



Schlussbericht

Erforschung und Entwicklung neuer Methoden und Konzepte für die Messung hadronischer Energien am ILC

Zuwendungsempfänger:	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Projektleitung:	Prof. Dr. H.-Ch. Schultz-Coulon
E-Mail:	coulon@kip.uni-heidelberg.de
Förderkennzeichen:	05HS6VH1
Förderzeitraum:	01.07.2006 – 30.06.2009
Zuwendung:	105.660,00 EUR
Projektträger:	Projektträger DESY

Genutzte Großgeräte:	Detektorentwicklung - Hochenergiephysik
Veröffentlichungen:	2
Konferenzbeiträge:	6
Diplomarbeiten:	1
Dissertationen:	0
Habilitationen:	0
Patente:	0

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 04.01.2010 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Erforschung und Entwicklung neuer Methoden und Konzepte für die Messung hadronischer Energien am ILC

Zuwendungsempfänger: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Projektleitung: Prof. Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens waren Forschung und Entwicklung für ein 'Imaging'-Kalorimeter im Rahmen der CALICE Kollaboration. Das Kirchhoff-Institut für Physik (KIP) der Universität Heidelberg war dabei speziell an den Forschungsarbeiten für den hadronischen Teil eines solchen Kalorimeters beteiligt. In Rahmen dieser Forschungsarbeiten wurde am DESY bereits 2006 ein 1m³-Prototyp für ein hoch-granulares Hadron-Kalorimeter (HCAL) gebaut, das aus einer 38-lagigen Sampling-Struktur mit alternierenden Lagen aus szintillierenden Kacheln und Stahl als Absorbermaterial besteht. Die einzelnen Szintillatorkacheln werden dabei über Wellenlängenschieber mit Hilfe von Silizium-Photomultipliern (SiPMs) ausgelesen. Der HCAL-Prototyp wurde im Verlauf der letzten Förderperiode in mehreren Teststrahlperioden intensiv getestet und für die Aufnahme hoch-granularer Schauerdaten eingesetzt. Das KIP hat sich 2007, 2008 und 2009 am Teststrahlbetrieb und der Analyse von Schauerdaten beteiligt; bei den Teststrahlmessungen am Fermilab im Jahr 2008 übernahm ein Heidelberger Doktorand zentrale Verantwortung für die Datennahme. Im Bereich der Analyse hat sich Heidelberg bisher vor allem der SiPM-Kalibration des HCAL-Prototypen gewidmet. Dabei wurde ein Verfahren zur Korrektur der Temperaturabhängigkeiten von SiPM-Verstärkungsfaktoren entwickelt.

Zu den im Förderantrag genannten Schwerpunkten der geplanten Heidelberger Forschungsarbeiten gehörte auch die Untersuchung und Charakterisierung neuartiger Silizium-Photodetektoren. Entsprechend wurde im Verlauf der Förderperiode ein Testlabor zur Vermessung von SiPM-Eigenschaften eingerichtet. SiPM-Verstärkungsfaktoren (Gains), Dunkelraten und das Rauschverhalten von Photosensoren können bestimmt werden. Photon-Detektionseffizienzen können absolut und als Funktion der Wellenlänge des einfallenden Lichts gemessen werden. Die Möglichkeit Pixel von Silizium-Photodetektoren einzeln zu beleuchten erlaubt zudem Untersuchungen zur Pixel-Uniformität sowie Studien zum Cross-Talk.

Seit Anfang 2008 ist die Heidelberger KIP-Gruppe außerdem an der Entwicklung von Ausleseelektronik für das HCAL-Projekt beteiligt. Ein in Orsay für die SiPM-Auslese entwickelter ASIC-Chip (SPIROC) wurde am DESY unter Beteiligung des Heidelberger Kirchhoff-Instituts intensiv getestet. Dabei hat sich herausgestellt, dass das Signal-zu-Rauschverhältnis des SPIROC-Chips für neuere SiPM-Modelle – mit im Vergleich zu den im HCAL-Prototyp verwendeten Sensoren typischerweise niedrigeren Verstärkungsfaktoren – nicht optimal ist. Entsprechend arbeitet die Heidelberger Gruppe jetzt an der Entwicklung eines optimierten Auslesechips. Diese Forschungsarbeiten finden in enger Zusammenarbeit mit dem LAL in Orsay und dem DESY statt.

