

Abbildung 55: *Simuliertes Ereignis im Kalorimeter Prototypen für den ILC. Drei Detektoren – ECAL, HCAL und tail catcher, sind hintereinander angeordnet. Ein 10 GeV Pion trifft auf die Frontseite des Prototypen auf und wird im Kalorimeter absorbiert. Gezeigt werden die Monte Carlo Teilchen (Linien) und die rekonstruierten Treffer in den Kalorimetern (Punkte).*

# Forschung für den International Linear Collider

**ILC-Projektgruppe:** Mitglieder und Gäste der Gruppen aus M (DESY, Hamburg), LC (DESY, Zeuthen – Leiter: A. Stahl (bis Okt. 2004); H.J. Schreiber (ab Okt. 2004)) und dem FH-Bereich (DESY, Hamburg), darunter insbesondere die Gruppe FLC (Leiter: T. Behnke), sowie etwa 66 Institute aus 17 Ländern (im Rahmen der ECFA Studie).

**ILC-Projektleiter:** T. Behnke, E. Elsen und N. Walker, DESY

Das Jahr 2004 war für den  $e^+e^-$ -Linearbeschleuniger entscheidend von der Arbeit des International Technology Recommendation Panel (ITRP) geprägt. Das von ICFA eingesetzte ITRP begann seine Arbeit Ende 2003 und verkündete nach einer Serie von Treffen in Asien, Europa und Amerika auf der Internationalen Konferenz für Hochenergiephysik (ICHEP) in Peking bereits im August 2004 seine Entscheidung. Danach soll der zukünftige Linearbeschleuniger mit der im Rahmen der TESLA Kollaboration am DESY federführend entwickelten supraleitenden Beschleunigertechnologie im L-Band betrieben werden. Die Verlässlichkeit dieser Technologie wurde vom Panel als höher eingestuft als die X-Band Beschleunigung bei höheren Frequenzen (NLC/GLC-Design). Die Notwendigkeit für eine frühe Technologieentscheidung, wie auch die Entscheidung selbst, wurde von allen Experten anerkannt. Die Einstimmigkeit der Vorgehensweise wurde bereits im November, auf dem ersten weltweiten Treffen der Maschinenexperten, eindrucksvoll demonstriert. Der Name „International Linear Collider“ (ILC) wurde für das gemeinsame Projekt vereinbart.

Gruppen des DESY waren an zentraler Stelle im Entscheidungsprozess des ITRP beteiligt und stellten dem Komitee Materialien zum kalten Beschleuniger und zum Experimentieren an einer kalten Maschine zur Verfügung. Im Sommer 2004 wurde eine von der Europäischen Union geförderte und von DESY koordinierte Design-Studie (EUROTeV) zum Linearbeschleuniger bewilligt. Diese Studie vereint

28 Labors in Europa bei der Forschung zur Optimierung des Beschleunigers und der Weiterentwicklung des Projekts zur Entscheidungsreife und hat bei einer Laufzeit von drei Jahren einen finanziellen Rahmen von mehr als 27 Millionen €. Gleichfalls im November des Jahres wurde bei DESY eine ILC-Projektgruppe installiert, die bereichsübergreifend, die Tätigkeiten für den ILC bei DESY koordiniert. Darin eingeschlossen sind die in den Vorjahren begonnenen Arbeiten zur Entwicklung neuer, anspruchsvoller Detektortechnologien und verschiedene Studien zur Physik am ILC. Diese Untersuchungen fanden im Rahmen der ECFA Studie zur Physik und dem Detektor an einem Linearbeschleuniger statt.

Im Folgenden werden die Aktivitäten zu diesem Thema für die beiden DESY Standorte Hamburg und Zeuthen zusammengefasst und erst am Ende des Abschnitts nach Standorten aufgeschlüsselt.

## Physikstudien für den ILC

Physikstudien für den ILC konzentrieren sich auf folgende Themen:

- LHC/ILC-Arbeitsgruppe
- Präzisionsanalysen von supersymmetrischen Modellen
- Präzisionsanalysen von Higgs-Bosonen

- Einfluss der Zeitstruktur der Linear Collider Strahlen auf die Physikanalyse

In der seit 2003 laufenden ECFA-Studie spielt die DESY Gruppe weiterhin eine führende Rolle. Auf dem internationalen Linear Collider Workshop LCWS'04 in Paris wurden zahlreiche Beiträge der Gruppe vorgestellt.

Die Zielsetzungen der obengenannten Themenbereiche sowie aktuelle Beiträge der Gruppe werden im Folgenden erläutert.

### LHC/ILC-Arbeitsgruppe

Ziel der internationalen LHC/ILC-Arbeitsgruppe ist es, an konkreten Beispielen zu untersuchen, wie sich der LHC und der ILC gegenseitig ergänzen. Hierbei arbeiten Experimentalphysiker am ILC und am LHC sowie Theoretiker eng zusammen. Der erste Bericht dieser Arbeitsgruppe ist 2004 erschienen.

**Higgs-Boson:** In supersymmetrischen Modellen unterscheidet sich das leichteste neutrale Higgs-Boson häufig nur geringfügig von dem des Standardmodells. Die schwereren supersymmetrischen Higgs-Bosonen liegen oft außerhalb der kinematischen Reichweite des ILC. Da auch am LHC diese Teilchen nicht immer beobachtet werden können, ist es besonders wichtig, indirekte Information über die Massen der schweren neutralen Higgs-Bosonen, insbesondere über das CP-ungerade  $A^0$ , zu erhalten. In früheren ILC-Studien wurde gezeigt, dass die Verzweigungsverhältnisse des leichten Higgs-Bosons  $h$  vom Massenwert  $M_A$  des  $A^0$  abhängen. Allerdings hängt diese Masse auch vom Spektrum der supersymmetrischen Teilchen, insbesondere der dritten Generation, ab. Unter diesen sind die Squarks am einfachsten am LHC zu beobachten. Weiterhin spielt die genaue Messung der Top-Masse am ILC eine wichtige Rolle. In einer neuen Studie, die von Physikern der Gruppe FLC zusammen mit dem Weizmann Institut in Israel, der TU München und dem IPPP in Durham durchgeführt wurde, wurde nun erstmals das Zusammenspiel der verschiedenen sensitiven Observablen untersucht. Nur durch Verwendung der Messungen von ILC und LHC zusammen lässt sich die  $A^0$ -Masse einschränken. Für eine  $A^0$ -Masse von 800 GeV erreicht man eine Genauigkeit von etwa 30% (siehe Abb. 56).

Im Jahr 2004 konzentrierten sich die Studien auf Fragen, ob und wie gut es möglich ist, die verschiedenen neutralen Higgs-Bosonen des Minimalen Supersymmetrischen Standardmodells (MSSM) im Regime intensiver Kopplungen zu erkennen und deren Eigenschaften zu vermessen. Im Vergleich mit dem LHC ist ein Linear Collider eindeutig besser zur Bestimmung des Profils solcher Teilchen geeignet. Insbesondere ist eine Differenzierung der drei möglichen neutralen Higgs-Bosonen beim ILC möglich und ihre Massen sind mit Genauigkeiten von 100 bis 500 MeV bestimmbar.

**SUSY:** Die Studien zu Präzisionsanalysen supersymmetrischer Modelle wurden in 2004 weiter fortgeführt. So ist es erstmals gelungen, zu zeigen, dass die Parameter des MSSM aus den Observablen von ILC und LHC in einem globalen Fit extrahiert werden können. Im Gegensatz zu früheren Studien zur Parameterbestimmung wurden Korrekturen höherer Ordnung berücksichtigt. Diese führen dazu, dass sich die einzelnen Sektoren des Modells nicht mehr unabhängig behandeln lassen. Es wurde ein neues Fit-Programm (Fittino) entwickelt, das experimentelle und theoretische Unsicherheiten sowie deren Korrelationen berücksichtigt und die Parameterbestimmung ohne a-priori-Annahmen durchführt. Aufgrund der großen Anzahl von Parametern kommen herkömmliche Fit-Algorithmen an ihre Grenzen. Ein neuer thermodynamisch inspirierter Algorithmus (simulated annealing) wurde erstmals für solche Zwecke eingesetzt und liefert stabile Ergebnisse. Es wurde gezeigt, dass sich in den untersuchten Szenarien das richtige globale Minimum erreichen lässt und dass die Fehlerbestimmung der Parameter zuverlässig ist.

**Stop:** Untersuchungen zur Messung der Masse des supersymmetrischen Top-Quarks (Stop) wurden gemeinsam mit der Universität Lancaster durchgeführt. Dabei wurden vier verschiedene Methoden angewendet, um Masse und Mischungswinkel des Stops zu bestimmen. Eine präzise Messung der Wirkungsquerschnitte bei verschiedenen Polarisationszuständen der Elektron- und Positronstrahlen ergibt die höchste Genauigkeit von 0.57 GeV für die Stop-Masse. Eine Messung der Wirkungsquerschnitte nahe der Erzeugungsschwelle von skalaren Tops gestattet es, die Masse auf 1.2 GeV genau zu bestimmen. Weiterhin wurde versucht, die Stop-Masse aus den Eigenschaften der Charm-Jets zu bestimmen. Beide hier angewandten Methoden ergaben eine Genauigkeit von etwa 1.5 GeV.

