BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Bergische Universität Wuppertal
Gaußstraße 20
42119 Wuppertal
Fakultät für Mathematik
und Naturwissenschaften - Physik

Aufbau und Charakterisierung eines Serienteststandes für HAMAMATSU H12700 MAPMTs und erste Messergebnisse

Masterthesis
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science (M.Sc.) Physik

Der Fachgruppe Physik vorgelegt von

Jörg Förtsch
1022595
j.foertsch@uni-wuppertal.de

Wuppertal, August 2016

1.Gutachter
Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert

2.Gutachter
Prof. Dr. Christian Zeitnitz

Betreuer
Dr. Christian Pauly

Abstract

This thesis describes the building of a MAPMT series testbench. The test stand uses the principle of an untriggered measurement of "single" photons. This method allows to measure many different MAPMT characteristics for three MAPMTs during one seven hour scan. Results and limitations of the testbench are discussed regarding 400 HAMAMATSU H12700 MAPMTs.

Kurzfassung

Diese Thesis beschreibt den Aufbau eines MAPMT Serienteststandes. Der Teststand verwendet das Prinzip der ungetriggerten Messung von "einzelnen" Photonen. Diese Methode erlaubt es, viele verschiedene MAPMT-Eigenschaften für drei MAPMTs in nur einem Messdurchlauf von sieben Stunden zu messen. Die Ergebnisse und Limitierungen des Teststandes werden anhand 400 HAMAMATSU H12700 MAPMTs diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation **1**
1.1 Gliederung . . . 3

2 Theorie **5**
2.1 Photomultiplier . . . 5
2.2 Der HAMAMATSU H12700 MAPMT . . . 10
2.3 Verwendete Hardware und Softwareumgebungen . . . 12

3 Aufbau und verwendete Bauteile des Messstandes **15**
3.1 Funktionsprinzip . . . 15
3.2 Aufbau des Serienteststandes . . . 16
3.3 Leuchtquelle . . . 18
3.4 XY-Tisch . . . 22
3.5 n-XYTER-FEB Aufbau und Kalibration . . . 25
3.6 Gehäuse und Lichtdichtigkeit . . . 28

4 Software und die Standardmessung **31**
4.1 Der EPICS IOC . . . 31
4.2 CSS-Hauptbenutzeroberfläche . . . 33
4.3 Standard Messeinstellungen und weitere Benutzeroberflächen . . . 35
4.4 Weitere Hardwareeinstellungen der Standardmessung . . . 37
4.5 Datenanalyse und zeitliche Einordnung von Events . . . 38

5 Standard Messgrößen **39**
5.1 Effizienz und der "Efficiency-Index" . . . 39
5.2 Effektive Fläche . . . 44
5.3 Schiefheit (Skeweness) . . . 46
5.4 Einzelelektronenvervielfachung . . . 48
5.5 Dunkelrate . . . 51
5.6 Nachpulshäufigkeit . . . 54
5.7 Zusammenfassung aller Standardmessgrößen . . . 56

6 Analyse von 400 H12700 MAPMTs **57**
6.1 Doppelseitiges MAPMT-Infoblatt . . . 57
6.2 Vergleich mit dem H8500 MAPMT . . . 64
6.3 Vergleich der Lieferchargen . . . 69
6.4 Artefakte bei vermessenen MAPMTs und Retouren . . . 72

7 Zusammenfassung und Ausblick **79**

A Weitere Graphiken **87**

B Weitere Tabellen **95**

C Verschiedene Messgrößen aller MAPMTs **97**

Literatur **105**

Danksagung **109**

Erklärung **111**

1 Motivation

Das Compressed Baryonic Matter Experiment (CBM) und das High Acceptance DiElectron Spectrometer Experiment (HADES) Upgrade sind zwei Experimente am momentan in der Bauphase befindlichen FAIR[1]-Beschleuniger (SIS100) und haben es sich zur Aufgabe gemacht, Schwerionenkollisionen zu untersuchen. Das HADES-Experiment liefert bereits seit 1995 wichtige Daten zur Erforschung von Schwerionenkollisionen und soll, nach einer Aktualisierungsphase, zuerst am SIS18 an der GSI getestet werden. Das CBM-Experiment soll, mit dem fertigen SIS100 Beschleuniger, bis 2022 fertig aufgebaut sein.

Bei Schwerionenkollisionen entsteht gängigen Theorien zufolge ein sogenannter Feuerball mit extrem hohen baryonischen Dichten und Temperaturen. Zur Untersuchung dieses Feuerballes ist es hilfreich Teilchen zu untersuchen, die lediglich innerhalb dieses Feuerballs wechselwirken. Solche Teilchen können z.B. leichte Vektormesonen sein, welche vor dem Verlassen des Feuerballs in ein Dileptonenpaar zerfallen. Diese selten entstehenden Dileptonenpaare wechselwirken nicht mehr hadronisch. Die entstandenen Dileptonenpaare nachzuweisen ist jedoch schwierig, denn wenn man schwere Teilchen kollidieren lässt, entstehen viele Fragmente, sodass der Nachweis und das Vermessen einzelner Teilchen schwierig wird. Es ist daher bei solchen Experimenten von besonderer Wichtigkeit die einzelnen Fragmente mit hoher Präzision identifizieren zu können.

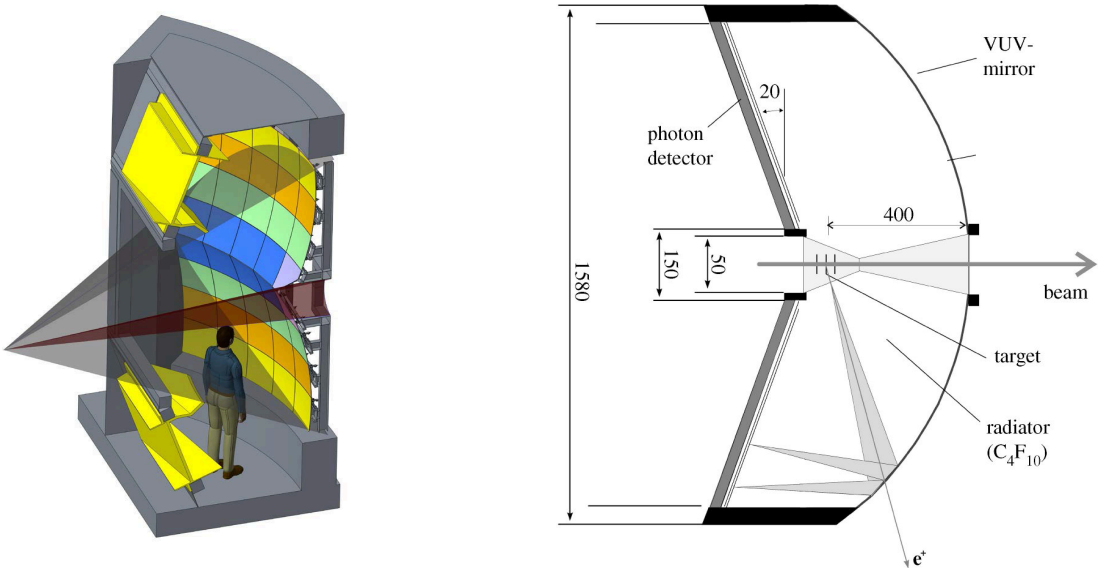


Abb. 1.1 ♦ *Darstellungen des CBM-RICH-Detektors (links) und HADES-RICH-Detektors (rechts). Der CBM-RICH ist aufgeschnitten mit farbig dargestellten Spiegelteilen und gelb dargestellter, den Photodetektor umschließender Metallbox abgebildet (entnommen aus Quelle [Rya16]). Der HADES-RICH ist als abgewandelte technische Zeichnung des alten HADES-RICH-Aufbaus dargestellt. Aus Quelle [ZEF+99] entnommen und bearbeitet.*

[1] Facility for Antiproton and Ion Research

Hierzu wird in den beiden oben genannten Experimenten ein Ring-abbildender Čerenkov Detektor (RICH) verwendet. Ein solcher Detektor nutzt den Čerenkov Effekt aus, bei dem ein Teilchen, welches sich mit einer Geschwindigkeit größer der Lichtgeschwindigkeit im Medium durch dieses bewegt, Licht unter dem Čerenkov-Winkel emittiert. Dieser Winkel berechnet sich nach

$$\begin{aligned} \cos(\Theta) &= {}^{1}/_{n\beta} \\ \Leftrightarrow \beta &= {}^{1}/_{n\cos(\Theta)} \end{aligned}$$

, mit n als Brechungsindex des Mediums und $\beta = {}^{v}/_{c}$ als Geschwindigkeit des Teilchens. Das kontinuierliche Abstrahlen von Photonen unter diesem Winkel erzeugt den sogenannten Čerenkov-Konus, welcher über Parabolspiegel auf einen Kreis abgebildet werden kann. Misst man den Radius des Kreises, hat man indirekt die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt und kann unter Verwendung des Impulses

$$\begin{aligned} p &= {}^{m\beta c}/\sqrt{1-\beta^2} \\ \Leftrightarrow m &= p \times \sqrt{1-\beta^2}/\beta c \end{aligned}$$

, die Masse m und somit das Teilchen selbst bestimmen.

Um die Photonen des Čerenkov-Ringes mit möglichst wenig Verlusten zu bestimmen, bietet sich die Verwendung eines PhotoMultiplier (PMT) an. Ein Photomultiplier dient zur Detektion einzelner Photonen und verwendet hierzu dem photoelektrischen Effekt und die Elektronenvervielfachung. Ein einzelner Photomultiplier vermag hierbei nicht Photonen ortsaufgelöst zu messen. Daher wird zur Bestimmung des Ringradius ein MultiAnoden PhotoMultiplier (MAPMT) verwendet. Dieser MAPMT hat dasselbe Funktionsprinzip wie ein normaler PMT, fokussiert und verstärkt die dem photoelektrischen Effekt entstammenden Photoelektronen in verschiedenen Kanälen. Die verschiedenen Kanäle des MAPMT enden auf einzeln abgreifbaren Anodenpads und fügen so dem PMT-Prinzip eine Ortsauflösung hinzu.