Bericht

Einleitung

Das hier beschriebene Vorhaben dient der Erforschung und Entwicklung neuer Verfahren und Konzepte zur Vermessung von Energien hadronischer Teilchenschauer an einem zukünftigen Linearbeschleuniger wie z.B. dem ILC oder CLIC. Die diesbezüglich am Heidelberger Kirchhoff-Institut für Physik (KIP) durchgeführten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen der CALICE Kollaboration durchgeführt, die sich die Entwicklung und den Bau eines hoch-granularen so genannten 'Imaging'-Kalorimeters, das den hohen Anforderungen des 'Particle-Flow'-Konzepts genügt, zum Ziel gesetzt hat. Heidelberg ist wie im ursprünglichen Antrag geplant seit Beginn der Förderperiode an den F&E-Arbeiten für den hadronischen Teil eines solchen Kalorimeters beteiligt und seit 2007 Mitglied der CALICE Kollaboration.

Der augenblickliche Umfang der Heidelberger Beteiligung umfasst – neben unterstützenden Technikern und Ingenieuren aus den Werkstätten und dem ASIC-Labor des Kirchhoff-Instituts – drei Doktoranden und zwei Diplomanden sowie einen mit etwa 20% beteiligten Postdoktoranden. Die von der Heidelberger KIP-Gruppe im Verlauf der Förderperiode durchgeführten Forschungsarbeiten gliedern sich in drei Teilgebiete:

- Beteiligung am Teststrahlbetrieb und Analyse von Teststrahlraten
- Vermessung und Charakterisierung von Silizium-Photomultipliern (SiPMs)
- Entwicklung von ASIC-Chips zur optimierten Auslese von SiPMs.

Die Teilgebiete 1 und 2 stehen in Einklang mit der ursprünglichen im Projektantrag aufgeführten Planung. Dabei lag der Schwerpunkt in Teilbereich 1 vor allem auf der Beteiligung an den vorgesehenen Teststrahlmessungen, der Aufnahme hoch-granularer Schauerdaten sowie Arbeiten im Bereich der Detektorkalibration; mit der ebenfalls anvisierten Analyse dieser Daten zur Verbesserung existierender Schauermodelle wurde in Heidelberg erst gegen Ende der Förderperiode begonnen; hierzu werden daher erst in der kommenden Förderperiode belastbare Ergebnisse erwartet. Ebenfalls geplant waren die Arbeiten in Teilgebiet 2 zur Vermessung und Charakterisierung von SiPMs. Hier wurde eine bereits existierende Messeinrichtung angepasst und deutlich erweitert, um alle relevanten Eigenschaften von SiPMs schnell und teilweise automatisiert messen zu können. Die im Rahmen des Projekts bisher durchgeführten Vergleichsmessungen zeigen, dass es durchaus neue, weiterentwickelte Alternativen zu den augenblicklich im HCAL-Prototyp eingesetzten Photosensoren gibt, die auch eine direkte Kopplung von SiPMs an das Szintillatormaterial zulassen sollten.

Zusätzlich zu den im Projektantrag bereits aufgeführten Aktivitäten engagiert sich die Heidelberger CALICE Gruppe seit 2008 im Bereich der Elektronikentwicklung (Teilbereich 3). Ausgangspunkt war die Mitwirkung bei am DESY durchgeführten SPIROC-Tests und die aus den Ergebnissen resultierende Notwendigkeit, den Auslese-Chip für zukünftige SiPM-Generationen weiter zu optimieren. Die Anfang 2009 am KIP begonnene Chip-Entwicklungsarbeit wird durch das von der Helmholtz-Allianz "Physics at the Terascale" geförderte Heidelberger ASIC-Labor unterstützt. Ein erster Satz von Testchips wurden Ende 2009 produziert.