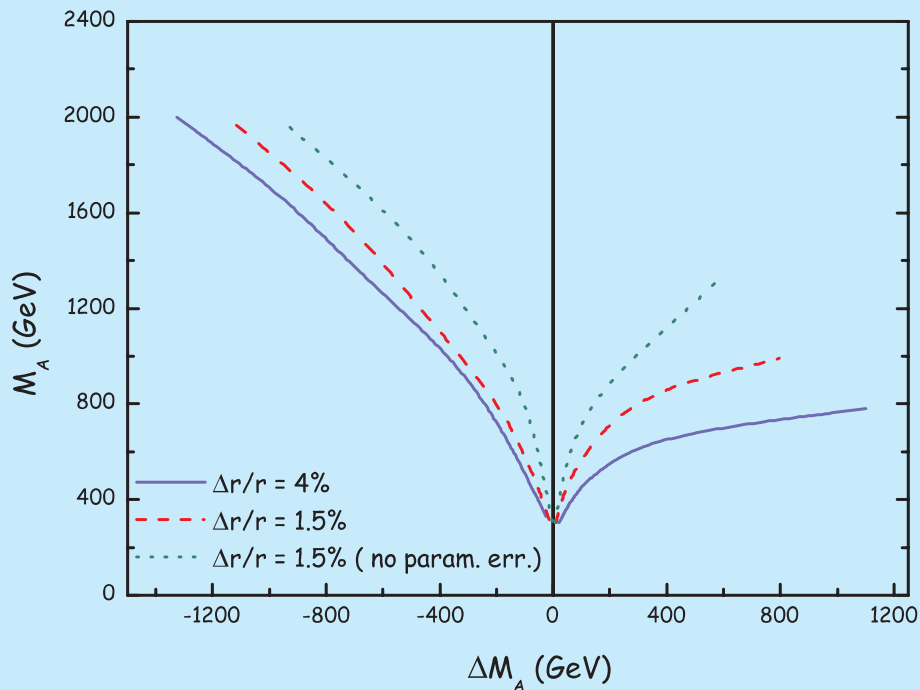


Abbildung 56: Die Variation  $\Delta M_A$  des Messwertes der Masse  $M_A$  des  $A^0$  als Funktion von  $M_A$  abgeleitet aus der Präzisionsmessung von Verzweigungsverhältnissen am ILC ( $r = [BR(h \rightarrow b\bar{b})/BR(h \rightarrow WW)]_{obs}/[BR(h \rightarrow b\bar{b})/BR(h \rightarrow WW)]_{SM}$ ). Die durchgezogene Linie bezieht sich auf eine  $r$ -Präzision von 4% (möglich bei ILC500), die gestrichelte Linie auf 1.5% (ILC500 + ILC1000). Die Unsicherheiten der MSSM-Vorhersage aufgrund der anderen MSSM-Parameter, die sich aus den Fehlern der LHC/ILC-Messungen der SUSY-Teilchen (insbesondere Squark-Massen) ergeben, sind berücksichtigt. Die gepunktete Linie zeigt die Genauigkeit, die erreichbar wäre, wenn die Eigenschaften der SUSY-Teilchen exakt bekannt wären.

## Präzisionsanalysen von Higgs-Bosonen

Zu den seit langem bekannten Stärken des ILC gehört die Möglichkeit ein standardmodellartiges Higgs-Boson detailliert zu untersuchen. Die Messung der Masse und der Verzweigungsverhältnisse eines leichten Higgs-Bosons stellen hierbei Referenzanalysen dar, deren Untersuchung die Entwicklung

des Detektordesigns ständig begleiten. In 2004 wurden Untersuchungen zum systematischen Fehler der Higgs-Massenbestimmung aufgrund der Unsicherheiten der Strahlparameter (Energiekalibration, Energieprofil, Beamstrahlung) durchgeführt. Es zeigt sich, dass Energieprofil und Beamstrahlung nur einen kleinen Einfluss auf die Genauigkeit der Massenbestimmung haben, vorausgesetzt, die geplante Maschinenpräzision wird eingehalten und die Beamstrahlung wird aus

der Akoplanarität von Bhabha-Ereignissen bestimmt. Die absolute Energiekalibration überträgt sich in etwa 1:1 auf die Präzision der Higgs-Masse. Bei einer gewünschten Unsicherheit von weniger als 40 MeV für eine Higgs-Masse von 120 GeV ergibt sich hieraus eine Anforderung für die Energiekalibration von  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Die Analyse der hadronischen Verzweungsverhältnisse eines leichten Higgs-Bosons wurde weiter vervollständigt und als Referenzanalyse auf dem LCWS'04 vorgestellt. Frühere Unstimmigkeiten in der Literatur über die erreichbare Präzision konnten aufgeklärt werden. Im Vergleich zu den im TESLA-TDR vorgestellten Ergebnissen zeigt sich, dass der Fehler auf das Verzweungsverhältnis in b-Quarks reproduziert werden konnte, während die Fehler für Charm-Quarks und Gluonen etwa 50% (relativ) größer sind. Der Grund liegt vor allem in einer wesentlich realistischeren Simulation der Rekonstruktion sekundärer Zerfallsvertices.

Wenn kein leichtes Higgs-Boson existiert, werden die Eichkopplungen bei Energien in der Nähe von  $\sqrt{s} \sim 1$  TeV stark. Dieses Szenario wurde an Hand der WW Streuung detailliert untersucht. Auch hier ist der ILC dem LHC auf Grund der eindeutig identifizierbaren Subprozesse bei ausreichend hoher Luminosität überlegen.

### **Einfluss der Zeitstruktur der Linear Collider Strahlen auf die Physikanalyse**

In Vorbereitung der ITRP-Entscheidung wurde im Herbst 2004 an Beispielen untersucht, wie sich die unterschiedlichen Zeitstrukturen der beiden Beschleunigertechnologien auf die erreichbare Präzision von Observablen aus der Higgs-Physik auswirken.

Die Zeitstruktur der kollidierenden Teilchenbündel (Bunches) unterscheidet sich für einen auf TESLA-Technologie basierenden Linear Collider deutlich von dem normalleitenden NLC/GLC-Design. So folgen im NLC/GLC-Design Bunches im Abstand von 1.4 ns, während dies im TESLA-Design mit 180–340 ns geschieht. Während letzteres für moderne Detektoren kein Problem darstellt, ist es eine Herausforderung Ereignisse im Abstand von 1.4 ns zu separieren. Sollte dies technologisch nicht möglich sein, so integriert der Detektor Untergrund aus aufeinanderfolgenden Bunch-Crossings. In der Gruppe FLC wurde zur Vorbereitung

der Technologieentscheidung studiert, welchen Einfluss ein solcher integrierter Untergrund auf die Rekonstruktion von Higgs-Ereignissen in verschiedenen Endzuständen haben kann. Als Untergrund wurde vor allem die Produktion von Hadronen aus der Kollision hochenergetischer Beamstrahlung-Photonen untersucht. Im Mittel werden in etwa 0.4/0.27 (TESLA/NLC) solcher Ereignisse pro Bunch-Crossing erwartet, die jeweils zu einigen Hadronen im Detektor führen. Wird ein solcher Untergrund über mehrere Bunch-Crossings integriert, führt die zusätzliche Energiedeposition zu einer Verschlechterung der Massenauflösung und der Trennbarkeit von Higgs-Ereignissen von anderen Physik-Ereignissen. Es wurden Algorithmen entwickelt, mit deren Hilfe der Einfluss dieses hadronischen Untergrundes minimiert wird. Dennoch zeigt sich eine signifikante Verschlechterung der Massenauflösung für ein leichtes Higgs-Boson im Higgs-Strahlung-Prozess und ein schlechteres Signal-zu-Untergrund Verhältnis in WW-Fusion wenn der Detektor über 18 Bunch-Crossings (etwa 25 ns für NLC/GLC-Design) integriert.

### **Beschleuniger Entwicklungen**

Die Forschungsarbeiten zum Linear Collider im Jahr 2004 sind eng mit den Arbeiten der TESLA-Kollaboration und der Vorbereitung für den XFEL verbunden. Der Schwerpunkt in der ersten Hälfte des Jahres lag in der Vorbereitung der Technologie-Entscheidung. Anfang April besuchte das ITRP-Experten-Gremium DESY, um sich vor Ort über den Stand der Entwicklungen zu informieren. Die TESLA-Kollaboration hatte zu diesem Ereignis sowohl externe Mitglieder der Kollaboration als auch die Vertreter der beteiligten oder interessierten Industriefirmen eingeladen. In Plenarvorträgen, wie auch in detaillierte Posterausstellungen, hatte das Gremium Gelegenheit, sich zu informieren und Kontakt mit den Experten aufzunehmen. In Folgetreffen an den Standorten der anderen Labors war DESY durch Experten jeweils vertreten und konnte dem Gremium Rede und Antwort stehen. Die behandelten Themen sind im Detail weiter unten aufgeführt.

Im März 2004 hatte ein Konsortium bestehend aus mehr als zwanzig europäischen Labors unter Federführung von DESY eine Design-Studie bei der Europäischen Union eingereicht, um die Forschung für





Abbildung 57: Die Beschleunigerexperten aus aller Welt treffen sich beim ersten ILC-Workshop am KEK-Labor in Japan.

den Linearbeschleuniger voranzubringen. Dieser so genannte EUROTeV Vorschlag umschließt in seinem Arbeitsprogramm viele der unten aufgeführten Themen mit Ausnahme der „supraleitenden Technologie“, die bereits in der EU-geförderten „Joint Research Activity“ zur Superconducting RF (SRF) als Teil des „CARE“-Förderprojektes abgedeckt ist. Der EUROTeV-Vorschlag wurde zusammen mit dem ebenfalls unter DESYs Federführung eingereichten Vorschlag EUROFEL von den Gutachtern auf die beiden ersten Plätze unter mehr als Hundert eingereichten Vorschlägen gesetzt und zur Förderung von der europäischen Union ausgewählt. DESY selbst gewinnt auf diese Weise sechs Nachwuchswissenschaftler zur Forschung am ILC. Gleichzeitig intensiviert das Projekt die internationale Zusammenarbeit am Linear Collider. In einem Kick-Off Meeting Ende November am DESY wurde das Projekt der Öffentlichkeit vorgestellt und das detaillierte Programm besprochen. Auszüge aus dem Arbeitsprogramm von EUROTeV finden sich in den aufgeführten Abschnitten wieder.

