



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

# International Linear Collider

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

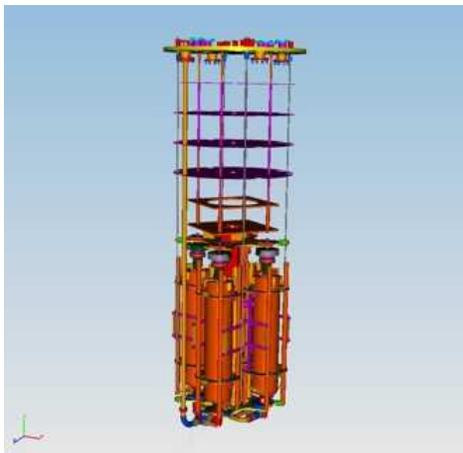


Abbildung 87: CAD Skizze des vertikalen Inserts zum Transport von 4 Resonatoren

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

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



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

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

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

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

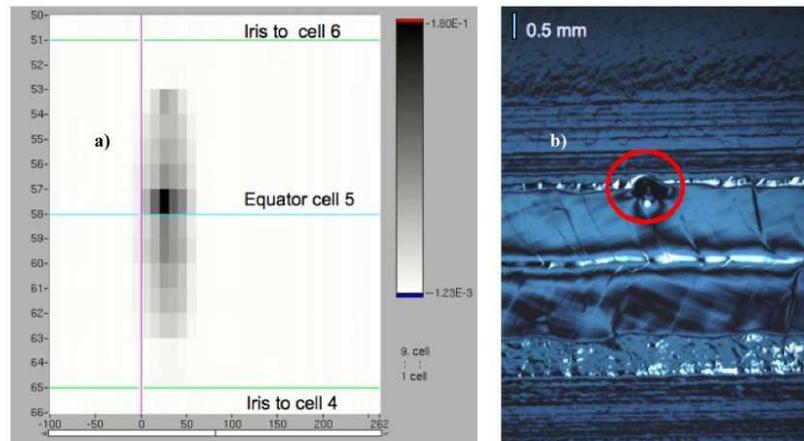


Abbildung 89: Temperaturprofil beim Quench des Resonators und b) die Strukturen, die an gleicher Stelle auf der Oberfläche zu erkennen ist.

und den Leistungskopplern; Italien fertigt die mechanischen Tuner.

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

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

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

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

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

## Studien zur Instrumentierung am ILC

### Messung der Strahlenergie am ILC

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

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

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

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

Yerevan, wurde ein Experimentierorschlag entwickelt und publiziert.

### Polarisation am ILC

#### Polarisierte Positronenquelle

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

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

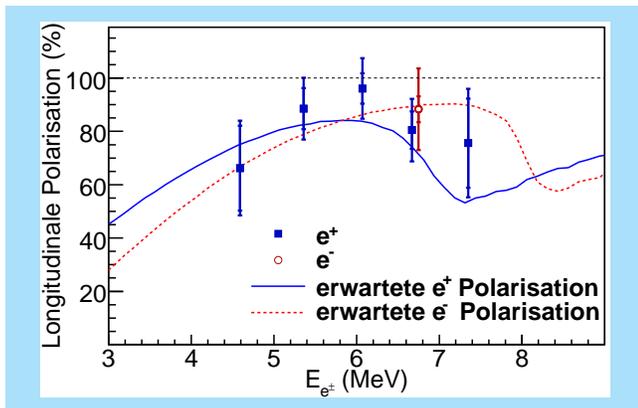


Abbildung 90: Die Polarisation von Positronen und Elektronen gemessen mit dem Comptontransmissionspolarimeter am E166 Experiment in Abhängigkeit von ihrer Energie. Die Energie wurde mit einem Doppeldispersionspektrometer eingestellt. Die erwartete Polarisation, berechnet mit Geant ist ebenfalls angegeben.