Das CBM und HADES Experiment haben über eine mehrere Jahre andauernde Forschungs- und Entwicklungsphase einen ihren Bedürfnissen genügenden MAPMT gefunden. Der rechteckige H12700 MAPMT von HAMAMATSU hat 8×8 Pixel und kombiniert eine gute effektive Fläche, gute Einzelphotonenvervielfachung und gute Effizienz, geringes Rauschen und geringes Kanalübersprechen und ist daher ideal für die Anwendung in den RICH-Detektoren der beiden Experimente.

Im Sommer 2015 entschloss sich das CBM-Experiment 1100 H12700 MAPMTs zu kaufen. Seit Herbst 2015 werden pro Monat 50 MAPMTs geliefert. Daraus folgt, dass bis zum Sommer 2017 alle MAPMTs geliefert sind. Da die MAPMTs zu diesem Zeitpunkt nicht direkt verwendet werden können, werden sie vorerst an das HADES-Experiment zum Test der, mit CBM gemeinsam entwickelten Ausleseelektronik verliehen. Aufgrund der kurzen Lieferzeitspanne ist es von großer Wichtigkeit die MAPMTs direkt charakterisieren zu können. Hierzu wurde ein Serienteststand basierend auf dem Nachweis von Einzelphotonen entwickelt, der die 50 pro Monat gelieferten MAPMT nach verschiedenen Parametern differenziert. Eine ungetriggerte Messung von Einzelphotonen liefert direkten Aufschluss über Einzelelektronennachweiseffizienz, Dunkelrauschen, Einzelphotonenspektrum und weitere wichtige Größen in nur einem Messdurchlauf. Die Charakterisierung gibt dem Hersteller wertvolle Resonanz, um die Produktion der MAPMTs zu verbessern, und hilft bei der Gruppierung auf der späteren Detektorfläche. Weiter erlaubt er fehlerhafte PMTs zu registrieren und ermöglicht damit Reklamationen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau, der Charakterisierung und den Messergebnissen des Serienteststandes. Zur Charakterisierung des Teststandes wurden Messergebnisse der ersten 400 gelieferten MAPMTs untersucht und analysiert.

1.1 Gliederung

Die Thesis beginnt mit einer Übersicht über die theoretischen Eigenschaften eines (MA)PMTs. Der HAMAMATSU H12700 MAPMT und die ausgehandelten Kaufspezifikationen werden kurz behandelt. Dann werden einige Bauteile des Teststandes kurz anhand ihrer, den Datenblättern entnehmbaren Eigenschaften vorgestellt.

Im nächsten Kapitel (Kapitel 3) wird das Messprinzip und die Umsetzung besprochen. Um die Realisierbarkeit der Messung mit den gewählten Bauteilen zu begründen, wurden Messungen zu den Hauptbestandteilen des Teststandes gemacht. Diese Messungen zeigen Limitierungen und die Funktionstüchtigkeit des Gesamtaufbaus.

In Kapitel 4 werden Software und Analyse vorgestellt. Die Programmierung und Möglichkeiten des Motortreibers in der EPICS-Softwareumgebung werden dargestellt. Die Benutzeroberfläche für den Teststand, ihr Design und Funktionalität werden gezeigt. Die Messeinstellungen, welche für die 400 später vorgestellten Messungen verwendet wurden, werden motiviert. Zuletzt wird das Analyseprinzip grob skizziert.

Kapitel 5 beschäftigt sich tiefer gehend mit der Analyse und den aus ihr entnehmbaren Messgrößen. Diese werden motiviert und ihre Berechnung dargestellt. Anhand der Messdaten des Referenz-PMTs werden Fehler auf die Größen bestimmt und diskutiert.

Im letzten Kapitel 6 werden Messungen von 400 HAMAMATSU H12700 MAPMTs ausgewertet. Zu Beginn wird das Infoblatt vorgestellt, welches zu jedem MAPMT von der Analyse ausgegeben wird. Mithilfe der Messdaten und der, im vorherigen Kapitel diskutierten, Fehler wird ein Vergleich zu dem gleichgroßen älteren MAPMT Modell H8500 gezogen. Dann werden die einzelnen Lieferchargen miteinander verglichen, um gewisse Trends in der Produktion zu erfassen. Zuletzt werden verschiedene Artefakte einzelner MAPMTs gezeigt und beschrieben, um schlussendlich deren Herkunft zu erläutern.

Zuletzt folgt das Fazit in Kapitel 7 .

2 Theorie

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen von Photomultipliern und der verwendeten Hardware. Es gibt einen Überblick über den HAMAMATSU H12700 und die beim Kauf vertraglich garantierten Spezifikationen. Abschließend werden Softwareumgebungen und Hardwarebausteine beleuchtet.

2.1 Photomultiplier

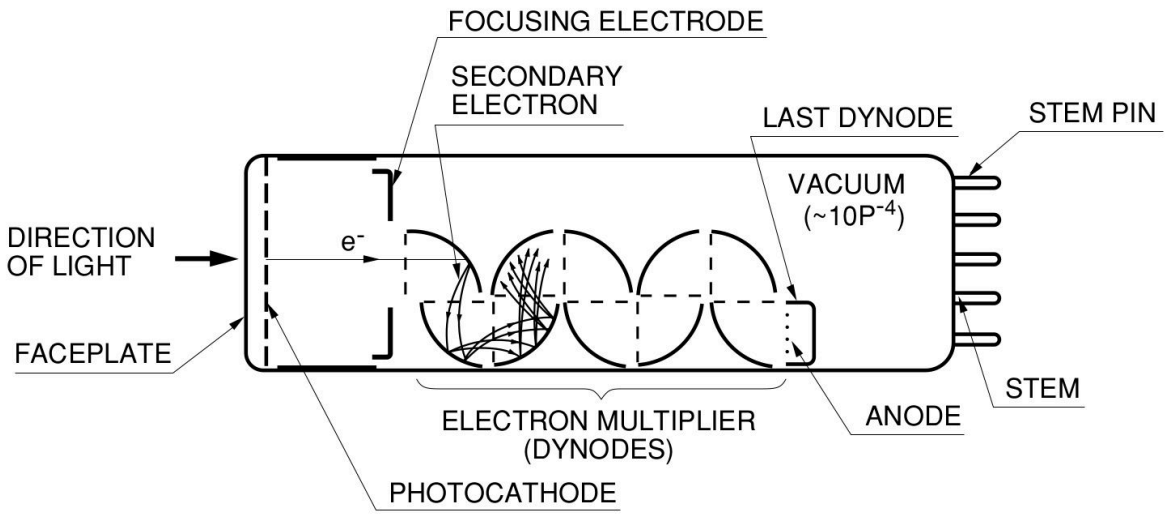


Abb. 2.1 ♦ *Schematische Darstellung eines Photomultipliers, entnommen aus Quelle [HAM07]. Gezeigt sind Funktionsweise der Photokathode, der fokussierenden Elektrode, der Sekundärelektronenvervielfacher und der Anode. Mit Pfeilen eingezeichnete Elektronentrajektorien deuten Vervielfachung an.*

Photomultiplier sind Photoelektronenvervielfacher und dienen dem Zweck, Lichtsignale mit wenigen Photonen, hier sogar einzelnen Photonen, in elektrische Signale umzuwandeln und ausreichend zu verstärken, um einen elektronischen Nachweis zu ermöglichen. Der Photomultiplier besteht aus einem Gehäuse mit Frontfenster, einer dort aufgedampften Photokathode, der Fokussierelektrode, dem Sekundärelektronenvervielfacher und einer Anode zum Abgreifen des Messpulses (vgl. Abb. 2.1).

Fenster

Die Photokathode, welche über den photoelektrischen Effekt bei eintreffenden Photonen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Photoelektron emittiert, ist auf dem Frontfenster aufgebracht. Das Frontfenster muss für die zu messenden Photonen durchlässig sein. Geeignete Materialien sind Borosilikatglas mit einer Transmission ab 300 nm, UV-Glas mit einer Transmission ab 185 nm und Quarzglas mit einer Transmission ab 170 nm ([HAM07, S. 48f]). Die genannten Fenstertypen werden auf verschiedenen PMTs verwendet und bieten neben unterschiedlichen Transmissionswellenlängen auch andere Eigenschaften, die entweder Produktion

(Ausdehnungskoeffizient vom Glas gegenüber dem PMT ist zu verschieden), Lagerung (Dichte gegenüber Helium ist zu gering) oder die Messung (höhere Dunkelrate) erschweren.

Photokathode

Die aufgedampfte Photokathode lässt sich primär nach ihrer Effizienz und ihrem spektralen Frequenzpeak unterscheiden. Typische Kathodenmaterialien sind Sb-Rb-Cs oder Sb-K-Cs und werden als Bialkali-Kathode (BA) bezeichnet. Eine solche Kathode hat eine maximale Quanteneffizienz (QE) von ungefähr 25%. Die Quanteneffizienz ist hierbei die Wahrscheinlichkeit bei eintreffendem Photon ein Photoelektron zu emittieren.