Im November wurde bei DESY die ILC-Projektgruppe mit der Aufgabe gegründet, die ILC spezifischen Aktivitäten bei DESY zu koordinieren und die bestmögliche Synergie mit den TTF- und XFEL-Projekten herzustellen. Die Bedeutung von TTF und XFEL für den ILC ist außerordentlich. Ein Erfolg des XFEL ist nach der Entscheidung für die kalte Technologie unabdingbar und umgekehrt gibt es viele originäre Beiträge aus dem Feld des ILC, die für den XFEL interessant werden. Es ist abgeschätzt worden, dass etwa 90% der XFEL-

Arbeitsfelder (unter Einschluss der Industriearbeiten) direkt relevant sind für den ILC. Unter diesem Licht hat beispielsweise die TESLA-Kollaboration auf ihrem Treffen in Orsay im Herbst 2004 beschlossen, die Arbeit mit Konzentration auf die kalte Beschleuniger-Technologie weiter zu führen. Experimentelle Grundlage bleibt der Weiterbetrieb der TTF (TTF II), der DESY eine federführende Rolle in der Kollaboration einräumt.

Ebenfalls im November fand der erste ILC-Workshop am KEK in Japan statt, auf dem auch DESY gut vertreten war (siehe Abb. 57). Dieser Workshop demonstrierte eindrucksvoll das große internationale Interesse und den Willen, nach der Wahl der Beschleuniger-Technologie, die Realisierung des Projektes gemeinsam im internationalen Umfeld anzugehen.

## Entwicklung der supraleitenden Technologie

Die TESLA-Kollaboration hat bereits Kavitäten mit Gradienten von mehr als 35 MV/m hergestellt und betrieben. Die gegenwärtig bei ZANON in der Entwicklung befindlichen Kavitäten werden die bisher kleine Produktionsstatistik verbessern. Der Test neun solcher Kavitäten in einem Kryostaten bei gleichem mittleren Gradienten konnte wegen fehlender Infrastruktur bisher nicht im Teilchenstrahl erfolgen. Das Modul 6 ist für solche Tests an der TESLA Test Facility (TTF) vorgesehen. Solche Kavitäten ermöglichen den Betrieb

des VUV-Lasers mit Elektronenenergien jenseits von 1 GeV und den Betrieb des XFEL bei kleinsten Wellenlängen oder wegen Verminderung der Verlustleistung bei höherer Bunchrate.

Schlüsselfrage bei der Begutachtung durch das ITRP war die Frage nach der weiteren Industrialisierung des Herstellungsprozesses. Die Erwartung ist, dass durch noch weiter verbesserte Produktionsprozesse die Qualität der Module gesteigert werden kann, so dass aufwändige Tests entfallen. Die Behandlung durch „Electro-Polishing“ scheint viele Qualitätsanforderungen in diesem Zusammenhang zu erfüllen und wird für die Herstellung der Kavitäten mit hohem Gradienten benutzt. Neben diesem Basisprogramm zur Konsolidierung des Produktionsprozesses beteiligt DESY sich aktiv an der Entwicklung von Kavitäten mit noch höherer Beschleunigungsspannung in Zusammenarbeit mit Experten aus Japan und USA.

Die außerordentliche Güte der Kavitäten bei hoher Beschleunigungsspannung lässt sich nur dann effizient zur Beschleunigung ausnutzen, wenn der Verstimmung der Kavitäten aufgrund der Lorentzkraft entgegengewirkt wird. Bei TESLA sind Piezo-Tuner in der Entwicklung, die dynamisch der Deformation beim „Füllen“ der Kavität entgegenwirken. Die Herstellung dazu passender, höchstintegrierter Steuerelektronik ist Aufgabe der LLRF Gruppe bei DESY, während die mechanischen Tuner in Zusammenarbeit mit Saclay entwickelt werden.

### Dämpfungsringe

Der lange Pulszug beim ILC von 1 ms macht es erforderlich, dass die einzelnen Pakete in den Dämpfungsringen eng gepackt werden. Im TESLA-Vorschlag wurde ein so genanntes „Dog-bone“-Konzept entwickelt, bei dem die Dämpfungsringe zum Teil im langen Beschleunigertunnel aufgebaut sind. Andere Konzepte mit kreisförmigen Dämpfungsringen von 6 oder sogar nur 3 km Umfang werden ebenfalls diskutiert. Solche Vorschläge erfordern jedoch extrem schnelle „Kicker“ für die Ejektion der Pakete. Grundlage der weiteren Diskussion bleibt deshalb gegenwärtig das Konzept aus dem TESLA-Vorschlag.

Weiteres Studium scheint auch notwendig für den so genannten „Electron-Cloud“-Effekt, bei dem sich heraus-

geschlagene Elektronen auf der Strahlachse akkumulieren und die dicht nachfolgenden Bündel beeinflussen, so dass die Strahlemittanz bereits im Dämpfungsring leidet. Dieser Effekt wird gleichsam für LHC von Bedeutung sein und stellt ein spezielles Forschungsthema dar, das auch von EUROTeV behandelt wird.

### Strahldynamik und Physik

Die gute Emittanz der Strahlen nach den Dämpfungsringen kann in den Bunch-Kompressoren, im eigentlichen Linac und im Strahlzuführungssystem beeinflusst werden. Hier ist es notwendig, durch robuste Algorithmen die Optimierung des Strahls zu erreichen. Ausschlaggebend sind hier Feedback-Systeme, die von Puls zu Puls die Strahlage nachsteuern. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch der Einfluss von Bodenbewegungen, die bei vertikalen Strahlabmessungen von einigen Nanometern aktiv kompensiert werden müssen.

### Positronenquelle

Nach einem Vorschlag von Beschleuniger Experten aus Protvino (Russland) war im TESLA Technical Design Report die Erzeugung der Positronen aus einem hochenergetischen Elektronenstrahl in einem Undulator vorgesehen. Gegenüber konventionellen Vorschlägen mit einem Festkörper-Target gewinnt man hier vor allem wegen der geringeren Materialbelastung im dünnen Target. Gleichzeitig ist es möglich, auch den Positronenstrahl longitudinal zu polarisieren.

Intensive Vorstudien hierzu wurden im Experiment E166 am SLAC, USA, aufgenommen, das weiter unten beschrieben ist. Für die Verwendung am ILC muss gleichzeitig die Ausweitung des Konzeptes auf einen 100-fach längeren Undulator berücksichtigt werden und der Transport des Spins über die lange Strecke von Erzeugung über Dämpfungsring bis zum Kollisionspunkt betrachtet werden.

### Global Accelerator Network

Der Bau des ILC erfordert neue Wege der internationalen Zusammenarbeit. Anders als bei früheren Großprojekten der Teilchenphysik, werden für den ILC technisch anspruchsvolle Komponenten weit entfernt vom

Standort des Beschleunigers entwickelt und gebaut. Selbst die Expertise zum Betrieb der Komponenten wird großteils nur aus der Entfernung abrufbar sein. Unabdingbar für eine solche Betriebsweise sind deshalb Kommunikationsmittel, die den „Live“ Eindruck der Beschleunigerkomponente entfernt übermitteln. Im EUROTeV Projekt ist deshalb die Entwicklung eines virtuellen Labors vorgesehen, das Messgrößen standardisiert aufnimmt und in Echtzeit übermittelt.

Gleichzeitig bemühen sich diese Experten um die Verbreitung der audiovisuellen Kommunikationsmittel. Ziel ist hier aus dem sich schnell entwickelnden Marktangebot die geeignete Lösung herauszusuchen.

## Verfügbarkeit des Beschleunigers

Die hohe Zahl von Komponenten für den Beschleuniger beeinflusst dessen Betriebsverhalten und Einzelausfälle könnten die integrierte Luminosität empfindlich schmälern. Es ist deshalb notwendig, die Schwachstellen zu identifizieren und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Wegen der großen Zahl an Komponenten sind hier Untersuchungsmethoden angemessen, die auf statistische Methoden bei der Modellierung der Ausfälle zurückzugreifen. Solche Modelle sind insbesondere bereits in Amerika für vergleichende Studien der verschiedenen Beschleunigerkonzepte eingesetzt worden. Die Fragen haben Auswirkungen auf zukünftige Designentscheidungen, bei denen u. a. ein zweiter Tunnel als Servicetunnel mit schnellerem Zugang diskutiert wird. Der TESLA-Vorschlag favorisiert einen Ein-Tunnelvorschlag, in dem der Linac an der Tunneldecke angebracht wird. Eine solche Lösung erlaubt relativ ungehinderten Zugang zum Beschleuniger, allerdings nur in den Betriebspausen.

## Detektorentwicklungen

Auch im Jahre 2004 wurden an beiden DESY Standorten intensive Arbeiten zur Entwicklung von Detektoren für einen Linearbeschleuniger durchgeführt. Die Hauptgebiete sind: strahlnahe Kalorimetrie (Zeuthen), hadronisches Kalorimeter (Hamburg), Zeit-Projektionskammer (Hamburg) und MAPS-Pixel Detektoren (Hamburg). Darüber hinaus arbeitet DESY am

Experiment zur Entwicklung einer polarisierten Positronenquelle mit (E166, in Zeuthen und in Hamburg) und entwickelt präzise Strahllagemonitore, die für einen Einsatz in einem Energiespektrometer gedacht sind (Zeuthen).

