

DISS. ETH NO. 23069

Design and commissioning of the trigger electronics for a novel Geiger-mode avalanche photodiode based camera for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Patrick Ernst Vogler
MSc. ETH Physics

born August 1, 1981
citizen of Niederrohrdorf, AG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Felicitas Pauss, examiner
Prof. Dr. Günther Dissertori, co-examiner
Prof. Dr. Adrian Biland, co-examiner

2015

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Abstract

The successful operation of large ground-based Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs) has opened a new window in astronomy by observing very high-energy (VHE) gamma rays in the energy range between 0.1 – 100 TeV, originating from galactic and extragalactic sources. When entering into the atmosphere, the gamma rays initiate the formation of showers of secondary particles that emit Cherenkov light. These short and faint flashes of light can be measured with IACTs requiring fast and sensitive cameras, which were so far solely based on Photo-Multiplier tubes (PMTs). When silicon-based semiconductor light sensors, so called G-APDs, became commercially available, their application as new photo-sensor in the very demanding field of ground-based gamma ray astronomy, had to be demonstrated. The **F**irst **G**-**A**PD **C**herenkov **T**elescope (FACT) was constructed with the aim to operate a full-scale IACT using a novel camera concept based on G-APDs.

To prove that G-APD are a viable alternative for the next generation of IACTs currently under design for the large scale project CTA (Cherenkov Telescope Array, an observatory for ground-based gamma-ray astronomy), it was crucial to get a fully functional system in a rather short time frame. Therefore, it was not possible to extensively test and calibrate the full camera system in the laboratory at ETH in Zurich. In autumn 2011, the FACT camera was shipped to La Palma, Canary Islands (Spain) and installed on a refurbished HEGRA Cherenkov telescope mount located on the Roque de los Muchachos observatory. On 11 October 2011, FACT successfully triggered the first air showers - only hours after installation.

This thesis describes in detail the design, construction and commissioning of the trigger system's hardware and firmware. The trigger of FACT is based on the analogue sum of trigger patches consisting of nine adjacent pixels. To each sum, a programmable threshold is applied.

Not being able to perform all tests in the laboratory before installation in La Palma required a detailed analysis and optimization of the trigger system during the commissioning and data-taking phase. As a remedial measure, methods were developed to investigate the trigger using standard physics data as well as some special runs taken under non-standard operation modes. These analyses fully confirmed that the functionality and performance of the trigger system is according to the expectations. Furthermore it also allowed investigating a few remaining irregularities, which are now well understood. In particular, there are a few trigger patches that suffer from externally induced noise and distortion, although their effect on standard data taking is negligible. While the trigger was highly uniform from the beginning, the analysis allows to even better flatfielding the trigger threshold for different patches without hardware modifications. It could be demonstrated that a simple analogue sum-trigger is sufficient for a G-APD based IACT camera. Furthermore it also could be shown that the problem of after-pulses present in cameras based on PMTs is not an issue for the FACT system.

The camera is now operating since several years without major problems. So far no performance degradation could be detected. Based on the different measurements performed, a few-% stability could be reached by correcting for temperature effects in real time and independent of light conditions. Based on the experience gained with FACT, possible improvements for future similar systems are also proposed.