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

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

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

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

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

#### Geant4: Validierung und Verbesserung

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

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

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

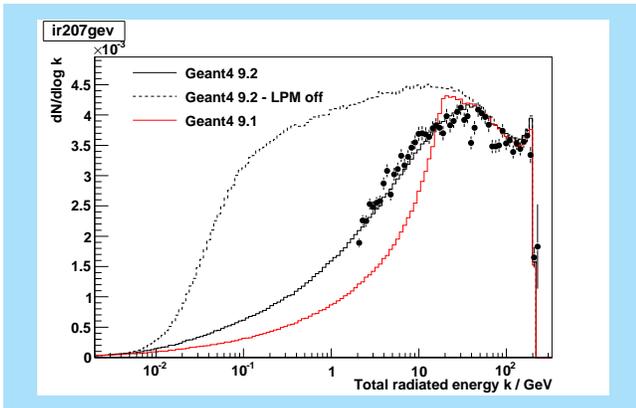


Abbildung 91: Bremsstrahlungsspektrum von 207 GeV Elektronen in einem 0.128 mm dicken Iridium Target. Die volle Linie beruht auf neuen Geant4 v.9.2 Simulationen mit LPM Effekt und stimmt gut mit den Daten überein. Zum Vergleich ist auch das Bremsstrahlungsspektrum mit der Version Geant4 v.9.1 gezeigt.

## Messung der Polarisation am ILC

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

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

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

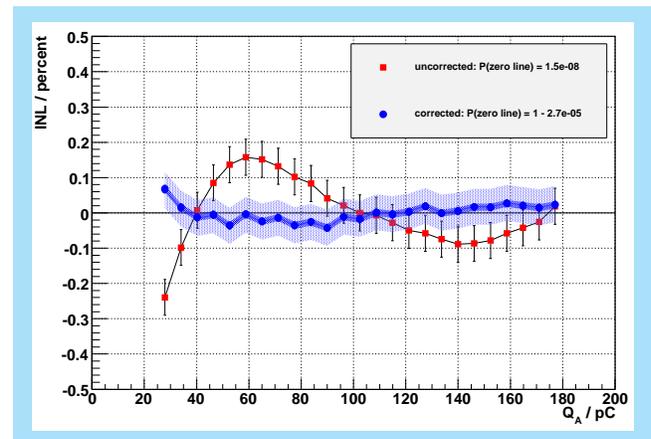


Abbildung 92: Integrierte Nichtlinearität eines Hamamatsu R5900U-03-M4 Photodetektors vor und nach der Korrektur mit einer einige Tage vorher aufgezeichneten Referenzmessung.

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

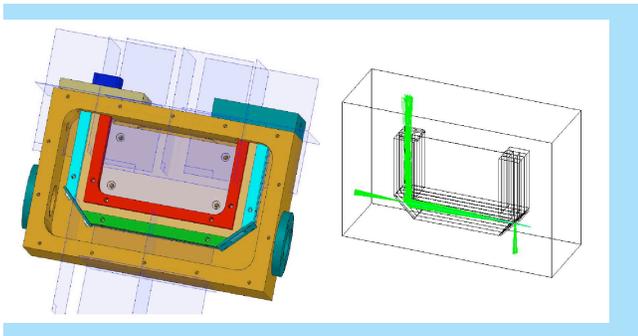


Abbildung 93: Prototyp für Polarimeter-Detektor: CAD-Zeichnung und Simulation eines durchfliegenden Elektrons und seiner Cherenkov-Strahlung.

## Detektorentwicklung für einen Linearbeschleuniger

### Das ILD Detektor Konzept

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

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

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

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

Ein Bild des Detektors ist in Abbildung 94 gezeigt.