## F&E für strahlnahe Kalorimeter eines ILC Detektors

In der strahlnahen Region des ILC Detektors sind zwei Kalorimeter vorgesehen, welche extremen Anforderungen genügen müssen und daher intensive Grundlagenforschung erfordern. Das BeamCal, welches direkt an der Strahlröhre anliegt und einen Polarwinkel von 4 bis 28 mrad überdeckt, muss unter sehr hoher Strahlenbelastung funktionstüchtig bleiben. Elektronen und Positronen der „Beamstrahlung“ deponieren eine Dosis von etwa 10 MGy pro Jahr. Das sich radial anschließende LumiCal bei Polarwinkeln zwischen 26 und 82 mrad ist ein Instrument zur präzisen Luminositätsmessung.

Eine eigene Kollaboration für Kalorimetrie in Vorwärtsrichtung (FCAL) erarbeitet ein technisches Design für beide Kalorimeter. Im Berichtszeitraum wurden umfangreiche Monte Carlo Rechnungen zur Optimierung der Strukturen durchgeführt. Parallel dazu wurden Sensor Prototypen getestet und Vorbereitungen für den Aufbau von Prototypen der Kalorimeter getroffen.

Die Verteilung der Beamstrahlung im Bereich des BeamCal kann zur Strahldiagnose und Korrektur genutzt werden. Einzelne hochenergetische Elektronen müssen bis zu kleinsten Polarwinkeln erkannt werden, da diese sonst zum Untergrund bei der Suche nach neuen Teilchen beitragen. Für diese Zwecke muss das innere Kalorimeter sehr kompakt sein und eine hohe Granularität besitzen. Mögliche Varianten sind ein Diamant-Wolfram Sandwich Kalorimeter oder ein Kalorimeter aus Szintillatorkristallen. Die Segmentierung der Sensoren oder Kristalle wurde nach Monte Carlo Studien festgelegt.

Diamant-Sensoren, die das Fraunhofer Institut für angewandte Festkörperphysik in Freiburg angefertigt hat, wurden in einem Teststrahl in einem großen Intensitätsbereich untersucht. Ein Sensor der Größe  $12 \times 12 \text{ mm}^2$  ist in Abb. 58 gezeigt. Linearität und Homogenität



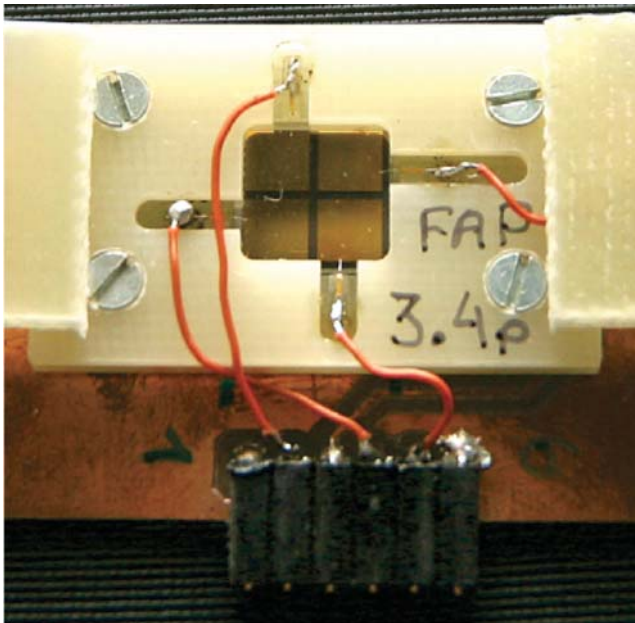


Abbildung 58: Ein Diamantsensor für Untersuchungen im Teststrahl. Die Elektrode besteht aus vier Teilflächen etwa der Größe, die für das Kalorimeter optimal ist. Jede Teilfläche wird separat ausgelesen.

wurden getestet. Die vorläufigen Resultate sind sehr zufriedenstellend.

Aus Plastik-Szintillatoren wurden Segmente gefertigt, welche etwa den Abmessungen der Kristalle im BeamCal entsprechen, mit optischen Fasern zur Lichtauskopplung versehen und zu einem Mini-Modul zusammengesetzt. Die Lichtmenge vom Durchgang kosmischer Myonen wurde direkt am Szintillator und am Ende der optischen Faser gemessen. Etwa 10% des Lichtes wird ausgekoppelt. Das ist ausreichend für die Anwendung im Kalorimeter.

Für das Design des LumiCal wurden detaillierte Monte Carlo Rechnungen von anderen Partnern der FCAL Kollaboration durchgeführt. Auf deren Grundlage wurde in Zeuthen ein mechanisches Design entwickelt, welches in Abb. 59 gezeigt ist.

Die Position der Sensoren muss mit einer Präzision von einem Mikrometer kontrolliert werden. Deshalb sind getrennte Halterungen für die Sensoren und die Absorberringe notwendig.

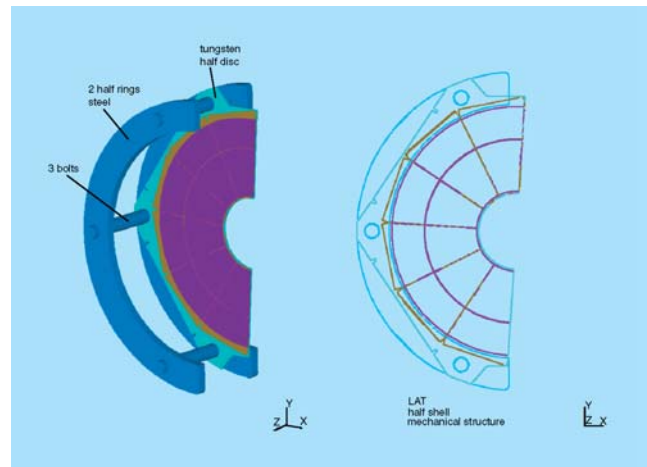


Abbildung 59: Der mechanische Aufbau des LumiCal. Die linke Figur zeigt die Aufhängung eines Sensormoduls. Auf der rechten Seite ist der Aufbau eines Sensormoduls aus mehreren Silizium Sensoren gezeigt.

## F&E für ein hadronisches Kalorimeter am ILC

Bei vielen Schlüsselreaktionen am Linear Collider werden schwere Bosonen, z. B. W, Z oder Higgs-Teilchen erzeugt, die ihrerseits überwiegend in Jets zerfallen. Die zugrundeliegende Physik im Energiebereich des ILC erschließt sich aus der präzisen Vermessung solcher Prozesse. Die schweren Teilchen können in den Multi-Jet-Endzuständen nur anhand ihrer invarianten Massen identifiziert werden. Dazu müssen die Energien der Jets sehr genau gemessen werden, und zwar wesentlich genauer, als dies mit bisher gebauten Detektoren an Beschleunigern möglich ist. Diese Forderung ergibt sich unter anderem direkt aus den Massenwerten der schweren Bosonen bzw. deren Abstand voneinander. Die Physikstudien der vergangenen Jahre haben hier eine gewaltige Herausforderung an die Detektorentwicklung aufgezeigt.

Im Prinzip kann die nötige Präzision erreicht werden, wenn jedes Teilchen im Ereignis einzeln im Detektor nachgewiesen und mit der Komponente gemessen wird, die dafür am besten geeignet ist: also geladene Teilchen mit dem Spurdetektor, und neutrale im Kalorimeter. Bei dieser „particle flow“ genannten Methode müssen die Teilchensignale im Kalorimeter räumlich voneinander

getrennt werden. Die Trennung ist umso erfolgreicher, je stärker das Magnetfeld ist, das die geladenen Teilchen von der Jet-Richtung ablenkt, je weiter entfernt vom Wechselwirkungspunkt die Teilchen auf das Kalorimeter treffen, und je feiner dessen Granularität ist. Dem stehen offensichtliche technische und budgetäre Grenzen gegenüber; der Auslegung der Magnetspule und des Kalorimeters kommt eine besondere Bedeutung bei der sorgfältigen Optimierung des Detektorkonzepts zu.

Die Gruppe FLC arbeitet zusammen mit Partnerinstituten in Frankreich, Großbritannien, Russland, den USA und Tschechien im Rahmen der CALICE-Kollaboration an der Entwicklung eines hadronischen Kalorimeters (HCAL) mit Eisen als Absorber und Szintillatorauslese. Dank neu entwickelter Photodetektor-Technologien können hier deutlich kleinere Auslesezellen als früher realisiert werden. Winzige,  $1\text{ mm}^2$  messende Halbleiterdetektoren, „Silizium-Photomultiplier“ (SiPM), die auf einem kurzen Wellenlängenschieber direkt auf die Szintillatorplättchen montiert werden, übernehmen dabei die Rolle der vormals verwendeten Vakuum-Photovervielfacher, zu denen das Szintillationslicht über komplizierte Lichtleitersysteme aus dem Detektorvolumen herausgeführt werden musste.

In einem „particle flow“-Kalorimeter spielt die Ortsauflösung eine mindestens genauso große Rolle wie die Energieauflösung. Diese Gesichtspunkte auszubalancieren ist eines der Ziele des Entwicklungsprogramms. In einer radikaleren Variante kann sogar auf die Amplitude der Kalorimetersignale ganz verzichtet werden: das „digitale Kalorimeter“ misst die Energie durch Zählen der Treffer in sehr feiner ( $1\text{ cm}^2$ ) Segmentierung. Für diesen Ansatz kommen auch Gas-Detektoren als Auslesemittel in Frage, eine Option, die von anderen Gruppen in CALICE untersucht wird.

