher-Level-Triggers gefüllt werden. Hier steht die volle Ereignisrate von 100 kHz als Input zur Verfügung. Diese Histogramme werden alle 93 Sekunden (entsprechend eines Luminositätsabschnitts) ausgelesen. Zudem steht ein Ereignis-Server zur Verfügung, der Ereignisdaten mit einer Rate von typischerweise 10 Hz an DQM-Applikationen liefert. In 2007 wurde ein Betrieb etabliert, bei dem jede einzelne Detektorkomponente ein oder mehrere unabhängige DQM-Applikationen besitzt, welche die jeweiligen Histogramme anlegt und mit Ereignisdaten füllt (siehe Abbildung 80).

Die von den DQM-Applikationen erzeugten Histogramme, sowie die Histogramme aus den Filter-Units, werden zur Visualisierung an ein zentrales *Graphisches User-Interface* (GUI) geliefert, und für einzelne Runs archiviert. Das DQM GUI basiert auf einem Webserver und erlaubt somit den einfachen und weltweiten Zu-

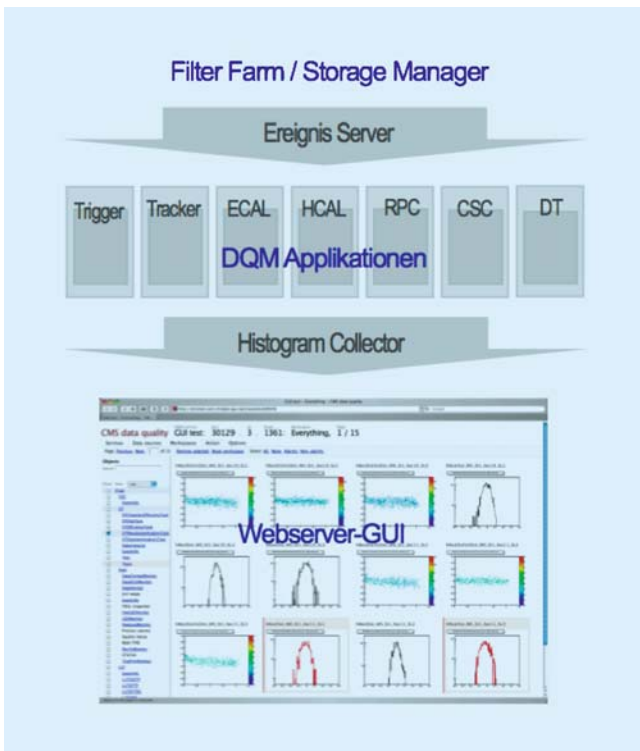


Abbildung 80: Schematische Darstellung des für Online Data Quality Monitoring aufgebauten Systems. Ereignisse aus dem Software Filter werden von mehreren DQM Applikationen verarbeitet. Die Verteilungen von Kontrollgrößen werden in einem zentralen web-basierten Visualisierungssystem dargestellt.

griff auf alle Verteilungen. Eine Beispielansicht ist in Abbildung 80 gezeigt. Die hervorragende Funktionalität dieses Ansatzes wurde in Testdatennahmen in der zweiten Jahreshälfte bewiesen. Seit November 2007 ist das System in kontinuierlichem Betrieb am Experiment und ist dort von großem Wert für die Arbeit an der Inbetriebnahme der Detektoren.

Für die erste Hälfte 2008 ist geplant, das System auf weitere Bereiche des DQM, z. B. Zugriff auf archivierte Verteilungen, sowie DQM für Tier-0 basiertes Prozessieren (*Offline*) zu erweitern. Die Architektur für *Offline* DQM ist mit der in Online verwendeten kompatibel, so dass die gleiche Applikations-Software in beiden Bereichen eingesetzt werden kann.

CMS Tracker Alignment

Der CMS Tracker besteht aus über 15000 individuellen Silizium-Modulen und ist damit einer der komplexesten Spurdetektoren die jemals gebaut wurden. Das Leistungsvermögen solcher Spurdetektoren ist entscheidend durch die Präzision bestimmt, mit der man die Position und Orientierung dieser Module auf der Mikroskala feststellen kann. Die Kalibrierung dieser Parameter bezeichnet man als *Alignment*. Die ultimative Genauigkeit erreicht man letztlich nur durch die Analyse der rekonstruierten Spuren selbst. Die Bestimmung von über 50 000 freien Parametern aus einem Ensemble von einigen Millionen rekonstruierten Spuren ist jedoch ein formidables mathematisches Problem, das bei Teilchenphysikexperimenten erstmals in dieser komplexen Form auftritt. Dabei hat sich die Nutzung des Millepede-II-Algorithmus als sehr vielversprechend erwiesen, der von Prof. V. Blobel (Universität Hamburg) entwickelt wurde. Da in den HERA-Experimenten bei DESY bereits umfangreiche Erfahrungen mit dem Alignment von Siliziumdetektoren gemacht wurden, war es naheliegend, diese Expertise auch bei CMS einzubringen. Im Frühling des Berichtsjahres begann DESY daher eine enge Zusammenarbeit mit der CMS-Gruppe der Universität Hamburg, die bereits seit geraumer Zeit mit dem Millepede-II Algorithmus arbeitet. Das Ziel dieser Aktivität ist die Komplettierung und Inbetriebnahme eines Systems, welches das routinemäßige Alignment des vollen CMS-Trackers mit einer Genauigkeit von besser als $10\mu\text{m}$ erreicht, und dies voll integriert in den normalen Betrieb von Datennahme und prompter Rekonstruktion quasi in Echtzeit durchführen kann.

Als Einstieg organisierte DESY gemeinsam mit der Universität Hamburg einen zweitägigen *CMS Tracker Alignment Workshop*, der Ende Mai auf dem DESY-Gelände stattfand. Mit über 30 Teilnehmern war er sehr gut besucht und ausgesprochen erfolgreich. Ein wichtiges Thema bei CMS war die Vorbereitung des sogenannten *Computing, Software and Analysis (CSA07) Challenge*, dessen Ziel die realitätsnahe Simulation des Betriebes mit 50% der nominellen Ereignisrate im ersten Jahr der Datennahme war. DESY übernahm die Verantwortung für die Durchführung der Alignment-

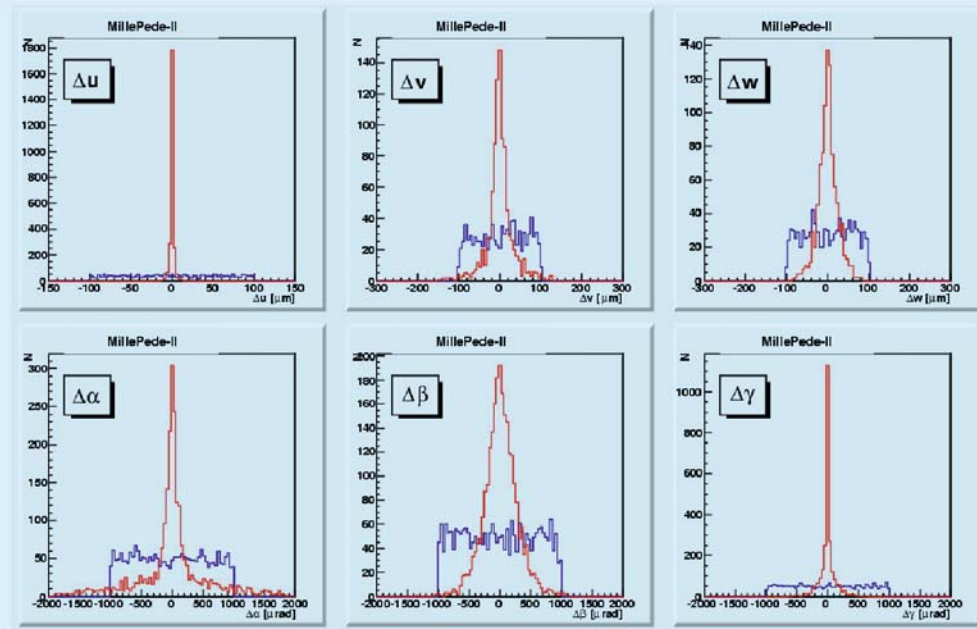


Abbildung 81: Abweichungen relativ zur wahren Geometrie, vor (blau) und nach der Anwendung des MillePede-Alignments (rot). Die gezeigten Parameter entsprechen Verschiebungen (Δu , Δv , Δw) und Verdrehungen ($\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$) im dreidimensionalen Raum.

Studie mit dem Millepede-Algorithmus. Nach umfangreichen Vorarbeiten fand dieser Teil des Challenges am 18. Oktober 2007 auf der Plattform der *CERN Analysis Facility* (CAF) statt: mit 1.7 Millionen simulierter Zerfälle des Z^0 -Bosons im Myonkanal konnten rund 12000 Alignmentparameter simultan bestimmt werden, wobei die erste Version der Konstanten bereits nach drei Stunden in die CMS-Datenbank geladen wurde. Damit wurde eine Latenzzeit erreicht, wie sie auch im Routinebetrieb des CMS-Experiments mit „echten“ LHC-Kollisionen völlig akzeptabel ist. Die erreichte Genauigkeit ist in Abbildung 81 gezeigt. Die transversale Verschiebung der Sensoren (entsprechend der u-Koordinate in Abbildung 81) wurde dabei mit einer Genauigkeit von rund 2 Mikrometern bestimmt. Des Weiteren wurden wichtige Erfahrungen in der zeitnahen Durchführung des Alignments auf der CERN Analysis Facility gewonnen, die inzwischen in Form konkreter Verbesserungen der Infrastruktur umgesetzt werden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen einer Diplomarbeit Methoden zur Validierung der Alignmentalgorithmen entwickelt und getestet. Bereits vor dem Einbau in der CMS-Kaverne am LHC wurde der CMS-Spurdetektor (mit Ausnahme des Pixeldetektors) im späten Frühjahr 2007 in einer Halle am CERN vollständig zusammengesetzt und teilweise mit Ausleseelektronik versehen. Wie in Abbildung 82 gezeigt, konnten mit Hilfe von Szintillatoren in Teilbereichen kosmische Myonen getriggert und zum Test verschiedener Alignmentalgorithmen verwendet werden. Diese Daten wurden in enger Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg analysiert. Die Validierung zeigt klar die Verbesserung der Spurrekonstruktion durch den Einfluss der Vermessungsdaten des Detektors sowie der durch die verschiedenen Alignmentalgorithmen bestimmten Korrekturen, und verifiziert damit eine Methodik, die auch bei der weiteren Kommissionierung des CMS-Spurdetektors eine wichtige Rolle spielen dürfte.

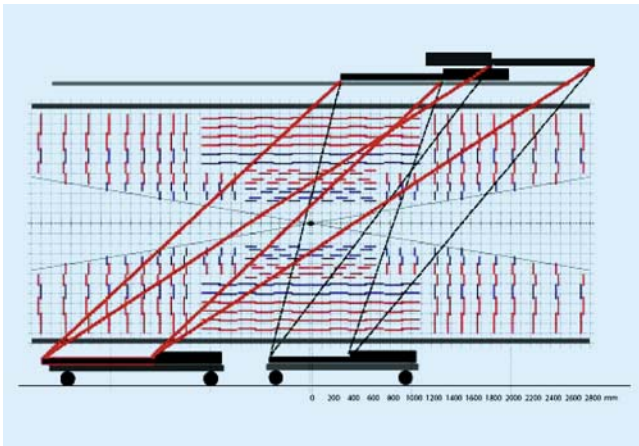


Abbildung 82: Testanordnung des CMS-Spurdetektors. Oberhalb und unterhalb des Detektors sind die beweglichen Szintillationszähler zum Triggern kosmischer Myonen eingezeichnet.

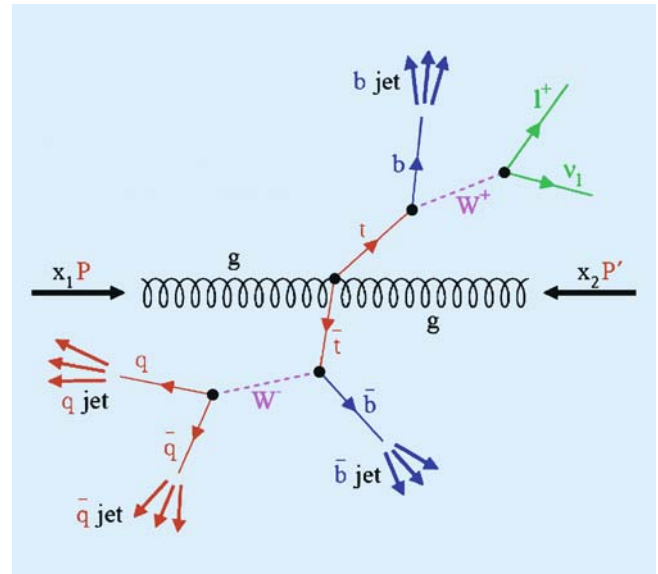


Abbildung 83: Produktion eines Top-Quarkpaares am LHC mit anschließendem Zerfall.

Vorbereitung Physikanalyse

Ein wesentlicher Teil der Aktivitäten der CMS-Gruppe liegt in der Vorbereitung von Physikanalysen. In diesem Bereich wurden im Jahr 2007 eine Reihe von Diplom- und Doktorarbeiten begonnen, die von DESY Wissenschaftlern betreut werden. Die Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg ist in diesem Bereich besonders eng.

Der Schwerpunkt der bisher am DESY vorbereiteten Physikanalysen lag im Berichtszeitraum im Bereich der Physik des Standardmodells, sowohl in der Präzisionsbestimmung von Standardmodellparametern (z. B. der Masse von Top-Quarks), als auch in der Untersuchung von QCD Phänomenen. Ein quantitatives Verständnis der QCD ist für die eventuelle Entdeckung neuer physikalischer Phänomene unerlässlich.

Physik der Top Quarks

Am LHC werden bei der für die ersten Betriebsjahre angestrebten Luminosität von $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Top-Quarkpaare mit einer Rate von ungefähr einem Ereignis pro

Sekunde erzeugt. Damit bietet der LHC ideale Voraussetzungen, um das schwerste der bekannten Teilchen genauer zu untersuchen und noch ungetestete Vorhersagen des Standardmodells zu überprüfen. Insbesondere die Zerfallskanäle mit einem oder zwei geladenen Leptonen sind dafür geeignet (Abbildung 83). Die Physik der Top-Quarks ist bereits seit einigen Jahren ein Schwerpunkt der Aktivitäten in der DESY Gruppe bei CMS und in der Helmholtz-Allianz. Bis Ende 2007 war ein DESY Physiker am CMS Experiment Koordinator für Top-Physik. Insgesamt führen vier Doktoranden und ein Diplomand am DESY vorbereitende Studien zur Top-Physik mit dem CMS-Experiment durch.

Eines der am DESY untersuchten Themen, die Vorbereitung der Messung von Top-Antitop-Spin-Korrelationen, wurde im Jahr 2007 zum Abschluss gebracht und liegt seit 2008 in einer Dissertation vor. In dieser Analyse werden dileptonische Top-Antitop Ereignisse vollständig rekonstruiert, so dass die Winkel und Impulse der Quarkpaare, sowie von deren Zerfallsprodukten genau bestimmt werden können. Wegen der hohen Masse zerfallen Top-Quarks so schnell, dass keine Hadronisierung stattfindet. Anders als die leichteren Quarks sind Top-Quarks daher im Zerfall frei

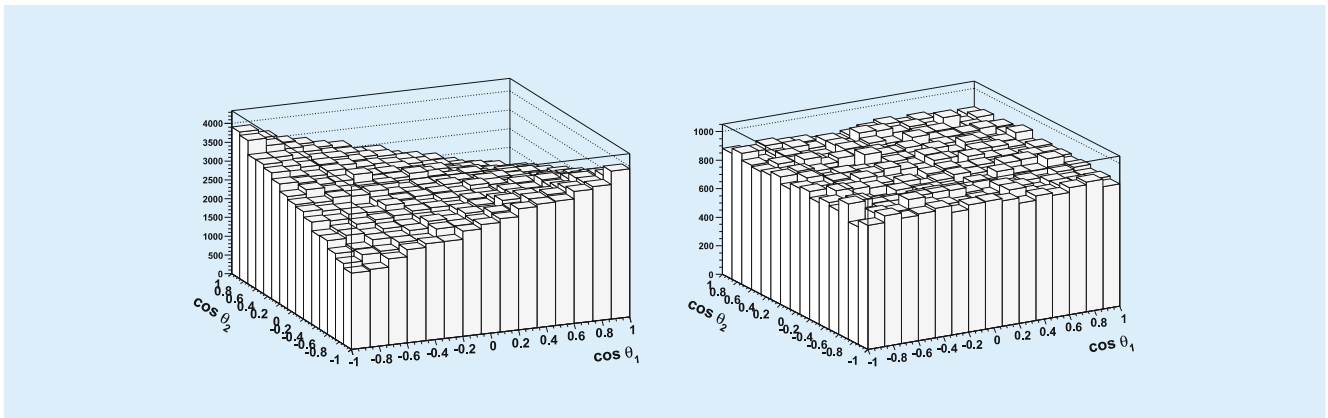


Abbildung 84: Vergleich der erwarteten Winkelverteilungen von Top-Quarkpaar-Zerfällen im Standard-Modell (links) und ohne Korrelation (rechts).

von Effekten der starken Wechselwirkung, die die in der Paarproduktion im Standard-Modell erwartete Korrelation der Quark-Spins unsichtbar machen würden. In Abbildung 84 ist ein Vergleich zwischen der Erwartung im Standardmodell und dem Fall ohne Spin-Korrelation gezeigt. Aufgetragen ist die Korrelation der Zerfallswinkel der Zerfallsleptonen im Helizitäts-Bezugssystem.

In jüngeren Arbeiten liegt der Schwerpunkt auf der möglichst genauen Messung differentieller Top-Quark Produktionswirkungsquerschnitte. Sowohl Produktion als auch Zerfall von Top-Quarks werden im Standardmodell recht genau vorhergesagt, so dass präzise Messungen zum Beispiel die Überprüfung der Partonverteilungen bei hohen Impulsüberträgen erlauben. Mit detaillierten Messungen der Ereignistopologie, etwa im Hinblick auf die Produktion zusätzlicher Gluonen im Endzustand, können verschiedene Näherungsverfahren der perturbativen Quantenchromodynamik auf ihre Anwendbarkeit getestet werden. All diese Analysestudien werden mit ständig verbesserter Simulation des CMS-Detektors durchgeführt, um der realen Datennahmesituation möglichst nahe zu kommen. Das Verständnis dieser Phänomene erlaubt auch Rückschlüsse auf das Auftreten neuer Physik, die sich in manchen Modellen aufgrund der hohen Masse in Top-Endzuständen manifestieren kann.

Underlying Events und Multiple Interactions

In hochenergetischen Proton-Proton Wechselwirkungen gibt es aufgrund der sehr großen Partondichteverteilungen (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 selbst 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 dieser mögliche 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, verglichen und angepasst werden. Um Vorhersagen bei LHC machen zu können, ist aber eine Extrapolation über ein Größenordnung in der zur Verfügung stehenden Schwerpunktsenergie der Wechselwirkungen notwendig 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. Abbildung 85 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Teilchen-Multiplizität als Funktion der Rapidität, für verschieden große Energiedeposition im CASTOR Kalorimeter. Wie oben beschrieben eignet sich das CASTOR Kalorimeter für eine ganze Reihe von Untersuchungen. Die Vorbereitung einiger dieser Untersuchungen, z. B. die Messung zur sogenannten *forward jet* Produktion, wurde im Berichtszeitraum begonnen. Mit dieser Messung werden sich neue Ergebnisse zur Partonen-Dynamik bei sehr kleinen Werten von x erzielen lassen. Ergebnisse von in dieser kinematischen Region gültigen Rechnungen wurden auf verschiedenen Konferenzen, beispielsweise im HERA-LHC Workshop, vorgestellt.

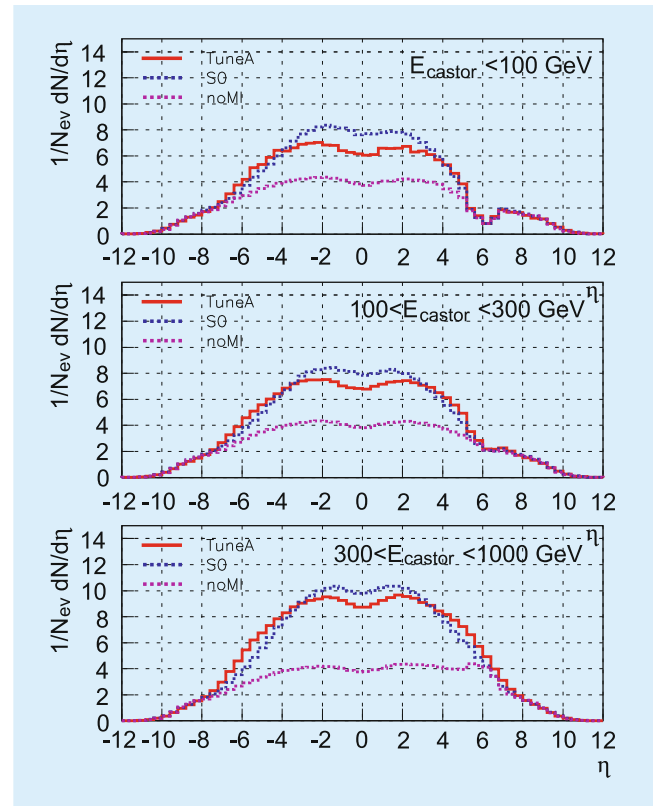


Abbildung 85: Mittlere Teilchen-Multiplizität als Funktion der Rapidität der Teilchen für verschiedene Energien im CASTOR Kalorimeter.

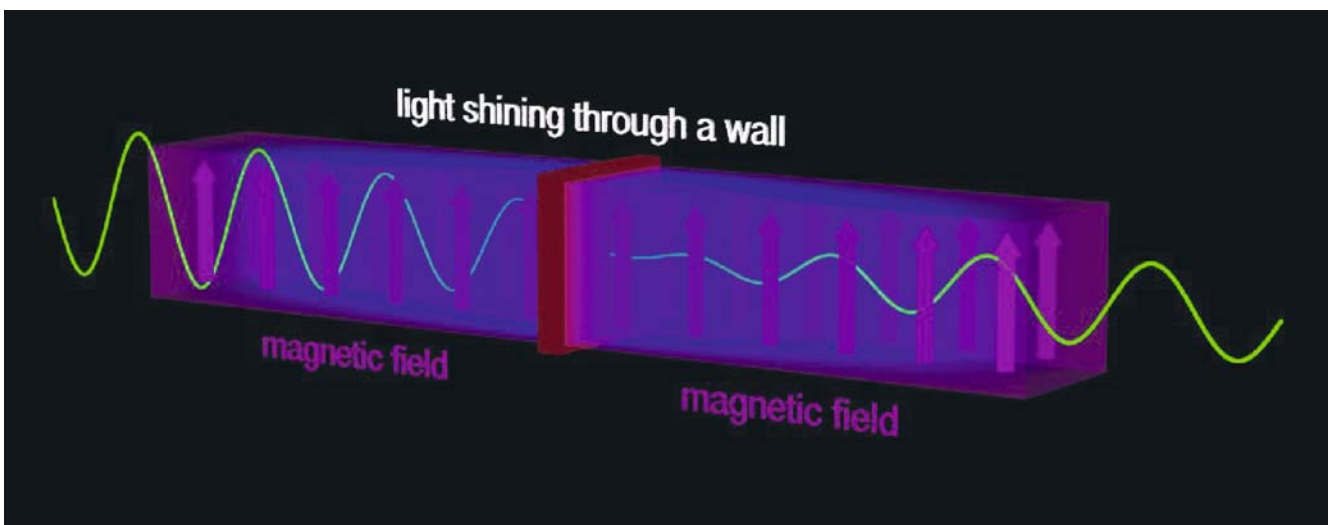


Abbildung 86: Das ALPS-Experiment sucht mit dem Licht-durch-die-Wand-Prinzip (oben) nach sehr leichten Teilchen jenseits des Standardmodells, die sehr schwach an Photonen koppeln. Das starke Magnetfeld des ALPS-Experiments wird durch einen supraleitenden HERA-Dipol geliefert (unten). Der Aufbau befindet sich in Halle 55 bei DESY in Hamburg, in der alle supraleitenden HERA-Magnete getestet wurden.

ALPS-Experiment

Beteiligte Institute: DESY Hamburg, Hamburger Sternwarte, Laser Zentrum Hannover

Sprecher: A. Lindner, DESY

Das ALPS-Experiment wurde im Januar 2007 vom DESY Direktorium genehmigt. Es hat das Ziel, nach sehr leichten Teilchen jenseits des Standardmodells, die sehr schwach an Photonen koppeln, zu suchen. Ein erster Probelauf im September 2007 verlief vielversprechend. Es bestehen sehr gute Aussichten, im Jahr 2008 in einen bisher unerforschten Massen- und Kopplungsbereich dieser hypothetischen neuen Teilchen vorzustoßen.

Es ist eine sehr spannende Frage, ob es neben den bekannten Teilchen des Standardmodells noch weitere sehr leichte, aber sehr schwach an die gewöhnliche Materie gekoppelte Teilchen gibt. In der Tat legen Erweiterungen des Standardmodells, die – wie etwa die Stringtheorie – auf eine Vereinheitlichung der bekannten Elementarkräfte hinzielen, deren Existenz sogar nahe. So könnte es durchaus leichte Spin-0 Teilchen, sogenannte *Axionen*, leichte Spin-1 Teilchen, sogenannte *Hidden-Sector Photonen*, und leichte minigeladene Spin-1/2 Teilchen, sogenannte *Hidden-Sector Fermionen* geben. Allerdings sind die Vorhersagen der Teilchenmassen und Kopplungen im Rahmen dieser vereinheitlichten Modelle noch mit großen Unsicherheiten behaftet, so dass jeder experimentelle Hinweis oder jede experimentelle Einschränkung sehr willkommen sind. Hochenergie-Experimente an Beschleunigern sind für die Suche nach solchen Teilchen aber nicht gut geeignet. Stattdessen liegt es nahe, zu deren Nachweis hochpräzise Niederenergie-Experimente, die hohe Flüsse von Photonen und/oder starke elektromagnetische Felder involvieren, durchzuführen.

Das *Axion-Like Particle Search* Experiment ALPS benutzt einen leistungsstarken Laserstrahl, der entlang des starken Magnetfelds eines Dipolmagneten geschickt und in dessen Mitte durch eine Wand gestoppt wird (siehe Abbildung 86). Der indirekte Nachweis der Produktion eines leichten, sub-eV Teilchens, das sehr schwach mit Photonen wechselwirkt, geschieht nach dem *Licht-durch-die-Wand*-Prinzip: Die vor der Wand durch z. B. Kopplung an das Magnetfeld möglicherweise entstandenen neuen Teilchen fliegen aufgrund ihrer sehr schwachen Wechselwirkung mit Materie völlig unbeeinflusst durch das Hindernis. Ein Bruchteil von ihnen kann sich hinter dem Hindernis wieder in Photonen zurück umwandeln, welche als Lichtteilchen, die aus Richtung der Wand kommen, wahrgenommen und detektiert werden können.