Heidelberg Arbeiten und Ergebnisse

Teststrahlbetrieb und Analyse von Teststrahlraten

In der letzten Förderperiode wurde der 2006 am DESY in Hamburg entwickelte 1m^3 -Prototyp für das analoge Hadron-Kalorimeter (HCAL) – zusammen mit anderen Prototyp-Kalorimetern der CALICE Kollaboration – im Rahmen mehrerer Teststrahlperioden am CERN und am Fer-

milab betrieben. Seit Herbst 2007 ist die CALICE Gruppe des Kirchhoff-Instituts an der Datennahme und der Auswertung der aufgenommenen Kalorimeterdaten beteiligt. Ein Heidelberger Doktorand war dafür bereits 2007 mehrere Wochen am CERN, um am Schichtbetrieb und der Kalibration der zur Auslese der Szintillatorkacheln verwendeten Silizium-Photomultiplier mitzuwirken. Bei den Teststrahlungsmessungen am Fermilab im Jahr 2008 übernahm das Kirchhoff-Institut dann einen Großteil der Verantwortung für das analoge HCAL. Der für diese Aufgabe ans Fermilab abgeordnete Doktorand war während dieser Zeit mit einer Vielzahl unterschiedlichster Arbeiten betraut, die von der Installation der Datennahme- und Detektorüberwachungssysteme bis hin zur Mitwirkung beim mechanischen Aufbau des experimentellen Setups reichten. Er hat damit zentral zum Erfolg der drei mehrwöchigen Datennahmeperioden am Fermilab beigetragen und eine Vielzahl neuer Testdaten sowohl für das HCAL, als auch für andere im Rahmen der CALICE Kollaboration entwickelte Kalorimeter-Prototypen, wie das silizium-basierte ECAL, den TailCatcher und das Szintillator-ECAL, aufgenommen. Im April 2009 war er dann noch ein weiteres Mal am Fermilab, um noch fehlende Messdaten bei niedrigen Strahlenergien aufzunehmen.

Neben der intensiven Beteiligung an den Teststrahlungsmessungen war das Heidelberg Kirchhoff-Institut auch bei der Analyse von Teststrahlendaten vertreten. Die Arbeiten in diesem Bereich umfassen vor allem Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der SiPM-Kalibration. Dabei wurde ein Verfahren zur Korrektur dieser Abhängigkeit bei der Kalibration der SiPM-Verstärkungsfaktoren entwickelt. Erste Ergebnisse hierzu wurden auf der NDIP-Konferenz 2008 vorgestellt. Seit dem Ende des Teststrahlbetriebs 2009 widmet sich das KIP außerdem verstärkt der Analyse von Hadronschauern. Erste Vergleiche zwischen Monte Carlo Simulation und hoch-granularen Teststrahlendaten wurden bereits in internen CALICE Meetings vorgestellt und diskutiert.

Charakterisierung von Silizium-Photomultipliern

Zu den Schwerpunkten der Heidelberger Forschungsarbeit gehört auch die Untersuchung neuer Silizium-Photodetektoren. Hier konnten im Verlauf der letzten Förderperiode mehrere Fortschritte erzielt werden. So wurden im Rahmen einer Diplomarbeit am KIP und in Zusammenarbeit mit DESY Messungen zur Energieauflösung und zum Zeitverhalten von Silizium-Photomultipliern durchgeführt. Darüber hinaus wurde ein Testlabor zur photometrischen Charakterisierung neuartiger Photosensoren eingerichtet. Mit Hilfe der aufgebauten Messapparaturen wurden im Jahr 2008 erste relative Photon-Detektionseffizienzen (wellenlängenabhängig!) bestimmt. Für eine absolute Messung der Photon-Detektionseffizienz (PDE) musste die Apparatur allerdings weiter ausgebaut werden. Dieser Ausbau wurde 2009 abgeschlossen und erste absolute PDE-Messungen wurden auf der PD09-Konferenz vorgestellt; eine Veröffentlichung ist in Vorbereitung. Das ausgebaute SiPM-Testlabor erlaubt außerdem eine einfache, halbautomatische Bestimmung von Verstärkungsfaktoren, Dunkelraten und dem Rauschverhalten von SiPMs. Die Möglichkeit SiPM-Pixel einzeln zu vermessen und für diese separat Photonspektren aufzunehmen, gestattet zudem Untersuchung der Pixel-Uniformität sowie Studien zum Cross-Talk. Erste Vergleiche zwischen mehreren auf dem Markt verfügbaren SiPM-Modellen von verschiedenen Herstellern (e.g. HAMAMATSU, SensL, MEPhl) wurden durchgeführt; die Resultate wurden intern diskutiert und in Rahmen von Konferenz-Proceedings teilweise veröffentlicht.