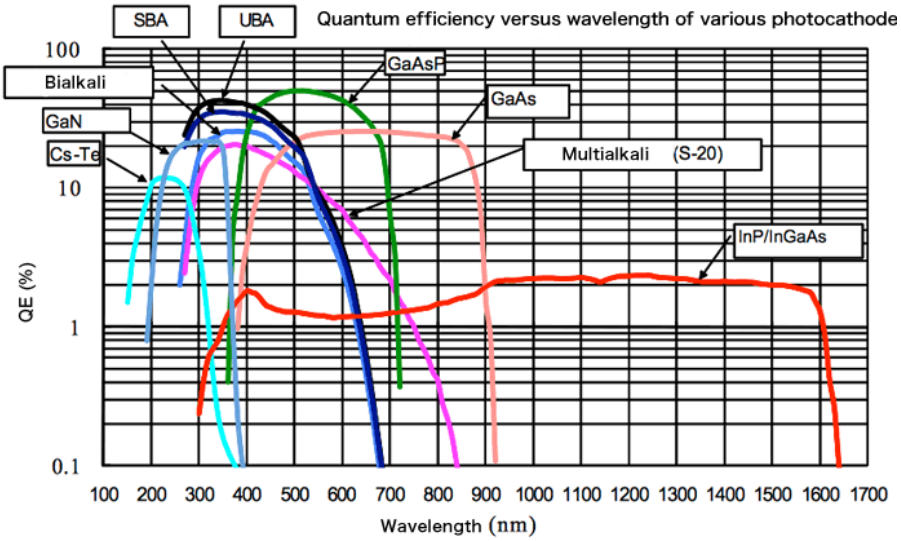


Abb. 2.2 ♦ *Darstellung der Quanteneffizienzen zu verschiedenen Wellenlängen verschiedener Kathodenmaterialien (entnommen von [Ham16]).*

Die genauen Kathodenmaterialien und Zusammensetzungen sind gerade bei unterschiedlichen Herstellern verschieden und lassen sich meist auch nicht genau angeben. Unterschieden werden daher weitere Kathodentypen wie Super-Bialkali (SBA) mit einer Maximaleffizienz von 35% und Ultra-Bialkali (UBA) Kathoden mit einer maximalen Effizienz von 43%. Zu beachten ist, dass nicht alle Kathodentypen auf jeden PMT aufgedampft werden können. So gibt es bisher keinen 2 inch-Multianodenphotomultiplier von HAMAMATSU mit einer UBA-Kathode. Alle diese Kathoden haben ihre maximale Quanteneffizienz um 350 nm, sind aber effizient bis meist 700 nm. Zu kleineren Wellenlängen ist meist die Transmission des Fensters der limitierende Faktor. Weitere Kathodenmaterialien, welche deutlich andere Frequenzbereiche abdecken, werden hier nicht weiter behandelt . Eine Darstellung verschiedener Kathodentypen und ihrer Quanteneffizienz bei verschiedenen Wellenlängen findet sich in Abb. 2.2 . HAMAMATSU gibt zur Unterscheidung verschiedener PMTs den sogenannten "Blue-Sensitivity-Index" an. Der Index ergibt sich aus einer Kathodenstrommessung bei 150V mit einer Wolframlampe definierter Intensität und vorgeschobenem Blaufilter (400 nm). Da diese Messmethode nicht wellenlängenabhängig ist, ist sie primär zum Vergleich von PMTs gleicher Kathodenart oder sogar des komplett gleichen Typs verwendbar, nicht jedoch zum Vergleich verschiedener Kathodentypen.

Dynodensystem

Nach der Photokathode folgt das Kernstück des PMTs, eine Kette von Sekundärelektronenvervielfachern, den sog. Dynoden. Diese Dynoden verwandeln das an der Photokathode umgewandelte Photoelektron ($Q = 1.6 \times 10^{-19}$ C) über mehrfache Elektronenvervielfachung (H12700 typisch: 1.5×10^6) in ein messbares Signal (im mittel etwa 250 fC) um. Mittels einer Widerstandskette wird die angelegte Hochspannung auf die einzelnen Dynoden verteilt. Es ergibt sich etwa eine Potentialdifferenz von 100 V bis 200 V zwischen jeweils zwei Dynoden. Durch dieses Potential werden die Elektronen von einer auf die nächste Dynode gezogen, die dort aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit und damit hohen Energie weitere Elektronen auslösen. Die ausgelösten Elektronen werden dann wieder auf die nächste Dynode beschleunigt und sorgen damit für eine Elektronenlawine. Die Anzahl an ausgelösten Elektronen schwankt und hängt stark vom Potential und der Güte der einzelnen Dynoden ab. Da die Elektronenkaskade gerade zu Beginn nur wenige Elektronen enthält, ist hier eine hohe Vervielfachung besonders wichtig. Daher ist meist das Potential zwischen den Dynoden größer. Die Elektronenvervielfachung weist eine statistische Verteilung auf. Es ergibt sich also für viele gemessene Vervielfachungen eine Gaußverteilung, den sog. Einzelphotonenpeak. Der Mittelwert dieses Peaks wird meist als Elektronenvervielfachung bezeichnet. Interessant ist auch das sogenannte Peak-zu-Tal Verhältnis (Peak-to-Valley (PV)), welches die Höhe des Einzelphotonenpeaks über dem minimalen Abfall zu kleineren Ladungen beschreibt. Schematisch ist solch ein Einzelphotonenpeak und seine Entstehung in Abb. 2.3 dargestellt.

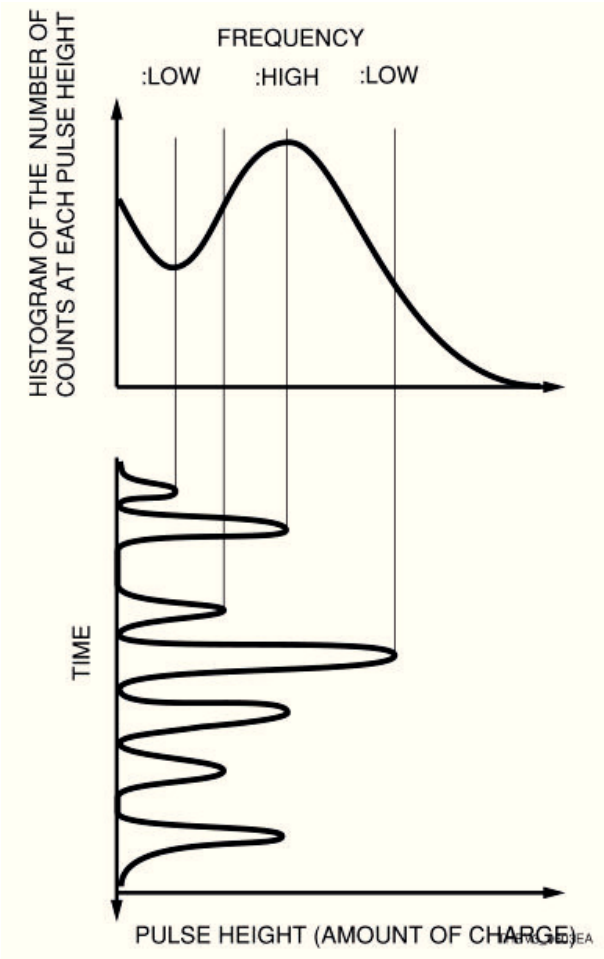


Abb. 2.3 ♦ *Darstellung des Einzel-Photon-Spektrums als Histogramm der Anzahlen verschiedener Pulsladungen. Hierbei bezeichnet "frequency" die Auftrittshäufigkeit einer speziellen Pulsladung. Die Pulse sind darunter im zeitlichen Verlauf skizziert. Entnommen aus [HAM07, S. 127]*

Um zu gewährleisten, dass möglichst viele Photoelektronen die erste Dynode erreichen, wird neben dem hohen Potential zwischen Kathode und erster Dynode eine Fokussierelektrode verwendet. Diese leitet mittels eines elektrischen Feldes Photoelektronen auf die erste Dynode.

Nach korrekter Fokussierung kann allerdings das Photoelektron immer noch durch z.B. elastische Rückstreuung an der ersten Dynode verloren gehen. Man bezeichnet die Anzahl an korrekt in den Verstärkungsprozess eingehender Photoelektronen über der Gesamtanzahl an Photoelektronen als Kollektionseffizienz.

Für einzelne Photonen lässt sich also für eine hinreichend gute Elektronenvervielfachung die Gesamteffizienz als Faltung der Quanteneffizienz und Kollektionseffizienz ausdrücken. Die Elektronenvervielfachung spielt bei der Effizienz eine wichtige Rolle, da sie genügend groß sein muss, um ein für die Messapparatur messbares Signal zu erzeugen. Ist die Vervielfachung nicht groß genug oder gar nicht vorhanden, ist der PMT, für die respektive Ausleseelektronik, absolut ineffizient.

Anode

Den letzten Teil des PMTs macht die Anode aus. Sie soll die entstandene Ladung abführen und der nachfolgenden Messapparatur übergeben. Bei der Konstruktion einer Anode ist es wichtig zwischen dieser und der letzten Dynode eine genügend große Spannung anzulegen, damit alle Elektronen abfließen können und sich somit aufgrund der großen Anzahl an Elektronen keine Raumladung vor der Anode bilden.

MultiAnodenPhotoMultiplier

Der Multianodenphotomultiplier besitzt nun viele solcher Anoden und macht damit die Position des auf den PMT eintreffenden Photons ortsauflösbar. Um das Signal sowohl zeitlich als auch örtlich nicht aufzuweiten, werden neben verschiedenen Anodenpads auch mehrere Dynodenkanäle in den PMT eingesetzt. Die Anzahl der Dynodenkanäle kann hierbei sogar größer der Anzahl an Anodenpads sein Durch diesen Trick verkürzen sich die Laufwege der Sekundärelektronen, wodurch die Verstärkung und die Zeitauflösung nicht mehr vom Auftreffpunkt des Photons abhängt. Eine Schemazeichung eines aufgeschnittenen MAPMTs findet sich in Abb. 2.4 und zeigt neben den Dynodenkanälen und Anodenpads die typischen Trajektorien der Elektronen in einem Kanal.

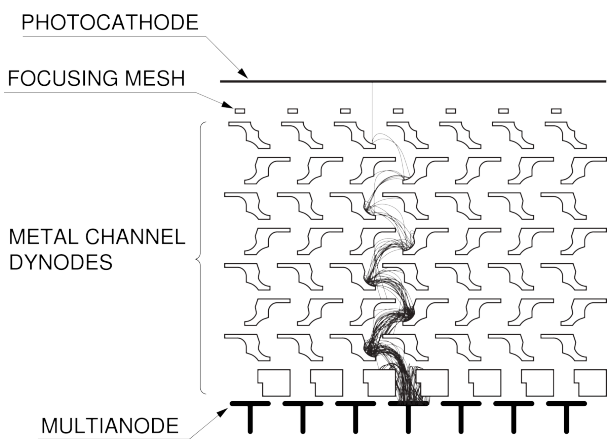


Abb. 2.4 ♦ *Aufbau eines normalen Multianoden-PMT aus Quelle [HAM07, S. 178]. Zu erkennen ist an oberster Stelle die Photoelektronen auslösende Kathode. Es folgen die fokussierenden Elektroden, welche in diesem Fall als Netz (Focussing Mesh) angeordnet sind. Es folgen die Dynoden der einzelnen separierten Kanäle (Metal Channel Dynodes). Zuletzt eingezeichnet ist die Multianode. Mittig in schwarz eingezeichnet ist eine typische Elektron-Trajektorie in einem Kanal, welche den Messpuls auf dem Anodenpad erzeugt.*

Allerdings kann es hierdurch auch zu Ladungsaufteilungen zwischen zwei Dynodenkanälen und sogar Anodenpads kommen. Es entstehen also zwei kleinere Ladungspulse in zwei Kanälen, die evtl. nicht mehr detektierbar sind. Dieses Verhalten nennt man "charge-sharing" oder "crosstalk".