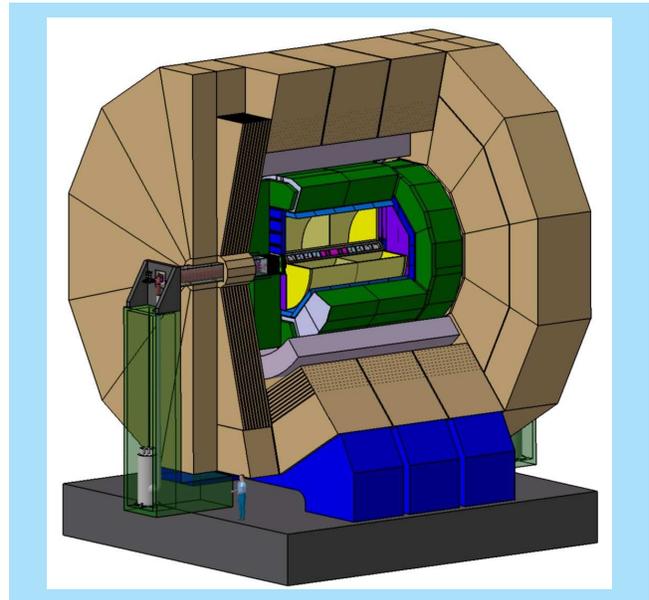


Abbildung 94: Dreidimensionale Ansicht des ILD Detektors

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

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

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

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

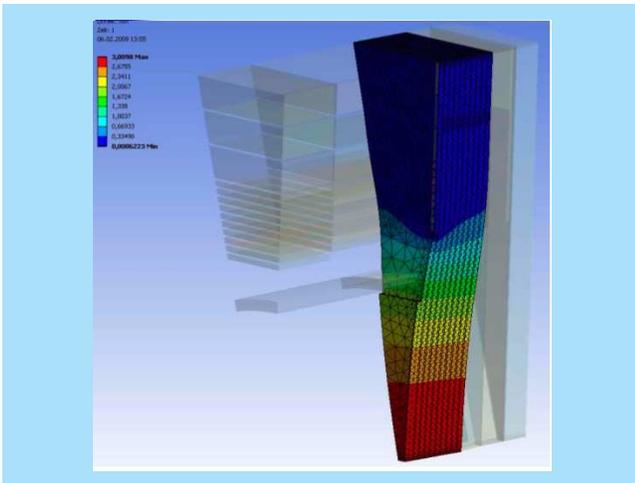


Abbildung 95: *Magnetische Verformung eines Segments der Endkappe des Eisenjochs.*

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

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

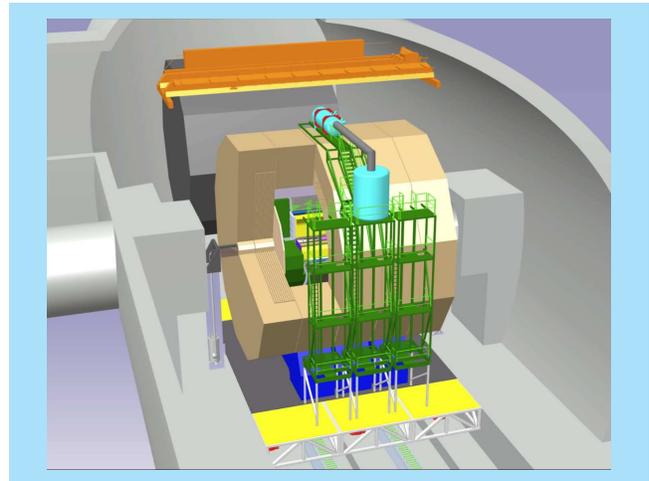


Abbildung 96: *Der IL-Detektor in der unterirdischen Detektorhalle.*

## Vertex Detektor

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

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

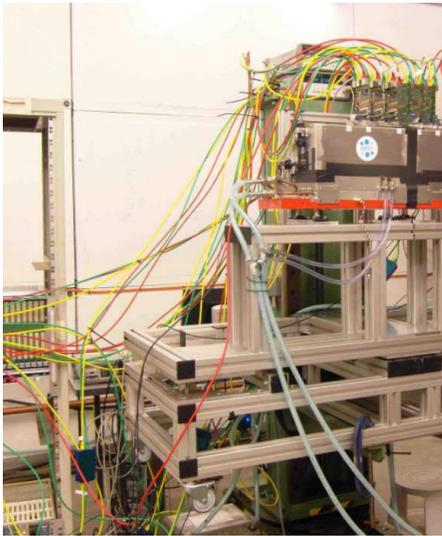


Abbildung 97: Das EUDET Teleskop am DESY Teststrahl.