Ein Beschleunigerlabor wie DESY bietet sich als Standort eines solchen Experimentes einzigartig an³. So wird beim ALPS-Experiment ein supraleitender HERA-Dipolmagnet eingesetzt, der ursprünglich als Ersatzmagnet für HERA vorgesehen war (siehe Abbildung 86). Als Kollaborationspartner konnten für den Laseraufbau das Laser Zentrum Hannover und für den Detektor die Hamburger Sternwarte gewonnen werden. Im ersten Quartal 2008 hat sich darüber hinaus auch das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik der Kollaboration angeschlossen. Auf Basis eines Letter-of-Intent [DESY 07-014] wurde das ALPS-Experiment im Januar 2007 vom DESY Direktorium genehmigt.

³Auch an anderen Beschleunigerstandorten, wie CERN, Fermilab und Jefferson Lab, gibt es ähnliche Experimente.



Abbildung 87: Die CCD Kamera SBIG ST-402, die beim ALPS-Experiment zum Nachweis der regenerierten Photonen verwendet wird.

Im September 2007 konnte das ALPS-Experiment einen ersten Probedurchlauf durchführen, bei dem wichtige Aspekte des Aufbaus und einiger Teilkomponenten getestet wurden. Dabei kam ein bei DESY verfügbarer grüner (532 nm) 3.5 W Laser zum Einsatz. Die Vakuumröhre innerhalb des Magneten, durch die der Laserstrahl geschickt wurde, bestand aus zwei Teilen: die laserseitige Röhre endete in der Magnetmitte mit einem Vakuumfenster, wohingegen die detektorseitige Röhre an dieser Stelle mit einem Metallpfropfen (die Wand, durch die Licht scheinen soll) versehen war. Wegen der vergleichsweise geringen Leistung des verwendeten Lasers konnte auf eine Totalreflexion des Laserlichts in der Mitte des Magneten verzichtet werden. Zur Photodetektion wurde die aus der Amateur-astronomie bekannte CCD Kamera SBIG ST-402 (siehe Abbildung 87) benutzt. Es wurde verifiziert, dass der Laserspot im Wesentlichen auf ein Pixel ($9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$) der Kamera fokussiert werden kann.

Die Datennahme verlief nach folgendem Schema:

1. Das detektorseitige Strahlrohr wird entfernt, um ohne Hindernis die Lage des (abgeschwächten) Laserstrahls auf der CCD Kamera zu messen, um eine $3\text{Pixel} \times 3\text{Pixel}$ Region für die Signalsuche zu definieren.

2. Das detektorseitige Strahlrohr mit der *Wand* wird eingeführt, um nach neuen Teilchen zu suchen.
3. Das detektorseitige Strahlrohr wird wieder entfernt, um die Stabilität der Strahlage zu kontrollieren.

Der Magnet lief sehr verlässlich. Die Kamera und der damit einhergehende Aufbau stellten sich als robust heraus: die Lage des Spots auf der CCD veränderte sich trotz der Umbauten während des Experiments um weniger als ein Pixel.

Die Datenanalyse erfolgte dann wie folgt:

1. Elimination von Aufnahmen, welche Anzeichen von kosmischen Strahlen in der Signalregion zeigen
2. Korrektur der Drift der CCD
3. Vergleich der Einträge in der Signalregion (Summe der $3\text{Pixel} \times 3\text{Pixel}$) mit denjenigen von Dunkelenaufnahmen

In diesem Probelauf wurde kein signifikanter Überschuss von regenerierten Photonen gefunden, was aber in Anbetracht der Ergebnisse von anderen Experimenten auch nicht zu erwarten war. Eine Photonzählrate von mehr als 80 mHz konnte ausgeschlossen werden.

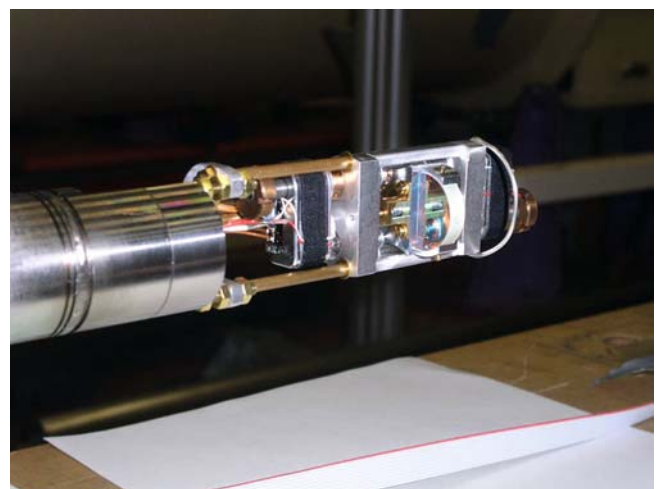


Abbildung 88: Motorgesteuerter Spiegel am Ende der laserseitigen Vakuumröhre des ALPS-Experiments.

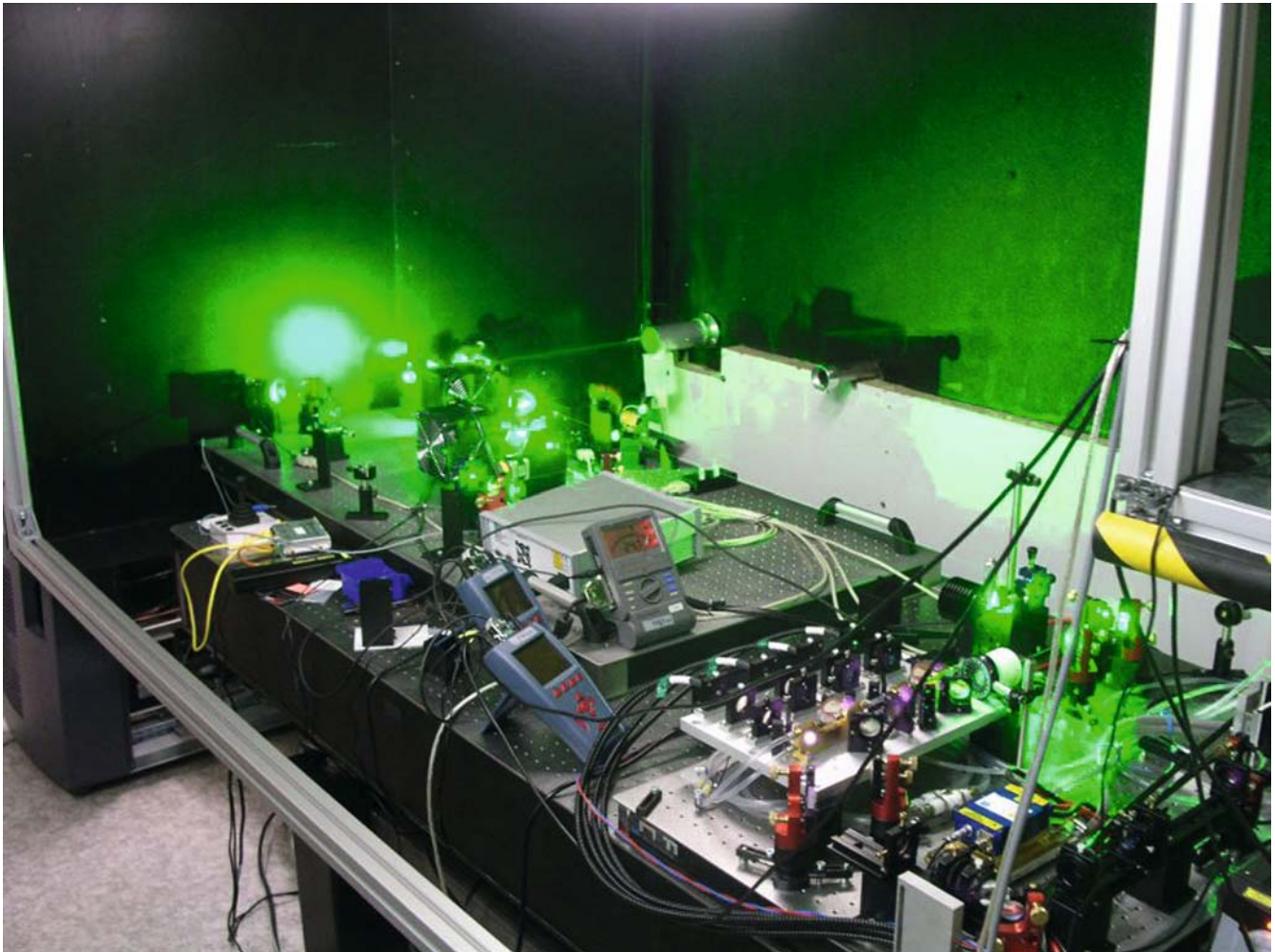


Abbildung 89: Der Laseraufbau des ALPS-Experiments (Stand Ende 2007).

Die entsprechende Obergrenze an die Regenerationswahrscheinlichkeit liegt bei etwa 10^{-20} . Daraus lassen sich Obergrenzen für die Kopplungen neuer Teilchen an Photonen ableiten. Um bisher nicht experimentell zugängliche Parameterbereiche untersuchen zu können, wird eine Empfindlichkeit für eine Regenerationswahrscheinlichkeit von 10^{-24} angestrebt.

Ein erster Schritt in diese Richtung wurde gegen Ende 2007 unternommen. Ein neues, leistungsstärkeres Lasersystem wurde installiert (siehe Abbildung 89).

Es basiert auf einem 4 W infraroten (1064 nm) Laser, an den ein vierstufiger Verstärker, wie er auch beim Gravitationswellen-Experiment LIGO eingesetzt wird, anschließt, welcher die Leistung auf 45 W erhöht. Anschließend wird durch einen Kristall die Frequenz verdoppelt. Für das ALPS-Experiment stehen dann 14 W grünes (532 nm) Laserlicht zur Verfügung. Als Lichtstopper wurde ein motorgesteuerter Spiegel, der am Ende der laserseitigen Vakuumröhre angebracht wurde, eingesetzt (siehe Abbildung 88). Erste Messungen mit diesem System werden Anfang 2008 stattfinden.



Abbildung 90: *Installationsteam des vierten SPATS Strings. Vorne rechts Delia Tosi (DESY).*

Astroteilchenphysik

Gruppenleiter: S. Schlenstedt (bis 30.9.2007); C. Spiering (ab 1.10.2007)

Das Jahr 2007 war für die internationale Hochenergie-Astroteilchenphysik äußerst erfolgreich. Mit Gamma-Teleskopen wurde die Anzahl identifizierter Gamma-Quellen im TeV-Bereich auf etwa siebzig gesteigert. Spektakulär ist auch die von der Auger-Kollaboration berichtete Korrelation zwischen Aktiven Galaktischen Kernen und höchstenergetischen kosmischen Strahlen. Wenn sich der Auger-Befund erhärten sollte, würde er den Eintritt in die Ära der Astronomie mit geladenen kosmischen Strahlen markieren. Ein drittes Beobachtungsfenster soll durch die Hochenergie-Neutrinoastronomie geöffnet werden. Das größte Experiment auf diesem Gebiet ist IceCube, das zentrale Projekt der Astroteilchen-Gruppe in Zeuthen. IceCube hat in der Saison 2007/08 die Hälfte seiner projektierten Größe von einem Kubikkilometer erreicht und wird 2008 in völlig neue Sensitivitätsbereiche vorstoßen.

Die Suche nach extraterrestrischen Neutrinos erfordert wegen der kleinen Neutrino-Querschnitte und der großen Entfernungen zu Objekten wie Doppeltsternsystemen oder Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) Neutrino-Detektoren mit sehr großen sensitiven Volumina. Das Schwergewicht der Aktivitäten der Gruppe liegt bei Untersuchungen mit dem im Aufbau befindlichen IceCube-Teleskop und dem Abschluss der Daten-Analyse für sein Vorgänger-Experiment AMANDA. Die Beteiligung am Experiment NT200+ im sibirischen Baikalsee wird 2008 beendet.

Anders als die etablierte Astronomie mit Neutrinos aus der Sonne interessiert sich die Neutrino-Astrophysik bei Energien über 100 GeV vorzugsweise für die Neu-

trinos, die in hochenergetischen astrophysikalischen Prozessen im Zerfall beschleunigter geladener Teilchen in Stoßwellen und starken variablen Magnetfeldern nahe der Quelle entstehen. Zusätzliche Informationen erhofft man sich durch Kombination der Studien astrophysikalischer Objekte mit unterschiedlichen Botenteilchen (Multi-Messenger). Aus den gleichzeitigen Beobachtungen von elektromagnetischer Strahlung zusammen mit Beobachtungen von Neutrinos erwartet man ein vollständigeres Verständnis der den Objekten zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Dieses Prinzip ist der zentrale Ansatz einer 2006 etablierten Helmholtz-Nachwuchsgruppe, die mit der Astroteilchen-Gruppe in Zeuthen eng verzahnt ist. Durch die Zusammenarbeit der Nachwuchsgruppe mit der MAGIC-Kollaboration und durch die parallel dazu begonnene Mitarbeit an einer Prototyp-Studie für CTA, einem Gamma-Observatorium der nächsten Generation, ergibt sich eine zusätzliche Thematik am DESY. Sie wird den Standort Zeuthen mit einer reichen Ausbeute an Beobachtungsdaten wissenschaftlich beleben.

Status des IceCube-Experiments

Der IceCube-Detektor wird aus 4800 Digitalen Optischen Modulen (DOM) bestehen, die an 80 Trossen mit 125 m Abstand zwischen den Trossen und 17 m Abstand zwischen den DOMs entlang einer Trosse aufgehängt werden. Der Detektor im Eis wird ergänzt durch den Luftschauer-Detektor IceTop auf der Eisoberfläche, für den 320 DOMs eingesetzt werden. IceTop besteht aus großen, mit Eis gefüllten Tanks, die jeweils zwei DOMs enthalten und als Stationen paar-

weise an der Position jeder Trosse aufgestellt sind. Ice-Top ist völlig in das Trigger- und Datennahmesystem von IceCube integriert.

Beginnend mit der Saison 2004/05 wurden zunächst eine, dann acht (05/06), dreizehn (06/07) und achtzehn (07/08) Trossen installiert. Der Detektor besteht damit gegenwärtig aus 40 Trossen und 40 IceTop-Stationen. Die Konstruktion des gesamten IceCube-Detektors soll im Jahr 2011 abgeschlossen werden, wobei in den letzten beiden Jahren Modifikationen und Erweiterungen der Grundkonfiguration zu einer weiteren Verbesserung der Sensitivität bei besonders hohen und besonders niedrigen Energien führen sollen.

Technische Beiträge zum IceCube-Experiment

Die DESY-Gruppe hat bei der Konstruktion und Inbetriebnahme von IceCube folgende Schwerpunktaufgaben:

- Montage und Test von 1300 DOMs
- Bereitstellung von magnetischen Abschirmungen und von Aufhängungen für 5200 Module
- Entwicklung von Karten für DOR (Digital Optical Module Readout), dem Empfangsteil der DOMs an der Oberfläche
- Koordination und Management der Rekonstruktions-Software
- Europäisches Zentrum für die Massenprozessierung von experimentellen sowie Monte-Carlo-Daten, deutsches Analysezentrum
- Untersuchung der Möglichkeit, höchstenergetische Neutrinos durch akustische Methoden nachzuweisen

DOM-Produktion: Seit der Fertigstellung des Produktions- und Test-Labors im Jahre 2004 werden kontinuierlich optische Module produziert. In vierzehntägigen Zyklen werden im Kühlraum zwischen +20 und -45°C alle DOMs ausführlich getestet. Neben DESY beteiligen sich Gruppen aus Madison (USA)

sowie Uppsala und Stockholm (Schweden) an der Modulfertigung. Eine einheitliche Technologie für die Herstellung und das Testen der DOMs in allen drei Labors sichert gleiche Qualitätsstandards. Im Jahre 2007 wurden bei DESY 480 optische Module gefertigt. Die gewissenhafte Arbeit der beteiligten Kollegen der AT-Gruppe, der Mechanik, von Experiment-Support und der Werkstätten sowie die exakte Einhaltung der Technologie führte zu einer Produktionseffizienz von 98%.

DOR-Karte: Die digitalisierten DOM-Informationen werden über elektrische Kabel zur DOR-Karte übertragen. Diese Elektronik wurde am DESY entworfen. Am Südpol wurden im Jahre 2007 22 Trossen mit 176 DOR-Karten ausgelesen und 12 Karten für die Auslese des IceTop-Detektors verwendet. Für die Datennahmesaison 2008 wurden 252 DOR-Karten produziert, getestet und am Südpol installiert.

Software: Die Verantwortlichkeit der DESY-Gruppe im Jahre 2007 auf dem Gebiet der Rekonstruktions-Software bestand in der Koordination und dem Versions-Management. Die Software steht der Kollaboration für die Daten-Rekonstruktion und die Analyse zur Verfügung. Die Koordinationsaufgaben werden im Frühjahr 2008 abgeschlossen sein.

Computing: Auf den Rechnern des Batch-Clusters des DESY Zeuthen wurden neben AMANDA-Rekonstruktions- und Simulationsaufgaben auch IceCube-Simulationsrechnungen für die Kollaboration ausgeführt. Es wurden Signal- und Untergrund-Ereignisse für verschiedene Detektor-Konfigurationen generiert, wobei der AMANDA-Detektor berücksichtigt wurde. Eine weitere Aktivität ist die Vorbereitungen des Zugriffs auf die Daten sowie Simulations-Produktion mit Hilfe von GRID-Tools. Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit der IT-Gruppe ausgeführt.

Akustischer Neutrino-Nachweis: Mit diesen Arbeiten soll untersucht werden, ob das polare Eis für den akustischen Nachweis von Teilchenreaktionen geeignet ist, so dass bei einer möglichen späteren Erweiterung

von IceCube durch Radio-Sensoren auch akustische Sensoren eingesetzt werden könnten. Beide Methoden würden von der großen Abklinglänge von Radio- und Schallwellen in Eis profitieren und die Überdeckung eines extrem großen Volumens mit einem großen Sensorabstand erlauben – eine Bedingung zum Nachweis der niedrigen erwarteten Neutrino Flüsse bei Energien oberhalb von 100 PeV. In der Saison 2006/07 wurde dafür SPATS, das *South Pole Acoustic Test Setup*, erfolgreich installiert. SPATS besteht aus drei 400 m langen Trossen mit je sieben akustischen Stationen aus einem Sender und drei Empfängern, die alle bei DESY entwickelt, gebaut und getestet wurden. Erste Messungen zur Refraktion akustischer Signale und zu Störgeräuschen im Eis ergaben, dass beide hinreichend gering sind. Schlüssige Aussagen zur Abklinglänge sollen 2008 mit Hilfe eines vierten Strings und einer *mobilen Pinger*-Station gewonnen werden. Der String wurde im Dezember 2007 installiert und in Betrieb genommen. Daran sind neben DESY Gruppen aus Aachen, Berkeley, Gent, Stockholm, Uppsala und Wuppertal beteiligt. Alle Sensoren und Signalgeber funktionieren wie vorgesehen und tragen zum SPATS Datenstrom bei.

Der *mobile Pinger* wurde in sechs IceCube-Bohrlöchern bis zu einer Tiefe von 500 m in die Wassersäule versenkt. Die von ihm emittierten akustischen Pulse wurden von den Sensoren der SPATS-Strings registriert. Die Auswertung wird wegen der für alle Messungen identischen Quelle eine Kalibrierung des Detektorsystems erlauben. Eine weitere Information liefert die Entfernungsabhängigkeit der Lautstärke, mit der die beim Bohren in der Höhe des Bohrkopfes entstehenden Geräusche registriert werden. Aus der Vielzahl komplementärer Informationen wird das Jahr 2008 eine verlässliche Aussage zur Abklinglänge liefern.

Physikalische Untersuchungen mit IceCube und AMANDA

AMANDA nimmt seit dem Jahr 2000 Daten und ist seit 2006 vollständig in IceCube integriert. Der IceCube-Detektor besteht im Moment aus 40 Trossen, die in den

letzten vier Jahren ins Eis eingebracht wurden. Erste physikalische Analysen der IceCube-Daten mit neun Trossen wurden publiziert. Die gegenwärtige Ausbaustufe von IceCube mit 40 Trossen übertrifft die Sensitivität von AMANDA, je nach physikalischer Fragestellung, um einen Faktor 15–30. Die DESY Gruppe trägt zu den kollaborationsweiten Arbeiten gegenwärtig vor allem durch Massenproduktion von Monte-Carlo-Daten und zur Ausarbeitung von on-line-Filtern bei. Bei der Datenanalyse ist besonders die enge Zusammenarbeit mit der Emmy-Noether-Gruppe von M. Kowalski an der Humboldt-Universität hervorzuheben.

Suche nach Punktquellen: Die Punktquellenanalyse liegt in der Hand der Helmholtz-Nachwuchsgruppe von E. Bernardini. Nachdem aus den AMANDA-Daten der Jahre 2000–2004 die bislang besten Obergrenzen auf den Neutrino flux aus Punktquellen kosmischer Neutrinos abgeleitet wurden, wurde im Jahr 2007 eine ergänzende Suchstrategie entwickelt. 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. Entsprechende Analysen wurden in DESY für AMANDA und für die 22-Trossen-Stufe von IceCube begonnen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, nach Korrelationen zwischen PeV-Neutrinos und jenen Quellen geladener kosmischer Strahlung zu suchen, die kürzlich von der Auger-Kollaboration berichtet wurden und die auf der Südhalbkugel liegen.

Das Multi-Messenger Programm: Bei der Beobachtung elektromagnetischer Strahlung konzentriert sich die Helmholtz-Nachwuchsgruppe vor allem auf sehr hochenergetische Gamma-Strahlung (GeV/TeV), die mit Hilfe von Cherenkov-Teleskopen erstmals 1989 nachgewiesen wurde. Durch die Kombination von Gamma-Daten der letzten Jahre mit Neutrino-Beobachtungen kann die Nachweiswahrscheinlichkeit für Neutrino-Signale erhöht und das Verständnis kosmischer Objekte verbessert werden.

Da Cherenkov-Teleskope ein sehr eingeschränktes Gesichtsfeld haben, existieren jedoch oft keine Beobachtungen von GeV/TeV-Photonen zeitnah zu gemessenen Neutrino-Ereignissen. Aus diesem Grund wurde zusammen mit der MAGIC-Kollaboration ein *Target-of-Opportunity* (ToO) Programm entwickelt und Ende 2006 durchgeführt. Immer wenn AMANDA ein Neutrino aus einer Richtung nachwies, in welcher sich einer von fünf vorab definierten Quellkandidaten befand, wurde ein Alarm an MAGIC gesendet. Das MAGIC-Teleskop versuchte dann eine Beobachtung der Quelle durchzuführen, falls Sichtbarkeit und Wetter dies zuließen. Fünf Alarme wurden ausgesandt, auf zwei konnte MAGIC reagieren, allerdings ohne einen korrelierten Gamma-Ausbruch zu beobachten. Die technologische Machbarkeit solcher Programme wurde erfolgreich demonstriert. Gegenwärtig arbeitet die Gruppe zusammen mit der Emmy-Noether-Gruppe der Humboldt-Universität daran, einen on-line-Filter für IceCube am Südpol zu installieren. Damit wird auch IceCube Alarmdaten aufgrund exakt rekonstruierter Neutrinoereignisse verschicken können.

Die Nachwuchsgruppe vervollständigt ihr Archiv für historische und aktuelle Beobachtungen von GeV/TeV-Gammastrahlen. Durch Hinzufügen neuerer Beobachtungsdaten kann sie schrittweise präzisiertere Werte für die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der sich ein bestimmtes Objekt in einem Zustand erhöhter Gamma-Emission befindet. Die Kenntnis der Wahrscheinlichkeit für solche Ausbrüche ist eine Voraussetzung, um die Signifikanz korrelierter Neutrinoereignisse angeben zu können.

Suche nach diffusen Quellen: Bestimmte Neutrino-Wechselwirkungen können isolierte elektromagnetische und hadronische Schauer (Kaskaden) erzeugen, insbesondere die Reaktionen von Elektron- und Tau-Neutrinos. Die Analyse solcher Endzustände hat verschiedene Vorteile: eine gute Energieauflösung, mit der man das härtere astrophysikalische Spektrum vom atmosphärischen Spektrum unterscheiden kann, und einen niedrigeren Untergrund von anderen Wechselwirkungen. Durch den niedrigeren Untergrund hat man eine größere geometrische Akzeptanz

als in der Punktquellen-Suche. In DESY wurde erstmalig mit hoher Statistik nach Kaskaden aus Neutrino-Wechselwirkungen gesucht (Daten der Jahre 2000–2003). Die abgeleitete Obergrenze an den Fluss von $4 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$ liegt nur unwesentlich höher als jene aus der Untersuchung für Myon-Neutrinos und stellt damit eine wichtige Ergänzung zu dieser da.

Ebenfalls vorangetrieben wurden die vorbereitenden Arbeiten zur Suche nach Neutrinos mit Energien über 10^{17} eV mit IceCube. Bei diesen Energien werden Bremsstrahlung und Paar-Erzeugung durch den Landau-Pomeranchuk-Migdal (LPM) Effekt unterdrückt. Daher sind die Kaskaden von Elektron- oder Tau-Neutrinos bis zu mehreren 100 m lang.

Analyse von kosmischen Strahlen: Mit IceTop sollen Energiespektrum und Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung zwischen $3 \cdot 10^{14} \text{ eV}$ und 10^{18} eV gemessen werden. Die Kenntnis der Massenzusammensetzung ist wesentlich für das Verständnis des Ursprungs der kosmischen Strahlung. Experimentell wird sie bei diesen Energien über die Vermessung der durch die kosmischen Primärteilchen ausgelösten Luftschauer erschlossen. IceCube hat in der Kombination mit IceTop die einzigartige Möglichkeit hochenergetische Myonen im Eis in Koinzidenz mit Luftschauern an der Oberfläche zu messen. Damit wird ein im Vergleich zu anderen Experimenten komplementärer Zugang zur Bestimmung der Massenzusammensetzung eröffnet.

Die 2006 begonnene Entwicklung eines Algorithmus für die Rekonstruktion und Energiebestimmung von Luftschauern konnte 2007 abgeschlossen werden. Die statistischen Fluktuationen von Höhe und Ankunftszeit der Signale, deren Kenntnis für die Rekonstruktion wichtig ist, wurden untersucht. Der Rekonstruktionsalgorithmus wurde auf die im Jahre 2007 mit 26 Stationen genommenen Daten zur Bestimmung des Energiespektrums zwischen 1 und 100 PeV angewandt und bildet die Grundlage für die bevorstehende erste Publikation einer Analyse von IceTop-Daten. Das Spektrum aus einer vorläufigen Analyse der Daten von 2006 mit 16 Stationen ist in Abbildung 91 gezeigt.

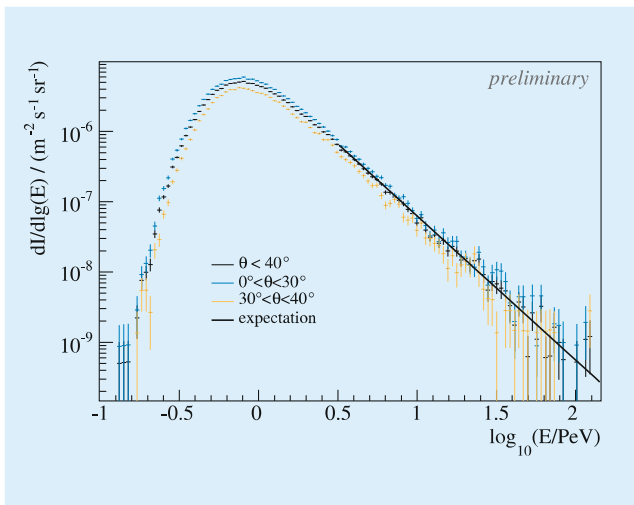


Abbildung 91: Das mit IceTop (16 Stationen) gemessene Energiespektrum für verschiedene Zenitwinkel im Vergleich mit dem durch andere Anlagen gemessenen Spektrum (vorläufiges Resultat ohne Akzeptanzkorrektur bei kleinen Energien).