Die SiPM-Untersuchungen werden in enger Zusammenarbeit mit DESY und der Helmholtz-Nachwuchsgruppe von Dr. Erika Garutti durchgeführt. Insbesondere beteiligt sich Heidelberg in diesem Zusammenhang auch an der Entwicklung neuer PET-Systeme (Positron Emission Tomography), für die die im Rahmen des hier beantragten Forschungsprojekts erzielten Ergebnisse von wesentlicher Bedeutung sind.

Im Jahr 2009 hat das Heidelberger Kirchhoff-Institut zusammen mit DESY, dem Max-Planck-Institut München und der Universität Wuppertal ein virtuelles SiPM-Labor (VSL, "Virtual SiPM

Laboratory") gegründet, das von der Helmholtz-Allianz "Physics at the Terascale" unterstützt wird. Ziel des VSL ist die Bereitstellung und gemeinsame Nutzung von Infrastruktur zur Untersuchung von Silizium-Photomultipliern und ihrer Anwendung. Dies schließt neben Messapparaturen vor allem auch die Entwicklung und Bereitstellung von SiPM-Ausleseelektronik und einfacher Auslesesystem ein.

ASIC-Entwicklung zur optimierten SiPM-Auslese

Ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung eines hochgranularen Hadron-Kalorimeters ist der Bau eines sogenannten technischen Prototypen als Teil eines realen Detektors. Dies bedeutet insbesondere auch eine Einbettung der Front-End-Ausleseelektronik zwischen die einzelnen Szintillatorlagen. Wesentliche Aspekte bei der Entwicklung der Ausleseelektronik sind daher: geringe Leistungsaufnahme und damit geringe Verlustleistung. Hierzu wurde am LAL in Orsay ein spezieller ASIC-Chip (SPIROC) für die HCAL Front-End-Auslese entwickelt, dessen Vorgänger auch für die SiPM-Auslese des 1m^3 -Prototypen verwendet wird. Dieser ASIC-Chip wurde 2008 am DESY unter Beteiligung des Heidelberger Kirchhoff-Instituts intensiv getestet. Dabei hat sich der SPIROC-Chip, der als Spin-off aus Entwicklungen für die Auslese des Silizium-Wolfram-Kalorimeters (ECAL, SKIROC-Chip) entstanden ist, als nicht optimal für zukünftige SiPM-Generationen erwiesen (z.B. zu niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis, nicht-lineares Verhalten bei großen Signalen). Daher arbeitet die Heidelberger Gruppe seit Herbst 2008 an der Weiterentwicklung eines für die SiPM-Auslese optimierten ASICs. Dies geschieht in enger Zusammenarbeit mit Orsay und dem DESY. Unterstützung ist durch das Heidelberger ASIC-Labor gewährleistet, das im Rahmen der 2007 genehmigten Helmholtz-Allianz 'Physics at the Terascale' ausgebaut wurde. Die Ziele für die Neuentwicklung sind: ein größeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis, Verbesserung der Linearität, Erweiterung des dynamischen Bereichs. Ein Design einer neuen analogen Verstärkerschaltung liegt bereits vor und wurde auf der IEEE-Konferenz 2009 zusammen mit den SPIROC-Testergebnissen vorgestellt. Ein erster Satz von Testchips wurde im Herbst 2009 produziert und soll in der kommenden Förderperiode getestet und weiterentwickelt werden.

