

DISS. ETH No. 21494

THE FIRST SEMICONDUCTOR-BASED  
CAMERA FOR IMAGING ATMOSPHERIC  
CHERENKOV TELESCOPES

Dissertation submitted to  
ETH Zurich

for the degree of  
Doctor of Sciences

Thomas Krähenbühl  
Dipl. Phys. ETH Zürich  
born February 25, 1984  
from Zäziwil, BE

Accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Felicitas Pauss, examiner  
Prof. Dr. Rainer Wallny, co-examiner  
Prof. Dr. Adrian Biland, co-examiner  
2013



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

# Abstract

The systematic exploration of our environment and its underlying principles is a fundamental human characteristic to satisfy our curiosity. Precise observations and their thorough analysis depend in general on technological aids, either initiating their specific development or pushing technologies to their limits and enhancing their application. The tight coupling of scientific progress to technological advancements requires the regular review of the currently used techniques and the evaluation of new developments from industry and other fields of research for new applications.

The begin of the industrial production of Geiger-mode Avalanche Photodiodes (G-APD) for the measurement of light on the single photon level a few years ago implied the need for an evaluation of the currently used Photomultiplier Tubes (PMT) for the detection of weak Cherenkov light flashes initiated by high-energetic particles from galactic and extra-galactic sources. The field of Very High Energy (VHE) astrophysics measures and analyses gamma rays with energies above 30 GeV, which are emitted by cosmic objects such as supernova remnants, pulsars or Active Galactic Nuclei (AGN). When these gamma rays arrive at the earth's atmosphere, they initiate a shower of secondary particles, which in turn emit Cherenkov light. The measurement of this light using Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACT) requires cameras with fast and single-photon sensitive photosensors. All major experiments in this field currently use PMTs for this task. The availability of semiconductor photosensors in the form of G-APDs with the potential of a facilitated implementation and improved performance with the drawbacks of a strong temperature and voltage dependence, slower signals and a completely different noise characteristic, raised the question of their applicability in IACT cameras. The First G-APD Cherenkov Telescope (FACT) collaboration designed and built the first camera based on this novel technology, which is operational since autumn 2011 and shows excellent performance characteristics.

At the start of this PhD thesis in 2008, many questions concerning the characteristics and correct usage of G-APDs were not yet answered, and it was my task in the collaboration to find and evaluate potential problems. Through laboratory measurements, computer simulations and analytic calculations I characterized the behavior of G-APDs under the viewpoint of their application in an IACT camera. The voltage dependencies of gain, crosstalk probability and photon detection efficiency were measured and combined with a mathematical model of the sensor response. The various components influencing the precision of measured signals were identified and characterized, allowing to compare their relevance quantitatively. Based on these investigations, the optimal G-APD type for the FACT camera was identified.

In summer 2009, the construction of a prototype camera was finished and successfully used for the first measurement of Cherenkov air showers in a self-triggering mode using G-APDs. A full camera with 1440 pixels and in-camera digitization electronics for the operation in a refurbished telescope mount of the pioneering HEGRA Cherenkov telescope array was subsequently constructed. Besides tests and characterization measurements of camera electronics I participated in the development of optical light guides

(“light-collecting cones”) and established measurements for the quality assurance in their production. The optical light guides were glued onto the photosensors, which required the evaluation of cleaning and gluing procedures. I participated in the development of these procedures and ensured the gluing quality and correct administration of the photosensors and pixels during the assembly of the sensor compartment.

After extensive laboratory tests, the final camera was installed in the telescope on the Roque de los Muchachos on La Palma, Spain, and switched on in the evening of October 11, 2011. The camera was instantly operational and shows excellent performance parameters. Using laboratory and telescope measurements I characterized the homogeneity of the photon detection efficiency and the gain of the camera, which have an RMS of  $<7\%$  and  $<5\%$  without fine-tuning, respectively. For the analysis software, I contributed algorithms for the calibration step, in particular an algorithm which allows the in-situ calibration of observation data without additional information. This allowed to evaluate the stability of the FACT camera under various observation conditions, where it proved to be exceptionally stable using a real-time bias voltage regulation system. The regular remote observations since summer 2012 and the planned robotic observations are only possible due to the high reliability of the camera. The advantages of the photosensors could be fully exploited while keeping the drawbacks well under control.

The successful observation of three sources (Crab, Markarian 421, Markarian 501) with FACT was communicated to the astrophysics community half a year after recording the first air showers. Regular updates on the experience with the new camera established G-APDs as an excellent alternative to PMTs and FACT as an excellent monitoring instrument for variable galactic and extra-galactic sources.

# Zusammenfassung

Die systematische Erforschung unserer Umgebung und der ihr zugrunde liegenden Prinzipien ist eine grundlegende menschliche Eigenart zur Befriedigung unserer Neugierde. Präzise Beobachtungen und ihre sorgfältige Analyse benötigen im Allgemeinen technologische Hilfsmittel, welche entweder spezifisch entwickelt werden oder die auf vorhandenen Technologien basieren und diese an ihre Grenzen bringen und ihre Anwendung weiterentwickeln. Die enge Kopplung von wissenschaftlichem Fortschritt und technologischen Verbesserungen bedingt die regelmässige Überprüfung der gegenwärtig verwendeten Verfahren sowie die Evaluierung neuer Entwicklungen aus Industrie und anderen Forschungsrichtungen auf neue Anwendungen.