MAGIC

Das Potential der Multi-Messenger Analysen wird durch die Teilnahme der Nachwuchsgruppe am MAGIC Gamma-Teleskop verstärkt. Dabei geht es in erster Linie um die Erweiterung der verfügbaren Zeitreihen von Gamma-Beobachtungen und die Vorbereitung und Teilnahme an entsprechenden Beobachtungen. Die Gruppe beteiligt sich auch an der Monte-Carlo-Massenproduktion und am MAGIC-Schichtbetrieb auf La Palma. Die Arbeiten zu einem *Neutrino-Target-of-Opportunity-Trigger* (NToO) wurden oben schon erwähnt. Die Einwerbung von Helmholtz-Mitteln zum Kauf von verbesserten Photosensoren erlaubt es, einen großen Teil der MAGIC-Kameras mit diesen Sensoren auszustatten und somit die Energieschwelle zu senken.

Das Baikal-Experiment

Das Baikal-Experiment ist 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. Anfang 2005 wurde die Anlage um drei Trossen zum viermal empfindlicheren Teleskop NT200+ erweitert.

Die geringe Lichtstreuung im Baikalsee ermöglicht die Suche nach Kaskaden aus Neutrinowechselwirkungen unterhalb des Detektors in einem sehr großen Volumen. Die im Jahr 2006 publizierte obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus den Daten der Jahre 1998–2002 ist inzwischen durch AMANDA um das Vierfache unterboten worden. Sie ist aber, bei gleichem Datenmaterial, durch eine verbesserte Analyse, nochmals um einen Faktor zwei verbessert worden und stellt darum eine wichtige Bestätigung von AMANDA mit einer unabhängigen Methode dar. Im Jahr 2007 wurde ebenfalls eine Grenze für den Fluss relativistischer magnetischer Monopole publiziert und eine neue, konkurrenzfähige Obergrenze für den indirekten Nachweis für die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie erhalten.

DESY hat eine Linux-PC basierte, 100 mal schnellere Daten-Verbindung vom Ufer zum Unterwasser-Teleskop NT200+ entwickelt, sowie einen Unterwasser-Lasermodul beigesteuert, der mit Nanosekunden-Lichtpulsen eine synchrone Eichung des Teleskops mit einer einzigen Lichtquelle erlaubt. Schließlich wurde mit Hilfe von DESY die Satelliten-Kommunikation zwischen dem Uferzentrum und Europa durch Installation einer Breitband-Verbindung verbessert und überwacht.

Die DESY-Gruppe betrachtet ihre Aufgabe an diesem Pionier-Projekt als erfüllt und wird die aktive Mitarbeit am Projekt daher Mitte 2008 beenden. Die frei werden Ressourcen sollen den Vorarbeiten zum CTA-Projekt zugute kommen.

CTA

Das *Cherenkov Telescope Array* CTA ist das große europäische Zukunftsprojekt der hochenergetischen Gamma-Astronomie. Es soll aus einer mehrere Qua-

dratkilometer überdeckenden Konfiguration aus Cherenkov-Luftschauer-Teleskopen bestehen, deren Spiegeldurchmesser zwischen 7–8 m für die kleinen Teleskope und 25–30 m für die großen liegt. CTA wird die Sensitivität existierender Projekte im zentralen Energiebereich von 1 TeV um das Zehnfache verbessern

und darüber hinaus den Messbereich bis zu wesentlich höheren und niedrigeren Energien erweitern. DESY beteiligt sich an der Design-Phase des Projekts, die 2007 begann. Diese Phase soll im Jahr 2009 zum Bau erster Prototypen und 2012 zum Baubeginn für das volle Observatorium führen.

Theoretische Physik

Gruppenleiter: F. Schrempp (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 Gittereichtheorie, einschließlich der Entwicklung von Parallelrechnern. Letzteres profitiert von der engen Zusammenarbeit mit dem John von Neumann-Institut.

Aktivitäten in Hamburg

HERA-Physik und QCD

Hadronstruktur

Partondichten

Detaillierte Information über die Struktur des Protons kann in exklusiven Streuprozessen gewonnen werden. Eine wichtige Klasse von Prozessen, die bei HERA

gemessen worden sind, ist die Produktion von Vektormesonen, die besonders sensitiv ist auf die Gluonverteilung im Proton. In [DESY 07-117] wurde eine umfassende Studie der nächstführenden Korrekturen in α_s für diesen Prozess vorgenommen und gezeigt, dass diese Korrekturen in einem weiten kinematischen Bereich numerisch groß sind. Ein Teil der α_s Korrekturen ist durch die Skalenabhängigkeit der verallgemeinerten Quark- und Gluondichten im Proton gegeben, die in [DESY 07-195] mit Blick auf qualitative und quantitative Gesichtspunkte untersucht worden ist. Eine grundlegende Eigenschaft von Streuamplituden ist, dass sie Integralgleichungen in der Form sogenannter Dispersionsrelationen erfüllen. In der Beschreibung exklusiver Prozesse durch verallgemeinerte Partondichten sind diese Relationen nicht trivial, und in [DESY 07-094] wurde gezeigt, dass die Lorentzinvarianz eine wesentliche Rolle für die interne Konsistenz des Formalismus spielt. Der gleiche Formalismus beschreibt nicht nur die Produktion von Vektormesonen, sondern auch von $\pi^+\pi^-$ Paaren. Die Kombination von HERMES-Daten und theoretischer Analyse in [DESY 07-032] hat gezeigt, dass dabei bestimmte Observable höchst sensitiv sind auf die Wechselwirkung von Pionen im Energiebereich um 1 GeV, was für eine Hochenergie-Reaktion zunächst überraschend ist.

Eine attraktive Eigenschaft verallgemeinerter Partondichten ist, dass mit ihrer Hilfe verschiedene Aspekte der Hadronstruktur in Beziehung gesetzt werden können. In [DESY 07-209] wurde ein quantitativer Zusammenhang hergestellt zwischen verschiedenen Asymmetrien von Strange-Quarks und Antiquarks im Proton, die Information über die Dynamik des Quark-Antiquark Sees enthalten. Auf der einen Seite war dies

die Asymmetrie in der Impulsverteilung, die in der tief-inelastischen Streuung gemessen werden kann, und auf der anderen Seite die Asymmetrie in der räumlichen Verteilung, welche durch Paritätsverletzung in der elastischen Elektron-Proton Streuung experimentell zugänglich ist. Der Formalismus verallgemeinerter Partondichten ist weiterhin geeignet für Berechnungen in der Gittertheorie. So wurde in [DESY 07-120] anhand von Gitterrechnungen gezeigt, dass eine starke Asymmetrie in der Verteilung transversal polarisierter Quarks in einem Pion besteht, die bemerkenswert ähnlich ist zu der entsprechenden Asymmetrie im Proton. Dies zeigt insbesondere, dass das Pion eine nichttriviale innere Spinstruktur hat, obwohl es selbst keinen Spin trägt.

Charakteristische Information zur Hadronstruktur ist auch in semi-inklusiven Prozessen zugänglich, deren Beschreibung in den letzten Jahren wichtige theoretische Fragen aufgeworfen hat. Ein Beispiel hierfür ist der Sivers-Effekt, der eine Korrelation von transversaler Polarisation und transversalem Impuls eines Quarks im Proton darstellt und für dessen Existenz der Austausch von Gluonen eine wesentliche Rolle spielt. In [DESY 07-028] wurde gezeigt, wie dieser Gluonenaustausch, der durch Wilson-Linien beschrieben werden kann, verantwortlich ist für eine starke Änderung in Größe und Vorzeichen der Sivers-Asymmetrie beim Übergang von der Lepton-Nukleon Streuung zur Produktion eines Photons und eines Hadron-Jets in Proton-Proton Kollisionen. Eine analoge Korrelation zwischen transversalem Spin und transversalem Impuls in der Quarkfragmentation ist durch den Collins-Effekt gegeben, der wichtig ist für die quantitative Interpretation bestimmter Spinasymmetrien im HERMES-Experiment. In [DESY 07-105] wurde die Collins-Fragmentationsfunktion in einem einfachen Modell berechnet und verglichen mit Daten aus der e^+e^- Annihilation im Belle-Experiment.

Schwere Quarks

Die Beiträge schwerer Quarks ($q = c, b$) zu den Protonstrukturfunktionen $F_2^q(x, Q^2)$ und $F_L^q(x, Q^2)$ wurde im Grenzfall kleiner Werte der Bjorkenschen Skalierungsvariable x in NLO betrachtet, und es wurden

kompakte Formeln für die Verhältnisse $R_q = F_L^q/F_2^q$ hergeleitet, welche die Extraktion von $F_2^q(x, Q^2)$ aus Messungen des doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitts der inklusiven tief-inelastischen Streuung bei HERA erleichtern. Dieser Zugang erklärt auf natürliche Weise, warum die Verhältnisse R_q näherungsweise unabhängig von x und den Einzelheiten der PDFn bei kleinen x -Werten sind [DESY 08-002, arXiv:0801.1502 [hep-ph]].

Small-x Dynamik

Eine zentrale Größe der *small-x* Dynamik ist der sogenannte Triple-Pomeron Vertex; er liefert z. B. den Integralkern der nichtlinearen Balitsky-Kovchegov (BK) Evolutionsgleichung. In [DESY 07-185] wird dieser Vertex im Impulsraum näher untersucht, und es werden Unstimmigkeiten in einigen anderen nichtlinearen Evolutionsgleichungen aufgedeckt und diskutiert.

Bei der Analyse von HERA Daten im Bereich kleiner x Werte hat sich das QCD Dipolmodell als sehr hilfreich und erfolgreich erwiesen. Ein Grund für diesen Erfolg liegt in der Natur des Photons, das in der tiefinelastischen Streuung in ein Quark-Antiquark Paar dissoziiert und so auf natürliche Weise Farb-Dipole erzeugt. In [DESY 07-198] wird gezeigt, dass dieses Bild in der Proton-Proton Streuung am LHC nur begrenzt anwendbar ist. Insbesondere enthält das Proton Odderon-artige Konfigurationen, die in dem Dipolbild nicht enthalten sind.

Instantonprozesse

Die wichtige Frage nach einer Nachweismöglichkeit von harten Instantonprozessen bei LHC wurde auch in 2007 weiterverfolgt [DESY-THESIS-2007-021]. Instantonen stellen einen grundlegenden, nicht-störungstheoretischen Aspekt der QCD dar, und ihr direkter experimenteller Nachweis steht noch immer aus. In die theoretischen Rechnungen flossen die Erfahrungen von zwei früheren HERA-Experimenten zur Instantonsuche ein, die auf Voraussagen aus der Theoriegruppe

aufbauten. Anders als bei HERA ist der führende Subprozess bei LHC durch zwei Gluonen initiiert. Die benötigte Virtualität wird daher im Endzustand in Form eines emittierten W-Bosons eingebracht. Damit wird die Virtualität zeitartig, was die Gluonresummation im Endzustand erheblich erschwert hat. Dieser wichtige Schritt konnte nun aber 2007 in Sattelpunkts-Näherung bewältigt werden [DESY-THESIS-2007-021]. Die zeitartige Virtualität führte zu einer überraschend hohen Verstärkung der Raten und der Ereignissignatur im Vergleich zum raumartigen Fall bei HERA. Damit vergrößert sich auch die Hoffnung auf einen Nachweis von Instantonprozessen am LHC, trotz der bekannten Untergrundproblematik, insbesondere am LHC.

QCD und Stringtheorie

Die AdS/CFT Hypothese stellt einen Zusammenhang zwischen supersymmetrischen Eichtheorien und Stringtheorien dar und liefert die Möglichkeit, interessante Größen der Eichtheorien (anomale Dimensionen, cusp-anomale Dimension) auch im Bereich grosser Kopplungen zu berechnen. In [Theor. Math. Phys. 150: 213–224, 2007, Teor. Mat. Fiz. 150:249–262, 2007] und [J. Stat. Mech. 0710:P10003, 2007. e-Print: arXiv: 0704. 3586 [hep-th] wird dieser Zusammenhang weiter untersucht und eine Diskrepanz aufgedeckt, die erst in höherer Ordnung Störungstheorie sichtbar wird.

Gittereichtheorie

Numerische Monte-Carlo-Simulationen sind geeignet, in Quantenfeldtheorien nicht-störungstheoretische Resultate zu erzielen. Zurzeit konzentrieren sich die Arbeiten auf die QCD und auf ähnliche Theorien, die damit verwandt sind.

In einer Kollaboration mit dem Institut für Theoretische Physik der Universität Münster wurde das Teilchenspektrum in QCD mit einem Quark-Flavour untersucht. Diese Theorie ist interessant wegen der Abwesenheit von Goldstone-Bosonen als Folge der Quanten-Anomalie

in der chiralen Symmetrie. Außerdem wird bei negativen Quarkmassen die spontane Brechung der CP-Symmetrie erwartet. Ermöglicht wird diese spontane Symmetriebrechung durch die Besonderheit, dass die Fermion-Determinante auf dem Gitter auch negativ sein kann. Für die Behandlung dieses Problems wurde ein effektiver Algorithmus entwickelt. Die Resultate wurden in [DESY 07-078] und auch auf der Internationalen Gitter-Konferenz in Regensburg präsentiert. Die numerischen Simulationen wurden auf den Supercomputern der KFA-JSC, Jülich gerechnet. Ähnliche Untersuchungen des Teilchenspektrums wurden auch in der Supersymmetrischen Yang-Mills Theorie mit SU(2) Eichgruppe durchgeführt.

In einer großen internationalen Kollaboration (*European Twisted Mass Collaboration* ETMC) mit mehr als 40 Teilnehmern aus 7 Ländern und 13 Instituten wurden verschiedene Größen (Hadronmassen, Zerfallskonstanten, Formfaktoren, Quarkmassen usw.) mit zwei leichten dynamischen Quark-Flavours (u- und d-Quarks) bestimmt ([DESY 06-236] und 12 Beiträge zur Regensburg-Konferenz). Der Vorteil der sogenannten *Twisted-Mass-Formulierung* ist die verbesserte chirale Symmetrie bei nicht-verschwindender Gitterkonstante, die eine leichtere Extrapolation zum Kontinuumslimes ermöglicht. In dieser Formulierung der Gitter-QCD wurden auch die ersten Schritte zur dynamischen Berücksichtigung der schwereren Quark-Flavours (s- und c-Quarks) eingeleitet.

B-Physik

B-Physik ist ein fester Bestandteil der Arbeiten in der Theoriegruppe. 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 eine systematische $1/m_b$ -Entwicklung der QCD-Lagrangedichte und Übergangmatrixelemente durchzuführen. Die HQET-Methoden gehören zu dem standard-theoretischen *Repertoire*, mit Hilfe dessen sich die Eigenschaften der B-Mesonen Zerfälle

quantitativ untersuchen lassen. Insbesondere haben die HQET-basierten Methoden es ermöglicht, die CKM-Matrixelemente aus Experimenten zu extrahieren. Das gilt vor allem für die Matrixelemente V_{ub} und V_{cb} . In diesem Zusammenhang wurden die nicht-störungstheoretischen Effekte in dem Zerfall $B \rightarrow X_u \ell \nu_\ell$ mit Hilfe der sogenannten *Shape functions* untersucht [DESY 07-040]. Außerdem wurden die HQET-basierten Methoden und die QCD Summenregeln dafür benutzt, die Massen- und Zerfallsraten-Differenzen in dem $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ System zu berechnen [DESY 07-038].

B-Mesonen Zerfälle in effektiven Theorien beinhalten im Allgemeinen drei verschiedene Energieskalen: m_b , $\sqrt{m_b \Lambda_{\text{QCD}}}$ und Λ_{QCD} (hier ist m_b die b-Quarkmasse und Λ_{QCD} die QCD-Skala). Eine besondere Formulierung der QCD ist die sogenannte *Soft Collinear Effective Theorie* (SCET), die eine zentrale Rolle in der Herleitung einer Faktorisierungsformel für B-Mesonen Zerfälle spielt. SCET erlaubt es, die großen Effekte in die Zerfallsmatrixelemente aufzusummieren, die durch das *Running* zwischen diesen Skalen entstehen. Die SCET-basierten Methoden wurden dazu benutzt, eine präzise Theorie der Penguin-induzierten Übergänge $B \rightarrow K^* \gamma$ und $B_s \rightarrow \phi \gamma$ in $O(\alpha_s^2)$ zu entwickeln [DESY 07-124]. Die abgeschätzten Zerfallsraten für $B^\pm \rightarrow K^{*\pm} \gamma$, $B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$ und $B_s^0 \rightarrow \phi \gamma$ sind mit deren experimentellen Messungen gut verträglich. Wie schon berichtet, wurden theoretische Abschätzungen für die Zerfälle $B \rightarrow (K, K^*) \ell^+ \ell^-$ mit Hilfe der SCET in 2006 angefertigt.

Die Experimente an Tevatron haben einige B_s^0 -Meson Zerfälle und CP-Asymmetrien gemessen. Auch das Belle Experiment am KEK hat einige B_s -Zerfälle beobachtet. Das LHCb Experiment am CERN wird demnächst in der Lage sein, eine ganze Reihe von B_s -Meson Zerfällen und CP-Asymmetrien genau zu messen. In Erwartung dessen wurden die Zerfallsraten und CP Asymmetrien in den sogenannten $\bar{B}_s^0 \rightarrow PP$, $\bar{B}_s^0 \rightarrow PV$ und $\bar{B}_s^0 \rightarrow VV$ theoretisch abgeschätzt. $P(V)$ sind leichte Pseudoskalare (π, K, η, η') und Vector (ρ, K^*, ω, ϕ) Mesonen [DESY 07-021].

Theoretische Arbeiten zur B-Physik wurden in einem Übersichtsbericht zusammengefasst [DESY 07-

212]. Darin behandelt werden unter anderem die seltenen B-Mesonen Zerfälle, CP-verletzende Asymmetrien, und Massen-Differenzen zwischen Masseneigenzuständen in den neutralen B-mesonen Komplexen $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ und $B_s^0 - \bar{B}_s^0$. Die Präzisionsmessungen der B-Mesonen Zerfälle liefern ein theoretisch konsistentes Bild innerhalb des Standardmodells. Die Arbeiten in der Theoriegruppe haben wesentlich zu diesen Ergebnissen beigetragen.

Teilchenphysik am LHC/ILC

Von Bedeutung waren im Bereichszeitraum zahlreiche teilchentheoretische Problemstellungen am CERN Protonenbeschleuniger LHC, der in Kürze in Betrieb gehen wird, sowie von Vorbereitungen zur Physik am TeV e^+e^- Linearbeschleuniger ILC. Beide Maschinen versprechen, unsere Kenntnisse über die fundamentalen Strukturen der Materie und ihrer Wechselwirkungen wesentlich zu erweitern und zu vertiefen. Insbesondere ging es um Präzisionsvorhersagen für die Hadron- und Eichboson-Erzeugung, Renormierung instabiler Fermionen und Supersymmetrie.

Hadronen-Erzeugung

Im Rahmen des Partonmodells der QCD wird die inklusive Erzeugung von Hadronen (h) mit Hilfe von Fragmentierungsfunktionen (FFn) $D_a^h(x, \mu^2)$ beschrieben. Das Faktorisierungstheorem der QCD sagt für diese Objekte zwei wichtige Eigenschaften vorher, die experimentell überprüft werden können, nämlich Universalität und wohldefiniertes Skalenverhalten (μ). Im Bereich mittlerer bis großer Impulsüberträge x vom Mutterparton a an das Hadron h wird die μ -Abhängigkeit der FFn durch die wohlbekannten Dokshitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi-Evolutionsgleichungen (DGLAP) beschrieben. Die analytische Lösung dieser Gleichungen im Mellin-Raum wurde nun durch die Aufsummierung der im Grenzfall $x \rightarrow 1$ auftretenden Divergenzen verbessert. In nächstführender Ordnung

(NLO) und unter Berücksichtigung der nächstführenden Logarithmen wurden explizite Ergebnisse angegeben. Die numerische Auswertung ergab erwartungsgemäß, dass der theoretische Fehler durch die Aufsummierung in einem weiten x -Bereich verringert wird [DESY 07-151, arXiv:0712.0481 [hep-ph]].

FFn beinhalten langreichweitige Effekte der starken Wechselwirkung und können daher nicht im Rahmen der Störungstheorie berechnet werden, sondern müssen, ähnlich wie Partondichtefunktionen (PDFn), durch Fits an experimentelle Daten ermittelt werden. Hierfür besonders geeignet sind Daten der e^+e^- -Vernichtung, da diese vergleichsweise kleine Messfehler aufweisen und wegen des leptonischen Anfangszustandes ohne weitere hadronische Unsicherheiten theoretisch interpretiert werden können. Ausgehend vom masselosen Partonmodell wurde ein rigoroser theoretischer Formalismus, das *General-Mass Variable-Flavour-Number Scheme* (GM-VFNS), entwickelt, der einerseits Massenkorrekturen vollständig berücksichtigt und andererseits die Universalität und Skalenverletzung der FFn auf der Grundlage des Faktorisierungstheorems gewährleistet. Im Rahmen dieses Formalismus wurden erstmals FFn bestimmt, welche Quark- und Hadronmasseneffekte konsistent berücksichtigen. Insbesondere wurden FFn für D^0 -, D^+ - und D^{*+} -Mesonen durch einen globalen Fit an alle verfügbaren experimentellen e^+e^- -Daten in NLO extrahiert. Diese Daten stammen von der Energieregion knapp unterhalb der $\Upsilon(4S)$ -Resonanz (Belle, CLEO) bzw. von der Z^0 -Resonanz (ALEPH, OPAL) und erlauben aufgrund der langen Evolutionsstrecke einen signifikanten Test der Skalenverletzung. Hierbei erwies sich die Berücksichtigung der elektromagnetischen Anfangsstrahlung als unverzichtbar [DESY 07-219].

Im Rahmen des GM-VFNS wurde auch die inklusive Hadroproduktion von Hadronen mit Bottom-Flavour unter Tevatron-Bedingungen in NLO untersucht. Im Widerspruch zu einer früheren Vermutung anderer Autoren bewirken Masseneffekte im Bereich mittlerer Transversalimpulse ($2m_b < p_T < 4m_b$) einen moderaten Anstieg des Wirkungsquerschnittes im Vergleich zur masselosen Theorie, um ca. 20% bei $p_T = 2m_b$,

der mit zunehmenden p_T -Werten rasch abklingt. Unter Verwendung von FFn, die eigens durch einen Fit an LEP1-Daten von ALEPH und OPAL bestimmt worden waren, wurde gute Übereinstimmung mit CDF-Daten aus Tevatron-Run II gefunden, wodurch sowohl Skalenverletzung als auch Universalität der FFn bestätigt wurden. Der altbekannte Mangel, dass die CDF-Daten die theoretische NLO-Vorhersage im herkömmlichen Schema (NLO QCD), bei dem massive b -Quarks nur im Endzustand auftreten, um etwa drei Standardabweichungen übertreffen, konnte auf verblüffend einfache Weise beseitigt werden, nämlich durch Verwendung des derzeitigen Weltmittelwertes der starken Kopplungskonstante α_s und zeitgemäßer PDFn [DESY 07-066].

Die Beiträge schwerer Quarks ($q = c, b$) zu den Protonstrukturfunktionen $F_2^q(x, Q^2)$ and $F_L^q(x, Q^2)$ wurden im Grenzfall kleiner Werte der Bjorkenschen Skalierungsvariable x in NLO betrachtet, und es wurden kompakte Formeln für die Verhältnisse $R_q = F_L^q/F_2^q$ hergeleitet, welche die Extraktion von $F_2^q(x, Q^2)$ aus Messungen des doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitts der inklusiven tief-inelastischen Streuung bei HERA erleichtern. Dieser Zugang erklärt auf natürliche Weise, warum die Verhältnisse R_q näherungsweise unabhängig von x und den Einzelheiten der PDFn bei kleinen x -Werten sind [DESY 08-002].

Eichboson-Erzeugung

Die elektroschwachen Strahlungskorrekturen zum Wirkungsquerschnitt der inklusiven Hadroproduktion einzelner W^\pm -Bosonen mit endlichem Transversalimpuls wurden vollständig in der Ein-Schleifen-Näherung berechnet. Um infrarotsichere Vorhersagen bei gleicher Definition von quark- und gluoninitiierten Hadronenjets (j) zu erhalten, wurden sowohl die $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen zur $W^\pm + j$ -Erzeugung als auch die $\mathcal{O}(\alpha_s)$ -Korrekturen zur $W^\pm + \gamma$ -Erzeugung berücksichtigt, wobei α und α_s die elektromagnetische bzw. starke Kopplungskonstante bezeichnen. Ferner wurden die Beiträge der $W + j$ -Photoproduktion mit einem direkten oder aufgelösten Photon im Anfangszustand in LO betrachtet.

Es wurden integrierte Wirkungsquerschnitte als Funktion eines Mindest- p_T -Schnittes und p_T -Verteilungen zum Vergleich mit Messungen am Tevatron und am LHC bereitgestellt und die theoretische Unsicherheit abgeschätzt [DESY 07-103].

Eine unabhängige Untersuchung der p_T -Verteilung von W^\pm -Bosonen, die am Tevatron oder am LHC einzeln erzeugt werden, beschränkte sich auf die rein elektroschwachen Korrekturen der Ordnung $\mathcal{O}(\alpha)$, wobei Übereinstimmung mit der oben genannten Arbeit gefunden wurde. Der Schwerpunkt lag hier auf der Bereitstellung von Näherungsformeln für den Hochenergiebereich, wo große Sudakov-Logarithmen auftreten, die typischerweise von der Form $\ln(\hat{s}/M_W^2)$ sind, wobei $\sqrt{\hat{s}}$ die Schwerpunktsenergie des partonischen Stoßprozesses bezeichnet. Diese Logarithmen sind aus allgemeinen Untersuchungen bis zu zwei Quantenschleifen bekannt [DESY 07-041;DESY 07-112].

Die Formfaktoren für die Kopplung eines masselosen bzw. massiven Eichbosons an eine masselose Fermionlinie wurden für beliebige Werte des Impulsübertrags q^2 im Rahmen der $U(1)\times U(1)$ - bzw. $SU(2)\times U(1)$ -Eichtheorie in der Zwei-Schleifen-Näherung berechnet. Das asymptotische Verhalten für $q^2 \rightarrow \infty$ wurde mit einer neulich durchgeführten Berechnung der entsprechenden Sudakov-Logarithmen verglichen. Diese Ergebnisse werden für die Berechnung von Strahlungskorrekturen zur Z^0 -Erzeugung mit Hadronen- und Leptonen-Beschleunigern benötigt [DESY 07-024].

Renormierung

Die Konzepte der Polmasse und -breite wurden im Rahmen paritätsverletzender Eichtheorien, etwa des Standardmodells, auf instabile Fermionen erweitert. Im Gegensatz zu den üblichen On-Shell-Definitionen sind diese Konzepte eichunabhängig und vermeiden schwerwiegende unphysikalische Singularitäten. Diese Eigenschaften sind von großer Wichtigkeit, weil die meisten Fermionen in der Natur instabile Teilchen sind. Es wurden auch allgemeine Ausdrücke für die unrenormierten und renormierten Versionen der aufsummierten Propagatoren instabiler Fermionen und deren

Wellenfunktionsrenormierungskonstanten hergeleitet [DESY 08-001].