Für dieses Programm ist der Bau von Kalorimeter-Prototypen für Teststrahlexperimente unverzichtbar. Zum einen müssen die neuen Technologien über den Labormaßstab hinaus und unter realistischen Bedingungen erprobt werden, zum anderen sind die Modelle, die der Computersimulation hadronischer Schauer zugrundeliegen, zu ungenau, als dass die Optimierung eines „particle flow“-Kalorimeters sich darauf stützen könnte. Daten von elektronischen und hadronischen Teststrahlen sind nicht zuletzt nötig, um das Konzept überhaupt

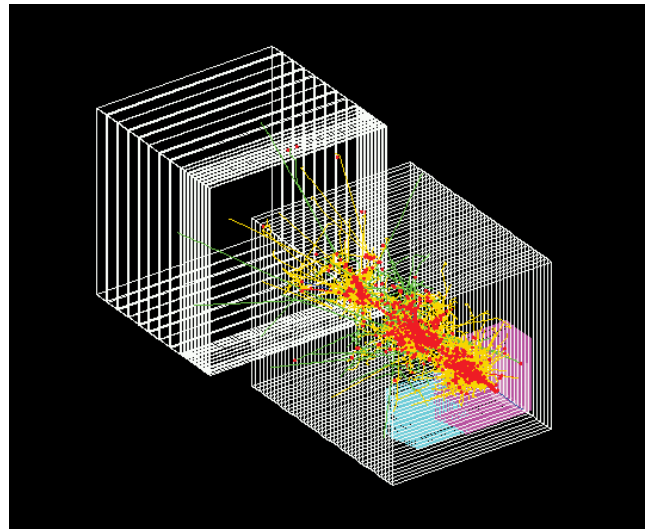


Abbildung 60: Simulation eines Ereignisses im kompletten Prototypen (ECAL, HCAL und tail catcher).

auf eine experimentelle Basis zu stellen. Die Größe des zur Zeit im Bau befindlichen „Kubikmeter“-Prototypen ist dabei durch die Ausdehnung hadronischer Schauer bei ILC typischen Energien vorgegeben, die Granularität und damit die Zahl der elektronischen Kanäle (ca. 8000) durch die bei der Rekonstruktion der Schauer aufzulösenden Substrukturen. Ein simuliertes Ereignis in der geplanten Konfiguration aus elektromagnetischem und hadronischem Kalorimeter sowie „tail catcher“ ist in Abb. 60 gezeigt.

In einer Vorstudie ist ein kleineres Kalorimeter („Minical“) mit ca. 100 SiPMs gebaut und 2003 im Elektronen-Teststrahl am DESY untersucht worden. Im Jahre 2004 wurde die Datenanalyse mit einer Publikation abgeschlossen. Die Messungen wurden außerdem ergänzt durch Vergleiche mit einer mit Avalanche-Photodioden instrumentierten Variante. Die Resultate in Abb. 61 zeigen, dass die erzielten Auflösungen praktisch gleich und anhand von Simulationen gut verstanden sind. SiPMs haben eine Pixel-Struktur und erzeugen ein Signal, das der Zahl der von Photonen getroffenen Pixel entspricht. Damit gehen Sättigungseffekte einher. Ein wichtiges Ergebnis des Minical-Teststrahlprogramms ist, dass diese Effekte zuverlässig korrigiert werden können und ohne nennenswerten Einfluss auf die Auflösung bleiben.

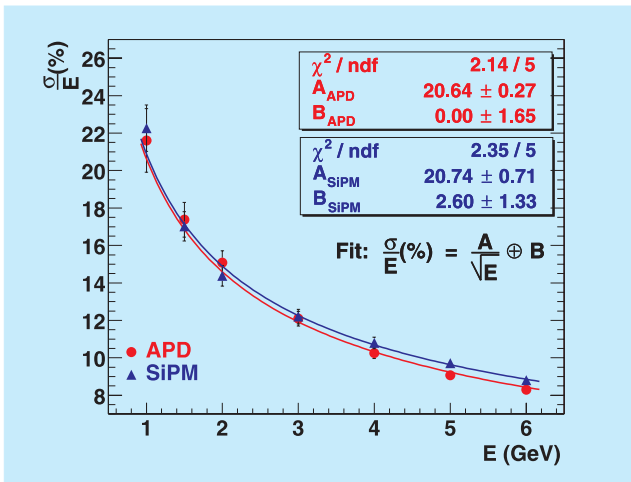


Abbildung 61: Mit zwei Auslesetechniken gemessene Auflösung für Elektronen im Minical (siehe Text).

Für den Kubikmeter-Prototypen war das gesamte elektro-mechanische Konzept zu erarbeiten. Die Absorberstruktur wurde dabei so flexibel ausgelegt, dass neben Szintillator-Modulen auch andere Auslesetechnologien getestet werden können, z. B. ein digitales HCAL auf Gas Basis. Konnte das „Minical“ noch mit Elektronik-Komponenten aus der Zeit der PETRA-Experimente ausgelesen werden, wurde 2004 mit der Entwicklung neuer Frontend-Elektronik begonnen. Das Konzept ist ähnlich dem ebenfalls in der CALICE-

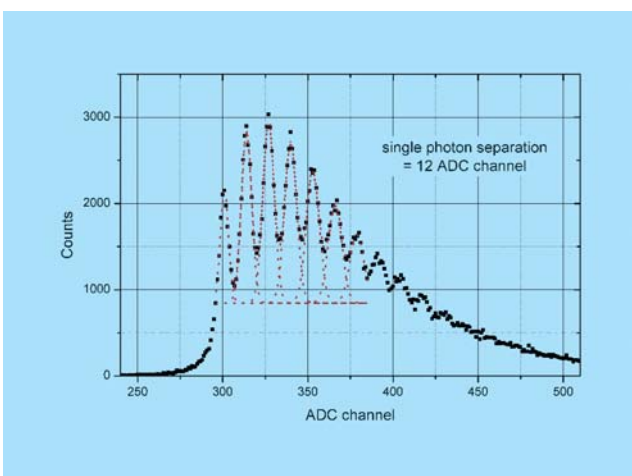


Abbildung 62: Pulshöhenspektrum eines Silicon Photomultipliers. Deutlich erkennbar sind die äquidistanten Signale für einzelne Photoelektronen.

Kollaboration gebauten elektromagnetischen Silizium-Wolfram-Teststrahlkalorimeters (ECAL), so dass sich das HCAL in die ECAL-Datenakquisition integrieren lässt. Die Elektronik-Karten für das HCAL wurden in enger Zusammenarbeit zwischen den DESY-Gruppen FLC und FEB entwickelt. Ihr Herzstück ist ein am LAL in Orsay entwickelter ASIC-Chip mit Vorverstärkern für 18 Kanäle. Am Ende des Berichtsjahres konnte der Bau der ersten Detektorebene mit den ersten 220 mit SiPMs versehenen Szintillatorplättchen beginnen, und die ersten Chips der Serienproduktion erfolgreich getestet werden. Abb. 62 zeigt ein dabei aufgenommenes Pulshöhenspektrum; zu erkennen sind die für die Kalibration der SiPMs wichtigen Signale einzelner Photoelektronen.

## Studien zum Vertexdetektor an MAPS Sensoren

Für den Vertexdetektor eines ILC-Detektors werden mehrere Technologien studiert. DESY beteiligt sich im Rahmen der „Monolithic Active Pixel Sensor“ Gruppe an Studien zum Verhalten dieser Sensoren, zur mechanischen Aufhängung und zur Kühlung durch Verdampfungskühlung. IReS in Strasbourg hat einen ersten großen Sensor entwickelt: Mimoso V, 18 mm × 18 mm groß, mit 256 kpixel und einer Pixelgröße von 17 μm. Dieser Sensor ist die Grundlage für die Studien bei DESY. Um das Verhalten dieses Pixeldetektors kennenzulernen, sind drei Sensoren, die IReS DESY zur Verfügung gestellt hat, in ausführlichen Tests mit einer Fe55-Quelle und im Teststrahl vermessen worden. Dafür musste das vorhandene Datenerfassungssystem für das Test-Teleskop modernisiert und den Anforderungen des Pixeldetektors angepasst werden.

Abbildung 63 zeigt ein typisches Ereignis, das im Teststrahl aufgenommen wurde. Man unterscheidet klar 2 typische Cluster, die aus mehreren Pixeln bestehen und 2 „heiße“ Pixel. Die Analyse der Daten ist noch nicht abgeschlossen. Insbesondere werden die Ortsauflösung und die Nachweiswahrscheinlichkeit noch untersucht. Der Ortsauflösung sind, bedingt durch den niedrigen Impuls der Elektronen von 6 GeV/c, Grenzen durch die Vielfachstreuung gesetzt.