Zusammenfassung

Der erfolgreiche Betrieb von grossen bodengebundenen Cherenkov-Teleskopen, sogenannten Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs), hat der beobachtenden Astronomie den neuen Energiebereich der Gammastrahlen im Bereich von 0.1 – 100 TeV erschlossen. Diese sogenannte very high energy (VHE) Gammastrahlung wird sowohl von galaktischen als auch extragalaktischen VHE Gamma-quellen abgestrahlt. Beim Auftreffen von VHE Gammastrahlung auf die Erdatmosphäre entstehen Sekundärteilchen welche ausgedehnte Luftschauer bilden. Elektrisch geladene Sekundärteilchen strahlen Cherenkov Licht ab, welches am Boden in Form von kurzen, schwachen Lichtpulsen mittels Cherenkov-Teleskopen detektiert werden kann. Diese Teleskope benötigen hierzu sehr schnelle und äusserst empfindliche Kameras, welche bisher ausschliesslich auf Photoelektronenvervielfachern, auch PMTs (engl. photomultiplier tubes) genannt, basierten. Inzwischen sind neuartige Silizium-basierten Halbleiter-Photosensoren, so genannte G-APDs (engl. Geigermode Avalanche Photo-Diode) kommerziell erhältlich, deren Eignung als Photosensoren in den Kameras von Cherenkov-Teleskopen zu beweisen war. Dazu wurde die **F**irst **G**-APD **C**herenkov **T**elescope (FACT) - Kollaboration gegründet mit dem Ziel eine vollständige, auf G-APDs basierte Kamera für ein Cherenkov-Teleskop zu entwickeln, herzustellen und in einem Teleskop zu betreiben.

Um zu zeigen, dass G-APD für das sich in der Planungsphase befindende grosse Observatorium für VHE Gammastrahlung, genannt CTA (Cherenkov Telescope Array, an observatory for ground-based gamma-ray astronomy) geeignet sind, stand die Entwicklung unter grossem Zeitdruck. Daher waren umfangreiche Tests und die Kalibration der FACT Kamera in den Laboratorien der ETH in Zürich nicht möglich. Im Herbst 2011 wurde die Kamera auf der Kanareninsel La Palma (Spanien) in das revidierte HEGRA Cherenkov-Teleskop am dortigen Observatorium auf dem Roque de los Muchachos eingebaut. Am 11. Oktober 2011, nur wenige Stunden nach der Montage der Kamera, triggerte FACT bereits die ersten Cherenkov Luftschauern.

In dieser Dissertation werden Entwicklung und Bau sowie Inbetriebnahme des Triggersystems der FACT-Kamera beschrieben. Dies umfasst sowohl die Hardware als auch die zugehörige Firmware. Das Triggersystem der FACT-Kamera basiert auf einem analogen Summentrigger mit aus jeweils neun benachbarten Pixeln bestehenden Triggerpatches. Wobei die Trigger-Schwelle der Triggerpatches individuell eingestellt werden können.

Da es aus Zeitgründen nicht möglich war, das Triggersystem vor dem endgültigen Einbau in die Kamera umfassend zu charakterisieren, geschah dies ersatzweise anhand von auf La Palma erhobenen Physik-Daten. Ergänzend wurden diverse technische Messungen mit dem gesamten System durchgeführt und analysiert. Die volle Funktionalität des Triggersystems konnte so belegt werden. Die wenigen verbleibenden Unregelmässigkeiten, insbesondere ein

paar wenige, von Rauschen und Störsignalen betroffene Triggerpatches, beeinträchtigen den regulären Beobachtungsbetrieb nur in vernachlässigbarer Weise. Das Triggersystem der FACT-Kamera war von Anfang an äusserst homogen. Die Analyse der Daten erlaubte aber noch eine Verbesserung der Homogenität ohne Modifikationen der Hardware. Im weiteren konnte gezeigt werden, dass bei Verwendung von G-APDs als Photosensoren, ein analoger Summentrigger für eine IACT-Kamera vollständig ausreicht. Die befürchteten und von PMT-basierten Kameras bekannten Probleme durch Nachpulse (Afterpulsing) traten nicht auf.

Die FACT-Kamera ist nun schon seit mehreren Jahren im Betrieb, ohne dass dabei schwerwiegende Probleme auftraten. Eine Reduktion der Empfindlichkeit der G-APDs wurde nicht festgestellt. Nach Anwendung der notwendigen Temperaturkorrekturen in Echtzeit, konnte eine Stabilität im Bereich weniger Prozent über den gesamten Bereich der Betriebstemperatur und bei allen Lichtverhältnissen ermittelt werden. Basierend auf diesen Resultaten und den gewonnenen Erfahrungen werden abschliessend verschiedene Vorschläge zur Verbesserung ähnlicher, zukünftiger Instrumente präsentiert.