Supersymmetrie

Eine der zentralen Prämissen von supersymmetrischen Theorien ist die Identität von Yukawa-Kopplungen mit korrespondierenden Eichkopplungen, wodurch die Extrapolation der Theorie bis zur Planck-Skala auf natürliche Weise gewährleistet wird. Im elektroschwachen Sektor kann die Identität der beiden Kopplungsarten an einem Lepton Collider (LC) mit hoher Genauigkeit experimentell geprüft werden. Die Produktion von Squarks und Gluinos, den Partnerteilchen von Quarks und Gluonen, bietet sich zur Messung der supersymmetrischen QCD-Kopplungen am LHC an. Es sind die Möglichkeiten einer solchen Messung untersucht worden mit dem Resultat, dass die Identität der Kopplungen experimentell im Prozent-Bereich nachgewiesen werden kann. Eine signifikante Verbesserung kann durch kohärente Analysen von Produktions- und Zerfallskanälen bei LHC und LC erreicht werden [DESY 07-035].

Die stabile Fortsetzung von supersymmetrischen Theorien zu hohen Energien eröffnet die Möglichkeit, die physikalischen Wurzeln von Materie und Wechselwirkungen an der Planck-Skala experimentell zu erforschen. Diese Programmatik ist für LHC und LC in der Vergangenheit im Rahmen der supersymmetrischen $SU(5)$ -Vereinigungstheorie intensiv studiert worden. Der Nachweis kleiner Neutrinomassen legt die Erweiterung dieses Konzepts auf die $SO(10)$ -Symmetrie nahe. Da die experimentell beobachteten Neutrinomassen in diesem Rahmen aufgrund des Seesaw-Mechanismus erzeugt werden, stellt sich die Aufgabe, auch die Massen der sehr schweren rechts-chiralen Neutrinos zu bestimmen. Es konnte gezeigt werden, dass in universellen supersymmetrischen Theorien diese Massen in der Nähe der $SO(10)$ -Vereinigungsskala aus der Massendifferenz von Seletron und Stau, der Partner von Elektron und τ -Lepton, bestimmt werden können. So ermöglichen Präzisionsexperimente an Collidern die experimentelle Erforschung der Wurzeln der Physik an der Planck-Skala. [DESY 07-199].

Kosmologie und Astroteilchenphysik

Dunkle Materie, dunkle Energie und Inflation

In supersymmetrischen Theorien ist das leichteste Superpartikelchen, insbesondere das Neutralino oder das Gravitino, ein attraktiver Kandidat für die beobachtete dunkle Materie. Superpartikelchen unterscheiden sich von gewöhnlichen Teilchen durch eine diskrete Quantenzahl, die R-Parität. In der Regel wird angenommen, dass die R-Parität erhalten ist. Das leichteste Superpartikelchen, und die dunkle Materie, sind dann stabil. In [DESY UT-07-03] wurde jedoch gezeigt, dass R-Parität und Leptonzahl gemeinsam spontan gebrochen werden können. Dies führt zu instabilen Gravitinos mit einer Lebensdauer, die sehr viel größer ist als das Alter des Universums. Dunkle Materie aus quasi-stabilen Gravitinos ist konsistent mit der Erklärung der kosmologischen Materie-Antimaterie-Asymmetrie durch Leptogenese [DESY 07-186].

Instabile Gravitinos können in Neutrino-Photon-Paare zerfallen. Dies führt zu einem charakteristischen Fluss von Photonen, der mit der von der EGRET-Kollaboration beobachteten Anomalie im Photon-Spektrum konsistent ist [DESY 07-128]. Das vorhergesagte Photon-Spektrum hat eine charakteristische Signatur, die mit dem Experiment GLAST beobachtet werden könnte [DESY 07-158] (siehe Abbildung 92).

Im Rahmen von Supergravitations- und Stringtheorien sind Moduli-Felder interessante Kandidaten für das Inflatonfeld. Ihr Zerfall erzeugt Gravitinos, die zu einer zu großen Dichte dunkler Materie führen können [DESY 07-061]. Dies führt zu starken Einschränkungen an die verschiedenen Mechanismen der Supersymmetriebrechung [DESY 07-001, 07-019, 07-156]. Ähnliches gilt für die Realisierung des Peccei-Quinn-Mechanismus zur Lösung des CP-Problems der starken Wechselwirkung mit Hilfe eines Axionfeldes [DESY 07-217]. In supersymmetrischen Theorien sind Axion und ein Dilaton Bestandteile eines einzigen Superfeldes. Die

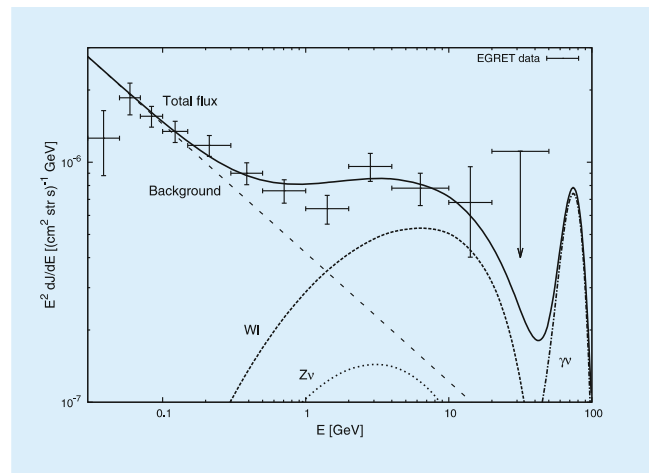


Abbildung 92: Beiträge zum Photonfluss durch verschiedene Gravitino-Zerfälle: W -Boson/Lepton (Wl), Z -Boson/Neutrino ($Z\nu$) und Photon/Neutrino ($\gamma\nu$), als Funktion der Photonenergie; Gravitinomasse: $m_{3/2} = 150 \text{ GeV}$, Gravitinolebensdauer: $\tau_{3/2} = 2 \times 10^{26} \text{ s}$.

Dynamik des gekoppelten Axion-Dilaton Systems ist ein interessantes Modell für die dunkle Energie [DESY 07-145].

Die Daten der WMAP-Kollaboration für die kosmische Hintergrundstrahlung schränken Inflationsmodelle stark ein. Dies wird illustriert durch den Effekt von möglichen Oszillationen im sonst flachen primordialen Spektrum der Dichtefluktuationen [07-004]. Interessante Modelle für Inflation lassen sich in Supergravitationsmodellen mit Hilfe von D-Termen konstruieren [DESY 07-187]. Sie sind überprüfbar durch Vorhersagen für den spektralen Index von Dichtefluktuationen [DESY 07-210].

Im Oktober 2007 wurde am II. Institut für theoretische Physik der Universität Hamburg eine neue Gruppe für theoretische Astroteilchenphysik unter der Leitung von Prof. Dr. Günter Sigl eingerichtet. Die folgenden Abschnitte sollen auch einen Eindruck von den derzeit verfolgten Forschungsschwerpunkten dieser Arbeitsgruppe geben. Nicht all die genannten Ergebnisse sind tatsächlich in der Zeit nach dem 1.10. erzielt worden.

Ein wichtiger Aspekt der Forschung sind Ursprung und Ausbreitung hochenergetischer geladener kos-

mischer Strahlung sowie neutraler Sekundärteilchen wie hochenergetische gamma-Strahlung und Neutrinos. Hierzu wird CRPropa, ein unter der Adresse <http://apcauger.in2p3.fr/CRPropa/index.php> öffentlich verfügbarer numerischer code, weiterentwickelt. Das Ziel ist, *multimessenger* Signaturen verschiedener Szenarien für den Ursprung der kosmischen Strahlung systematisch vorherzusagen. Beispielsweise wird untersucht, ob mögliche Quellen wie aktive Galaxien nicht nur in höchstenergetischer kosmischer Strahlung mit Instrumenten wie dem Pierre Auger Observatorium sondern auch in TeV gamma-Strahlung mit Instrumenten wie H.E.S.S. und MAGIC, sowie auch in Neutrinos mit Neutrino-Teleskopen wie ICECUBE und dem zukünftigen europäischen km³net beobachtet werden können.

Auch die Signaturen von Physik jenseits des Standardmodells der fundamentalen Wechselwirkungen sind ein wichtiges Forschungsgebiet. Eines der diesbezüglich untersuchten Themen sind Einschränkungen an mögliche Verletzungen der Lorentz Symmetrie aus der chemischen Zusammensetzung höchstenergetischer kosmischer Strahlung [arXiv:0708.1737 [astro-ph]]. Ferner wurden mögliche Signaturen einer Mischung zwischen Axionen und Photonen in den Spektren von aktiven Galaxien untersucht. Solche Signaturen sind teilweise beobachtbar für Axion-Photon Kopplungen, die bisher nicht experimentell ausgeschlossen sind [arXiv:0708.1144 [astro-ph]]. Diese theoretischen Untersuchungen stellen einen wichtigen komplementären Ansatz zu den experimentellen Aktivitäten am DESY um mögliche Axion-Photon Kopplungen dar.

Ferner wird auch die indirekte Detektion von dunkler Materie untersucht. Die Annihilation von dunkler Materie in Form von noch nicht entdeckten schweren Teilchen, deren Existenz aber von vielen Erweiterungen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik vorausgesagt werden, können zu interessanten und detektierbaren Signaturen in den Flüssen hochenergetischer kosmischer Strahlung, gamma-Strahlung und Neutrinos führen. Dabei erzeugte Elektronen und Positronen produzieren in kosmischen Magnetfeldern auch Synchrotronstrahlung, die damit eine weitere mögliche Signatur darstellt. All diese Signaturen müssen aber

von Beiträgen „normaler“ astrophysikalischer Prozesse unterschieden werden.

Um zu verstehen, welche Rolle Neutrinos und Neutrino-Oszillationen, und insbesondere Effekte der Neutrino-Selbstwechselwirkung, für Supernovae des Typs II spielen, wurden mögliche Signaturen in den Flüssen der Neutrinos der drei verschiedenen flavors in zukünftigen Detektoren der Megatonnen-Skala untersucht. Eine Serie von Arbeiten, von denen drei während des Berichtszeitraums publiziert wurden [arXiv:0706.2498 [astro-ph]; arXiv:0712.1137 [astro-ph]; arXiv:0712.2176 [hep-ph]], liefern die Grundlage hierzu.

Ein weiteres Ziel der Gruppe besteht darin, den *multimessenger* Ansatz auf Gravitationswellen auszudehnen. Die elektromagnetischen Emissionen von sehr leuchtkräftigen aktiven Galaxienkernen erstrecken sich vom Infrarotbereich über Röntgenstrahlung bis zu gamma-Strahlung und werden von der Akkretion von Gas auf das zentrale supermassive schwarze Loch erzeugt. Sind in dieser Akkretion zum Beispiel kompakte Objekte eingelagert, werden Gravitationswellen emittiert, deren Intensität mit der elektromagnetischen Emission korreliert. In Zukunft sollen Quellen modelliert werden, welche sowohl Photonen (und möglicherweise auch geladene kosmische Strahlung sowie Neutrinos) als auch Gravitationswellen emittieren.

Vereinheitlichte Theorien

Die Symmetrien des Standardmodells und die Quantenzahlen von Quarks und Leptonen weisen auf eine Vereinigung aller Kräfte bei sehr kleinen Abständen hin. Zusammen mit der Gravitationskraft können vereinheitlichte Theorien (GUTs) im Rahmen von Stringtheorien beschrieben werden. Diese Vereinigung aller Kräfte schränkt das Massenspektrum der Teilchen im Standardmodell ein und legt auch die Existenz neuer, sehr schwerer und sehr leichter, Elementarteilchen nahe.

Theoretisch attraktiv sind vor allem vereinheitlichte Theorien in mehr als vier Raum-Zeit-Dimensionen, die als Zwischenschritt zwischen dem Standardmodell

und Stringtheorien auftreten können. Ein entsprechendes Modell in sechs Dimensionen wurde in [DESY 07-072] konstruiert. Die dritte Quark-Lepton Familie setzt sich dabei aus zwei verschiedenen Familien in sechs Dimensionen zusammen, was einen starken Einfluss auf die Yukawa-Kopplungen der Theorie in vier Dimensionen hat. Für ein verwandtes SO(10)-GUT-Modell in sechs Dimensionen wurde die Struktur von Quark- und Lepton-Massenmatrizen im Detail untersucht, vor allem im Hinblick auf Neutrinomassen und CP-Verletzung [DESY 07-141]. Eine entscheidende Rolle spielt dabei der Seesaw-Mechanismus, der auch in Kompaktifizierungen der heterotischen String-Theorie realisiert werden kann [DESY 07-030].

Der Seesaw-Mechanismus zur Erklärung der leichten Neutrinomassen beruht auf der Existenz schwerer Majorana-Neutrinos, die über Strahlungskorrekturen auch zu radiativen Zerfällen von Muon- und Tau-Neutrinos führen; im Rahmen vereinheitlichter Theorien ergeben sich ebenfalls Vorhersagen für Mischungen und Zerfälle von B-Mesonen [DESY 07-201]. In Modellen mit dem Gravitino als leichtestem Superparticle kann ein skalares Neutrino das nächst schwerere Superparticle sein, was zu charakteristischen Signaturen am LHC führen kann [DESY 07-029].

Erweiterungen des Standardmodells, die auf Supersymmetrie, Supergravitation oder Stringtheorie beruhen, scheinen unisono die Existenz eines *versteckten Sektors* von neuen Teilchen und Wechselwirkungen vorauszusagen. Die versteckten Teilchen haben nur eine sehr schwache Wechselwirkung mit den *sichtbaren* Teilchen des Standardmodells. Einige dieser hypothetischen Teilchen könnten durchaus sehr leicht ($< \text{eV}$) sein und daher bei Experimenten an hochenergetischen Beschleunigern keine messbaren Signaturen hinterlassen. Laserexperimente, wie das *Axion-Like Particle Search* (ALPS) Experiment [DESY 07-014] bei DESY, haben dagegen ein großes Entdeckungspotential für leichte versteckte Teilchen mit potentiell sehr kleinen Kopplungen zu Photonen [DESY 07-088, 162, 207], wie das Beispiel von Abbildung 93 zeigt.

Licht-durch-die-Wand (LSW) Experimente, wie ALPS bei DESY, sind derzeit die im meV Massenbereich

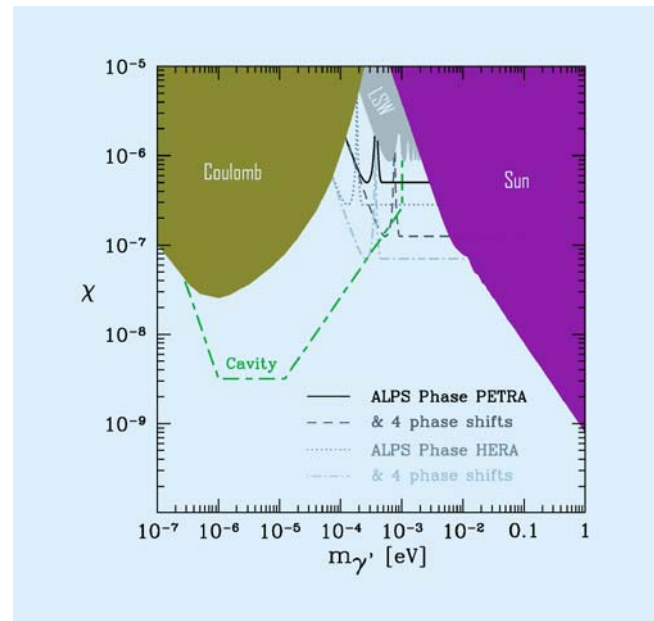


Abbildung 93: Experimentelle Grenzen an den kinetischen Mischungswinkel χ von versteckten Photonen γ' mit den sichtbaren Photonen, als Funktion von deren Masse $m_{\gamma'}$.

am empfindlichsten Experimente, mit großem Entdeckungspotential [DESY 07-207]. Deren Empfindlichkeit kann durch den Einsatz von Phasenschiebern (*phase shifts*) entscheidend verbessert werden [DESY 07-081]. Experimente mit Hohlraumresonatoren (*cavity*) könnten in naher Zukunft einen weiteren noch unerforschten Bereich hin zu kleineren Mischungswinkeln erschließen [DESY 07-099].

Stringtheorie

Im zurückliegenden Jahr haben Mitarbeiter der Stringtheorie Arbeitsgruppen der DESY Theorie und des II. Instituts für theoretische Physik der Universität Hamburg ein weites Themenspektrum bearbeitet mit Forschungen zu Supersymmetrie und Supergravitation, an verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen, an Problemen der AdS/CFT Korrespondenz sowie an Aspekten einer Quantengravitation und Stringkosmologie.

Stringtheorie in AdS Hintergründen

Das Verständnis nicht-linearer Sigma-Modelle auf Anti-deSitter (AdS) Räumen ist von grundlegender Bedeutung für ganz verschiedene Fragestellungen der theoretischen Physik. Insbesondere eröffnet sich durch die sogenannte AdS/CFT Korrespondenz ein völlig neuartiger Weg zur Behandlung stark gekoppelter Eichtheorien (z. B. der Quantenchromodynamik, siehe auch [DESY-07-044]). Interessante Einsichten lassen sich sogar schon aus dem Gravitationslimes gewinnen [JHEP 0705:075, 2007, DESY-07-085].

Man weiß, dass sehr viel mehr Informationen in der AdS/CFT Korrespondenz enthalten sind. So eröffnen Techniken der Stringtheorie im Prinzip die Möglichkeit, das Spektrum anomaler Dimensionen interessanter Eichtheorien zu bestimmen. In sehr speziellen Grenzfällen lassen sich die notwendigen Berechnungen schon heute durchführen. Um derartige Ideen jedoch in systematische Rechenmethoden für die Eichtheorie umsetzen zu können, bedarf es der vollständigen Konstruktion von Stringtheorien auf einer ganz neuartigen Klasse von gekrümmten Hintergründen. Deren charakteristische Eigenschaften sind unter anderem die Existenz einer fünften nicht-kompakten Dimension, und das Auftreten von superkonformen Symmetrien der super-Raum-Zeit.

Im vergangenen Jahr ist es gelungen, mehrere Serien nichtlinearer Sigma Modelle mit d -dimensionaler superkonformer Symmetrie vollständig zu lösen [DESY-07-074]. Aus der vorgeschlagen Konstruktion ergaben sich auch neue Einblicke in Modelle, die z. B. bei der Beschreibung kritischer Phänomene in 2-dimensionalen Grenzflächen eine wichtige Rolle spielen. Randbedingungen in derartigen Quantenfeldtheorien mit interner Supersymmetrie wurden zum ersten Mal in [DESY-07-109] systematisch klassifiziert. Die Konstruktion einer weiteren Klasse von Theorien mit interner Supersymmetrie wurde in [DESY-07-190] thematisiert. Dabei kamen ganz neue Techniken zum Einsatz, die zuvor in [DESY-07-075] entwickelt worden waren.

Die anomalen Dimensionen einer Eichtheorie hängen im allgemeinen kontinuierlich von den Kopplungskon-

stanten ab. Folgt man den Aussagen der AdS/CFT Korrespondenz, dann ergibt sich eine ähnliche kontinuierliche Abhängigkeit des Massenspektrums in der korrespondierenden Stringtheorie von den Parametern der Hintergrundgeometrie. Strings in AdS-Räumen sollten daher durch nicht-lineare Sigma Modelle mit kontinuierlich variierenden kritischen Exponenten beschrieben werden. Ein spezielles Beispiel wurde exemplarisch untersucht [DESY-07-226]. In dieser Arbeit konnte die Abhängigkeit spezieller Exponenten von den geometrischen Parametern effizient berechnet werden.

Mit dem wichtigen Sinh-Gordon Modell war noch eine andere kontinuierliche Familie von Modellen Gegenstand intensiver Untersuchungen [hep-th/0702214]. In diesem Kontext wurden moderne Methoden aus der Theorie integrierbarer Systeme zur exakten Bestimmung des Spektrums eingesetzt und weiterentwickelt. Wichtig war dabei vor allem eine geeignete Verallgemeinerung des Bethe-Ansatzes, der auf Modelle mit nicht-kompakter Raum-Zeit nicht anwendbar ist. Die Sinh-Gordon Theorie gilt als Modell für die fünfte Dimension von AdS₅ Hintergründen. Methoden aus der Theorie von integrierbaren Systemen wurden auch zur Analyse anomaler Dimensionen in der $N=4$ supersymmetrischen Yang-Mills Theorie in vier Raum-Zeit Dimensionen nutzbringend verwendet [DESY-07-216]. Anwendungen auf spezielle Gittermodelle standen in [DESY-07-222] im Vordergrund.

Stringkompaktifizierungen, Gravitation und Kosmologie

Stringkompaktifizierungen auf sogenannten verallgemeinerten Calabi-Yau Mannigfaltigkeiten sind insbesondere wegen Ihrer phenomenologischen Eigenschaften von großem Interesse. Die Arbeitsgruppe *Stringtheorie* am II. Theoretischen Institut der Universität Hamburg arbeitete im Berichtszeitraum vor allem an Aspekten von sogenannten T-Dualität in verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen in [DESY-07-189, DESY-07-127]. Stabile de Sitter Grundzustände wurden sowohl im frühen wie auch im späten Universum untersucht.

Die Emmy Noether-Gruppe *Geometrie in Gravitation und Kosmologie* hat sich mit der Untersuchung von Mannigfaltigkeiten mit Flächenmaß und deren Gravitationstheorie beschäftigt. Diese Mannigfaltigkeiten stellen verallgemeinerte geometrische Hintergründe dar, auf denen Strings als natürliche fundamentale Objekte formuliert werden können. Die Dynamik von effektiven Punktteilchen wurde aus ersten Prinzipien abgeleitet und erfolgreich zur Beschreibung eines konsistenten Modells des Sonnensystems eingesetzt. In der Kosmologie wurde gezeigt, dass sich das frühe strahlungsdominierte Universum wie in der Einsteinschen Theorie verhält, aber dass das späte Universum eine beschleunigende Lösung erlaubt [JCAP 0712:013, 2007, arXiv:0711.3771]

Für die Untersuchung zeitabhängiger Hintergründe in der Stringtheorie erscheint die sogenannte Stringfeldtheorie als ein vielversprechender Formalismus. Mitarbeiter der DESY Theoriegruppe haben im Berichtsjahr große Fortschritte bei der Lösung der sehr komplexen Feldgleichungen gemacht. Insbesondere wurden zahlreiche exakte Lösungen der Stringfeldtheorie für offene Strings mit überwiegend analytischen Methoden konstruiert [DESY-07-007, DESY-07-047, DESY-07-056, DESY-07-110, DESY-07-130].

Mathematische Physik

In der Mathematischen Physik gab es die folgenden Entwicklungen:

- Gruppentheoretische Quantisierung des topologisch nicht-trivialen Phasenraumes $S^1 \times \mathbb{R}^+$. Dieser entspricht dem kanonischen Paar *Winkel und (positive) Wirkungsvariable*, z. B. beim harmonischen Oszillator, für den man so eine neue reichhaltigere Quantenmechanik bekommt, die interessante experimentelle Konsequenzen hat (DESY 06-209; Ann. Physik (Leipzig) **16** (2007) 439–528).
- Mannigfaltigkeiten mit Flächenmaß: Aus der Betrachtung der Elektrodynamik im geometrisch-optischen Grenzfall wurde gezeigt, dass die Pro-

pagation von Licht entlang von Nullgeodäten bezüglich einer Finslernorm, die über den Fresnel-Tensor aus dem Flächenmaß abgeleitet ist, stattfindet. Dieselbe Finslernorm beschreibt auch die effektive Bewegung von Punktteilchen; dieses Ergebnis wurde aus einer isotropischen Mittelung über ein Stringfluid auf dem verallgemeinerten Hintergrund hergeleitet.

- Unendlich-dimensionale Mannigfaltigkeiten: Wir haben uns mit der Konstruktion einer *Quanten-Mannigfaltigkeit* beschäftigt, die lokal homöomorph zu einem Schwartzraum ist. Durch Einführung einer geeigneten Topologie auf dieser Mannigfaltigkeit ist es gelungen, eine Abbildung auf eine klassische endlich-dimensionale Mannigfaltigkeit zu konstruieren, deren Karten durch die Ortserwartungswerte auf dem Schwartzraum gegeben sind.
- Die Rolle der Renormierungsgruppe in der perturbativen algebraischen Quantenfeldtheorie wurde analysiert, insbesondere im Hinblick auf Theorien über gekrümmten Raumzeiten.
- Es wurde untersucht, in welchem Sinn die sogenannten Polymerdarstellungen der Loopquantengravitation Zustände in Schrödingerdarstellungen approximieren können.
- Quantenfeldtheorien auf nicht kommutativen Raumzeiten wurden studiert. Hierbei konzentrierten sich die Untersuchungen auf die Auswirkungen der Nichtkommutativität auf die Dispersionsrelationen.

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

Die Arbeit der DESY Theoriegruppe wurde im Bereichszeitraum durch zahlreiche Förderungen der Helmholtz Gesellschaft unterstützt. Dazu gehörten neben einer Helmholtz Allianz und zwei virtuellen Instituten auch eine Reihe von Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppen, die vorwiegend von Mitarbeitern aus der DESY Theorie geleitet wurden.

- Helmholtz Allianz: *Physik an der Teraskala*
- Virtuelle Institute:
 - VH-VI-106: *Particle Cosmology (VIPAC)*
 - VH-VI-032: *Hochenergiestrahlungen aus dem Kosmos (VIHKOS)*
- Nachwuchsgruppen:
 - VH-NG-004: *QCD in exklusiven Prozessen bei HERA,*
 - VH-NG-005: *Universelle Ereignisgeneratoren für zukünftige Lepton-Collider,*
 - VH-NG-006: *Particle Physics and Cosmology,*
 - VH-NG-008: *Hochpräzisionsanalyse von Top-quark-Eigenschaften bei TESLA*

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. DFG-Schwerpunktprogramm (SPP 1096) *Stringtheorie,*

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 stimulierenden Forschungsatmosphäre in der Theoriegruppe bei.

Mitarbeit bei der Organisation von Konferenzen

- DESY Theory workshop 2007 on *Quantum chromodynamics: String theory meets collider physics*, DESY, Hamburg
- XV International Workshop on *Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2007)*, München
- *Linear Collider Workshop 2007 (LCWS2007, ILC2007)*, Hamburg

- 5th International Workshop on *Heavy Quarkonia 2007*, Hamburg
- ESI workshop on *Mathematical and Physical Aspects of Perturbative Approaches to Quantum Field Theory*, Wien, Österreich
- ZMP Workshop on the *Geometric Langlands program*, DESY, Hamburg
- String Steilkurs Part II: *Advanced Topics in String Theory*, DESY, Hamburg
- 12th International Conference on *Elastic and Diffractive Scattering: Forward Physics and QCD*, DESY, Hamburg
- *Symposium on Particle Cosmology*, VIPAC meeting, DESY, Hamburg
- *Flavor Physics and CP Violation*, FPCP 2007 Lake Bled, Slovenien
- *HERA and the LHC*, CERN, Genf
- The 15th International Conference on *Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions*, SUSY07, Karlsruhe

Aktivitäten in Zeuthen

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).

Für die Hadro-Produktion von schweren Quarks konnten zum ersten Mal die Korrekturen zu nächst-nächst-führender Ordnung, d. h. die Feynman-Diagramme zu zwei Schleifen, im Grenzfall kleiner Quarkmassen exakt berechnet werden [arXiv:0705.1975, 0707.4139]. Des weiteren konnte die totale Zerfallsbreite des Higgs-

Bosons zur dritten Ordnung in der starken Kopplungskonstante bestimmt werden zusammen mit der zeitartigen Gluon-Splittingfunktion, deren Kenntnis eine präzisere Bestimmung von Fragmentationsprozessen erlaubt [arXiv:0709.3899].