Dunkelrauschen

Eine weitere Eigenschaft von sowohl PMTs als auch MAPMTs ist das sogenannte Dunkelrauschen. Dieses Dunkelrauschen bezeichnet das Auftreten von Messpulsen ohne Lichteinfall. Diese Pulse entstehen meist aufgrund thermisch aus der Photokathode oder aus den Dynoden ausgelöster Elektronen, wobei lediglich die von der Photokathode thermisch emittierten Elektronen die volle Verstärkung erfahren. Weitere mögliche aber geringer beitragende Rauschquellen sind das MAPMT-Fenster[1] durch z.B. Fenster-intrinsisches , Szintillation im Fenster oder an den Dynoden, Leckströme (meist aber nicht in gepulster Form) und Feldemissionsströme. Bei Messung dieser Dunkelrate ist zu beachten, dass diese erst nach einiger Zeit in Dunkelheit ihren durchschnittlichen Wert erreicht. Die Zeitspanne hierfür kann, abhängig von der Präzision der Messung, aufgrund des exponentiellen Abfalls mehrere Stunden dauern. Beeinflusst wird diese Zeitspanne vor allem durch die Menge an Licht, die ein PMT mit oder ohne angelegter Hochspannung vor der Messung gesehen hat. Durch die hohe Belichtung und Hitze beim Herstellungsprozess ist davon auszugehen, dass die Dunkelrate des PMTs nach Produktion besonders lange braucht, um seinen Standardwert zu erreichen. Auch Temperatur und Hochspannung haben einen großen Einfluss, wobei gerade die Hochspannung auch über den Typ der Dunkelpulse entscheidet.

Nachpulsen

Nachpulsen bezeichnet allgemein das Auftreten von Pulsen nach einem Messpuls in einem Zeitfenster von bis zu mehreren Mikrosekunden und werden in zwei Typen unterteilt. Nachpulse in einem Fenster bis zu einigen wenigen Nanosekunden nach dem Hauptpuls werden meist durch elastische Rückstreuung an der ersten Dynode erzeugt, sind aber für viele Experiment-Aufbauten nicht messbar. Die später auftretenden Nachpulse werden meist durch Restgasionisation erzeugt. Hier wird Restgas durch die Elektronenlawine eines Messpulses ionisiert. Die positiven Ionen driften dann wegen des Potentialgefälles in Richtung Kathode und lösen dort erneut Elektronen aus. Die Nachpulswahrscheinlichkeit ist also maßgeblich durch die Qualität des Vakuums bestimmt.

[1] Das Fenster kann, durch das darin vorkommende, radioaktive Isotop K^{40}, Dunkelpulse erzeugen.

2.2 Der HAMAMATSU H12700 MAPMT

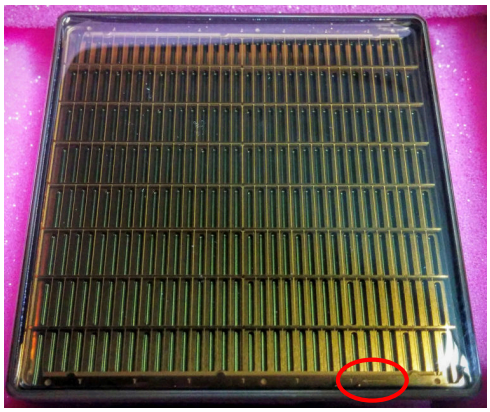


Abb. 2.5 ♦ *Photo einer Aufsicht auf den H12700 MAPMT. Klar zu sehen sind die einzelnen Teile der fokussierenden Elektrode und der ersten Dynodenstufe. Weiter ist am unteren rechten Fensterrand des MAPMTs der HAMAMATSU Marker-Pfeil, rot eingekreist, zu sehen. Die Orientierung des MAPMTs entspricht der später in den Effizienzgraphiken verwendeten Orientierung.*

Der HAMAMATSU H12700 ist ein $52 \times 52\,\mathrm{mm}^2$ MAPMT mit 10 Dynodenstufen und 8×8 Pixeln der Größe $6 \times 6\,\mathrm{mm}^2$. Er weist eine hohe Quanteneffizienz ($\sim 33\%$) mit Peakeffizienz im violetten Bereich, einen klar separierbaren Einzelphotonenpeak und eine hohe Elektronenvervielfachung (ca. 1.5×10^6) auf ([Ham14]). Der PMT hat ein UV-Fenster und ist somit ab 185 nm lichtdurchlässig. Eine große Potentialdifferenz zwischen Kathode und erster Dynode (2:1 im Vergleich zu den übrigen Dynoden) sowie ein optimiertes "focussing-mesh" sorgen bei diesem MAPMT für eine Kollektionseffizienz um 90% ([Sch13]). Der innere Dynodenaufbau ist der eines "Metal-Channel"-MAPMTs (siehe Abb. 2.4) und weist dadurch eine geringe Zeitaufweitung und eine relativ konstante Einzelelektronenvervielfachung auf. Der H12700 ist ein MAPMT-"Assembly" und hat damit die volle Widerstandskette samt aktiv stabilisiertem Spannungsteiler integriert. Der dadurch entstehende schmale Einzelphotonenpeak lässt sich daher gut vom Rauschen und anderen MAPMT-Artefakten (Ladungsteilung) trennen. Der MAPMT weist gegenüber anderen MAPMTs mit Bialkalikathode eine höhere Quanteneffizienz auf. Speziell der neuere H12700 hat eine weiter ins Violette verschobene Quanteneffizienz ("blue-enhanced").

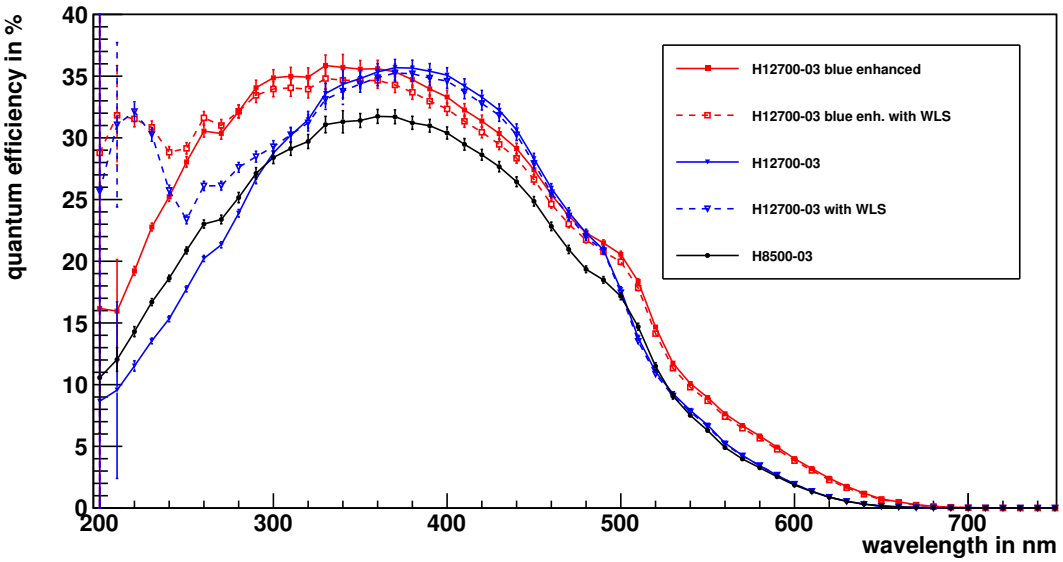


Abb. 2.6 ♦ *Quanteneffizienz gegenüber Wellenlänge für H12700 mit und ohne "blue-enhanced" Photokathode. Als Vergleich ist ein sehr guter H8500 Standard-Bialkali MAPMT gezeigt. Gestrichelte Kurven zeigen die Quanteneffizienz mit auf dem Fenster aufgebrachten Wellenlängenschiebenden-Filmen.*

All diese drei Eigenschaften sind in Abb. 2.6 zu sehen. Dort dargestellt sind eine Quanteneffizienzkurve eines sehr guten H8500[2] mit normaler BA-Kathode, ein H12700 mit hocheffizienter BA-Kathode und ein neuer H12700 mit blau-erweiterter BA-Kathode. Zusätzlich dem Bild zu entnehmen ist der Einfluss von sogenannten Wellenlängen-schiebenden-Filmen (WLS), welche hier jedoch nicht weiter diskutiert werden sollen.

Kaufspezifikationen

Für den Kauf der 1100 H12700 MAPMTs wurden an einzelnen Spezifikationen des MAPMTs bestimmte Voraussetzungen gestellt. In der nachfolgenden Aufzählung werden die mit dem vorgestellten Teststand ermittelbaren Limitierungen vorgestellt.

- Die Effektive Fläche muss $\geq 80\%$ der Außenabmessung sein.
- Die Peakquanteneffizienz muss $\geq 30\%$ sein.
- Die Varianz der Quanteneffizienz auf dem MAPMT darf maximal 25% zwischen 100%-Effizienz und relativem Minimum betragen.
- Die Einzelelektronenvervielfachung muss mindestens 0.8×10^6 bei Standardbetrieb betragen.
- Die Anodenuniformität muss $< 1:3$ sein.
- Das PV-Verhältnis im Einzelphotonspektrum in mindestens 61 Pixeln muss > 1.2 sein.
- Der Dunkelstrom darf maximal $< 5\,\mathrm{nA}$ betragen.
- Die Dunkelrate über den gesamten MAPMT muss bei einer Schwelle von 20% des Einzelphotonenpeaks $< 6.4\,\mathrm{kHz}$ betragen.
- Die Dunkelrate darf bei gleicher Schwelle (20% SPP) $1\,\mathrm{kHz}$ in einzelnen Pixeln nicht überschreiten.
- Das Nachpulsen darf maximal in 5% aller Signalpulse auftreten.