Um das bestmögliche Verhalten des Vertexdetektors zu erreichen, muss die Materie, die die Teilchen durchdrin-



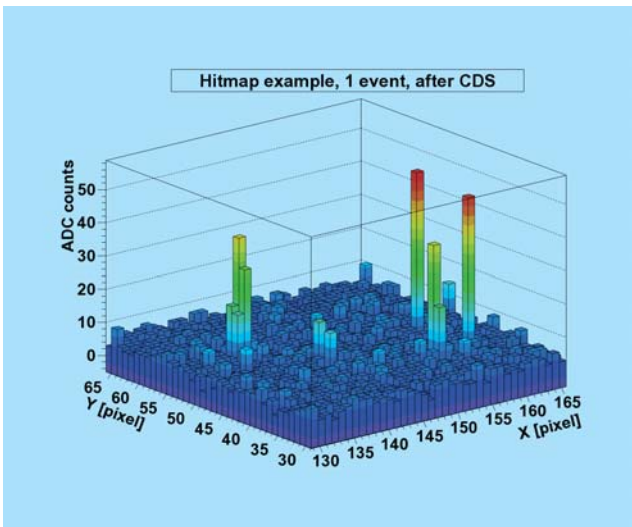


Abbildung 63: Beispiel eines guten Ereignisses im MAPS-Prototypen mit 2 Clustern und 2 „heißen“ Pixeln.

gen, so dünn wie nur möglich sein, um Vielfachstreuung zu reduzieren. Neben der Reduzierung der Sensordicke muss die mechanische Halterung wie alle anderen Materialien auf das Minimum reduziert werden. Auf der Suche nach geeignetem Material für die Tragestrukturen (Leiter) zeigte sich neben CVD-Diamant auch „geschäumtes“ Siliziumkarbid (SiC) als sehr gut geeignet. Erste Leitern aus SiC sind gefertigt worden.

Weitere Studien befassten sich mit dem Aufbau eines Kühlsystems, das entlang einer Leiter eine gleichmäßige Wärmeabfuhr garantieren soll. Dabei wird das Verfahren der Verdampfungskühlung in sehr dünnen Röhrchen benutzt. Abbildung 64 zeigt den Messaufbau, in dem die verschiedenen Aspekte des mechanischen Aufbaus und des Kühlsystems getestet werden sollen.

## Zeit-Projektions-Kammer

Als eine wichtige Komponente des Spurerkennungssystems für einen Detektor am ILC ist eine Zeit-Projektions-Kammer (TPC) in Diskussion. Der Schwerpunkt der F&E-Aktivitäten am DESY liegt bei der Untersuchung eines neuartigen Gasverstärkungssystems basierend auf Gas-Elektronen-Vervielfacher (GEM). Ziel ist eine Ortsgenauigkeit von besser als  $100\ \mu\text{m}$  über dem gesamten Kammervolumen.

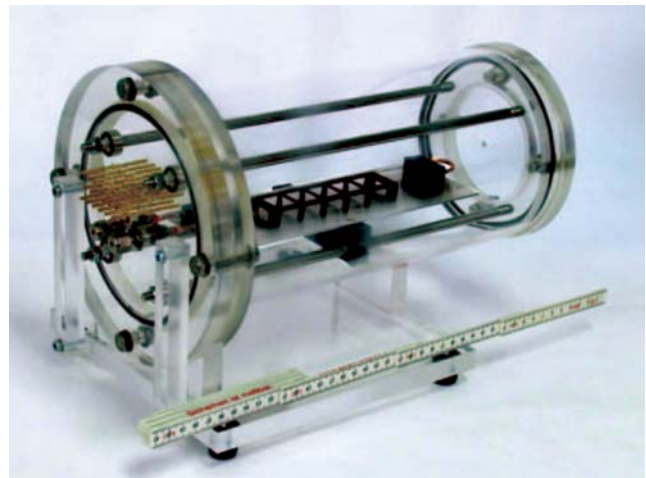


Abbildung 64: Messaufbau zum Testen des mechanischen Aufbaus und des Kühlsystems.

In den vergangenen Jahren sind bereits eine Reihe vielversprechender, grundlegender Versuche zum Einsatz von GEMs in einer TPC in enger Zusammenarbeit mit anderen Instituten in Deutschland, Frankreich und Kanada durchgeführt worden. Im Jahr 2003 ist ein spezieller TPC-Prototyp bei DESY entwickelt und gebaut worden. Dieser ist so konstruiert, dass er in der Hoch-Magnetfeld-Testanlage, die seit 2002 bei DESY zur Verfügung steht, betrieben werden kann.

Im Jahr 2004 wurden insgesamt rund eine halbe Million Spuren von kosmischen Myonen mit dem neugebauten TPC-Prototypen in der Hochfeld-Testanlage aufgezeichnet. Die gewonnenen Daten dienen vornehmlich der Untersuchung des räumlichen Auflösungsvermögens einer TPC. Abbildung 65 zeigt ein vorläufiges Ergebnis der Studien. Um den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Ortsauflösung studieren zu können, wurden Daten mit unterschiedlichen Auslesegeometrien und Gasen als Funktion der Kammerpositionen aufgezeichnet. Desweiteren stehen noch rund 300 000 Ereignisse, die im Jahr 2004 in einem Elektronenteststrahl am DESY aufgezeichnet wurden, für Auflösungsstudien zur Verfügung. Im Zuge der noch nicht abgeschlossenen Datenanalyse wurde die verwendete Rekonstruktions- und Simulationssoftware weiterentwickelt und verbessert. Ziel der Untersuchung ist es, zu verstehen, welche Faktoren die Auflösung limitieren, um die Leistungsfähigkeit der Kammer dann in einem weiteren Schritt optimieren zu können.



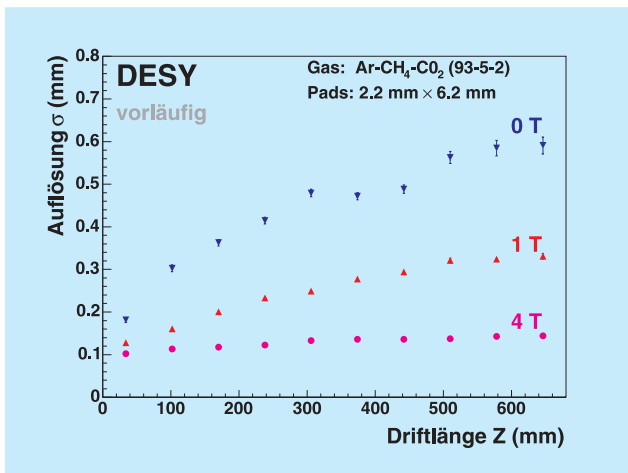


Abbildung 65: Räumliches Auflösungsvermögen einer TPC in transversaler Richtung als Funktion der Driftlänge bei unterschiedlichen Magnetfeldstärken.

Neben der Untersuchung der Ortsauflösung einer TPC mit GEM-Verstärkungssystem sind auch Untersuchungen zur Bestimmung der Doppelspurtrennung der Kammer begonnen worden. Hierzu kam ein UV-Laser zum Einsatz, dessen Licht in zwei Strahlen aufgespalten wurde. In den letzten Monaten begann die Entwicklung eines Strahlführungssystems, das die Strahlteilung und -fokussierung leistet. Ferner sind für die Messungen notwendige Modifikationen an dem TPC-Prototypen durchgeführt worden, die es ermöglichen, das Laserlicht in das Driftvolumen der Kammer einzuspeisen.

Der Hoch-Magnetfeld-Teststand hat sich in dieser ersten Messreihe bewährt. Eine weitere Nutzung dieser „Infrastruktur“ ist für fortgesetzte Studien zur Ortsauflösung auch für andere Spurdetektoren vorgesehen.

## Polarisierte Positronenquelle (E166)

In den vergangenen Jahren wurde im Rahmen der Studien für einen Linearbeschleuniger gezeigt, dass die Polarisierung beider Strahlen – Positronen sowie Elektronen – das Physikpotential erheblich erweitert. Während die Methode zur Erzeugung polarisierter Elektronen durch Photoemission an geeigneten GaAs-Strukturen inzwischen weit fortgeschritten ist und hohe Polarisationsgrade erreicht werden, ist die Erzeugung polarisierter Positronen vergleichsweise Neuland. Mit dem

E166 Experiment am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) soll erstmals die Produktion polarisierter Positronen mit einem wendelförmigen Undulator experimentell demonstriert werden. Diese Idee geht auf eine Arbeit von Balakin und Mikhailichenko aus dem Jahre 1979 zurück: ein hochenergetischer Elektronenstrahl wird durch einen wendelförmigen Undulator geschickt. Dabei entsteht zirkular polarisierte Gammastrahlung, die hinter dem Undulator auf ein dünnes Target trifft und Elektron-Positron Paare erzeugt. Fängt man mit der nachfolgenden Strahloptik lediglich die hochenergetischen Positronen ein, erwartet man Polarisationsgrade bis zu 60%.

Das E166 Experiment wird am SLAC FFTB unter internationaler Beteiligung durchgeführt. DESY hat die Verantwortung für Design, Bau, Betrieb und Auswertung des Polarimeters übernommen, mit dem die erreichte Polarisierung der Positronen vermessen werden wird. Es handelt sich hierbei um ein Comptontransmissionspolarimeter, das aus einem Analysiermagneten (Verantwortung DESY Hamburg) und einem CsI(Tl) Kalorimeter (Verantwortung DESY Zeuthen) besteht. Ein weiterer Analysiermagnet wird im Polarimeter zur Messung der Photonpolarisation eingesetzt.

Die beiden Analysiermagnete (Abb. 66) wurden von DESY Hamburg konzipiert und vom Efremov-Institut St. Petersburg hergestellt. Ein in den Magneten eingebetteter Ferromagnet wird durch ein solenoidales Feld auf über 2 T magnetisiert, dabei werden die Elektronen in den unvollständig besetzten inneren 3d-Atomshalen des Eisens polarisiert. In der Compton Polarimetrie werden nun polarisierte Photonen an den polarisierten Elektronen im Eisen gestreut. Aufgrund der Spinabhängigkeit des Compton-Prozesses ergibt sich bei Umkehrung der Magnetisierung eine Asymmetrie des Transmissionsignals. Die Analysiermagnete sind im Photonarm und im Positronarm, hier zusammen mit dem CsI Kalorimeter, installiert. Im Positronarm werden die erzeugten polarisierten Positronen am Eingang des Analysiermagneten in Photonen rückkonvertiert. Die Polarisierung der Positronen ergibt sich dann aus der gemessenen Asymmetrie der Signale im CsI(Tl)-Kalorimeter.