Beiträge zu den Korrekturen durch schwere Quark-Beiträge zur tief-inelastischen Streuung im unpolarisierten und polarisierten Fall wurden zu $O(\alpha^2)$ und $O(\alpha^3)$ berechnet [hep-ph/0702265, 0703285, arXiv:0706.2738, 0707.4659, 0710.3348]. Für Streuprozesse mit tief-inelastischer Kinematik und dem Austausch von geladenen Strömen konnten Mellin-Momente der Koeffizientenfunktionen zur dritten Ordnung berechnet werden [arXiv:0704.1740]. Mit diesen Ergebnissen wurden die QCD-Vorhersagen für die Paschos-Wolfenstein Relation verbessert [arXiv:0708.3731]. Weitere Arbeiten betrafen Target-Massen-Korrekturen im diffraktiven Fall [arXiv:0706.2478] sowie Parton-Verteilungsfunktionen und Λ_{QCD} [arXiv:0706.2430,

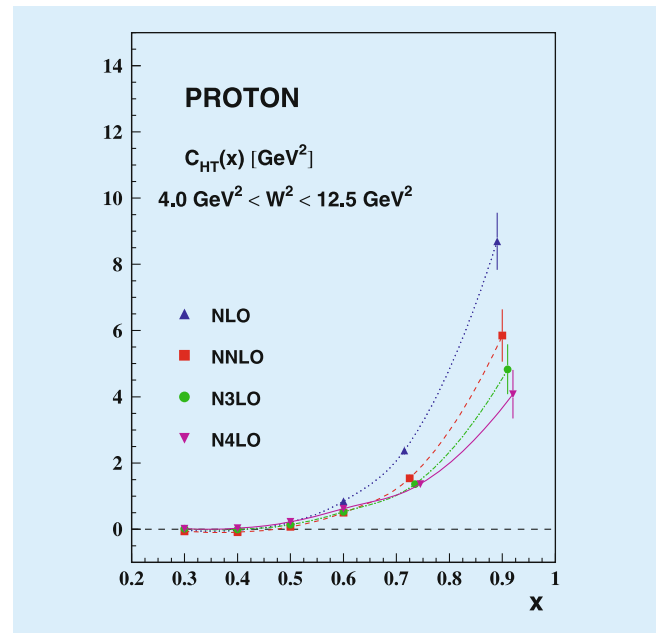


Abbildung 94: Vergleich der Beiträge höheren Twists $C_{HT}(x)/Q^2$ zur Strukturfunktion $F_2^{ep}(x, Q^2)$ im Bereich großer Werte von x von NLO bis N^3LO für die tief-inelastischen Welt-Daten. Die $O(\alpha_s^4)$ -Korrektur (N^4LO) zum non-singlet-Wilson-Koeffizienten ist in den führenden Beiträgen berücksichtigt.

0708.1474, 0711.1721]. Korrekturen höheren twists zur Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ wurden im Rahmen einer 4-Schleifen Analyse im Bereich großer Werte von Bjorken x extrahiert [DESY 07-227]. Der Effekt zeigt eine starke Abhängigkeit von der Störungsordnung, siehe Abbildung 94. Mathematische Eigenschaften von Wilson-Koeffizienten und anomalen Dimensionen in höherer Ordnung wurden in [arXiv:0706.2426] und Lösungen von Dyson-Schwinger-Gleichungen in [hep-th/0612180] untersucht. Universelle QED-Korrekturen durch unpolarisierte Streuung von geladenen Fermionen wurden bis zu $O((\alpha L)^5)$ für allgemeine Streuprozesse berechnet [hep-ph:0701019].

Die Bhabha-Streuung ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$) ist ein wichtiger Referenzprozess an e^+e^- -Collidern, besonders auch zur hochpräzisen Luminositätsbestimmung. Die Berechnung der virtuellen Zweischleifenkorrekturen dazu wurde mit der Vorhersage der Beiträge schwerer Leptonen beliebiger Masse und von Hadronen abgeschlossen [arXiv:0704.2400, 0710.5111, 0711.3847]. Abbildung 95 zeigt die numerischen Resultate für Experimente am ILC.

Zur weiteren Automatisierung der Auswertung von Mellin-Barnes-Darstellungen für Feynmandiagramme wurde das Mathematica-Paket AMBRE entwickelt und als *Public Domain Software* veröffentlicht [arXiv:0704.2423]. Die MB-Methode wurde für die

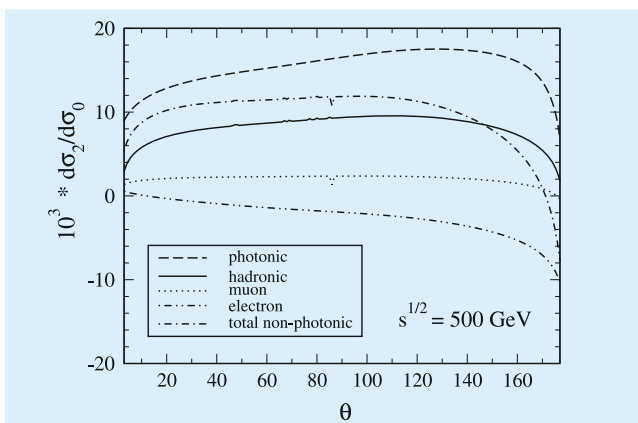


Abbildung 95: Hadronische Zweischleifen-Korrekturen von massiven Fermion-Schleifen zur Bhabha-Streuung am ILC als Funktion des Streuwinkels.

Beschreibung von zugleich auftretenden virtuellen und reellen Infrarot-Divergenzen ausgearbeitet [arXiv:0707.3567, 0710.5100, 0712.2969].

Nichtperturbative Quantenfeldtheorien

Die Berechnung nichtperturbativer Größen in der QCD mit schweren Quarks ist von Bedeutung für die Analyse der Präzisionsexperimente bei Babar und Belle, aber auch von zukünftigen Experimenten in der B-Physik. Neue Strategien wurden entwickelt, um hier zu Genauigkeiten zu gelangen, die es erlauben, auch kleine Effekte jenseits des Standardmodells zu isolieren [arXiv:0710.2201, 0710.2229, 0710.1553, 0705.1809]. Koordiniert mit anderen europäischen Gruppen, sollen diese Strategien in der QCD mit dynamischen Quarks angewendet werden; siehe auch die Webseite <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CLS/WebHome>. Detaillierte Vorarbeiten werden hierfür geleistet ([arXiv:0710.1263, arXiv:0710.1188]).

Eine weitere Forschungsaktivität im Bereich der Gitterfeldtheorie sind Simulationen mit dynamischen Quarks in der Formulierung der Gitter-QCD mit chiral rotiertem Massenterm. Dieses Projekt ist Teil einer breit angelegten *European Twisted Mass Collaboration* (ETMC). Bisher konnte die ETMC eine sehr präzise Bestimmung der Niederenergiekonstanten der chiralen Störungstheorie vornehmen [hep-lat/0701012]. Darüberhinaus wird das komplette Oktett- und Dekuplett-Spektrum berechnet [arXiv:0710.1173]. Weitere Untersuchungen betreffen die Momente von Parton-Verteilungsfunktionen [arXiv:0710.1580], die nicht-perturbative Bestimmung der Renormierungskonstanten [arXiv:0710.0975], die Berechnung der leichten Quarkmassen (von Up-, Down- und Strange-Quarks) [arXiv:0710.0329, arXiv:0709.4574] sowie der Charm-Quarkmassen [arXiv:0710.1414], Meson-Formfaktoren [arXiv:0710.0097] und die Bestimmung der Massen neutraler Mesonen [arXiv:0709.4564]. Weitere Arbeiten von mehr technischer Natur sind in den Referenzen [Cichy:2007vk, arXiv:0711.1871, arXiv:0711.1871] zu

finden. Erwähnt sei noch eine Studie des Phasendiagramms der QCD bei nicht-verschwindender Temperatur [arXiv:0710.0569].

Konferenzen

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

- CERN/DESY workshop on *HERA and the LHC* 12–16 March 2007, DESY, Hamburg
- International DESY School on *Computer Algebra and Particle Physics 2007* (CAPP 2007) (Local Organizing Committee and Chair) 25–30 March 2007, Zeuthen, Germany.
- International Summer School on *Lattice QCD and its applications* (Co-Chair) Seattle, USA, 1.1.2007–31.8.2007, Seattle, USA

Internationale Zusammenarbeit, Drittmittel-Projekte und 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 Eu-

ropäischen 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.

Es besteht eine enge Zusammenarbeit der Theoriegruppe mit den Universitäten Aachen, HU Berlin, Bielefeld, USB Caracas/Y, Cottbus, Durham/UK, Glasgow/UK, Grenoble/F, Groningen/NL, Katowice/PL, Leipzig, Liverpool/UK, Madrid/E, Mainz, Milton Keynes/UK, Münster, Rom II, III/I, Nikosia/Cy, Poznan/PL, Paris Süd/F, Valencia/E, Würzburg, Zürich/CH, und den Forschungszentren ECT* Trento, Harish Chandra Research Institute Allahabad/IN, NIKHEF, Amsterdam/NL, CERN/CH, IHEP Serpukhov/RU, RIKEN, Tokyo/J, und RISC, Linz/A.

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* gehalten, sowie die Vorlesung *Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie* an der Universität Dortmund.

Mehrere Diplom- und Doktorarbeiten wurden betreut.



Abbildung 96: *Im Jahre 2007 fand am DESY der internationale Linear Collider Workshop (LCWS2007) statt. Mehr als 600 Teilnehmer informierten sich über den Stand des ILC Projektes und diskutierten die letzten physikalischen und technischen Neuigkeiten.*

International Linear Collider

ILC-Projektgruppe: Mitglieder und Gäste der Gruppen M und FH, darunter insbesondere FLC (Leiter: T. Behnke) und LC (DESY, Zeuthen – Leiter: S. Riemann), sowie etwa 66 Institute aus 17 Ländern (im Rahmen der ECFA Studie).

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

Die Entwicklung des *International Linear Colliders* (ILC) wurde auch im Jahre 2007 auf einer sehr breiten internationalen Basis vorangetrieben. Dabei wurde ein wesentlicher Meilenstein im Jahre 2007 mit der Veröffentlichung des *Reference Design Reports* (RDR) erreicht. Der RDR beschreibt Physik, Detektor und Beschleuniger im Detail. Er enthält eine erste Kostenabschätzung für die im internationalen Konsens geplante Anlage, die sich auf \$6.7 Mrd. US beläuft. Die Veröffentlichung des RDR signalisiert das Ende der konzeptionellen Planung und den Übergang zu einer projektorientierten Phase, an deren Ende ein Projektvorschlag stehen soll, der den Regierungen zur Genehmigung vorgelegt werden kann. Zu diesem Zweck wurde im Laufe des Jahres ein Projektmanagement Team aufgestellt, das die Aktivitäten in direkter Zusammenarbeit mit den beteiligten Instituten koordiniert.

Im Bereich der Detektoren kam es zu einer ähnlich grundlegenden Neuorganisation. Prof. Sakue Yamada (KEK) wurde zum *Research Director* für den ILC berufen und wird die Koordination der weltweiten Detektoraktivitäten zu seiner Hauptaufgabe machen.

Am DESY stehen für den Linearbeschleuniger die gemeinsamen Aktivitäten mit dem XFEL weiterhin im Vordergrund. Konkret wurde Beiträge zur Vorbereitung schneller Tests der Kavitäten durchgeführt. Weiterhin wurden die Arbeiten im Rahmen

des EU geförderten EUROTeV Projektes fortgesetzt, dessen Laufzeit bis Ende 2008 verlängert wurde.

DESY hat auch im Jahr 2007 seine Arbeiten im Bereich der Detektorentwicklung fortgeführt. Nach Jahren der Vorbereitung konnten verschiedene Teststrahlexperimente durchgeführt werden. Für den Vertex Detektor, das Vorwärts-Kalorimeter und das hadronische Kalorimeter wurden große Datenmengen aufgezeichnet. Arbeiten zum Bau eines großen TPC Prototyps sind vorangegangen. Wichtige Fortschritte konnten im Bereich der Diagnostik (Energie- und Polarisationsmessung) gemacht werden.

Das auch von DESY wesentlich getragene LDC Detektorkonzept hat sich mit dem weitgehend asiatischen GLD Konzept zusammengeschlossen. An der Optimierung des gemeinsamen Detektorkonzeptes wird intensiv gearbeitet.

Eine wichtige Rolle hat die Genehmigung und der Beginn der Helmholtz Allianz *Physics at the Terascale* gespielt. Teil dieses Projektes, das detaillierter an anderer Stelle (Seite 12) vorgestellt wird, ist auch die Entwicklung einer kohärenten Strategie in Deutschland zur Detektorentwicklung für den ILC. DESY spielt hier als eine der treibenden Kräfte eine zentrale Rolle, sowohl bei der Durchführung von F&E Projekten als auch durch die Bereitstellung von Infrastruktur für Universitäten.

Im Juni 2007 war DESY Gastgeber der großen internationalen Konferenz über Linearbeschleuniger, LCWS2007 (Abbildung 96). Über 600 Gäste kamen ans DESY, um den Stand der ILC Entwicklungen und die Aussichten für das physikalische Programm zu diskutieren.

ILC

Der ILC, der technisch auf der supraleitenden TESLA-Technologie beruht, wird zurzeit durch den *Global Design Effort* (GDE) vorbereitet. Das GDE setzt sich aus Wissenschaftlern und Ingenieuren aus den drei Regionen Amerika, Asien und Europa zusammen und hat erfolgreich das Design der Maschine optimiert.

Unter Führung des GDE ist im Jahre 2007 der *Reference Design Report* (RDR) abgeschlossen worden und auf der Lepton-Photon Konferenz im August 2007 der Öffentlichkeit übergeben worden. Der RDR beschreibt einen etwa 30 km langen Komplex, in dem Elektronen und Positronen bei einer Schwerpunktsenergie bis zu 500 GeV zur Kollision gebracht werden. Ein späterer Ausbau auf eine Kollisionsenergie von 1 TeV ist möglich. Die Beschleunigermodule beruhen auf dem für den TESLA *Technical Design Report* vorgeschlagenen Design, sollen aber einen höheren mittleren Beschleunigungsgradienten von 31.5 MeV/m bereitstellen. Die Hochfrequenzquellen sind in einem zweiten, parallelen Tunnel untergebracht. Darüber hinaus sind die nun kreisförmigen zwei Dämpfungsringe für die Positronen und die Elektronen mit einem Umfang von gut 6 km in einem gemeinsamen Tunnel im Zentrum der Anlage angeordnet. Die standortabhängigen Kosten wurden durch Referenzstandorte in den drei Regionen ausgewertet. In Europa ist das ein Standort beim CERN mit einem etwa 100 m tiefen Tunnel im Festgestein, in den USA ein Standort in der Nähe des Fermilabs, und in Asien ein Standort in Japan. Untersuchungen für einen Standort in Anlehnung an die TESLA-Trasse mit einem Tunnel im Sand knapp unter der Erdoberfläche konnten noch nicht endgültig abgeschlossen werden.

Ein wichtiger Teil des RDR ist die Ermittlung der Kosten des Gesamtkomplexes. Das GDE hat hierzu eine Methode entwickelt, die es erlaubt, Kosten in allen Regionen der Welt in dem jeweils geltenden regionalen Kostensystem zu ermitteln. Grundlage ist der Wert der Komponenten, gemessen in so genannten ILC Einheiten (ILCU). Der Wert 1 ILCU ist über einen festen Wechselkurs zum Dollar und zum Euro definiert. Dabei entspricht ein ILCU dem Wert eines US-Dollars Anfang 2007, oder 1.20 Euro. Kosten für Personal und Risikozuschläge sind in den Kosten nicht enthalten. In dieser Definition betragen die Projektkosten des *International Linear Collider* 6.7 Mrd. ILCU. Zusätzlich werden 13000 Personenjahre benötigt. Etwa 1.8 Mrd. ILCU sind dabei direkt am Standort in Form von Infrastruktur, Bauwerken etc. zu erbringen.

Die Arbeiten am Beschleuniger sind mit der Veröffentlichung des RDR in eine neue Phase getreten, die auch eine neue Organisation bedingt. Ziel der nächsten Jahre ist es, den Entwurf der Maschine aus dem RDR soweit auszuarbeiten und zu verfeinern, dass das Projekt genehmigungsfähig wird. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der weiteren Entwicklung der Beschleunigertechnologie, und auf der Reduktion der Kosten des Gesamtprojektes. Außerdem wird ein Verfahren zur Standortbewerbung und -auswahl entwickelt. Das Projektmanagement wurde hierarchisch angeordnet und das Projekt in Arbeitspakete aufgeteilt. Unter dem Projektleiter teilen sich drei Projektmanager, je einer pro Region, die Aufgaben Beschleuniger, Infrastruktur und Beschleunigersysteme auf. Die Arbeitsgruppenleiter der Beschleuniger-, technischen und übergeordneten System haben ihre Arbeit in Arbeitspakete unterteilt und arbeiten unter der Leitung der jeweiligen Projektmanager (Abbildung 97).

Die supraleitende Beschleunigertechnologie steht weiterhin im Fokus der Optimierungsbetrachtungen für den ILC. Während in Amerika und Asien Anstrengungen unternommen werden, eine angemessene Testinfrastruktur zu entwickeln, können gegenwärtig lediglich bei DESY Tests in größerem Maßstab durchgeführt werden. Beispiele sind die Hochgradienten-Tests, für die ein Modul zum Test bei FLASH in Vorbereitung ist.

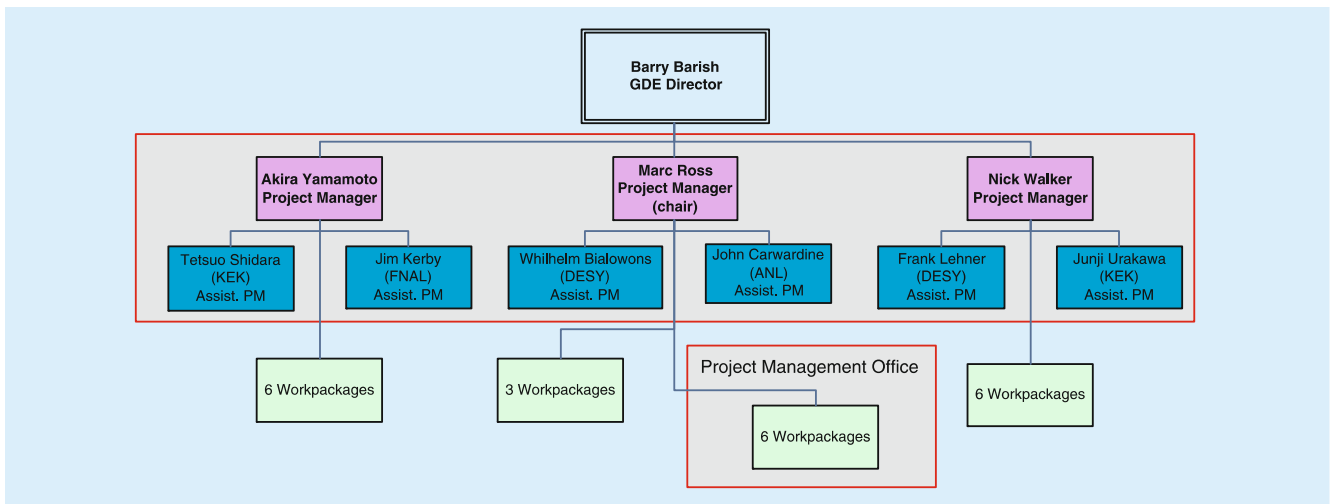


Abbildung 97: Die Organisationsstruktur des GDE in den Phasen I und II des Technical Design.

Schwergewicht ist ein Verständnis und die Optimierung des Fertigungsprozesses in einer Detailtiefe, die auch kostengünstige industrielle Fertigung ermöglicht. Vielversprechende Ergebnisse werden mit grobkristallinem Niob auf Grund der Reduzierung der Korngrenzen erwartet und z. T. bereits erreicht. In jedem Fall ist die vollständige Beherrschung des Reinigungs- und Politurverfahren ausschlaggebend. Diese Phase des ILC wird in Europa durch das neue Projekt ILC-HiGrade entscheidend gestärkt. Ein entsprechender Projektantrag bei der Europäischen Kommission über 5 Mrd.€ Förderung wurde im Laufe des Jahres bewilligt und wird ab Februar 2008 die Aktivitäten am DESY zusammen mit CERN, LAL (Orsay), CEA (Palaiseau), Mailand und Oxford unterstützen.

Diese Förderung ist umso willkommener als Ende des Jahres 2007 durch politische Entwicklungen in den USA und in UK die Fördermittel für die Entwicklung des ILC (und anderer Großprojekte) im Jahre 2008 deutlich eingeschränkt wurden. Das GDE Management hat darauf reagiert und die Forschungsvorhaben vorrangig auf die kritischen Komponenten des ILC in der *Technical Design Phase I* beschränkt, die nunmehr bis 2010 gehen wird. In der anschließenden *Technical Design Phase II* werden dann alle Forschungsziele des ILC aufgegriffen und mit dem *Technical Design Report* abgeschlossen.

Bei DESY selbst hat die ILC-Projektgruppe nach Abschluss der HERA-Experimente Entwicklungsarbeiten für supraleitende Kavitäten übernommen. Die Durchführung der kommenden Abnahmetests für die industrielle Serienfertigung wird gegenwärtig optimiert. Gleichzeitig werden mechanische Testvorrichtungen entwickelt und für hohen Durchsatz verbessert.

Im Rahmen des EUROTeV Projektes wurden im Dezember des Berichtsjahres Messungen zum *Fast-Ion-Effekt* am ATF-Ring in Japan durchgeführt. Durch gezielte Variationen des Drucks im Vakuumrohr kann die Entstehung der Ionen und deren Einfang im Feld des Strahls kontrolliert variiert und mit den bei DESY ausgeführten Simulationsrechnungen verglichen werden. Die Apparatur konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden. Allerdings müssen für aussagekräftige Messungen die Strahleigenschaften noch weiter verbessert werden.

Beim Strahltransport wurden die Anforderungen an die Aufstellungsgenauigkeit im Rahmen von EUROTeV weiter studiert. Die Frage der Stabilität der einzelnen optischen Komponenten und der Einfluss der Vermessungsgenauigkeit wurde realistisch in so genannten *Start-to-end* Simulationen mit dem Programmpaket Merlin studiert. Merlin wird von einem größeren User-Kreis als Werkzeug genutzt. Die Luminosität wurde in

Simulationsrechnungen als Funktion des Kreuzungswinkels optimiert.

Ergänzt wurden diese Simulationen durch gezielte Messungen der Vibrationsmoden von Kryomodulen, erstmals auch im Vergleich mit kalten Modulen bei 4.5 K. Die Aufhängung der Beschleunigerstrukturen an der Tunneldecke (wie beim XFEL vorgesehen) erzeugt offensichtlich keine zusätzlichen Schwingungen. Beim Übergang von warmen zu kalten Kavitäten wurden keine unerwarteten Schwingungen angeregt. Bei extremen Betriebsbedingungen der Kälteanlagen traten jedoch Schwingungsmodi auf, die über die Kühlleitungen eingekoppelt werden und die Strahlage im ILC in Extremfällen beeinflussen könnten. Im Normalbetrieb bei 2 K treten diese Schwingungen allerdings nicht auf.

Der Einfluss der asymmetrischen Einkopplung des RF-Feldes in die Kavitäten kann ebenfalls die Strahlage beeinflussen. Auf diese Weise angeregte höhere harmonische Moden wurden simuliert und der Effekt auf den Strahl studiert. Im normalen Betriebsmodus sind diese Einflüsse beherrschbar, bei hohen Intensitäten werden diese Effekte u. U. jedoch kritisch und müssen geometrisch kompensiert werden.

Die Wechselwirkungszone des ILC bleibt weiterhin eine Herausforderung. Studien zur Auslegung der Wechselwirkungszone wurden deshalb im internationalen Rahmen der Arbeitsgruppe Maschine-Detektor-Schnittstelle weitergeführt.

Im Rahmen der *HGF Terascale Allianz* koordiniert DESY den Bereich *Beschleuniger*. Während des Berichtsjahres wurden Lehrveranstaltungen zu Höchstenergiebeschleunigern sowohl bei DESY als auch an externen Universitäten angeboten.

Instrumentierung am ILC

Experimente am ILC hängen kritisch von einer guten und präzisen Messung verschiedener wichtiger Strahlparameter ab. An erster Stelle sind hier die Energie und die Polarisation der Strahlen zu nennen. Fortschritte konnten im Jahre 2007 in beiden Gebieten erzielt

werden. Besonders hervorzuheben ist, dass sowohl bei der Energiemessung als auch beim Verständnis der Polarisation am ILC erste konkrete Ergebnisse von Test-Experimenten vorliegen.

Messung der ILC Strahlenergie

Um die Masse von Teilchen wie z. B. vom Higgs-Boson oder dem Top-Quark mit einer besseren Genauigkeit als der theoretischen Unsicherheit zu messen, ist die Kenntnis der Strahlenergie (E_b) von $\Delta E_b/E_b \leq 10^{-4}$ notwendig. Die Standardmethode zur Bestimmung von E_b ist die Nutzung eines Magnetspektrometers bestehend aus Dipolmagneten und Strahlagemonitoren (BPMs). Um nachzuweisen, dass eine solche Präzisionsmessung unter realistischen Bedingungen möglich ist, wurde das sog. Endstation A Experiment T-474 Anfang 2006 von einer Kollaboration aus der Universität Cambridge, DESY, Dubna, der Universität Royal Holloway, dem SLAC, UC Berkeley, UC London und die Universität von Notre Dame am SLAC (USA) aufgebaut und in Betrieb genommen (siehe Abbildung 98). In diesem Experiment wird die Strahlenergie durch Mes-

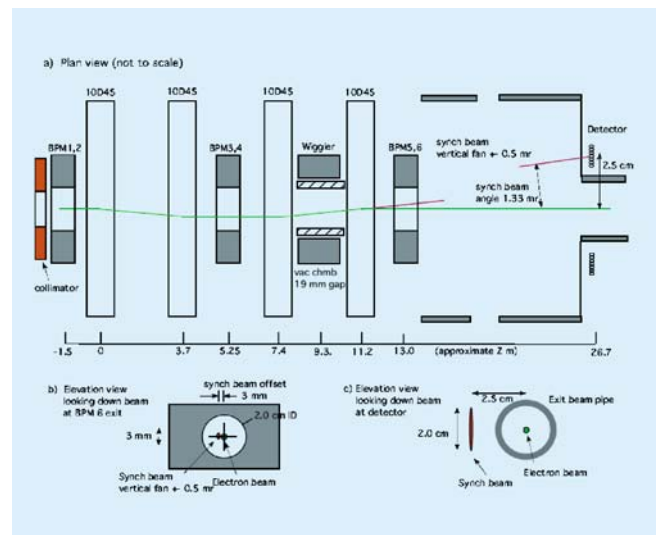


Abbildung 98: Übersicht des Endstation A Experiments T-474 zur Messung der Strahlenergie, ergänzt durch eine Anordnung zur Messung der Strahlenergie mittels Synchrotron Strahlung.