Alle genannten Größen, mit Ausnahme der absoluten Quanteneffizienz, sind im vorgestellten Teststand messbar. Die Quanteneffizienz kann lediglich aus der Gesamt-Effizienz geschlussfolgert werden. Um die absolute Quanteneffizienz zu ermitteln und speziell die Variation in der Quanteneffizienz zu quantifizieren, werden zusätzlich orts- und wellenlängenaufgelöste Quanteneffizienzmessungen für ausgewählte MAPMTs durchgeführt

[2] Der H8500 bietet die selben Außenabmessungen mit 12 Dynoden, schlechterer Kollektions- und Quanteneffizienz und leicht schlechteren PV-Verhältnis ([Ham11]).

2.3 Verwendete Hardware und Softwareumgebungen

Um für die spätere Beschreibung des Aufbaus ein Grundwissen über die verwendete Hard- und Software zu haben, sollen hier kurz einzelne Bausteine, wie die verwendeten Schrittmotoren, den Schrittmotorcontroller und die EPICS Softwareumgebung vorgestellt werden. Auch der verwendete ADC, seine Ansteuerung und die Analyseumgebung werden dargestellt.

Die IGUS Schrittmotoren und der TMCM-351 Schrittmotorcontroller

Die verwendeten Schrittmotoren des Typs "IGUS MOT-AN-S060-005-042-M-A-AAAA" haben keine speziellen Eigenschaften. Sie besitzen weder Bremse noch Enocder zur Bestimmung des korrekt durchgeführten Fahrwegs. Die Motoren haben ein Haltemoment von 0.5 Nm bei einem Nennstrom von 1.8 A. Die Ansteuerung geschieht mit Pulsen von 24 V bis 48 V und einer Frequenz von 500 $^{\text{Pulse}}/_{\text{Drehung}}$ ([IGU15]). Die Breite der Pulse und somit die Ladung bestimmt den Betriebsstrom am Motor.

Angesteuert werden die Motoren über einen Drei-Achsen fähigen Controller. Jede Achse besitzt einen Anschluss für zwei Endschalter und einen Encoder, wobei letzterer nicht verwendet wird. Der Motor unterstützt bis zu 64 μ-Schritten (μsteps) pro vollem Schritt und bietet die Funktion eines sog. "Stall-Guard" an ([Tri14b]). Der "Stall-Guard" detektiert plötzliche Anstiege im vom Motor abgegriffenen Strom und stoppt den Motor bei Überschreitung eines einstellbaren Wertes. Diese Funktion kann dafür verwendet werden, bei Kontakt mit Hindernissen den Motor sofort zu stoppen.

Der Controller unterstützt die folgenden Befehle, welche sich alle als 8-Byte Worte übertragen lassen:

- Rotation in Vorwärts-/Rückwärts-Richtung
- Motorstopp
- Bewegung zu einer relativen oder absoluten Position
- Ein/Ausstellen von Sperrparametern (z.B. Endschalter)
- Endschaltersuche
- Setzen/Abfragen eines Achsenparameters
  - Strom
  - Position
  - Geschwindigkeit
  - Beschleunigung
  - Endschalterstatus

    Eine vollständige Liste der Achsenparameter ist [Tri14a, S. 67ff] zu entnehmen.

Die EPICS Softwareumgebung

Das Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS)[3] ist ein Satz von Software-Tools und Anwendungen für den Aufbau verteilter Steuerungssysteme. Das Herzstück einer EPICS Installation sind meist ein oder mehrere sog. "Input-Output-Controller" (IOC), welche über das "Channel-Access" (CA) Netzwerk-Protokoll ihre Daten verfügbar machen.

Die von einem IOC zur Verfügung gestellten Daten werden als sog. records, verschiedener Typen, definiert. Solche Typen können "calc"-records zum Berechnen verschiedener Eingaben, "sequence"-records zum Hintereinander-Ausführen verschiedener Aktionen oder sogar "motor"-records zur Steuerung ganzer Motoren sein. Die records können untereinander kommunizieren, jedoch auch von außen abgegriffen werden. Das Aneinanderketten von verschiedenen records ermöglicht das Ausführen komplexer Strukturen. Als Beispiel ist hier der sog. "sscan"-record anzuführen, welcher für sich genommen lediglich ein Werteintervall in Schritten abgeht, jedoch unter Verküpfung mit einem weiteren "sscan"-record und einem "motor"-record zweidimensionale Scans durchführen kann.

Der "motor"-record gliedert sich in mehrere Unterrecords, welche alle im jeweilig zum Motor gehörenden Treiber hinterlegt sein müssen. Die einzelnen records zum Einstellen von Geschwindigkeiten, Fahrpositionen und weiterer Motorfunktionen können dann im verwendeten IOC hinterlegt und verwendet werden.

Das EPICS Kontrollsystem wird immer häufiger auch von Hardwareherstellern verwendet. So verfügt die im Teststand verwendete Hochspannungsversorgung (ISEG EHS F620n-F mit ISEG CC24[4] Controllereinheit im ISEG ECH44A-1200 HV-Crate) über einen eigenständigen, auf dem Crate-Controller implementierten EPICS-IOC, welches zum Setzen der Spannungen und Ströme sowie zur Abfrage dieser Werte verwendet werden kann.

Der n-XYTER-FEB

Das n-XYTER Front-End-Board (n-XYTER-FEB), welches in diesem Setup als ADC verwendet wird, basiert auf dem n-XYTER-ASIC ([BBS+09] & [Loi16]). Der n-XYTER-ASIC besteht aus 128 Kanälen, auf welchen eintreffende Pulse geformt, mit einem Zeitstempel versehen und via "Peakdetect & Hold" die Maximalladung der Pulse an eine Auswerteelektronik übermittelt werden. Hierfür verwendet der n-XYTER-ASIC zwei Zweige zur Pulsaufbereitung. Im schnellen Zweig wird, nach der Pulsformung (shaping) mittels eines "fast shapers" ,die Eintreffzeit der Pulse, welche eine einstellbare Schwelle überschreiten, gemessen und an einen digitalen FIFO ("File-In-File-Out") übergeben. Der langsame Zweig verwendet einen "slow-shaper", welcher den Puls deutlich präziser formt und dann mittels einer "peak detect and hold"-Einheit die maximale Pulshöhe speichert und an einen analogen FIFO weitergibt. In Abb. 2.7 ist das Ausleseschema des n-XYTERs graphisch dargestellt. Die Pulshöhe wird dann über einen "token"-Ring an einen schnellen ADC auf dem n-XYTER-FEB übergeben und ausgewertet.

Mit diesem Aufbau ist der n-XYTER in der Lage, eine statistische Eventrate von 32 MHz mit einem Verlust von nur 4% über 16 μs aufzunehmen. Der n-XYTER kann Ladung unter 120000 e oder 19.2 fC mit einem Rauschen < 600 e "noise-equivalent" und einer zeitlichen Genauigkeit von unter 3 ns nachweisen ([Loi16]). Der n-XYTERs hat eine starke Temperaturabhängigkeit und sollte daher bei möglichst konstanter Temperatur (z.B. durch Kühlung) betrieben werden. Der Grund für diese Temperaturabhängigkeit ist, dass die Operationslinie des langsamen Pulsformers stark temperaturabhängig ist [BBS+09, S. 16]. Durch dieses Verhalten schwankt die an den ADC weitergegebene Pulshöhe mit der Temperatur.

Das Zusammenführen von Datenströmen und die Einstellungen des FEBs nimmt der sogenannte Readout-Controller (ROC) vor. Der ROC lässt sich über ein Netzwerkkabel oder eine optische Faser abgreifen bzw. einstellen. Die Einstellung nimmt man hierbei softwareseitig mit

[3] `http://www.aps.anl.gov/epics/`
[4] `http://iseg-hv.com/en/products/detail/MMS-Controller`

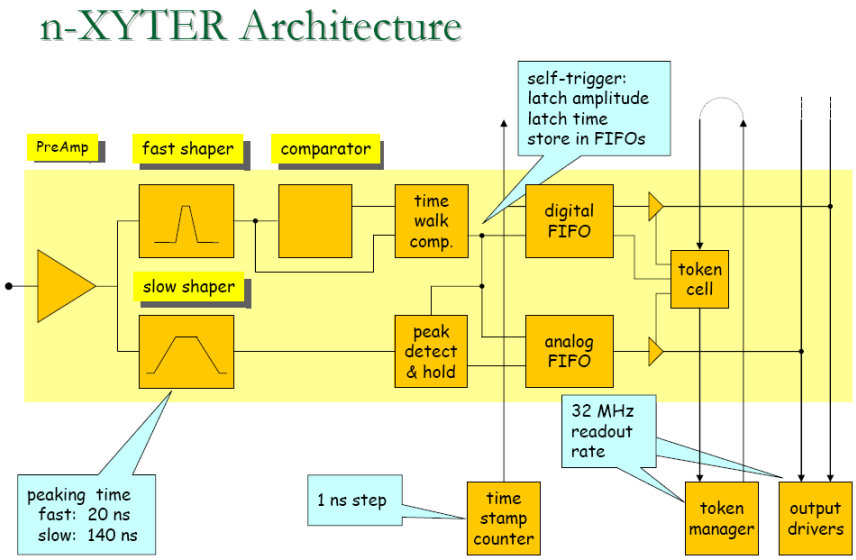


Abb. 2.7 ♦ *Schemazeichnung des n-XYTER ADCs. Gezeigt sind die zwei Signalzweige mit langsamem und schnellem Pulsformer, welche am Ende nach Bestätigung durch den Trigger am schnellen Pulsformer an einen FIFO (File-In-File-Out) übergeben werden. Entnommen aus [Loi16].*

dem sogenannten ROCUTIL-Tool vor. Dieses erlaubt die Einstellung aller wichtigen Parameter der einzelnen FEBs. Der Datenabgriff erfolgt über das sog. Data-Acquisition-Backbone-Core (DABC)[5] und das nachherige Entpacken der Daten über das GSI Object Oriented On-line-Offline (GO4)[6] Analysis Framework.