Schlußbemerkung

Als Ergebnis der im Verlauf der Förderperiode 2006 bis 2009 durchgeführten Teststrahlungsmessungen am CERN und am Fermilab hat sich das im HCAL-Prototyp umgesetzte Detektorkonzept als robust und für den sogenannten "Particle Flow"-Ansatz prinzipiell geeignet erwiesen. Erste (vorläufige) Resultate der Auswertungen von Schauerdaten liefern vernünftige Werte für die Energieauflösung elektromagnetischer und hadronischer Schauer; die für den "Particle Flow"-Algorithmus notwendige Schauerseparation scheint möglich. Darüber hinaus zeigen die zur Auslese des Szintillatorlichts verwendeten SiPMs ein ausgesprochen stabiles Verhalten. Abhängigkeiten der Betriebsparameter von der Temperatur etc. sind mit Hilfe geeigneter Korrekturen kontrollierbar.

Die Entwicklung eines ersten Detektorkonzepts für das HCAL ist – entsprechend der im Antrag angegebenen Meilensteinplanung – damit weitgehend abgeschlossen; das Kirchhoff-Institut hat hierzu mit seine Arbeiten vor allem im Bereich des Teststrahlungsmessungen wie geplant beigetragen. Der nächste Schritt ist nun die Entwicklung und der Bau eines technischen Prototypen, der sich vor allem der Skalierbarkeit des existierenden Detektorkonzepts widmet. Hierzu soll die Heidelberger Forschungsarbeit im Bereich SiPM-Charakterisierung und der Elektronikentwicklung wichtige Beiträge liefern.

Publikationen

Veröffentlichungen

N. D'Ascenzo et al., "Study of Micro Pixel Photon Counters for the Application to Positron Emission Tomography", DESY 08-047, arXiv:0805.0525 (2008).

R. Eisberg et al., "Fast and Reasonable Installation, Experience and Acceptance of a Remote Control Room", arXiv:0811.3228 (2008).

CALICE Collaboration, "Response of the Si-W Electromagnetic Calorimeter Physics Prototype to Electrons", Nucl. Inst. and Meth. A608 (2009) 372.

R. Fabbri et al., "Overview of Studies on the SPIROC Chip Characterisation", arXiv:0911.1566v1 (2009).

CALICE Collaboration, "Construction and Commissioning of the CALICE Analog Hadron Calorimeter Prototype", submitted to JINST.

P. Eckert et. al., "Characterization Studies of Silicon Photomultipliers", in preparation, to be submitted to NIM.

Publizierte Konferenzbeiträge (Proceedings)

N. D'Ascenzo et al., "Application of MPPCs to Positron Emission Tomography", Workshop on New Photon-Detectors (PD07), Kobe, Japan, 2007.

N. D'Ascenzo et al., "Application of the Micro Pixel Photon Counter to Calorimetry and PET", Workshop on New Developments in Photodetection (NDIP07), Perugia, Italien, 2007.

E. Garutti et al., "Application of Novel Silicon-Based Photo-Detector to Calorimetry and Medical Physics", IEEE-NSS 2007, Honolulu, USA, 2007.

M. Göttlich et al., "Application of Multi-Pixel Photon Counter to Positron Emission Tomography", IEEE-NSS 2008, Dresden, Germany, 2008.

A. Kaplan, "Correction of SiPM Temperature Dependencies", Workshop on New Developments in Photodetection (NDIP08), Aix-les-Bains, France, 2008.

A. Tadday et al., "Characterisation Studies of Silicon Photomultipliers for a Calorimeter for the ILC", Workshop on New Photon-Detectors (PD09), Matsumoto, Japan, 2009.

P. Jarron et al., "Time-Based Readout of a Silicon Photomultiplier (SiPM) for Time of Flight Positron Emission Tomography (TOF-PET)", IEEE-NSS 2009, Orlando, USA, 2009.

S. Callier et al., "Silicon Photomultiplier Integrated Readout Chip (SPIROC) for the ILC – Measurements and Possible Further Development", IEEE-NSS 2009, Orlando, USA, 2009.

W. Shen et al., "STIC – A Current Mode Constant Fraction Discriminator for Positron Emission Tomography using SiPMs (MPPC)", IEEE-NSS 2009, Orlando, USA, 2009.

Diplom- und Doktorarbeiten

Alexander Tadday, "Characterisation of Silicon Photomultipliers", Diplomarbeit, 2008