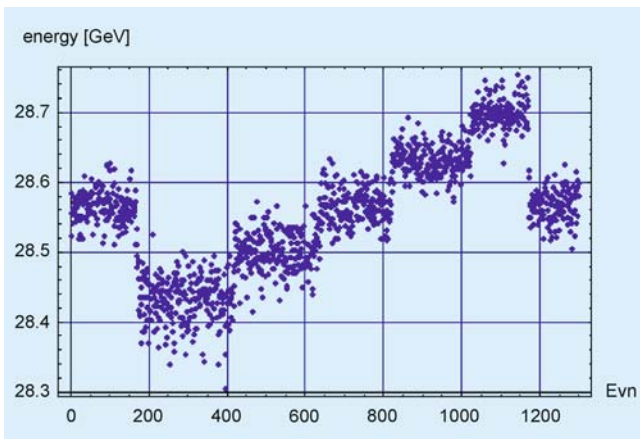


Abbildung 99: Messung der Strahlenergie während des Runs-1699 bei einer Magnetstromstärke von 150 A.

sung der Ablage des Strahls zwischen dem zweiten und drittem Magneten, der integralen Magnetfeldstärke des ersten Magneten und der Geometrie der Schikane bestimmt. DESY hat wesentliche Beiträge zu den verwendeten Magneten geleistet.

Die bereits im Jahre 2006 erreichte BPM-Auflösung von 550 nm bei einer Stabilität von besser als 40 ppm zusammen mit detaillierten Magnetfeldmessungen erlaubten die Messung der Strahlenergie (Abbildung 99). Die stufenweise Variation der Strahlenergie als Funktion der Zeit kann mithilfe des Spektrometers deutlich nachvollzogen werden. Eine Fortführung des Messprogrammes ist im Jahre 2008 geplant.

Neben der Methode des Spektrometers wurden verschiedene Alternativen untersucht. Vielversprechende Ansätze sind zusammen mit Kollegen aus Dubna, Yerevan und Novosibirsk bei der Bestimmung der Strahlenergie mittels der Messung des Endpunktes der Synchrotron Strahlung (SR), die in Ablenkungsmagneten erzeugt wird, mittels der Messung von Comptonstreuung von Laserlicht an Strahlelektronen, oder durch die Resonanzabsorption von Laserlicht in einem statischen toroidalen Magnetfeld verfolgt worden. Diese Studien werden in den nächsten Jahren fortgeführt werden. Unter anderem sind Tests in Novosibirsk geplant, um *proof of principle* Experimente der verschiedenen Methoden durchzuführen.

Polarisierte Positronenquelle für den ILC

Neben der Strahlenergie spielt die Polarisation – sowohl die Erzeugung polarisierter Strahlen, als auch die Messung der Polarisation im Wechselwirkungspunkt – eine zentrale Rolle bei der Bestimmung wichtiger Strahlparameter des ILC.

Der ILC sieht vor, dass der Elektronenstrahl durch die etablierte Methode der Photoemission an GaAs-Strukturen erzeugt wird, während der Positronenstrahl in einer neuartigen Undulator basierten Quelle produziert werden soll. Eine besondere Herausforderung hier ist es, ausreichend hohe Positronenströme mit hoher Polarisation zu erzeugen.

Das Design einer Positronenquelle des ILC wurde im Jahre 2007 weiterentwickelt. Es wurden Untersuchungen zur Optimierung der Quelle bezüglich der Positronenausbeute und -polarisation durchgeführt. Die zu erwartende Strahlenbelastung und Materialaktivierung wurden bestimmt und im Design für ein ferngesteuertes Positionierungssystem für das Positronentarget berücksichtigt. Ein besonderes Problem stellt dabei das Target selbst dar, es ist beim Betrieb extrem hohen Belastungen ausgesetzt und sein Austausch ist mit großem Aufwand verbunden. Berechnungen zeigten, dass die durch Strahlung verursachten Schäden am Material einen jährlichen Wechsel des Targets nötig machen.

Um die Machbarkeit einer Undulator-basierten Positronenquelle zu demonstrieren und den Produktionsprozess detailliert zu untersuchen, wurde am SLAC seit einigen Jahren das E166 Experiment durchgeführt, in dem der vorgeschlagene Produktionsprozess detailliert untersucht wird. DESY hat sich an der Konzeption des Experimentes, dem Bau und dem Betrieb beteiligt. Nach Abschluss der Datennahme im Jahre 2006 stand 2007 die Analyse der Daten im Vordergrund. Dies erforderte unter anderem eine erhebliche Erweiterung des Geant Monte Carlo Programms, um polarisierte Prozess korrekt beschreiben zu können. Diese Erweiterungen, die wesentlich in Zeuthen erarbeitet wurden, sind inzwischen Teil des offiziellen Geant4 Paketes geworden.

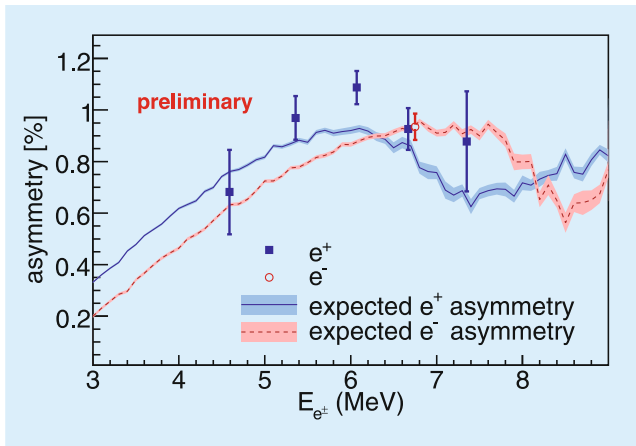


Abbildung 100: Die Asymmetrien gemessen mit dem Comptontransmissionspolarimeter bei E166 in Abhängigkeit von der Energie der Positronen bzw. Elektronen. Die Energie wurde mit einem Doppeldipol-spektrometer eingestellt. Die erwartete Asymmetrie, berechnet mit Geant4, ist ebenfalls angegeben.

Die vorläufigen Ergebnisse des E166 Experimentes sind in Abbildung 100 zusammengefasst. Gezeigt ist die gemessene Asymmetrie, die der Strahlpolarisation proportional ist, sowie die Ergebnisse der detaillierten Simulation. Eine gute Übereinstimmung wird beobachtet. Damit ist das wesentliche Ziel des E166 Experimentes erreicht worden: es konnte demonstriert werden, dass mithilfe der Undulator Quelle polarisierte Positronen produziert werden können, und dass die Modelle diese Prozesse mit ausreichender Präzision beschreiben können.

Messung der Polarisation am ILC

Viele Studien haben ergeben, dass am ILC die Polarisation mit einer Genauigkeit von $\delta P/P = 0,25\%$ genau gemessen werden muss. Das ist ein Faktor zwei besser als die bisher weltbeste Polarisationmessung, die am SLAC im Rahmen des SLD-Experimentes erreicht wurde. Das am ILC geplante Polarimeter basiert auf der Comptonstreuung zwischen Strahlelektronen und zirkular polarisierten Laserphotonen. Pro Teilchenpaket werden dabei 1000–2000 Elektronen gestreut, deren Energiespektrum polarisationsabhängig ist. Die

gestreuten Elektronen werden in einer Magnetschikane wie in einem Spektrometer nach Energien aufgefächert und anschließend wird ihre Ortsverteilung mit einem Cherenkov-Detektor gemessen. Zur Kontrolle der Spintransporteffekte und des Einflusses der Strahl-Strahl Wechselwirkung auf die Polarisation ist je ein Compton-Polarimeter vor (*upstream*) und hinter (*downstream*) dem e^+e^- -Wechselwirkungspunkt geplant. Am DESY werden Untersuchungen zur Entwicklung und zur Durchführung einer Polarisationmessung am ILC durchgeführt.

Mithilfe von Simulationsrechnungen wird die Strahlführung in der Umgebung des Polarimeters untersucht. Ziel ist es, eine Lösung zu finden, die optimal auf die Bedürfnisse des Polarimeters abgestimmt ist, und gleichzeitig möglichst wenig (teuren) Tunnelraum in Anspruch nimmt. Andere Effekte, wie die Möglichkeit der Kalibration des Polarimeters, und die Wechselwirkung mit anderen Diagnostik Messstationen, die eventuell in der Nähe des Polarimeters eingebaut werden, sind Gegenstand detaillierter Untersuchungen.

Verschiedene Möglichkeiten wurden untersucht, den Cherenkov-Detektor zu realisieren. Dazu wurde der Cherenkov-Detektor des SLD-Polarimeters am DESY im Teststrahl betrieben (siehe Abbildungen 101 und 102) und die ebenfalls in dieser Arbeitsgruppe entstandene Simulation an die Teststrahlergebnisse angepasst. Mit dieser Simulation können nun neue Detektorkonfigurationen für die ILC-Polarimeter studiert werden. In einer zweiten Teststrahlperiode wurde der SLD-Detektor mit verschiedenen Typen neuer Photodetektoren ausgerüstet.

Die Erfahrungen mit dem SLD-Polarimeter haben gezeigt, dass die Genauigkeit der Messung letztlich durch die Nichtlinearitäten des Cherenkov-Detektors und der Ausleseelektronik begrenzt war. Daher wurde im vergangenen Jahr ein LED-Teststand aufgebaut, mit dem die Linearität verschiedener Photodetektoren und Elektronikkomponenten untersucht werden kann. Es wurden verschiedene Methoden zur Messung von integralen und differentiellen Nichtlinearitäten verglichen, die nun auf die verschiedenen Komponenten angewendet werden können.



Abbildung 101: Teststrahllaufbau mit dem Cherenkov-Detektor des SLD-Polarimeters.

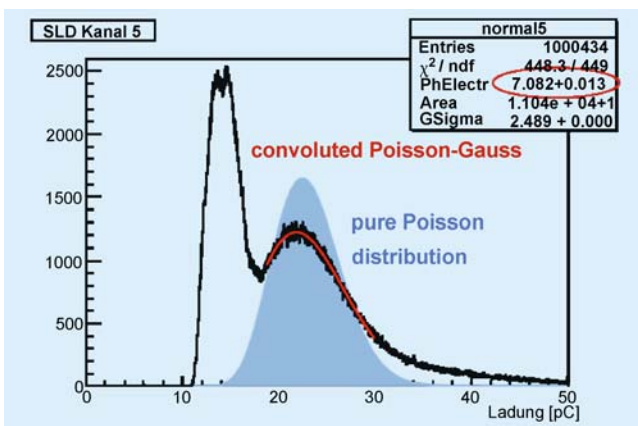


Abbildung 102: Signalthöhenspektrum mit Bestimmung der Anzahl der nachgewiesenen Photoelektronen aus einer der Teststrahlmessungen.

Detektorentwicklungen für den ILC

Ein Experiment am ILC ist mit erheblichen technischen und physikalischen Herausforderungen verbunden, damit die vom Beschleuniger erzeugten Kollisionen op-

timal ausgewertet werden können. Seit mehreren Jahren arbeitet deshalb am DESY eine Gruppe an der Entwicklung von Technologien und an der Ausarbeitung eines Detektorkonzeptes für den ILC. Diese Arbeiten sind international eng mit anderen Partnern verzahnt, sowohl in Europa, im Rahmen des EU geförderten EU-DET Programmes, als auch international im Rahmen der *World Wide Study for Physics and Experiments at a Future Linear Collider* (WWS). DESY beteiligt sich aktiv an der Entwicklung von Technologien für den Vertex Detektor, den TPC Spurdetektor, das hadronische Kalorimeter und die Instrumentierung der Vorwärtsregion des Experimentes. DESY spielt darüber hinaus eine wichtige Rolle in der Ausarbeitung eines kohärenten Konzeptes für einen Detektor am ILC, indem Arbeiten zum Detektordesign, aber auch Studien zur möglichen Physik am ILC durchgeführt werden. DESY hat sich in den letzten Jahren eine starke koordinierende Rolle erarbeitet, die auch in der im Jahre 2007 genehmigten Helmholtz Allianz *Physics at the Terascale* ihren Ausdruck findet.

Das ILD Detektor Konzept

Seit etwa 10 Jahren wird in Europa ein Detektorkonzept für eine Linearbeschleuniger entwickelt. Zunächst unter dem Namen TESLA, wurde dieser Detektor seit 2003 unter dem Namen LDC weiterentwickelt. Dieser Detektor ist konsequent auf das Ereignisrekonstruktionsmodell *Particle Flow* hin entwickelt worden. Ein wesentlicher Teil dafür ist eine hochauflösende TPC, die eine extrem effiziente und robuste Spurerkennung gewährleisten soll, und ein hochsegmentiertes Kalorimeter, um neutrale und geladene Teilchen effizient zu trennen und zu rekonstruieren. Die Details des Detektors sind im *Detector Outline Document* (DOD) und zuletzt stark kondensiert im RDR dokumentiert worden.

Im Sommer 2007 haben sich LDC und das weitgehend asiatische Detektorkonzept GLD zu einem neuen, dem *International Large Detector at the ILC* (ILD) Konzept, zusammengeschlossen. Von dem Zusammenschluss erhoffen sich beide Konzeptgruppen eine höhere Effizienz, und Synergien durch die Vermeidung von Doppel-

arbeiten. Schon vor dem Zusammenschluss arbeiteten beide Gruppen in verschiedenen F&E Kollaborationen eng zusammen.

DESY ist an verschiedenen Stellen in der ILD in führender Position vertreten. Es stellt ein Mitglied im *Joint Steering Board*, dem Führungsgremium der Gruppe, und ist in mehreren Arbeitsgruppen und Detektorgruppen an führender Stelle vertreten.

Maschine-Detektor Schnittstelle und Detektorintegration

Die Schnittstellen zwischen den geplanten Experimenten und dem Beschleuniger sind wichtiger Gegenstand der weltweiten Studien zum ILC. Im Jahr 2007 lag der Schwerpunkt der internationalen Entwicklungen dabei auf den technischen und physikalischen Randbedingungen, die das Design der geplanten Detektoren auf die Größe und Auslegung der unterirdischen Experimentierhalle haben. Höhepunkt in 2007 war dabei der am SLAC organisierte *ILC Interaction Region Engineering Design Workshop IRENG'07*.

Am DESY wurden im Berichtszeitraum Untersuchungen zur Detektorintegration und den sich daraus ergebenden Randbedingungen für das Design der Detektorhalle durchgeführt. Hierbei stand vor allem die Zusammenführung der beiden Detektorkonzepte GLD und LDC zum neuen ILD Design im Vordergrund.

Die Planungen zur Größe und Ausstattung der unterirdischen Detektorhallen stehen in enger Wechselwirkung zu den Planungen der Detektorintegration in den Detektorkonzeptstudien. Im *ILC Reference Design Report* wurden die Rahmenbedingungen, wie z. B. die Größe der unterirdischen Experimentierhalle beschrieben. Die Arbeiten in 2007 konzentrierten sich danach auf den Beginn der Entwicklungen, die zu einem technisch ausgearbeiteten Design führen sollen. Auf dem IRENG'07 Workshop kamen technische Experten der Maschine und der Detektorkonzepte zusammen, um den Status und die weiteren Entwicklungspläne für das technische Design der Wechselwirkungszone zu diskutieren. Hauptthemen waren dabei die Anforder-

ungen an die Experimentierhalle, die Unterstützung und Versorgung der Maschinenelemente im Detektor (Bsp. der Quadrupolmagnete), sowie die Anforderungen an ein schnelles und zuverlässiges *push-pull* System, mit dessen Hilfe die zwei geplanten Detektoren an der Wechselwirkungszone ausgetauscht werden können.

Die Entscheidung der Detektorkonzepte LDC und GLD, einen gemeinsamen *Letter of Intent* (LoI) einzureichen, führte im Verlauf des Berichtszeitraums zu einer intensiven Kollaboration, um ein gemeinsames Detektorkonzept (ILD) zu entwickeln. Obwohl ein Großteil der Entwicklungen auf dem Bereich der physikalischen Optimierung des neuen Konzepts liegen, wurde parallel mit Überlegungen zur technischen Realisierung eines ILD-Detektors begonnen. Hier stehen insbesondere Fragestellungen zur Detektorintegration im Vordergrund. Ziel dieser Arbeiten ist es, zum Zeitpunkt des Einreichens des LoI eine technische Studie des ILD-Detektors in Form von CAD-Modellen bereitzustellen (Abbildung 103). Dabei soll die mechanische und technische Realisierbarkeit prinzipiell gezeigt werden. Ein detailliertes technisches Design des Detektors bleibt der *Technischen Design Phase* vorbehalten, die sich an den LoI anschließen soll.

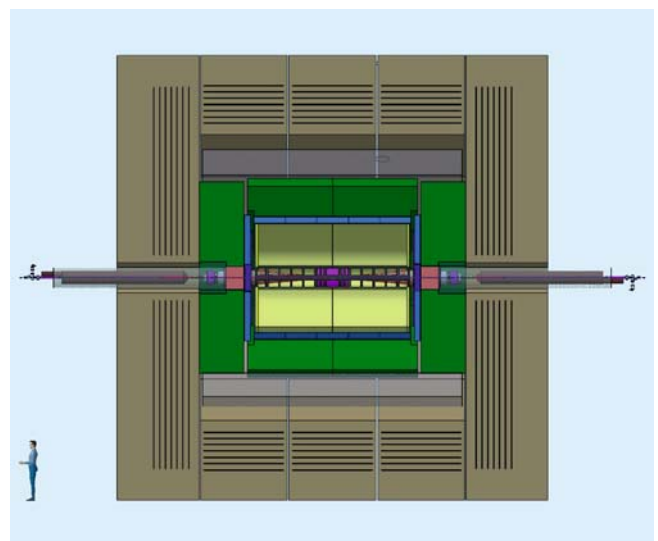


Abbildung 103: CAD Modell des ILD Detektors in einer der möglichen Konfigurationen.

Vorwärtskalorimeter (FCAL)

Die Detektoren am zukünftigen ILC werden in der Vorwärtsregion über zwei Kalorimeter verfügen, die besondere Aufgaben haben und deren technische Realisierung eine Herausforderung darstellt.

Das *Luminositätskalorimeter*, das einen Winkelbereich zwischen 25 bis 150 mrad abdeckt, soll die Luminosität extrem genau vermessen. Im Bereich zwischen 5 und 50 mrad ist das *Beamcal* angeordnet, das einerseits helfen soll, einzelne hochenergetische Teilchen bis zu sehr kleinen Winkeln zu messen, andererseits über die Messung des strahlinduzierten Untergrundes die Strahlparameter besser zu verstehen. Dieser Aspekt wurde im Jahre 2007 intensiv durch Simulationsstudien untersucht. Erste Entwürfe zu einer schnelle Ansleselektronik wurden erarbeitet.

Das *Beamcal* stellt besondere Anforderungen an die Strahlhärte der Sensoren. Die bereits 2006 begonnenen Messungen der Strahlhärte verschiedener Sensortypen wurden fortgesetzt und auf GaAs Sensoren

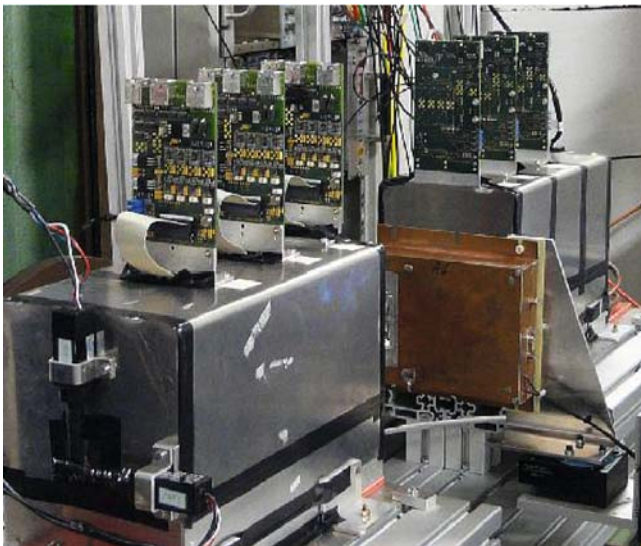


Abbildung 104: Messstand am DESY Teststrahl 24. Von rechts trifft der Elektronenstrahl ein und durchdringt die sechs Ebenen des EUDET Strahlteleskops. In der Mitte des Teleskops befindet sich der Diamantsensor in einer kupferverkleideten Vorverstärkerbox, die auf einem motorgesteuerten x-y-phi Schwenkarm montiert ist.

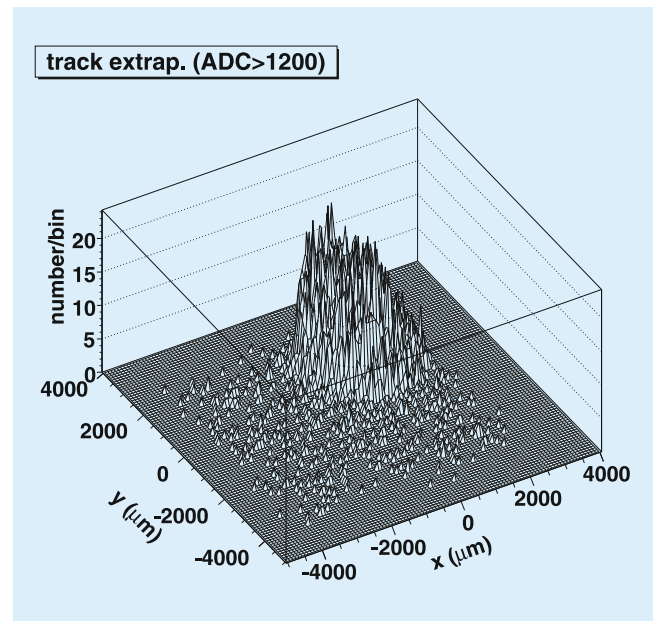


Abbildung 105: Vorhergesagte Spurposition an der z-Position des Sensors für Ereignisse mit einem ADC Signal von mehr als 1200. Der Akzeptanzbereich des Diamantsensors von 3 mm Durchmesser ist deutlich zu sehen.

und polykristalline CVD Diamanten ausgedehnt. Mit Messungen am DESY Teststrahl wurden erste Ergebnisse über das Verhalten von CVD Diamant Detektoren mit minimal ionisierenden Teilchen erzielt (siehe Abbildungen 104 und 105).

Hadronisches Kalorimeter

Das Jahr 2007 war ein wesentlicher Meilenstein in der Entwicklung des hadronischen Kalorimeters für den ILC. Nach dem ersten Testlauf des Prototypen am CERN im Jahre 2006 konnten 2007 in zwei Experimentierperioden mit dem inzwischen komplett ausgerüsteten Kalorimeter Daten am CERN aufgezeichnet werden. Über drei Monate konnte der Prototyp ohne wesentliche technische Probleme am CERN betrieben werden. Insgesamt 200 Millionen Ereignisse wurden aufgezeichnet und stehen jetzt der Kollaboration zur Auswertung zur Verfügung. Die DESY Gruppe spielte eine zentrale Rolle in der Planung, dem Betrieb und der Auswertung dieses Experimentes.

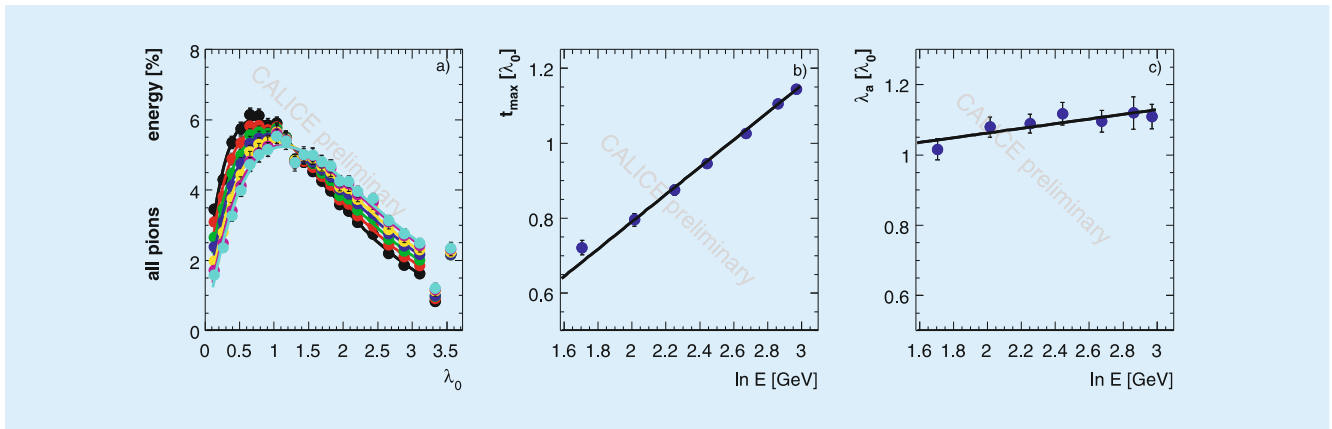


Abbildung 106: Longitudinales Profil von Pionen induzierten Schauern mit Energien zwischen 6–20 GeV. Nur Pionen sind selektiert, die erst im HCAL beginnen, aufzuschauern. (a) Longitudinales Profil zusammen mit der Fit Funktion. (b) Ergebnis des Fits zum Schauermaximum gegen die Energie des Schauers. (c) Position des Schauermaximums gegen Schauerenergie.

Parallel zu den Aktivitäten am CERN hat die Gruppe im Jahre 2007 intensiv an der Auswertung der Daten gearbeitet, die im Pilotrun im Jahre 2006 aufgezeichnet wurden. Daneben wurde die Qualität der neuen Daten kontinuierlich überwacht und studiert. Ergebnisse der Analysen sind auf mehreren Konferenzen gezeigt und in internen Berichten dokumentiert worden.

Ein wesentliches Ziel der Tests mit dem Prototypen ist es, die Rolle der Segmentierung im Kalorimeter besser zu verstehen und die Qualität der Monte Carlo Simulation zu optimieren. Die Rolle der Segmentation kann am Studium eines Pion Schauers demonstriert werden. In Abbildung 106 ist das longitudinale Profil eines Pionschauers dargestellt. Die Pionen hatten Energien zwischen 6 und 20 GeV. Die Position des Schauermaximums und die Abhängigkeit der Höhe des Schauermaximums von der Tiefe im Kalorimeter stimmen mit der Erwartung einer logarithmischen Abhängigkeit überein.

Die Analyse der 2007er Daten stellt eine erhebliche Herausforderung dar, da sowohl die Zahl der Kanäle als auch das Volumen der Daten eine neue Größenordnung erreicht hat. Entscheidende Fortschritte in der Software zur Handhabung der Daten und auch zur Analyse der Daten konnten gemacht werden.

Am CERN konnten Daten mit Elektronen, Muonen und Pionen bei unterschiedlichen Energien aufgezeichnet werden. Die Analyse der elektromagnetischen Schauerdaten wird verwendet, um die Integrität der Kalibrationskette zu etablieren.

Die Daten des hadronischen Kalorimeters werden mit den im Jahre 2003 aufgezeichneten Daten des Minicals verglichen. Da die *Sampling Fraction* beider Kalorimeter die gleiche ist, muss der stochastische Term der Auflösung ebenfalls gleich sein. In Abbildung 107 ist die Energieauflösung als Funktion der Energie des einfallenden Teilchens gezeigt. Daten sowohl des Minicals als auch des neuen Prototypen sind verglichen. Beide Messungen ergeben vergleichbare Ergebnisse und zeigen eine stochastische Auflösung für elektromagnetische Schauer von etwa $20\%/\sqrt{E}$.