Der Beginn der industriellen Produktion von Geiger-mode Avalanche Photodiodes (G-APD) zur Lichtdetektion auf Einzelphotonenlevel vor einigen Jahren machte die Evaluation der gegenwärtig verwendeten Photomultiplier Tubes (PMT) zur Detektion von schwachen Lichtblitzen nötig, welche durch hochenergetische Teilchen von galaktischen und extra-galaktischen Quellen ausgelöst werden. Das Forschungsgebiet der Very High Energy (VHE) Astrophysik misst und analysiert Gammateilchen mit einer Energie über 30 GeV, welche von kosmischen Quellen wie Supernova-Überresten, Pulsaren oder Aktiven Galaxienkernen ausgestossen werden. Wenn diese Gammastrahlen auf die Erdatmosphäre treffen, initiieren sie einen Schauer von Sekundärteilchen, welche wiederum Cherenkovlicht aussenden. Dieses Licht wird von Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACT) aufgefangen und detektiert, was Kameras mit schnellen und sehr sensitiven Lichtsensoren benötigt. Sämtliche grossen Experimente in diesem Feld benutzen dazu PMTs. Die Verfügbarkeit von Halbleiter-Lichtsensoren in der Form von G-APDs mit dem Potential einer vereinfachten Anwendung und verbesserter Leistung mit den Nachteilen einer starken Temperatur- und Spannungsabhängigkeit, langsameren Signalen und komplett andersartiger Rauschcharakteristik warf die Frage auf, ob sie in IACTs anwendbar seien. Die "First G-APD Cherenkov Telescope" (FACT) Kollaboration plante und baute die erste Kamera basierend auf dieser neuartigen Technologie, welche seit Herbst 2011 in Betrieb ist und exzellente Leistungsmerkmale aufweist.

Beim Beginn dieser Doktorarbeit in 2008 waren noch viele Fragen bezüglich der Eigenschaften und korrekten Verwendung von G-APDs offen, und es war meine Aufgabe innerhalb der Kollaboration, potentielle Probleme zu finden und zu evaluieren. Durch Labormessungen, Computersimulationen und analytische Berechnungen charakterisierte ich das Verhalten von G-APDs unter dem Gesichtspunkt ihrer Anwendung in einer IACT-Kamera. Die Spannungsabhängigkeit ihrer Lawinenverstärkung, Übersprech-Rauschwahrscheinlichkeit sowie Lichtdetektionseffizienz wurde gemessen und in ein mathematisches Modell der Sensorsignale eingebaut. Die verschiedenen Komponenten welche die Präzision der gemessenen Signale beeinflussen wurden gemessen und charakterisiert, was den Vergleich ihrer quantitativen Relevanz ermöglicht. Basierend auf diesen Untersuchungen wurde die optimale G-APD für die FACT-Kamera ausgewählt.

Im Sommer 2009 wurde die Konstruktion einer Prototypenkamera abgeschlossen und erfolgreich für die erste Messung von Cherenkov-Luftschauern mit G-APDs in einem un-

abhängig ausgelösten Messmodus verwendet. Daraufhin wurde eine komplette Kamera mit 1440 Pixeln und integrierter Digitalisierung der Sensorsignale konstruiert, welche zur Verwendung in einem instandgesetzten Teleskop des HEGRA-Experiments vorgesehen war. Nebst Tests und Messungen an der Kameraelektronik war ich an der Entwicklung der optischen Lichtleiter beteiligt und entwickelte Messmethoden zur Qualitätssicherung in deren Produktion. Die optischen Lichtleiter wurden auf die Lichtsensoren aufgeklebt, was die Evaluation von Reinigungs- und Klebprozeduren benötigte. Ich entwickelte diese Methoden mit und war für die Qualität der Klebungen sowie die korrekte Administration der Lichtsensoren und Pixel während der Konstruktion des Sensorabteils verantwortlich.

Nach ausführlichen Labortests wurde die Kamera im Teleskop auf dem Roque de los Muchachos auf La Palma (Spanien) installiert, und am Abend des 11. Oktobers 2011 eingeschaltet. Die Kamera war sofort betriebsbereit und weist exzellente Leistungswerte auf. Mit Hilfe von Labor- und Teleskop-Messungen charakterisierte ich die Homogenität der Detektionseffizienz und Signalgrösse der Kamera, welche ohne Feintuning direkt nach Inbetriebnahme ein RMS von  $<7\%$  respektive  $<5\%$  aufwiesen. Für die Analyse-Software entwickelte ich Algorithmen zur Datenkalibration, welche insbesondere die Kalibration aus den Daten selbst ohne weitere Hilfsmittel ermöglicht. Dies erlaubte die Untersuchung der Stabilität der FACT-Kamera unter verschiedensten Beobachtungsbedingungen, wobei sie sich unter Verwendung einer Echtzeit-Spannungsregulierung als ausserordentlich stabil erwies. Der regelmässige ferngesteuerte Betrieb seit Sommer 2012 und die geplante robotische Teleskop-Steuerung sind nur möglich dank der hohen Zuverlässigkeit der Kamera. Die Vorteile der Lichtsensoren konnten voll ausgenutzt werden, während ihre Nachteile gut unter Kontrolle gehalten werden konnten.

Die erfolgreiche Beobachtung dreier Quellen (Krebs-Nebel, Markarian 421, Markarian 501) durch FACT wurde der Astrophysik-Gemeinschaft ein halbes Jahr nach der Beobachtung der ersten Luftschauern mitgeteilt. Regelmässige Aktualisierungen über die Erfahrungen mit der neuen Kamera etablierten G-APDs als hervorragende Alternative zu PMTs, und FACT als exzellentes Beobachtungsinstrument für variable galaktische und extragalaktische Quellen.