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

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

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

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

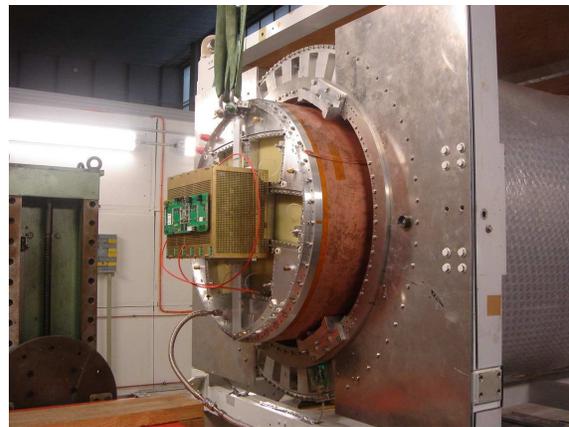


Abbildung 98: Photo des fertigen TPC Feldkäfigs beim Einschieben in den Magneten am DESY.

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

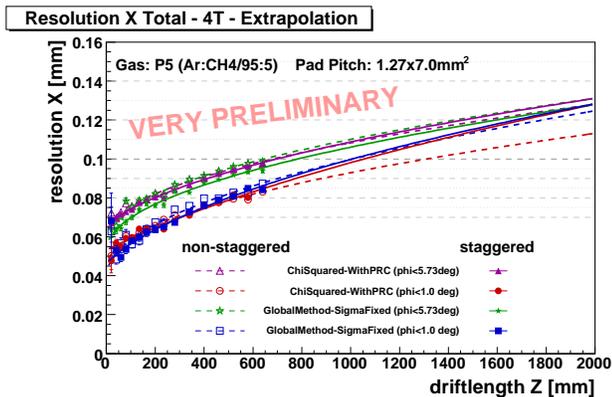


Abbildung 99: Gemessene Auflösung in der TPC, und Extrapolation auf die volle Driftlänge in der TPC.

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

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

## Hadronisches Kalorimeter

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

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

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

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

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



Abbildung 100: Installation des CALICE-Aufbaus am Fermilab

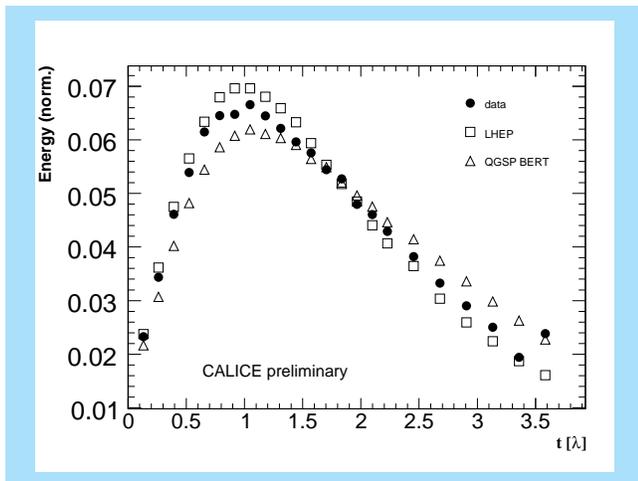


Abbildung 101: Vergleich des am CERN gemessenen HCAL Schauerprofils mit Geant4-Simulation.

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

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

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

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

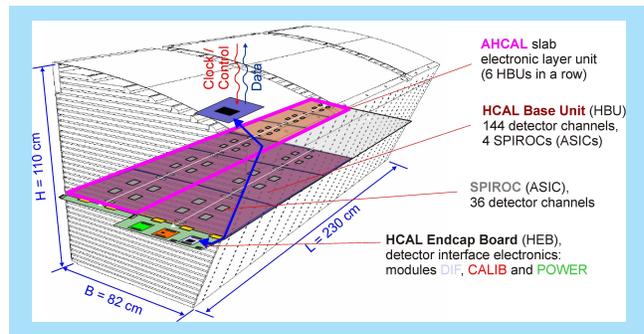


Abbildung 102: Design eines halben Sektors des hadronischen Kalorimeters.