Die 8000 Szintillator-Kacheln des Hadron-Kalorimeters werden einzeln mit neuartigen Multipixel-Geiger-Photodioden, sogenannten SiPMs (*Silicon Photomultiplier*), ausgelesen, die direkt auf den Kacheln angebracht sind und damit im Prinzip ein sehr kompaktes und homogenes Detektor-Design erlauben. Im Teststrahl-Prototypen sind Auslese-Elektronik und optische Kalibrations-Systeme noch extern angebracht, in einem realistischen Detektor müssen sie in die Detek-

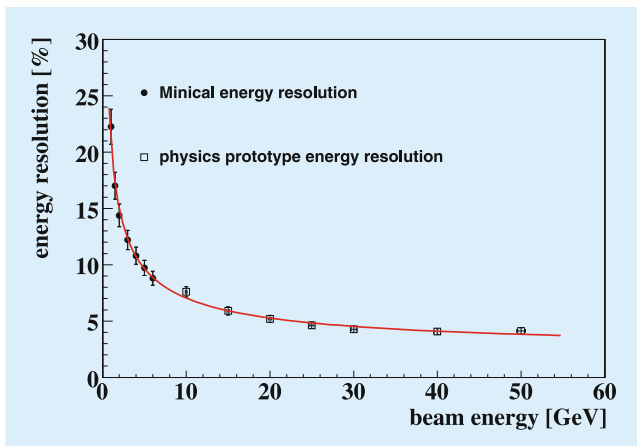


Abbildung 107: Ergebnisse der Energieauflösung gemessen mit dem Minical Detektor im Jahre 2003 bei Energien zwischen 1–6 GeV, und mit dem AHCAL Prototypen für Energien zwischen 10 und 50 GeV.

torstruktur integriert werden, so dass inaktive Regionen auf ein Minimum beschränkt bleiben.

Im Rahmen des EU-geförderten Projekts EUDET erarbeitet die Gruppe FLC, zusammen mit FEB, ein solches HCAL-Design. Mit einem kleinen Prototypen wurde gezeigt, dass zur Kalibration Leuchtdioden in SMD-Technologie verwendet werden können, die nahe an den Szintillatoren angebracht werden. Dieser wichtige Schritt ermöglicht den vollständigen Verzicht auf die bisher für optisch ausgelesene Detektoren charakteristischen, komplizierten Lichtleitersysteme.

Die Entwicklung der Silicon Photomultiplier, die ein wesentlicher Teil des hadronischen Kalorimeters sind, hat ein breites Interesse auch in anderen Bereichen gefunden. Im Rahmen der Helmholtz Nachwuchsgruppe VH-NG-206 wird die mögliche Anwendung dieser Geräte in der *Positron Emission Tomography* (PET) untersucht. Wie beim Kalorimeter ermöglicht die sehr kompakte Bauweise der SiPM's ein PET Gerät mit besserer Ortsauflösung und besserer Empfindlichkeit. Die Probleme sind hier sehr ähnlich zu denen, die auch für die Weiterentwicklung des HCAL's studiert werden müssen: Kopplung zwischen dem SiPM und dem Szintillator, Einsatz neuer SiPM von Hamatsu, die eine direkte Ankopplung des Szintillators and den SiPM erlauben, ohne Zwischenschaltung eines Wellenlängen-

schiebers. Erste Erfahrungen mit diesen Geräten und ihrer Anwendung für PET konnten im Rahmen von Diplomarbeiten gesammelt werden. Diese Arbeiten finden in enger Kooperation mit der Universität Heidelberg und der Universität Shinshu (Japan) statt.

In der Zukunft ist es geplant, einen kleinen PET Prototypen zu bauen, der die Machbarkeit eines auf SiPM basierenden PET Gerätes demonstrieren soll.

Vertexdetektor

DESY ist im Rahmen des EUDET Projektes *Pixelteleskop* an den Entwicklungen für den Vertex Detektor an einem Experiment am zukünftigen Linearbeschleuniger beteiligt. Im Rahmen dieses Projekts soll die Erfahrung mit Pixelsensoren in den Bau eines neuartigen Pixelteleskops und einer damit einhergehenden Teststrahlinfrastruktur am 6 GeV DESY Elektronenstrahl eingehen. Dieses Pixelteleskop soll Teilchenspuren mit einer Genauigkeit von besser als 3 Mikrometer vermessen. Die so erhaltene Spurinformaton wird genutzt um weitere hochauflösende Teilchendetektoren zu studieren. DESY hat Verantwortung im Bereich der Chiptests, der Systemintegration und der Datenanalyse übernommen.

Im Jahr 2007 wurde der Prototyp des Pixelteleskops, der sogenannte *Demonstrator*, gebaut und in Betrieb genommen. Als aktive Detektoren wurden Sensoren ausgewählt, die am *Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien* (IPHC), Strasbourg entwickelt wurden. Diese Sensoren vereinen aktives Material und Ausleseelektronik auf ein und demselben Silizium-Chip und verfügen über eine Pixelgröße von nur 30 Mikrometern. Diese monolithischen Pixelsensoren wurden auf Sensorplatten montiert und detailliert getestet. Messungen mit einer radioaktiven Quelle gaben Aufschluss über Signalgröße und Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Pixel. Anschließend wurden sechs dieser Chips in einer speziellen sehr genauen Mechanik integriert. Diese Mechanik wurde während des Berichtszeitraums konzipiert und produziert. Der mechanische Aufbau besteht aus zwei unabhängigen Sensorboxen zwischen denen ein Testdetektor platziert werden kann. In beiden Boxen be-

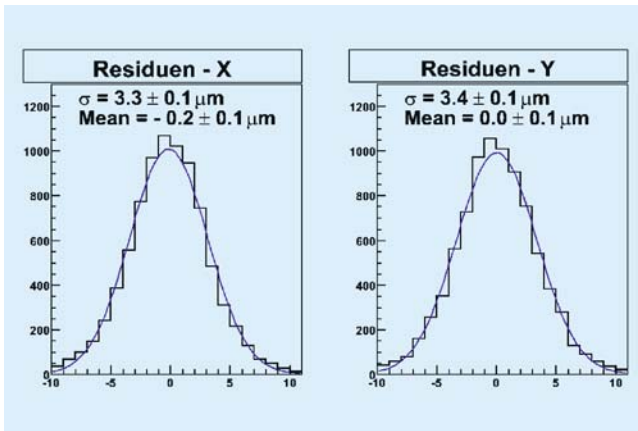


Abbildung 108: Residuen der x - und y -Komponenten einer Pixelebene gemessen mit 180 GeV Pionen am CERN Teststrahl.

finden sich je drei Sensorhalter die über ein Schienensystem positioniert werden. Kühlungsrohre unterhalb des Schienensystems ermöglichen eine ausreichende Kühlung der Silizium-Pixel-Chips. Die gesamte Mechanik des Teleskops wurde in DESY Werkstätten produziert. Der Demonstrator wurde am DESY erstmals in Betrieb genommen, und es wurden erste Messungen am Teststrahl mit 6 GeV Elektronen durchgeführt. Bei einem weiteren Strahltest mit 180 GeV Pionen am CERN wurde der Einfluss der Vielfachstreuung minimiert. Mehrere Millionen Spuren wurden innerhalb von zwei Wochen aufgenommen. Auf diese Weise lässt sich die geometrische Auflösung des Teleskops bestimmen, welche mit gedünnten Sensoren in dem finalen Teleskop bei DESY erreicht werden soll.

Die Analysesoftware *EUTelescope* wurde zur Datenanalyse genutzt. Diese Software wurde unter anderem am DESY entwickelt und bietet einen modularen Ansatz zur Rekonstruktion und Analyse der Teleskopdaten. Es bestehen sowohl Funktionen zur Kalibrierung, Ausrichtung und Datenrekonstruktion als auch für Mustererkennung und Bestimmung der Auflösung. Fast alle Schritte der Analyse können auf dem GRID durchgeführt werden, so wird die Rechenzeit extrem verkürzt. Die Analyse der DESY und CERN Daten zeigte, dass der Prototyp des Pixelteleskops den Erwartungen entsprechend gut funktioniert und eine Auflösung von nur einem Mikrometer mit dem finalen

Teleskop möglich ist. Abbildung 108 zeigt, dass die Residuen der x - und y -Komponenten einer Pixelebene des Teleskops 3.3 bzw. 3.4 Mikrometer ist. Bei einer intrinsischen Auflösung von 3 Mikrometer ergibt sich daraus eine Teleskopauflösung um 1.5 Mikrometer.

Zeitprojektionskammer

Ein zentraler Teil des ILD Spurrekonstruktionskonzeptes ist eine Zeitprojektionskammer. Seit mehreren Jahren wird die Technologie einer solchen Kammer in einer internationalen Kollaboration (LCTPC) entwickelt. DESY ist seit Beginn ein wichtiger Teil dieser Gruppe.

Ein besondere Herausforderung für diese Kammer ist die zu erreichende Auflösung, die etwa eine Größenordnung besser sein soll als bisher in großen Kammern erreicht worden ist. Die konventionelle Auslese mit Proportionalkammern ist deshalb keine Option mehr. Stattdessen werden sogenannte *Micro Pattern Gas Detectors* (MPGD) auf ihre Eignung für eine TPC Auslese untersucht. Nachdem für mehrere Jahre Studien an kleinen Prototypen durchgeführt wurden, und damit die Machbarkeit der Auslese demonstriert worden ist, laufen im Moment Entwicklungsarbeiten für einen größeren Prototypen. Mit diesem Gerät, das vom DESY in Kollaboration mit etwa 10 anderen Instituten entwickelt und gebaut wird, soll untersucht werden, wie man eine größere Fläche mit MPGD abdeckt, wie das System sich unter realistischen Bedingungen verhält, und wie gut die erreichbare Auflösung ist.

DESY trägt hierzu einen im Leichtbau gefertigten Feldkäfig bei, baut die Kathode, und ist für die Infrastruktur des Testes zuständig, der ab Sommer 2008 im DESY Teststrahl stattfinden soll.

Die Entwicklung des Feldkäfigs wurde im Jahre 2007 abgeschlossen, und zum Bau an eine externe Firma übergeben. Vorausgegangen waren intensive Diskussionen mit der Firma, um den Bauprozess zu optimieren, und an die Bedürfnisse des Experimentes anzupassen. Mit der Lieferung des Feldkäfigs wird im ersten Quartal 2008 gerechnet. Ein wesentlicher Teil des Feldkäfigs ist eine Leiterfolie, die innen auf den Feldkäfig aufge-

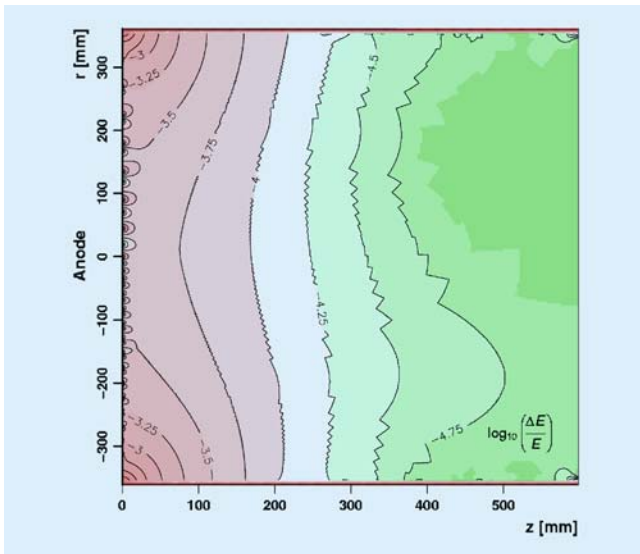


Abbildung 109: Ergebnis der Feldsimulation im Prototyp RPC, unter der Annahme, dass ein Fehler in der Wand aufgetreten ist.

bracht wird. Diese Folie stellt sicher, dass das elektrische Feld im Inneren der Kammer möglichst homogen ist. Ausführliche Simulationsrechnungen wurden durchgeführt, um die Homogenität des Feldes zu verstehen, und auch die Rolle möglicher Ungenauigkeiten im Bau des Feldkäfigs zu verstehen. In Abbildung 109 ist das simulierte Feld in der TPC gezeigt, unter der Annahme, dass eine Inhomogenität in der Wand auftritt.

Die fertige Kammer wird am DESY im Elektronen Teststrahl vermessen werden. Dazu wurde, unterstützt durch das EUDET Programm der Europäischen Union, einer der Strahlen mit einem supraleitenden Magneten (PCMAG) ausgerüstet. Dieser Magnet, der eine Leihgabe vom KEK ist, kann ein Feld von etwas über 1 T erreichen. In Kooperation mit dem CERN wurde das Feld des Magneten präzise vermessen. Ein System von mehreren Hall Probes kam dazu zum Einsatz, die mithilfe einer Mechanik das magnetische Volumen abtasteten.

Die Kontrolle des Testexperimentes benötigt eine leistungsfähige Kontrollsoftware und Auswertesoftware. Gemäss dem international akzeptierten Standard wird das LCIO Datenmodell und Input-output Paket verwendet, um die Daten zu speichern und zur Verarbei-

tung bereitzustellen. Als Kontrollsystem wurde das am DESY entwickelte DOOCS System ausgewählt. Dieses System bietet eine objekt-orientierte Programmierumgebung, die die Auslese einer Vielzahl verschiedener Geräte erlaubt, und hat ein weit entwickeltes graphisches Benutzerinterface, welches einfach konfigurierbar ist. Aufgrund der Client-Server Architektur ist eine Verbindung zur LCIO basierenden Datenverarbeitung einfach möglich. Neben der Auslese von Kontrollgrößen wie Druck, Temperatur und Gaseigenschaften soll dieses System auch zur Kontrolle der Hochspannungen und anderer wichtiger Betriebsparameter verwendet werden.

Physik Studien mit dem ILD Detektor

Für das Physikpotential des ILC sind neben den Parametern des Beschleunigers selbst die Eigenschaften der Experimente von entscheidender Bedeutung. Um die angestrebte Präzision zu erlangen, müssen nicht nur Technologien für die einzelnen Detektorkomponenten vorangetrieben werden, sondern diese auch zu einem optimierten Gesamtkonzept zusammengefügt werden. Im Rahmen des ILD Konzeptes arbeitet DESY intensiv an einer globalen Optimierung des Detektors. Ein wichtiges Ziel dabei war es, die Simulations- und Rekonstruktionssoftware soweit fertig zu stellen, dass eine große Zahl an Ereignissen für den ILD produziert werden kann. Diese Ereignisse werden dann in mehreren Studien eingesetzt, um das Potential des Detektors zu demonstrieren.

Für die eigentliche Detektoroptimierung ist es entscheidend, Messungen, die am später am ILC durchgeführt werden sollen, zu simulieren und die Genauigkeit, die mit den verschiedenen Detektorvarianten zu erzielen ist, zu vergleichen. Dabei müssen die Messungen so ausgewählt werden, dass möglichst alle Detektoraspekte abgedeckt werden. Eine entsprechende Liste von *benchmark*-Prozessen, anhand derer die verschiedenen Konzepte verglichen werden sollen, ist im Laufe des Jahres unter Mitwirkung der DESY-Gruppe erstellt worden.

Neben vielen softwaretechnischen Aufgaben wurde im Jahr 2007 damit begonnen Messungen, die bislang nur mit der parametrisierten Antwort des TESLA-Detektors simuliert wurden, auf die Analyse von Daten aus der Geant-basierten Simulation der neuen Detektorkonzepte vorzubereiten. Erste Ergebnisse einer modellunabhängige Suche nach Dunkler Materie wurden im Juni auf dem LCWS in Hamburg vorgestellt. Desweiteren wurde mit der Analyse von Higgsstrahlung, radiativer Neutralino-Produktion, $\tilde{\tau}$ -Produktion bei kleinen Massendifferenzen sowie der Polarisationsmessung aus W-Paarproduktion begonnen.

Unter Verwendung der schnellen Simulation wurde zusammen mit der Staatlichen Universität Moskau eine Studie von speziellen, dem Photon sehr ähnlichen Teilchen, zum Abschluss gebracht. Es konnte gezeigt werden, dass ein Linearbeschleuniger mit einer Schwerpunktsenergie von 1 TeV in der Lage ist, diese Art von Modellen zu untersuchen. In gleicher Weise wurden Studien zur Suche nach Teilchen, die in Modellen mit extra Dimensionen auftauchen, verfolgt. Hier wurde ein besonderes Augenmerk auf den Vergleich mit entsprechenden Studien am LHC gelegt. Es zeigt sich, dass der ILC hier entscheidende Vorteile gegenüber dem LHC aufweist.

Es ist geplant, im Jahre 2008 diese Analyseaktivitäten weiter auszuweiten.

Software Entwicklungen

Neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung des LCIO Datenmodells konzentrierten sich die Arbeiten am DESY in Jahre 2007 darauf, mehr Funktionalität in die Analyseumgebung MARLIN einzubauen, und eine funktionierende Rekonstruktionsskette für simulierte

Daten aufzusetzen. Dies wird sehr wichtig, wenn im Jahre 2008 das ILD Detektorkonzept einer weiteren globalen Optimierung unterzogen werden soll. Hierzu sollen unter wesentlicher Ausnutzung der DESY GRID Infrastruktur große Mengen an Daten simuliert und rekonstruiert werden, die dann von verschiedenen Gruppen für eine Detektoroptimierung verwendet werden.

Deutliche Fortschritte konnten auch in der Bereitstellung verschiedener Rekonstruktionsprogramme gemacht werden. Inzwischen steht im MARLIN Rahmen eine komplette Rekonstruktion zur Verfügung, mit Beiträgen aus mehreren Ländern. Die Rekonstruktion von Sekundärvertices wird mit dem am Rutherford Labor entwickelten ZVTOP Algorithmus durchgeführt. Das ursprünglich für TESLA entwickelte Programm zur Spurerkennung wird von DESY und dem MPI München gewartet und weiterentwickelt. Für die Ereignisrekonstruktion steht PandoraPFA zur Verfügung, welches in Cambridge entwickelt wird. Am DESY wird an einem weiteren Ereignisrekonstruktionsprogramm gearbeitet. Im Jahre 2007 wurde eine detaillierte Photonrekonstruktion fertiggestellt.

Daneben wird der LCIO/MARLIN Rahmen auch für die Aufzeichnung und die Analyse der Daten verwendet, die im HCAL Teststrahlexperiment aufgezeichnet wurden. Hierzu wurde erfolgreich eine Kette etabliert, in der Daten auf dem DESY Grid abgespeichert werden, und damit sehr schnell einer weiten Nutzergemeinschaft zugänglich gemacht werden. Gleichzeitig wurde zum ersten Mal das im Rahmen von MARLIN bereitgestellte Datenbank System zur Abspeicherung von Kontrolldaten im großen Stil eingesetzt. Trotz einiger anfänglichen Schwierigkeiten konnten damit mehrere hundert Millionen Daten erfolgreich aufgezeichnet werden.

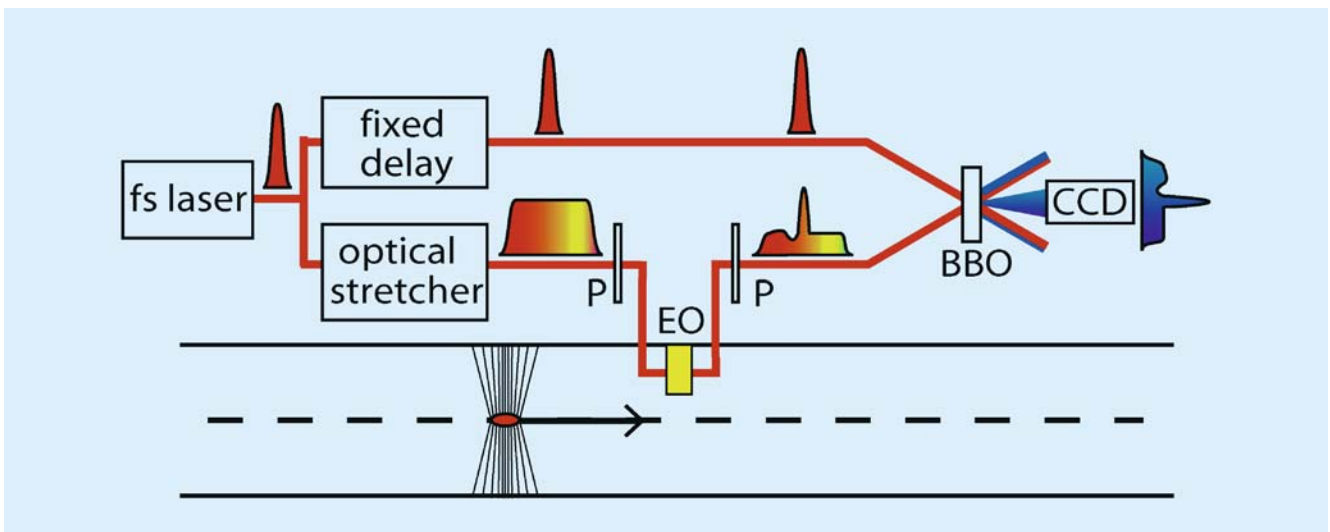


Abbildung 110: Schematische Darstellung der elektro-optischen Rekonstruktion der Ladungsverteilung in einzelnen Elektronenpaketen mit Hilfe der zeitlichen Codierung (electro-optic temporal decoding EOTD). Der verstärkte Laserpuls mit einer Energie von 1 mJ und einer Dauer von 30 fs wird in einen 30 fs langen Testpuls und einen auf 20 ps gestreckten Abtastpuls aufgespalten. Der Abtastpuls durchläuft einen Polarisator P und danach den im Strahlrohr befindlichen EO-Kristall, wo dem Laserpuls eine elliptische Polarisierung aufgeprägt wird, die proportional zur elektrischen Feldstärke des Bunches ist und den gleichen zeitlichen Verlauf hat. Diese elliptische Polarisierung wird im zweiten Polarisator in eine Intensitätsmodulation umgewandelt. Abtast- und Teststrahl werden im BBO-Kristall unter einem Kreuzungswinkel von 38° überlagert. Die UV-Strahlung aus der Überlagerung der beiden Strahlen verläuft in Richtung der Normalen des BBO-Kristalls. Sie ist dadurch räumlich von dem UV-Licht getrennt, welches von den Einzelstrahlen erzeugt wird.

Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet wie in den Vorjahren an hochauflösenden Strahldiagnosesystemen für FLASH und den XFEL. Zur Bestimmung der longitudinalen Ladungsverteilung in den komprimierten Elektronenpaketen werden drei Methoden angewandt: die elektro-optische (EO) Abtastung, die THz-Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung und die transversale Strahlablenkung mittels einer Hochfrequenz-Wanderwellenstruktur. 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. Im Jahr 2007 wurden umfangreiche Baumaßnahmen durchgeführt, die eine lange Unterbrechung des Messbetriebs am Beschleuniger notwendig machten. Unser Laser-Container wurde abgebaut und durch ein massives Gebäude neben dem FLASH-Tunnel ersetzt. Die Errichtung dieses Gebäudes mit Infrastruktur und Klimaanlage sowie der Wiederaufbau des Laserlabors und des THz-Spektrometers haben mehr als 8 Monate beansprucht.

Elektro-optische Experimente mit höchster Auflösung

In Zusammenarbeit mit Physikern des Infrarot-FEL-Labors FELIX in Nieuwegein (Niederlande), der Universitäten von Dundee und Aberty Dundee (Schottland) und des Daresbury Laboratory (UK) wurde ein EO-Experiment mit zeitlicher Codierung durchgeführt,

das Einzelbunch-Messungen mit hervorragender Zeitauflösung erlaubt. Das schon im Jahresbericht 2006 vorgestellte Schema wird zur Vollständigkeit noch einmal in Abbildung 110 gezeigt. Ein verstärkter Titan-Saphir-Laserpuls von 30 fs Länge wird in einen *Testpuls* (obere Spur) und einen *Abtastpuls* (untere Spur) aufgespalten. Der Abtastpuls wird mit einer Gitteranordnung auf 20 Picosekunden gestreckt. Im Gallium-Phosphid-Kristall wird die elektrische Feldverteilung des Bunches dem Abtastpuls aufgeprägt, der dabei eine zeitabhängige elliptische Polarisation erhält. In einem frequenz-verdoppelnden BBO-Kristall werden Abtast- und Testpuls unter einem Kreuzungswinkel von 38° überlagert. Die Zeitinformation des Abtastpulses setzt sich dabei in eine räumliche Verteilung der entstehenden UV-Strahlung um. Die UV-Strahlung wird mit einer bildverstärkenden CCD-Camera abgebildet. Hauptziel des Experiments war es, die Grenzen der Zeitauflösung elektro-optischer Methoden bei Einzelbunch-Messungen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden Vergleichsmessungen mit der transversal ablenkenden Wanderwellenstruktur (*transverse deflecting structure* TDS) durchgeführt, die eine hervorragende Auflösung von 20 fs bietet.

Ein Beispiel ist in Abbildung 111 zu sehen. Die EO- und TDS-Signale stimmen in der generellen Form überein, aber die bessere Zeitauflösung der TDS ist offensichtlich. Das TDS-Signal besitzt eine Struktur mit einem schmalen Hauptmaximum ($\sigma < 30$ fs) und einer Schulter, während der mit EOTD gemessene elektrische Feldpuls $E_b(t)$ nur ein einzelnes Maximum mit $\sigma \approx 60$ fs aufweist. Um diese Unterschiede zu verstehen, wurde der mit der Wanderwellenstruktur ermittelte zeitliche Verlauf des Pulses als Eingangsgröße einer

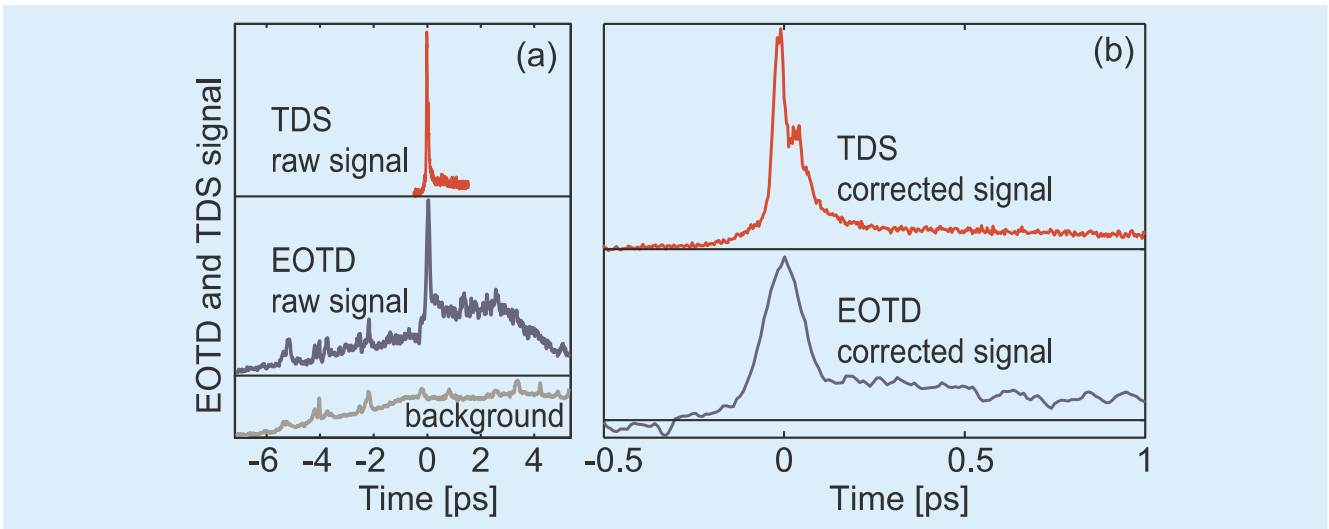


Abbildung 111: (a) Die obere Kurve zeigt das longitudinale Ladungsdichteprofil eines komprimierten Elektronenbunches, gemessen während des FEL-Betriebs mit der transversal ablenkenden Wanderwellenstruktur (TDS). Die untere Kurve zeigt den zeitlichen Verlauf des elektrischen Bunchfeldes $E_b(t)$ gemäss der Einzelschuss-EOTD-Messung. Der Kopf des Bunches liegt links. Für die EOTD-Daten wird auch der Untergrund ohne Elektronenstrahl gezeigt. (b) Die TDS- und EOTD-Signale nach Untergrundsubtraktion auf einer gedehnten Zeitskala.