[5] https://www.gsi.de/work/fairgsi/rare_isotope_beams/electronics/datenverarbeitung/datenerfassung/dabc.htm

[6] https://www.gsi.de/en/work/fairgsi/rare_isotope_beams/electronics/data_processing/data_analysis/the_go4_home_page.htm

3 Aufbau und verwendete Bauteile des Messstandes

Dieses Kapitel diskutiert den Aufbau des Teststandes. Es betrachtet dabei die einzelnen Bauteile und jeweiligen Limitierungen und folgert daraus eine Präzision der einzelnen Teile. Zu Beginn wird das allgemeine Funktionsprinzip vorgestellt, es folgt eine Diskussion der verwendeten Bauteile, die in den folgenden Abschnitten einzeln diskutiert werden.

3.1 Funktionsprinzip

Das dem Teststand zu Grunde liegende Prinzip fußt auf einer ungetriggerten Ladungsmessung. Eine solche ungetriggerte Ladungsmessung eröffnet die Möglichkeit Pulse zu messen, die entweder mit einer gepulsten Lichtquelle korreliert sind, oder nicht. Hat man eine einzelne Photonen emittierende Lichtquelle, so entspricht die Anzahl der nachgewiesenen Einzelphotonen geteilt durch die Anzahl an ausgesendeten Einzelphotonen der Einzelphotoneneffizienz des MAPMTs. Wichtig für diese Messmethode ist die genaue Kenntnis der Anzahl der ausgesendeten Einzelphotonen. Das Messen dieser ist allerdings aufgrund der statistischen Verteilung von Photonen schwierig. So muss man, um möglichst nicht mehr als ein Photon aus der Lichtquelle zu bekommen, die Lichtquelle so schwach einstellen, dass in den meisten Fällen gar kein Photon die Lichtquelle verlässt. Bei einer so geringen Intensität verliert man daher jede Information über die Häufigkeit einer Photonemission. Um dieses Problem zu umgehen, lässt sich die Methode leicht abwandeln. So lassen sich unter Verwendung eines, in jeder Messung eingesetzten Referenz-MAPMTs mehrere Messungen miteinander vergleichen. Liest man alle MAPMT-Kanäle einzeln aus, erschließt sich sogar nicht nur die Effizienz des MAPMTs sondern mindestens auch die Effizienz pro Pixel. Möchte man die Effizienz innerhalb des Pixels ortsaufgelöst messen, so muss die Lichtquelle mit genügend kleinem Lichtpunkt an verschiedenen Positionen auf dem Pixel positioniert werden.

Zählt man die Anzahl an Pulsen, die nicht mit den Pulsen der Lichtquelle korreliert sind, erhält man die Dunkelrate des MAPMTs. Damit die unkorrelierten Pulse lediglich vom MAPMT selbst und nicht etwa von einer anderen Lichtquelle kommen, muss die Messung unter Lichtabschluss erfolgen. Wenn man jeden Pixel des MAPMTs einzeln ausmisst, ergibt sich dann sogar die Möglichkeit das Dunkelrauschen jedes Pixels zu bestimmen.

Eine Messung jedes einzelnen Pixels liefert sogar weitere aufschlussreiche Messmöglichkeiten. Weiß man z.B., dass sich der Lichtpunkt auf einem Pixel befunden hat und erhält einen Puls im Nachbarpixel, gibt das einen Rückschluss auf Ladungsteilung und "cross-talk".

Die Ladung der gemessenen Pulse erlaubt mit dem Wissen, dass fast nur einzelne Photonen auf den MAPMT trafen, eine Bestimmung der Verstärkung bzw. Einzelelektronenvervielfachung des MAPMTs.

3.2 Aufbau des Serienteststandes

Die beschriebene Messmethode beinhaltet einige Anforderungen an die verwendeten Bauteile. So braucht man zur Messung der Ladungen an drei MAPMTs einen ADC mit 256 Kanälen, um ebenfalls den Referenz-MAPMT zu messen. Weiter braucht man eine gepulste Lichtquelle und einen Lichtleiter, um das Licht in ein möglichst lichtdichtes Messgehäuse (Dunkelbox)[1] zu leiten. Für die ortsaufgelöste Messung ist ein automatisierter Fahrtisch für Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung (XY-Tisch) vonnöten.

In Abb. 3.1 sind die einzelnen Komponenten des Aufbaus dargestellt. Zu sehen ist die Ansteuerung der LED mit dem Oszillator und die Einspeisung des LED-Lichtes mittels eines lichtdichten Tubus in die Faser. Die Faser ist in der lichtdichten Box am EPICS gesteuerten XY-Tisch angebracht und leuchtet auf einen der $3 + 1$ MAPMTs. Der XY-Tisch ist hierbei frei auf den MAPMTs verfahrbar und damit jede Position auf den MAPMTs ansteuerbar. Die Auslese der 4×64-MAPMT-Kanäle erfolgt über die jeweils 128 Kanäle der zwei n-XYTER FEBs, welche Ladungsverteilungen für jeden dieser Kanäle liefern. Weiter lässt sich die Hochspannung, welche zum Betrieb der MAPMTs notwendig ist, variieren. Somit ist eine Bestimmung der Einzelelektronenvervielfachung auch für verschiedene Spannungen möglich.

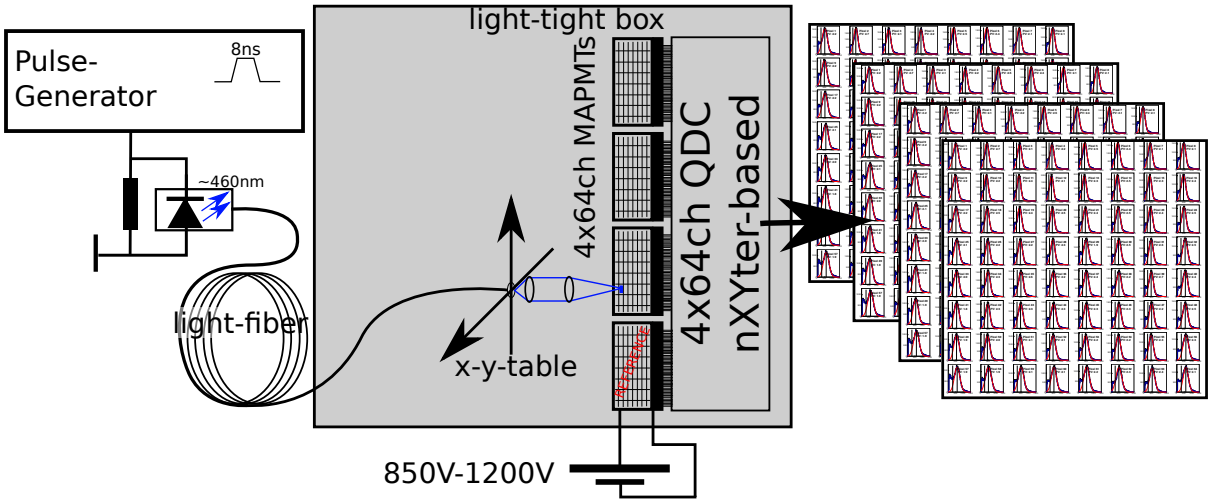


Abb. 3.1 ♦ *Schematische Darstellung des Teststandes. Links in der Abbildung sieht man den Pulsgenerator, welcher die LED betreibt. Die LED ist in einen abgeschlossenen schwarzen Tubus verbaut. Aus dem Tubus führt eine Lichtfaser in die Dunkelbox und ist am XY-Tisch fixiert. Das, aus der Lichtfaser über eine Fokussiereinheit ausgekoppelte Licht wird auf einen der vier MAPMTs gestrahlt. Unten im Teststand befindet sich rot markiert der Referenz-MAPMT. Die Pulse der MAPMTs werden, für jeden Kanal einzeln, über den n-XYTER vermessen und in Spektren (rechts zu sehen) gefüllt.*

Als gepulste Lichtquelle wird eine LED verwendet, welche von einem externen Pulser angesteuert wird. Der hier verwendete Pulser des Typs "Agilent 33250A Waveform Generator" verfügt über eine minimale Pulsbreite von 8 ns mit einer Flankensteilheit von 5 ns. Die maximal einstellbare Spannung beträgt ± 5 V [Agi01].

Da die Helligkeit der LED reduziert werden muss, dient ein langer schwarzer Tubus als Bindeglied zwischen LED und Lichtfaser. Die nicht reflektierende Innenseite der 20 cm langen Röhre reduziert die Helligkeit um einen Faktor von

$$I_{\text{in}}/I_{\text{out}} \approx 5000$$ [2]

[1] Der hier erwähnte mechanische Aufbau des Teststandes wurde zusammen mit Dennis Pfeifer getätigt.
[2] $\left(200\text{mm}\tan(10°)/0.5\text{mm}\right)^2$

aufgrund des Abstrahlwinkels der LED von $\Theta_{1/2} = 10°$ [3] und dem Lichtfaserdurchmesser von $d = 1\,\text{mm}$. Die Lichtfaser ist im Inneren der Dunkelbox am XY-Tisch angebracht und strahlt mit einem Lichtfleck des Durchmessers $\sim 1.5\,\text{mm}$ auf den MAPMT.

Die LED strahlt mit 465 nm und damit im sichtbaren blauen Bereich. Diese Wellenlänge liegt zwar nicht im Peak der Quanteneffizienz des MAPMTs, ist aber bzgl. der relativen Effizienz ausreichend.