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

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

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

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

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

## Instrumentierung der Vorwärtsrichtung

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

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

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

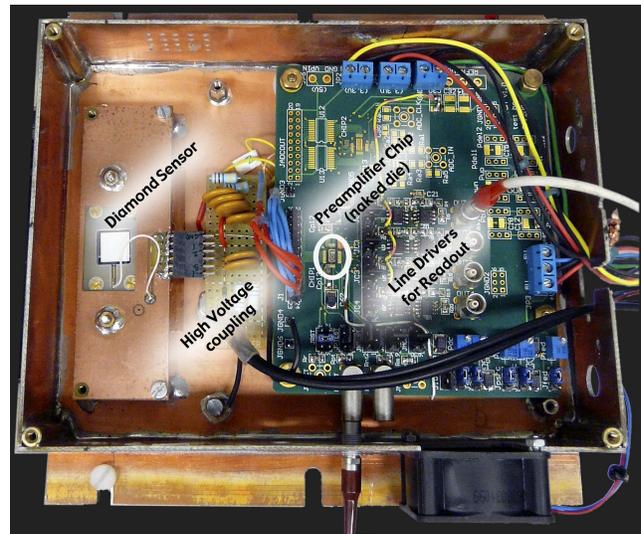


Abbildung 103: Prototyp eines Auslesechips für die Vorwärtskalorimeter.

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

## Software

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

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

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

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

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

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

## Physikalische Studien

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

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

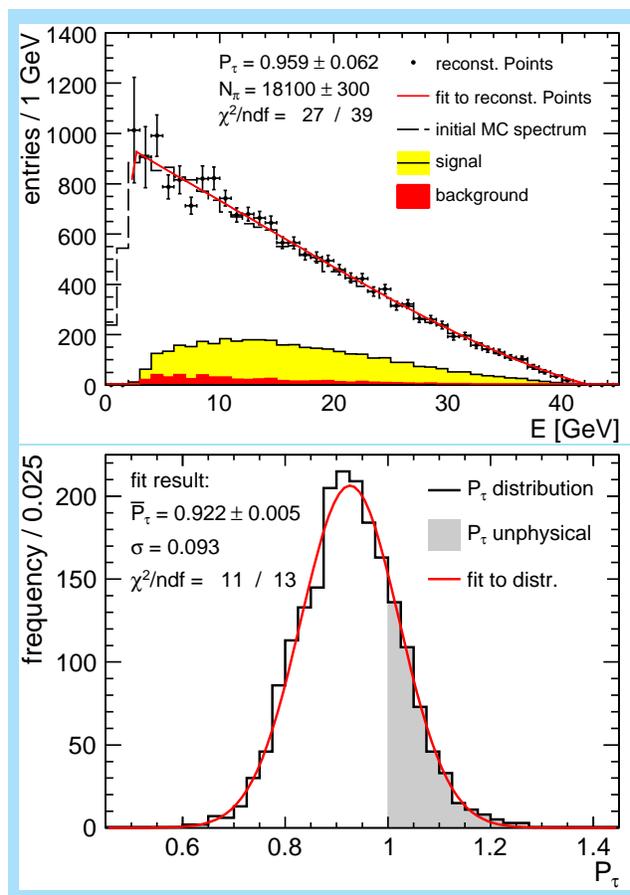


Abbildung 104: (a) Pion Impulsspektrum aus  $\tau$ -Zerfällen. Aus einem Fit an die Verteilung kann auf die mittlere Polarisation der  $\tau$ -Mesonen geschlossen werden. (b) Verteilung der Polarisation in einer Monte Carlo Studie, in der viele Experimente simuliert wurden. Die Breite der Verteilung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

im Licht der zu erwartenden LHC-Resultate zu präzisieren.

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

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

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