Simulation des elektro-optischen Effekts in GaP verwendet. Der transiente elektrische Feldpuls des relativistischen Elektronen-Bunches entspricht dabei einem THz-Puls, der durch den GaP-Kristall wandert. Bei dieser Simulation spielen die physikalischen Eigenschaften des elektro-optischen Kristalls eine wesentliche Rolle, insbesondere die Frequenzabhängigkeit des komplexen Brechungsindex $n(\omega) + i\kappa(\omega)$ und des elektro-optischen Koeffizienten $r_{41}(\omega)$, die ein Resonanzverhalten bei der transversal-optischen (TO) Gitterschwingung bei 11 THz aufweisen. Der abtastende Titan-Saphir-Laserpuls propagiert mit der optischen Gruppengeschwindigkeit in Galliumphosphid

$$v_g = \frac{c}{n} \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right),$$

die bei 800 nm den Wert $v_g = 0.28c$ hat. Die Phasengeschwindigkeit von THz-Signalen hängt von deren Frequenz ab und ändert sich stark bei Annäherung an die TO-Resonanz des GaP-Kristalls bei 11 THz. Die THz-Phasengeschwindigkeit kann aus dem gemessenen frequenzabhängigen Brechungsindex von GaP berechnet

werden. Sie ist in Abbildung 112 aufgetragen. Bei niedrigen Frequenzen propagiert eine THz-Welle mit etwas höherer Geschwindigkeit als der Laserpuls, aber mit wachsender Frequenz sinkt die Phasengeschwindigkeit ab, und bei Annäherung an die TO-Resonanz von GaP bei 11 THz findet man eine starke Fehlanpassung der Geschwindigkeiten. Die Konsequenz davon ist, dass die sehr hochfrequenten Fourierkomponenten des elektrischen Feldpulses nicht mehr korrekt abgetastet werden können. Als quantitatives Maß der Fehlanpassung definiert man eine geometrische Ansprechfunktion

$$\begin{aligned} G(\omega) &= \frac{1}{d} \int_0^d \left[\int e^{i[kz - \omega t]} e^{-\alpha z} \delta(z/v_g - t) dt \right] dz \\ &= \frac{1}{d} \int_0^d \exp \left(\frac{i\omega z}{v_{ph}(\omega)} - \frac{i\omega z}{v_g} \right) e^{-\alpha z} dz. \end{aligned}$$

Hierbei ist $\alpha(\omega) = \omega\kappa(\omega)/c$ der Abschwächungskoeffizient. Die geometrische Ansprechfunktion $G(\omega)$ hängt von der Dicke d des EO-Kristalls ab. Sie ist in Abbildung 112 als Funktion der Frequenz aufgetragen. Die geometrische Ansprechfunktion ist ungefähr

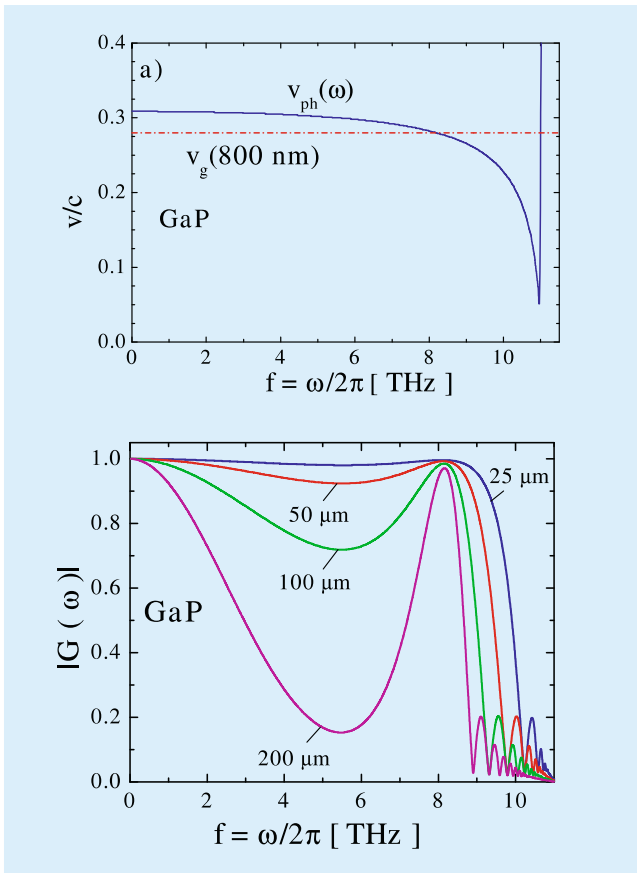


Abbildung 112: Oben: Die Phasengeschwindigkeit von GaP als Funktion der Frequenz im THz-Bereich. Die optische Gruppengeschwindigkeit bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ wird durch die strichpunktierte Linie gezeigt. Die Geschwindigkeiten sind auf c normiert. Unten: Absolutbetrag der geometrischen Ansprechfunktion von GaP für Kristalldicken von $25 \text{ }\mu\text{m}$, $50 \text{ }\mu\text{m}$, $100 \text{ }\mu\text{m}$ und $200 \text{ }\mu\text{m}$.

Eins bei niedrigen Frequenzen, wo gute Anpassung der Geschwindigkeiten vorliegt, sinkt aber auf Null ab für Frequenzen um 10 THz, bei größeren Kristalldicken sogar schon früher. Um hohe Frequenzen erfassen und somit sehr kurze Bunche rekonstruieren zu können, müssen GaP-Kristalle mit einer Dicke von weniger als $100 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet werden.

In der EO-Literatur wird üblicherweise eine elektrooptische Ansprechfunktion eingeführt, die auch noch den frequenzabhängigen Amplituden-Transmissionskoeffizienten $A_{tr}(\omega)$ und den elektro-optischen Koeffi-

zienten $r_{41}(\omega)$ umfasst

$$\begin{aligned} G_{EO}(\omega) &= G(\omega) \cdot A_{tr}(\omega) \cdot r_{41}(\omega) \\ &= G(\omega) \cdot \frac{2}{1 + n(\omega) + i\kappa(\omega)} \cdot r_{41}(\omega). \end{aligned}$$

Die im doppelbrechenden EO-Kristall erzeugte Phasenverzögerung Γ zwischen den beiden orthogonalen Polarisationskomponenten des Ti:SA-Laserstrahls ist durch folgenden Ausdruck gegeben

$$\Gamma(\tau) = \frac{2n_0^3 d}{\lambda_0} \Re \left\{ \int_0^\infty e^{-i\omega\tau} F_E(\omega) G_{EO}(\omega) d\omega \right\},$$

wobei τ die frei einstellbare Zeitdifferenz zwischen Laserpuls und Elektronenbunch ist.

In Abbildung 113 wird die vorhergesagte Form des EO-Signals mit dem gemessenen EOTD-Signal verglichen. Die Übereinstimmung ist perfekt. Dies ist unseres Wissens die erste absolute Pulsformbestimmung von THz-Pulsen mit Hilfe des elektro-optischen Effekts. Der einzige Unterschied zwischen Simulation und EO-Experiment ist eine höhere Intensität im Schwanz des gemessenen Signals (Zeiten oberhalb von 0.15 ps). Dies ist auf *wake fields* zurückzuführen, die in der Wanderwellenstruktur TDS erzeugt werden und

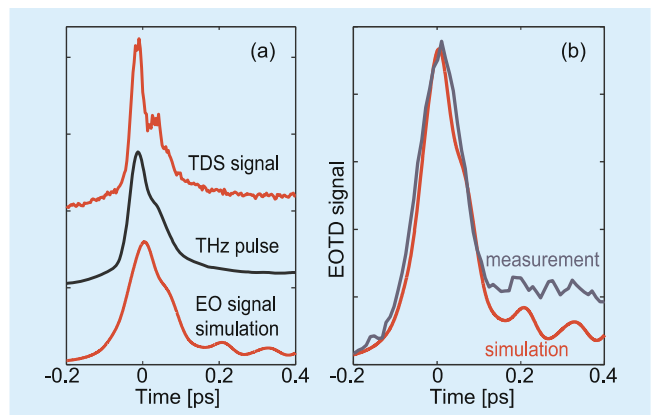


Abbildung 113: (a) Die obere Kurve zeigt das Zeitprofil eines komprimierten Elektronenbunches in FLASH wie es mit der Wanderwellenstruktur TDS gemessen wird. Die Zeitauflösung der TDS beträgt 20 fs . Die untere zeigt das simulierte EO-Signal. (b) Vergleich des simulierten EO-Signals mit dem im EOTD-Aufbau gemessenen Signal.

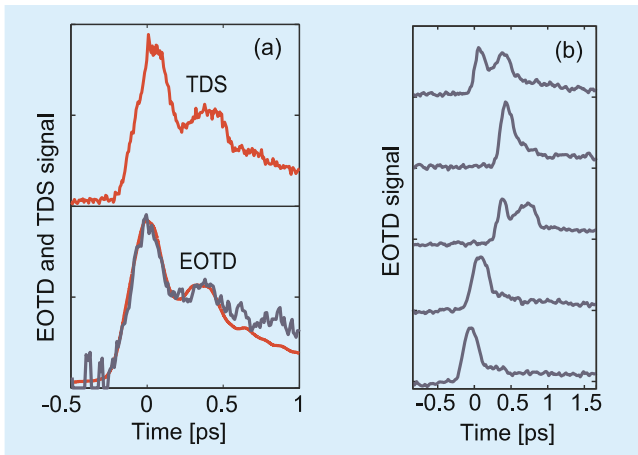


Abbildung 114: (a) TDS- und EOTD-Signale von längeren Bunchen mit Doppelppeak-Struktur, die man durch Verstimmung des Bunchkompressions-Systems erzeugen kann. (b) Sequenz von EOTD-Signalen bei Abschaltung des Feedbacks im Bunchkompressions-System. Die beobachteten Schwankungen in der Form der Bunche verschwinden, sobald das Feedbacksystem eingeschaltet wird und die Hochfrequenzphase im ersten Beschleunigungsmodul stabilisiert.

dem Elektronenbunch folgen. In diesem Experiment wurde die weltweit beste Auflösung bei der Analyse ultrakurzer Elektronenbunche mit elektro-optischen Methoden erzielt. Die Zeitaufösung liegt unter 50 fs (rms) und ist um einen Faktor 2 besser als bei der spektralen Codierung.

Die elektro-optische Methode ist durch die Gitterschwingungen des EO-Kristalls begrenzt: nur die Frequenzkomponenten unterhalb der Gitterresonanz (11 THz in GaP, 5.3 THz in ZnTe) können zur Rekonstruktion des Zeitprofils der Bunche genutzt werden. Bunche mit $\sigma \leq 30$ fs erscheinen in der EO-Messung auf etwa 55 fs gestreckt. Der TDS-Aufbau kann diese Bunche formtreu wiedergeben, hat aber zwei große Nachteile: die TDS ist „destruktiv“, d. h. der analysierte Bunch wird so stark verschmiert, dass er kein FEL-Licht mehr erzeugen kann. Zweitens benötigt die TDS mit OTR-Schirm sehr viel Platz im Beschleuniger, und zwar umso mehr, je höher die Energie ist. Aus diesem Grund werden die raumsparenden und

nicht-destruktiven EO-Experimente auch am XFEL eine wichtige Rolle spielen.

Bei längeren Bunchen ($\sigma > 90$ fs) ist die EO-Rekonstruktion absolut formtreu. Um dies zu zeigen, wurden Messungen mit nicht optimal komprimierten Bunchen gemacht, die ein Doppelmaximum haben. Hier stimmen TDS und EOTD sehr gut überein, siehe Abbildung 114a. Die Benutzung des EOTD-Aufbaus als Online-Monitor für die Form einzelner Bunche wird in Abbildung 114b demonstriert.

Bau eines Faserlasers für einen elektro-optischen Zeitprofilmonitor

Der Standard-Laser für Messungen im Femtosekundenbereich ist der Titan-Saphir-(Ti:Sa)-Laser. Dieser Lasertyp ist kostspielig und wartungsanfällig und daher kaum für einen Dauerbetrieb am Beschleuniger geeignet. Es besteht ein großes Interesse an einem in Realzeit arbeitenden Monitor, der das zeitliche Profil der Elektronenbunche kontinuierlich kontrolliert, damit Fehlfunktionen des Bunch-Kompressionssystems von FLASH sofort nachgewiesen werden können. Zu diesem Zweck ist ein Ytterbium-dotierter Faserlaser entwickelt worden, der bei einer Wellenlänge von

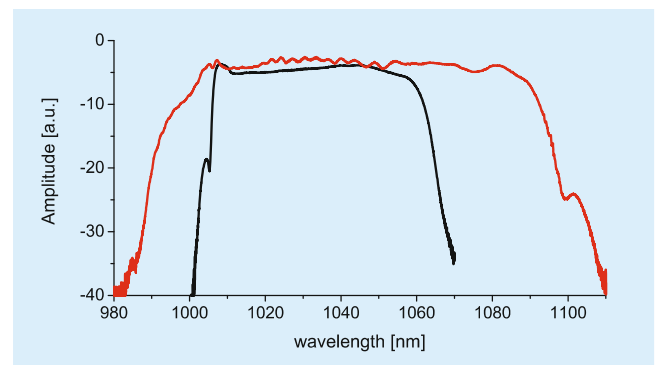


Abbildung 115: Optisches Spektrum des Ytterbium-dotierten Faserlasers (schwarze Kurve) und das Spektrum nach Verstärkung und spektraler Verbreiterung (rote Kurve).

1030 nm arbeitet. Faserlaser sind sehr robust und bestens für Dauerbetrieb geeignet. Spezielle Anstrengungen wurden unternommen, um eine große Bandbreite von 100 nm zu realisieren, siehe Abbildung 115. Die große Bandbreite ist optimal für die Methode der spektralen Codierung und erlaubt Einzelschuss-Messungen mit guter Zeitauflösung. In Gallium-Phosphid GaP ist die THz-Phasengeschwindigkeit besser an die optische Gruppengeschwindigkeit bei einer Wellenlänge von 1030 nm angepasst als an die optische Gruppengeschwindigkeit bei der Ti:Sa-Wellenlänge von 800 nm. Der Faserlaser erlaubt daher die Verwendung dickerer GaP-Kristalle, wodurch sich das Signal-Rauschverhältnis verbessern lässt.

Messungen der transversalen Emittanz

Die Verstärkung eines Freie-Elektronen-Lasers hängt kritisch davon ab, dass der Elektronenstrahl im gesamten Undulator einen kleinen Querschnitt hat. Um eine hohe Effizienz im SASE-Prozess zu erzielen, ist ein fein kollimierter Strahl mit hoher Ladungsdichte erforderlich. Die Emittanz ist ein Maß für die vom Strahl eingenommene Fläche im Phasenraum und kann als Produkt der transversalen Ausdehnung und Divergenz des Strahls interpretiert werden. Eine kleine Emittanz bedeutet, dass man einen kleinen Strahlquerschnitt über eine lange Distanz realisieren kann, was sehr wichtig in den langen Undulatomagneten eines UV- oder Röntgen-FEL ist. Die normierte Emittanz

$$\varepsilon_n = \frac{p}{m_e c} \varepsilon \approx \gamma \varepsilon$$

ist unabhängig von der Teilchenenergie. Um die Bedeutung einer kleinen Emittanz zu demonstrieren, zeigen wir in Abbildung 116 die berechnete Verstärkungslänge in FLASH als Funktion der Emittanz. Die mit der dreidimensionalen FEL-Theorie berechnete Verstärkungslänge wächst rapide mit der normierten Emittanz an. Es ist daher von allergrößter Bedeutung, eine kleine Emittanz zu erzielen. Der bei FLASH er-

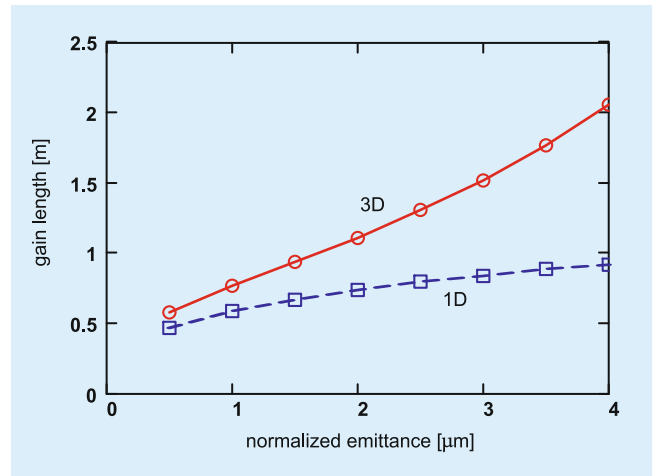


Abbildung 116: Die berechnete Verstärkungslänge in FLASH als Funktion der normierten Emittanz in der eindimensionalen (1D) und der dreidimensionalen (3D) FEL-Theorie.

reichte Wert $\varepsilon_n = 2 \mu\text{m}$ stellt zurzeit eine technisch realisierbare untere Grenze dar.

Die mittlere Emittanz vieler Bunche

Emittanzmessungen werden routinemässig in zwei Diagnosektionen von FLASH durchgeführt. Die zweidimensionalen Intensitätsprofile des Strahls werden mit

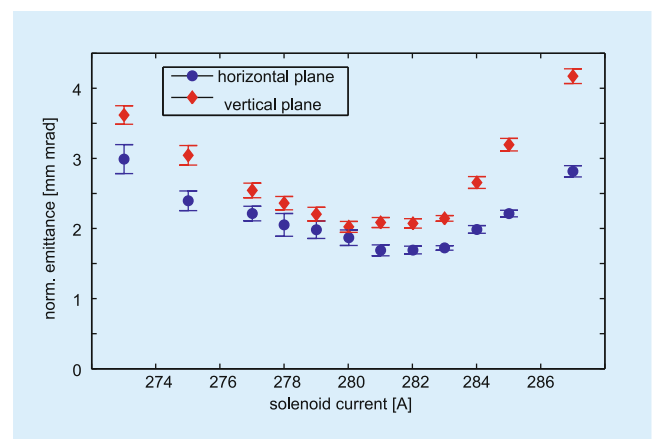


Abbildung 117: Die normierte horizontale bzw. vertikale Emittanz als Funktion des Solenoidstroms in der Elektronenquelle.

CCD-Cameras an vier OTR-Stationen aufgenommen (OTR: *optical transition radiation*). Aus den bekannten Strahltransfermatrizen zwischen den OTR-Schirmen kann die Teilchenverteilung im Phasenraum mit tomographischen Methoden berechnet und die Emittanz bestimmt werden. Abbildung 117 zeigt die normierte horizontale und vertikale Emittanz als Funktion des Stroms im Solenoidmagneten der Elektronenquelle. Die Emittanzen sind über viele aufeinander folgende Bunche sowie über die longitudinale Ladungsverteilung innerhalb der Bunche gemittelt.

Scheiben-Emittanz

Für den SASE-FEL ist nicht die mittlere Emittanz des gesamten Bunches von Interesse, sondern nur die Emittanz in der Hochstrom-Region am Bunchkopf. Die Standard-Emittanzmessmethoden sind außerstande, diesen wichtigen Parameter zu bestimmen. Die Wanderwellenstruktur TDS ist ein einzigartiges Messgerät, mit dem die Emittanz in einzelnen Zeitscheiben ermittelt werden kann. Die sogenannte Scheiben-Emittanz (*slice emittance*) wird in Abbildung 118 gezeigt. Sie hat den Wert $\epsilon_n \approx 10\mu\text{m}$ im Kopf des Bunches und sinkt ab auf weniger als $4\mu\text{m}$ im Schwanz. Dies ist ein überraschendes Resultat, da eine Emittanz von $\epsilon_n \approx 10\mu\text{m}$ viel zu groß ist, um die gemessene hohe Verstärkung im FLASH-FEL zu erklären. Die Komplexität der Daten wird in Abbildung 119 illustriert, wo die rekonstruierte horizontale Phasenraumverteilung im Bunchkopf gezeigt wird. Man beobachtet große Abweichungen von der idealen elliptischen Verteilung. Die langen

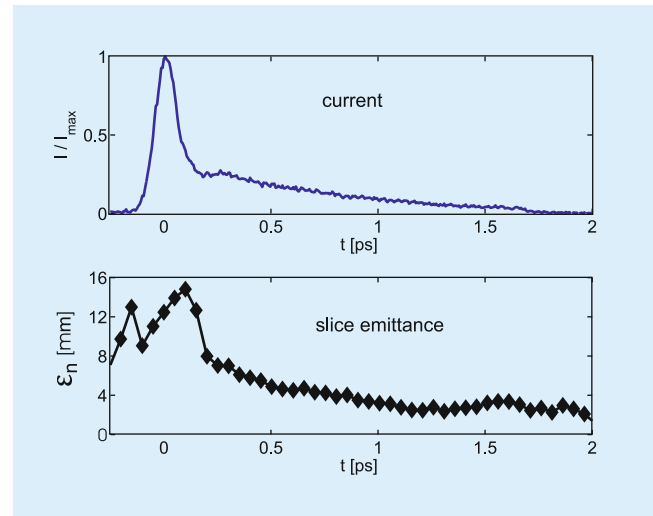


Abbildung 118: Der normierte Strahlstrom I/I_{max} und die normierte horizontale Emittanz als Funktion der zeitlichen Position im Bunch. Der Kopf des Bunches befindet sich links. Nur im Kopfbereich ist die Ladungsdichte groß genug, um hohe FEL-Verstärkung zu erhalten. Der Maximalstrom beträgt in dieser Messung $I_{max} = 1.8\text{ kA}$.

Ausläufer, die sich weit über den zentralen elliptischen Bereich hinaus erstrecken, liefern einen erheblichen Beitrag zu der Emittanz von $10\mu\text{m}$ im Bunchkopf, tragen aber wegen ihrer geringen Ladungsdichte nicht zur FEL-Verstärkung bei. Wenn man sich auf den zentralen elliptischen Bereich beschränkt (siehe Abbildung 120), ergibt sich eine Emittanz von wenigen μm bei einem Maximalstrom von 1.4 kA . Dieser zentrale Bereich ist in der Tat für die FEL-Verstärkung verantwortlich.

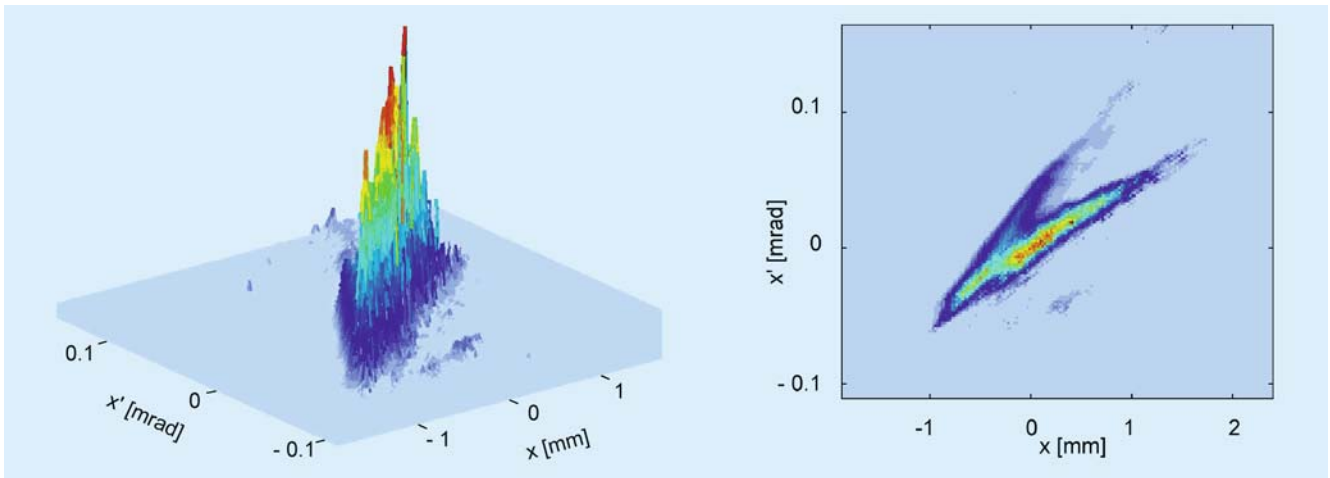


Abbildung 119: Die rekonstruierte horizontale Phasenraumverteilung in Bunchkopf. Die langen Ausläufer, die sich weit über den zentralen elliptischen Bereich hinaus erstrecken, sind die Hauptursache für die große Emittanz im Kopfbereich des Bunches, die in Abbildung 118 zu sehen ist.

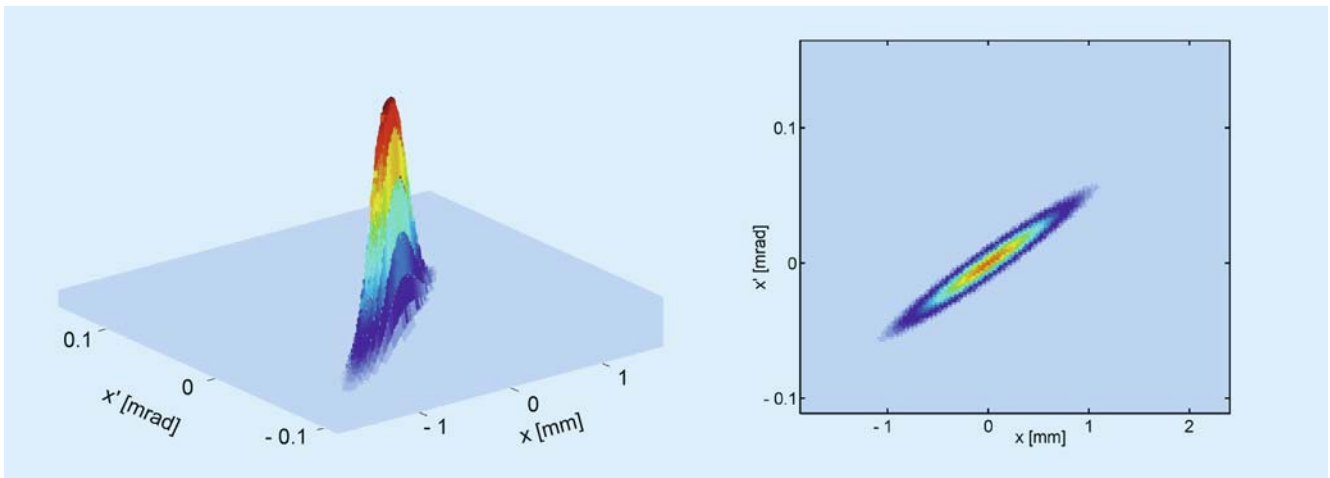


Abbildung 120: Die zentrale elliptische Phasenraumverteilung im Bunchkopf. Der Maximalstrom beträgt 1,4 kA, die normierte Emittanz ist $\epsilon_n = 4 \mu\text{m}$.