Für die Fokussierung auf den beschriebenen Lichtfleck ist eine Fokussiereinheit mit vorgeschobenem Kollimator zuständig. Die Brennweite der Fokussiereinheit sowie der Abstand zum MAPMT sind 40 mm. Um außerhalb des Lichtflecks keine weiteren ringförmigen Intensitätsmaxima zu haben, wurde vor die Fokussiereinheit eine kleine Lochblende gesetzt. Diese Lochblende dient des Weiteren dazu, ungewollte Reflexionen zwischen MAPMT-Fenster und Fokussierlinse zu vermeiden.

Als Analog-zu-Digital-Converter (ADC) wurden zwei nXYTER Front-End-Boards (FEB) verwendet, welche, basierend auf dem n-XYTER-ASIC, Ladungs- und Zeitinformationen messen und an das Readout-Controller-Board (ROC) weiterleiten.

Abb. 3.2 zeigt den aufgebauten Teststand.

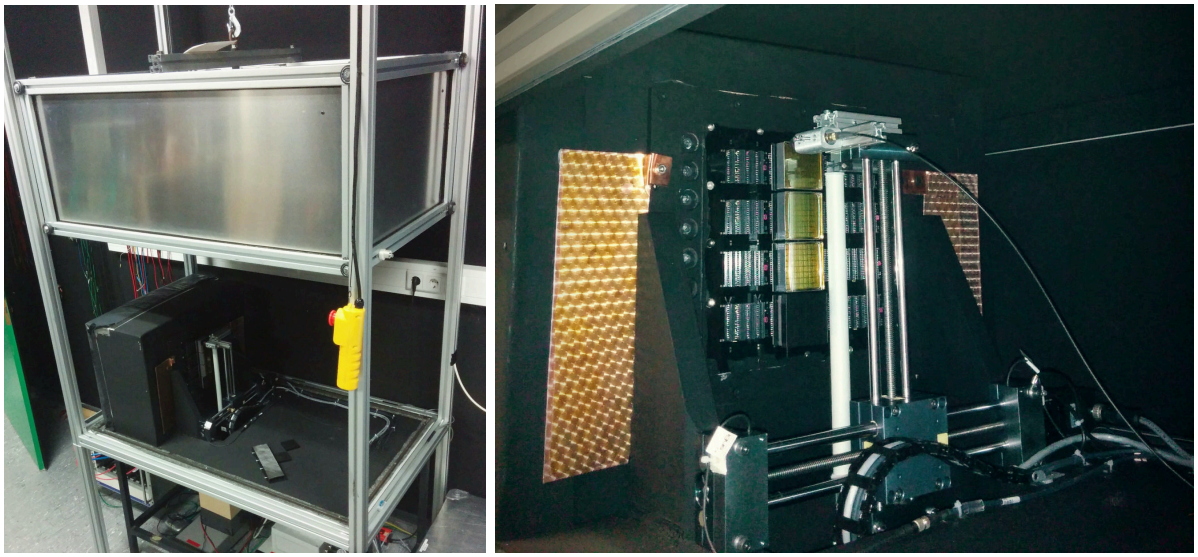


Abb. 3.2 ♦ *Photo des gesamten Teststandes samt Dunkelbox (links) und Nahaufnahme des XY-Tisches mit MAPMTs und Ausleseplatine (rechts). Die vier MAPMT der Messung sind, bis auf den untersten Referenz-MAPMT, nicht mit einer Lichtschutzkappe abgedeckt.*

[3] Mit $\Theta_{1/2}$ als Halbwertsbreite, entnommen aus [LL03].

3.3 Leuchtquelle

Zur Bestimmung der Stabilität der Leuchtdiode, wurden verschiedene Messungen durchgeführt. Bestimmt wurde die zeitliche Verteilung der Lichtpulse der verwendeten LED, die zeitliche Schwankung in der LED-Intensität und qualitativ die Auswirkung beim Verbiegen der Lichtfaser. Die LED strahlt mit einer Wellenlänge von 465 nm.

Zeitliche Varianz der Lichtpulse

Es wurde die zeitliche Verteilung der am MAPMT gemessenen Pulse bei Verwendung der gepulsten LED als Lichtquelle mit der Verteilung bei Verwendung von 40 ps breiten Laserpulsen (405 nm) verglichen. Hierfür wurden beide Lichtquellen in eine Lichtfaser eingespeist und das Licht über die Fokussiereinheit auf einen Pixel eines H12700 MAPMTs geleitet, während zeitgleich ein Trigger-Puls an das ROC-Board übermittelt wurde. Die an die LED angelegten Pulse haben eine volle Halbwertsbreite von FWHM = 8 ns mit einer Anstiegszeit von 5 ns und Höhe von +3.870 V [4] . Die Pulserfrequenz betrug 10 kHz. Der Laser[5] wurde mit einer Pulsbreite von 40 ps und einer Frequenz von 10 kHz betrieben.

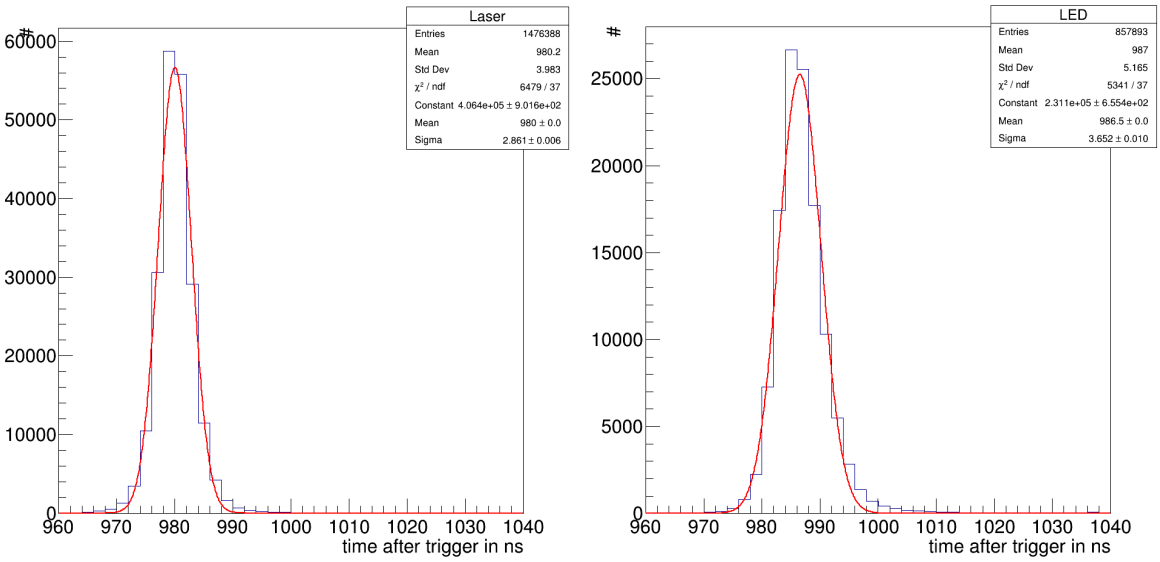


Abb. 3.3 ♦ *Mit dem n-XYTER am H12700 MAPMT gemessene Pulsankuftszeit bei bestrahlen des MAPMTs mit einem Laser (links) oder einer LED (rechts). Der Laser hat eine 40 ps- und die LED 8 ns-Pulsbreite. Gemessen ist die Zeit zwischen Ankunft des Triggerpulses und Messen des Ladungspulses am MAPMT. Die absolute Ankunftszeit ist hier nicht relevant, lediglich die Standardabweichung der Verteilungen von 3.652 ns für die LED und 2.861 ns für den Laser sind interessant. Die Standardabweichungen drücken die wichtige Variation in der Ankunftszeit der Lichtpulse aus.*

Die Verteilungen der Ankunftszeiten der Pulse am MAPMT gegenüber dem Triggersignal sind in Abb 3.3 dargestellt und mit einer Gaußverteilung angefittet worden. Die Mitte der Gaußverteilung und damit der Ankunftszeiten der Pulse des MAPMTs, liegt bei etwa 980 ns und ist hier nicht von Relevanz. Die Gaußverteilung beschreibt trotz der schlechten χ/NDF =

[4] Eine Spannung von +3.880 V wird für die eigentliche Messung verwendet, um in 10% aller Fälle ein Photon zu emmittieren (siehe Abschnitt 4.3)

[5] `http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf`

175 und $\chi/\text{NDF} = 144$ die Breite des Peaks ausreichend, lediglich bei der Verteilung der LED-Leuchtquelle ist eine leichte Asymmetrie zu hohen Zeitdifferenzen erkennbar. Allgemein ist dem $\sigma_{\text{LED}} = 3.652\,\text{ns}$ der LED gegenüber dem $\sigma_{\text{Laser}} = 2.861\,\text{ns}$ des Lasers eine Verbreiterung des Peaks zu entnehmen. Die Breite beider Verteilungen ist eine Faltung verschiedener Einflüsse. Diese sind der "Transit Time Spread" (TTS) des MAPMTs (TTS $\approx$ 0.45 ns [Ham14]), die Variation in der Ausgabe des TTL Trigger-Signals, die Umwandlung des TTL- in ein NIM-Signal, die Pulsbreite am Pulser, die Auflösung am TDC (1 ns maximal, $\sim$ 3 ns effektiv [Loi16]) und die Variation in der Lichtausgabe der Leuchte selbst. Sicherlich ist bei der LED die Leuchte selbst der dominierende Faktor. So lässt sich das bereits erwähnte Auslaufen im Bereich um 1000 ns durch verzögerte Emissionen von Photonen an der LED erklären. Beim Laser wiederum ist davon auszugehen, dass die Breite des Peaks primär durch die anderen Faktoren dominiert wird, zumal hier die Pulsbreite mit 40 ps sehr schmal ist. Allerdings sind sowohl Breite als auch Verbreiterung bei Verwendung der LED kein Problem, da ein Zeitfenster von 100 ns in den späteren Messungen als Signalfenster verwendet wird (siehe Abschnitt 4.5).