Zwei Kalorimeter-Prototypen, jeweils bestehend aus einem CsI(Tl) Kristall, aber mit unterschiedlicher Lichtauslese (Photomultiplier bzw. zwei großflächigen Photodioden), wurden Anfang des Jahres noch einmal ausgiebig getestet und dann am SLAC am zukünftigen



Abbildung 66: Die Analysiermagnete für das E166 Experiment am SLAC. Links ist der Magnet für den Positronarm und rechts ist der Magnet für den Elektronarm zu sehen. Weiterhin sind die Anschlüsse für die Wasserkühlung und die Stromversorgung zu erkennen.

gen Experimentierplatz eingebaut. Beide Prototypen funktionierten einwandfrei; da die Lichtauslese mittels Photodioden einfacher zu kalibrieren war, wurde entschieden, das Kalorimeter mit Photodioden auszustatten. Parasitär zum Betrieb anderer Experimente konnten die Prototypen unter tatsächlichen Strahlbedingungen getestet werden.

Im Laufe des Jahres wurde das Design des Polarimeters vervollständigt. Das Kalorimeter (Abb. 67) besteht aus 9 CsI(Tl) Kristallen mit einer Größe von je  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 28\text{ cm}$  angeordnet in einer  $3 \times 3$  Matrix.

Die Kristalle wurden von der Firma AMCRYS-H LIMITED aus der Ukraine geliefert und in Zeuthen eingehend auf ihre Szintillationseigenschaften hin untersucht. Alle zeigten hinreichende Qualität. Die mechanische Struktur des Kalorimeters wurde von der Humboldt-Universität, die Verstärker für den Signaltransport wurden gemeinsam mit der Humboldt-Universität entwickelt und gebaut. Das Kalorimeter wurde im Teststrahl am DESY II in Hamburg getestet, bevor es im Sommer zum SLAC gebracht und dort im Experiment installiert wurde. Simulationen mit Hilfe von GEANT3 haben gezeigt, dass man das Kalorimeter durch geeignete Blei- und Wolframwände nahezu vollständig gegen Photonenuntergrund schützen kann. Im

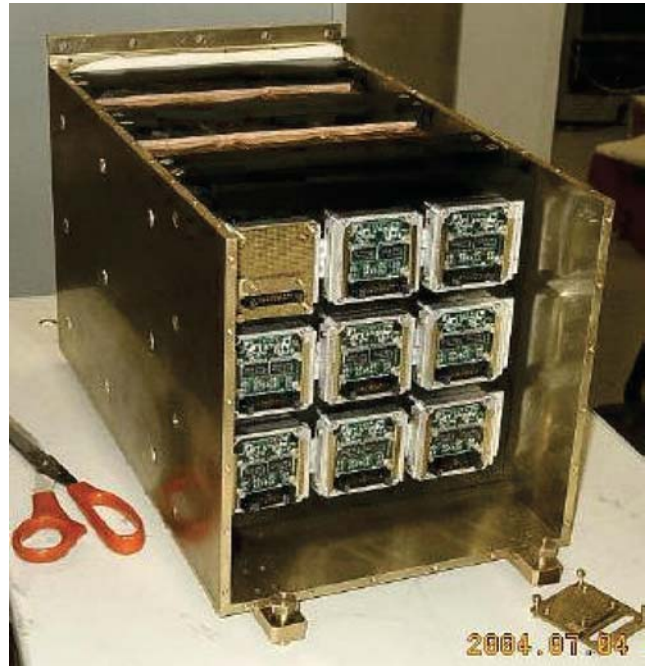


Abbildung 67: Die Anordnung der CsI(Tl) Kristalle im Kalorimeter für das E166 Experiment am SLAC. Die Lichtauslese erfolgt mittels Photodioden; hier ist die Ausleseelektronik zu sehen.

Oktober begann die erste Datennahme für das E166 Experiment, doch aufgrund eines schweren elektrischen Unfalles, der nicht im Zusammenhang mit dem Experiment stand, wurde der Beschleunigerbetrieb nach zweieinhalb Tagen für unbestimmte Zeit unterbrochen. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Wiederaufnahme des Strahlbetriebs sind für das Jahr 2005 zwei je ca. 4-wöchige Strahlzeiten geplant.

Die zweieinhalb Tage Strahlzeit bei 28 GeV dienten der ersten Strahljustierung und Untergrunderfassung. Der Undulator war zu diesem Zeitpunkt noch nicht installiert. Das wohl wichtigste und erfreulichste Ergebnis dieser kurzen Strahlzeit war, dass das CsI-Kalorimeter unter realistischen Strahlbedingungen keinen nennenswerten Untergrund registrierte, der direkt vom hochenergetischen Elektronstrahl oder indirekt über Neutronen vom „Strahldump“ ausgeht.

Das Kalorimeter funktionierte unter realistischen Bedingungen ausgezeichnet. Die gewonnenen Daten wurden in Bezug auf Kalibration und Linearität untersucht und bisher konnte eine Genauigkeit der Energiemes-

sung von etwa 20% erreicht werden. Ziel ist es, diese auf etwa 5% zu verbessern. Parallel zur Auswertung der Daten soll die vollständige Simulation des Experimentes mittels GEANT4 vorbereitet werden. Dabei ist zu erwähnen, dass hier auch Entwicklungsarbeit an GEANT4 geleistet werden musste, um die Polarisationsabhängigkeit wichtiger Prozesse in das Programm zu integrieren.

Die Analysiermagnete wurden vor der Installation am SLAC im August 2004 am DESY in Hamburg getestet. Beide Magnete konnten bis zu ihrem gewünschten Maximalwert von  $\pm 60$  A hochgefahren werden. Entscheidend für die Bestimmung der Magnetisierung des Eisens ist die Messung des magnetischen Flusses, die mit Hilfe von Induktionsspulen erfolgt, die um den Ferromagneten gewickelt sind. Eine am DESY durchgeführte Messung ergab einen Wert von 0.680 Vs, was sehr gut mit dem erwarteten Wert übereinstimmt.

Beide Magnete wurden Mitte September am SLAC im FFTB-Tunnel installiert. Leider ist ein Betrieb der Magnete nach dem erwähnten Unfall am SLAC bisher nicht möglich gewesen.

## Arbeiten zum Energiespektrometer

Gemeinsam mit dem VIK Dubna, Dzhelapov Laboratorium für Kernprobleme und der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Theoretische Elektrodynamik, wurde eine Initiative gestartet, ein für den Linear Collider notwendiges Spektrometer zur Messung der Strahlenergie mit einer relativen Genauigkeit von besser als  $10^{-4}$  zu entwickeln. Ausgehend von den Forderungen des Physikprogramms beim ILC wurden Design und Parameter der Magnete und der hochauflösenden Strahllagemonitore festgelegt. An der Technischen Universität Berlin wurden Monitore entwickelt, die einige zehn Nanometer Positionsgenauigkeit für den Einzelpaketbetrieb besitzen. Die 5.5 GHz Variante dieser Monitore erlaubt den Ort des Teilchenpakets (mit einer provisorischen Elektronik) mit 200 nm Präzision über eine Distanz von  $\pm 1.5$  mm zu bestimmen. Die theoretischen Erwartungen an diesen Monitor Typ (Cavity Monitor mit speziellen Wellenleitern, siehe auch Abb. 68) wurden durch Messungen an der Beschleunigeranlage ELBE in Rossendorf bei Dresden weitestgehend bestätigt.

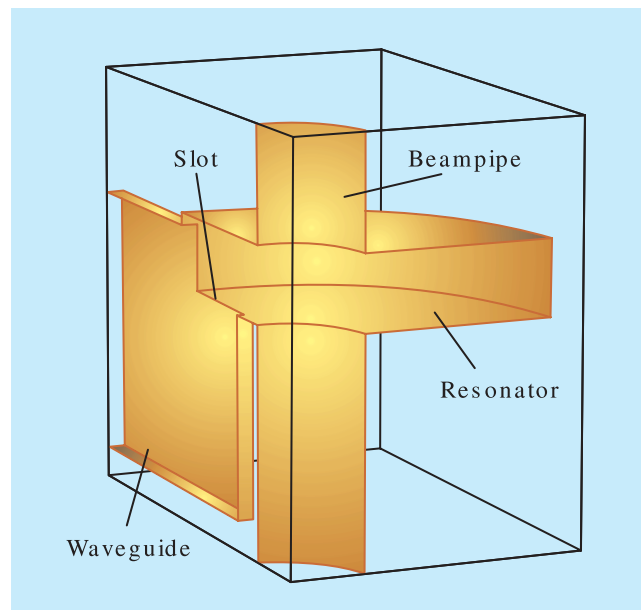


Abbildung 68: RF Monitor mit Koppelschlitz und Wellenleiter.

Darüber hinaus wurden Fragen zur Präzisionsausrichtung und Stabilisierung der Komponenten des Energiespektrometers sowie ihrer Überwachung untersucht und Vorschläge hierzu erarbeitet. Die erzielten Resultate sind in einem Technischen Design Report (LCNote) zusammengefasst.

Komplementäre Möglichkeiten zur Bestimmung der Strahlenergie („radiative return“ Ereignisse, Nutzung der Synchrotronstrahlung) wurden ebenfalls initiiert. In Zeuthen wurden „radiative return“ Ereignisse vom Typ  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$  als erstes wegen ihrer Einfachheit bei 350 GeV analysiert. Mit einer integrierten Luminosität von  $100 \text{ fb}^{-1}$  konnte ihre Nutzbarkeit zur Messung der Strahlenergie nachgewiesen werden. Der nur von der Statistik herrührende Fehler von über  $10^{-4}$  für die Strahlenergie erfordert aber, weitere Prozesse in die Untersuchungen einzubeziehen.

## Weiterentwicklung der ILC Simulations-Software

Die DESY LC Gruppen tragen in enger Zusammenarbeit mit DESY IT wesentlich zur Entwicklung eines



Software Systems für Studien für den ILC bei. In den letzten Jahren wurde in enger Kooperation mit dem SLAC ein Datenformat entwickelt, in dem Daten für den ILC Detektor abgespeichert und verarbeitet werden können (LCIO). Im Jahre 2004 wurde dieses Format weiterentwickelt, und fand immer weitere Akzeptanz bei Gruppen, die am ILC arbeiten. Ein Fortran Interface für LCIO einschließlich Dokumentation wurde im Berichtszeitraum erstellt.

Nach der LCWS'04 wurde mit der Entwicklung eines Programms begonnen, das die einfache Analyse von LCIO basierenden Daten erlaubt. Dieses Program, MARLIN (modular analysis and reconstruction system for the international linear collider) konnte im Herbst in einer ersten Version bereitgestellt werden. Seitdem werden von mehreren Gruppen Module entwickelt, die in der Simulation, Digitalisierung und in der Rekonstruktion Anwendung finden werden.

Als erster Test dieses Software Systems dienen die Detektor Entwicklungsarbeiten. Die Daten sowohl für den Kalorimeter Test wie auch für den TPC Test werden als LCIO Daten abgespeichert. Die Entwicklung der Analyse-Software im MARLIN System hat bereits begonnen.

Neben den neuen, C++ basierenden Paketen werden die existierenden, Fortran basierenden Programme weiterhin unterstützt. Das Detektorsimulationspaket BRAHMS wurde so modifiziert, dass variable Zell-Größen im Kalorimeter berücksichtigt werden können und das Einlesen (bzw. die Ausgabe) der Simulationsergebnisse von (in) einem LCIO file ermöglicht wird.

Das schnelle Detektorsimulationsprogramm SIMDET wurde weiter gepflegt und neue Entwicklungen wurden eingearbeitet. Die erwähnten Software-Pakete werden in einem eigens eingerichteten CVS-Server den Nutzern weltweit zur Verfügung gestellt.

## Das Zentrale Datennahme System

Ein wichtiger Aspekt der Detektorentwicklung ist das Zentrale Datennahmesystem, mit dessen Hilfe die Vielzahl der Signale der verschiedenen Detektorkomponenten erfasst, für die spätere Analyse aufbereitet und gespeichert werden. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei

auf einer verlustfreien Datenerfassung, um das physikalische Potential des ILC voll auszuschöpfen und gleichzeitig den Aufwand im Rahmen zu halten.

Beim ILC treten Kollisionen nur 5 mal pro Sekunde in einem Zeitfenster von etwa einer Millisekunde auf. In dieser einen Millisekunde treffen etwa 3000 Teilchenpakete im zeitlichen Abstand von wenigen hundert Nanosekunden aufeinander.

Diese Zeitstruktur des ILC erlaubt es, die anfallende Datenmenge während der Periode, in der die Kollisionen stattfinden, lokal in den Detektorkomponenten zu erfassen, zu speichern und in der verbleibenden Zeit von etwa 0.2 Sekunden vor der nächsten Kollision die Daten vom Detektor über ein Datennetzwerk in eine Rechnerfarm zu übertragen. In dieser werden die Daten weiterverarbeitet, die interessanten Ereignisse selektiert und letztlich die relevante Information zum Speichern für die Analyse aufbereitet. Dieses Konzept erlaubt es, auf einen konventionellen Hardware Trigger zu verzichten.

Dieses Konzept des „Software Triggers“ wurde in der ECFA/DESY Studie entwickelt und ist im TDR bereits prinzipiell beschrieben. In der anschließenden ECFA Studie sowie den Studien in Amerika und Asien wird dieses Konzept im Rahmen der interregionalen Zusammenarbeit weiterentwickelt und die Auswirkungen auf die verschiedenen Detektorkomponenten untersucht und mögliche Probleme sowie deren Lösungen erörtert.

Im Bereich der zentralen Datenerfassung sind konzeptionelle Studien über die notwendige Netzwerkbandbreite, die Rechenleistung und die Speicherkapazität notwendig. Dazu werden Abschätzungen der Ereignisgrößen in Abhängigkeit der eingesetzten Detektorkomponenten erarbeitet. Fragen der Kalibration sowie der Überwachung und Steuerung der Detektoren insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen für das Global Detector Network sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

## Ausbildung

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten zum ILC, besonders im Bereich der Physik und der Detektorentwicklungen, wird von Doktoranden und Diplomanden durchgeführt.



Das Interesse an Arbeiten im Bereich des ILC hat auch in diesem Jahr angehalten. Die Verbindung von der Entwicklung anspruchsvoller Nachweisgeräte, interessanter Physik und einer sehr internationalen Atmosphäre des Projektes hat eine hohe Attraktivität. Daneben haben etwa 10 Schüler die Möglichkeit wahrgenommen, im Laufe des Jahres zwei- bis dreiwöchige Praktiken in der ILC Arbeitsgruppe zu absolvieren. Die Schüler nehmen am „Leben“ der Forschungsgruppe teil, und verfolgen daneben ein eigenständiges, kleines Projekt, das ihnen die Möglichkeit gibt, einen Einblick in wissenschaftliches Arbeiten zu bekommen. In der Abbildung 69 ist der experimentelle Aufbau zu sehen, an dem die Schüler arbeiten.

### Zusammenfassung und Ausblick

Beide Standorte DESYs, Hamburg und Zeuthen, engagieren sich in den Arbeiten am ILC. Studien zur Physik am ILC werden an beiden Orten intensiv durchgeführt. Die Maschinenphysik hat naturgemäß ihr Schwergewicht in Hamburg, wo die großen Anlagen installiert sind. Zeuthen engagiert sich hier vor allem im Bereich der Quelle (PITZ) und der Erzeugung polarisierter Positronen. In Hamburg profitieren die Arbeiten am ILC vor allem von der Synergie mit der Entwicklung des XFEL, insbesondere in der Weiterentwicklung der supraleitenden Technologie. Darüber hinaus werden originäre Arbeiten zum Thema der Dämpfungsringe, der Strahldynamik und des Global Accelerator Networks weitergeführt. Arbeiten zum Detektor konzentrieren sich in Hamburg auf TPC Entwicklungen und die Entwicklung, den Bau und die Inbetriebnahme des HCAL Prototypen. In Zeuthen wird an der Instrumentierung der Vorwärtsrichtung gearbeitet. Alle anderen Arbeiten, speziell auch die Entwicklungen der Software, finden in enger Zusammenarbeit und Abstimmung beider Labore statt.

Im nächsten Jahr wird einer der Schwerpunkte der Arbeiten die Inbetriebnahme des großen HCAL Proto-

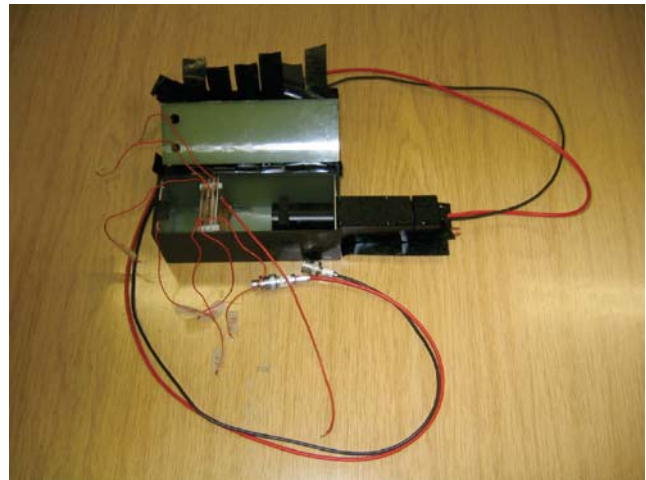


Abbildung 69: *Experimenteller Aufbau, der von Schülerinnen und Schülern im Rahmen mehrerer mehrwöchiger Praktika erstellt worden ist.*

typen sein. Zusammen mit Gruppen aus Frankreich, Großbritannien, der tschechischen Republik und Russland wird dieser im DESY Teststrahl zusammen mit einem ECAL Modul ausgetestet werden, bevor er dann im Jahre 2006 vermutlich ans Fermilab an einen hadronischen Teststrahl geht. Die Arbeiten im Bereich der anderen Detektorprojekte werden auf annähernd konstantem Niveau weitergeführt.

Nach der internationalen Entscheidung der Teilchenphysiker, den Beschleuniger in der kalten Technologie zu bauen, werden in den kommenden Jahren verstärkt Aktivitäten der FH Gruppen im Bereich der Maschine sichtbar werden. So haben bereits Arbeiten angefangen, um die Zuverlässigkeit des Beschleunigers zu simulieren. Arbeiten im Bereich der Maschineninstrumentation sind in mehreren Bereichen geplant. Insgesamt werden sich die Aktivitäten zum ILC weiter ausdehnen, und auch verstärkt Beiträge aus anderen DESY Bereichen integrieren. Dem hat auch die Gründung des ILC Projektes (<http://ilc.desy.de>) am DESY Rechnung getragen.