Zeitliche Intensitätsschwankungen

Um die zeitliche Intensitätsschwankung abzuschätzen, wurde eine Messung der Intensität der LED mit einer an einem Pikoampermeter angeschlossenen Photodiode über 69 Stunden gemacht. Hierbei wurde die LED mit Pulsen der Höhe +5 V und Breite 10 ns sowie Anstiegszeiten von 5 ns betrieben. Kleinere, den für die Messung verwendeten Pulsen ähnlichere Pulse konnten aufgrund der geringeren Sensitivität der Photodiode nicht verwendet werden[6]. Zur weiteren Erhöhung der Intensität wurde zur Einkopplung der LED in die Lichtfaser lediglich der halbe Tubus (also etwa 10 cm zwischen LED und Lichtfaser) verwendet. Die relativen Abweichungen der Intensitäten vom Mittelwert sind in Abb. 3.4 und 3.5 prozentual dargestellt (die expliziten Stromkurven finden sich im Anhang in Abb.en A.1 und A.2). Auffällig ist, dass gerade zu Begin der Messung große Abweichungen auftreten. Dieses Verhalten lässt sich auf einen Aufwärmvorgang an der LED zurückführen, ist aber für den Langzeitbetrieb im Teststand unerheblich, da die LED während des Teststand-Betriebes kontinuierlich über Monate nicht abgeschaltet wird. Weiter fällt auf, dass die maximale Schwankung über die Messdauer von 69 Stunden bei etwa 3% liegt. Damit ist aufgrund der Verwendung eines Referenz-MAPMTs lediglich die Schwankung über die Dauer einer Messung interessant. Daher sind in Abb. 3.5 die relativen Abweichungen der Intensitäten vom Mittelwert über sieben Stunden (von Stunde 7 bis Stunde 14) prozentual dargestellt. Auch hier liegt die maximale Schwankung bei etwa 3%. Wichtiger jedoch ist, dass die Standardabweichung über diese siebenstündige Messung $\sigma_{\text{int.}} = 0.77\%$ beträgt. Die Standardabweichung über eine Standardmesszeit von sieben Stunden ist ein guter Schätzer für den Fehler auf die Intensität der LED. Um bei der Bestimmung dieser Varianz nicht vom Messzeitpunkt dieser Messung über 69 Stunden abhängig zu sein, wird eine "laufende Standardabweichung" gebildet. Diese Werte der "laufende Standardabweichung" berechnen sich aus den Standardabweichungen jeweils aller "sieben Stunden Intervalle" im Messzeitraum von 7 Stunden bis 66 Stunden. Der Mittelwert dieser Standardabweichungen ist

$$\sigma_{\text{mean-int.}} = 0.633\% \pm 0.478\,(\text{pp})\ ^{7}$$

und wird im folgenden als Fehler auf die Intensität genommen. Der Fehler auf diesen Wert ergibt sich aus der Standardabweichung auf die "laufenden Standardabweichungen" und soll hier lediglich zeigen, dass die Schwankungen für einzelne Messungen dennoch groß sein können. Anzumerken ist, dass sich natürlich aufgrund der geringeren Intensität während der Messung stärkere Schwankungen ergeben könnten. Diese sind jedoch über diese Methode nicht weiter quantifizierbar und können daher nur aus den in Abschnitt 5 vorgestellten Messgrößen des Teststandes erschlossen werden.

[6] Der Strom für die hier verwendeten Pulse lag bereits bei maximal 30 pA.

[7] (pp) soll hier den sog. Prozentpunkt als Einheit darstellen

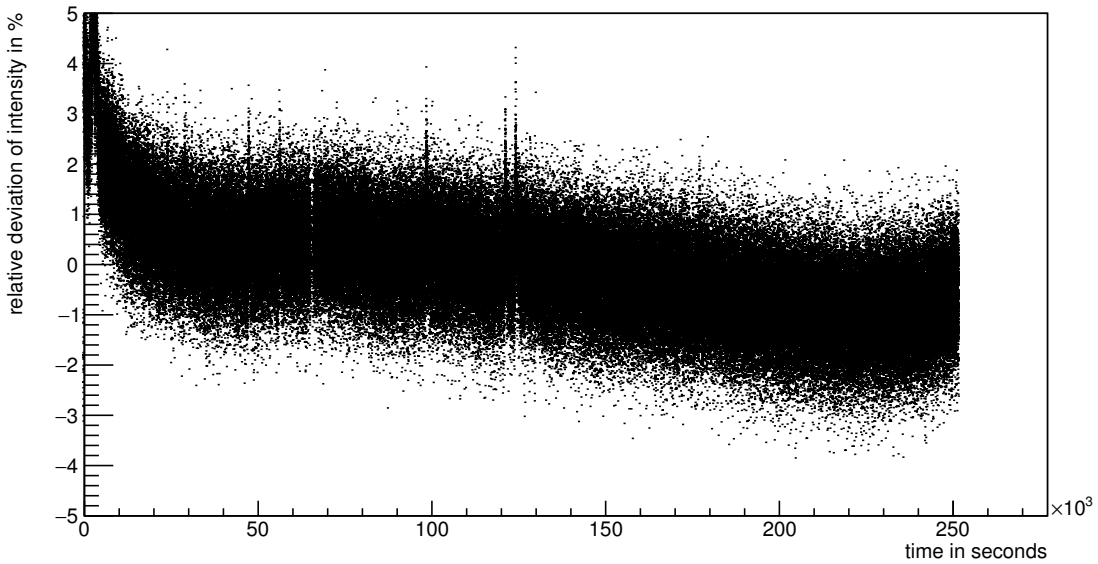


Abb. 3.4 ♦ *Zeitliche relative prozentuale Schwankung der Intensität der im Teststand verwendeten Leuchtdiode.* 10 *ns-Breite und* +5 *V hohe Pulse gemessen mit einem an einer Photodiode angeschlossenen Pikomaperemeter über eine Messdauer von 69 Stunden. Eine Darstellung der absoluten Messwerte ist in Abb. A.1 im Anhang zu finden.*

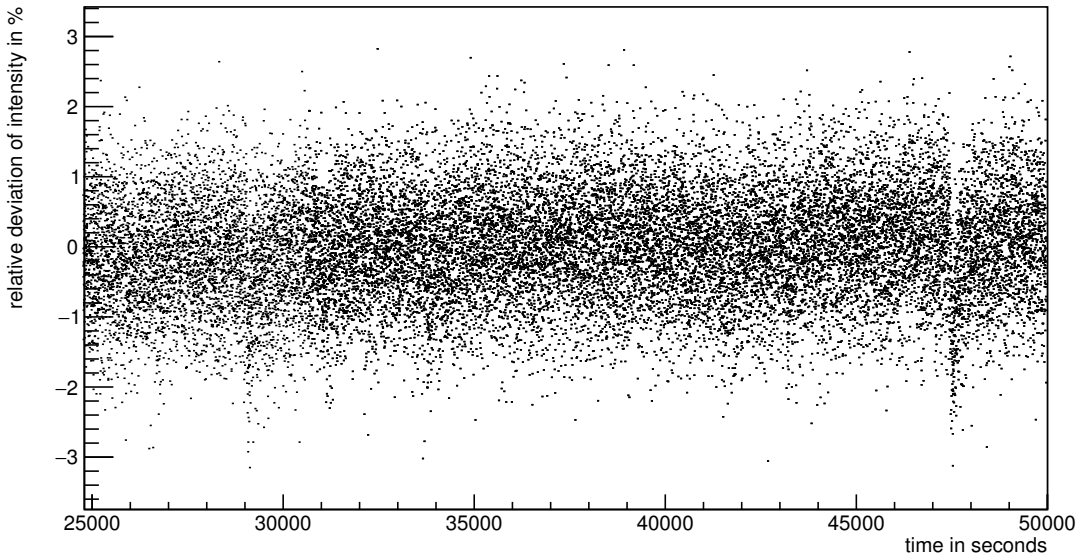


Abb. 3.5 ♦ *Zeitliche relative prozentuale Schwankung der Intensität der im Teststand verwendeten Leuchtdiode.* 10 *ns-Breite und* +5 *V hohe Pulse gemessen mit einem an einer Photodiode angeschlossenen Pikomaperemeter über eine Messdauer von 7 Stunden. Entnommen als Teil der in Abb. 3.4 dargestellten Messung zwischen 7 und 14 Stunden. Eine Darstellung der absoluten Messwerte ist in Abb. A.1 im Anhang zu finden.*

Faserinduzierte Schwankungen

Aufgrund des großen Abstands zwischen XY-Tisch und Fasereinlass in die Dunkelbox (60 cm) sind auf dem maximalen Fahrweg von 21.7 cm in horizontaler- und 5.6 cm in vertikaler Richtung maximale Knickwinkel der Faser von 20° und 5° möglich. Aufgrund dieser geringen Winkelgrößen sowie der Tatsache, dass die Faser deutlich langgezogener in der Box ausgebreitet liegt, ist davon auszugehen, dass das minimale Verknicken keine Intensitätsunterschiede zwischen den verschiedenen Positionen auf den MAPMTs zur Folge hat.

3.4 XY-Tisch

Der XY-Tisch besteht aus zwei Schrittmotoren zum Verschieben der Faser in horizontaler und vertikaler Richtung. Die beiden Schrittmotoren vom Typ "IGUS MOT-AN-S060-005-042-M-A-AAAA" werden vom drei-Achsen[8] Schrittmotorcontroller TMCM-351 angesteuert.

Fahrt des XY-Tisches in den Achsenursprung ("Homing")

Der Controller weist für jede seiner drei ansteuerbaren Achsen einen Anschluss für einen Endschalter auf. Der Endschalter dient sowohl zum Schutz vor ungewollten Kollisionen mit dem äußeren Rahmen des Aufbaus[9] und den Enden der Gewindestange, als auch zur Kalibration des Achsenursprungs. Für das Anfahren des Achsenursprunges, dem sog. "homing", fährt der Tisch in horizontaler Richtung nach oben und in vertikaler Richtung nach links (aus Sicht des MAPMTs) bis er den Endschalter in der jeweiligen Richtung auslöst. Nach dem Auslösen des Endschalters fährt der XY-Tisch mit 25% der Anfangsgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung bis der Endschalter nicht mehr ausgelöst ist. Zuletzt fährt der XY-Tisch mit der zweit langsamsten Geschwindigkeit ($2\,{}^{\mu\mathrm{steps}}/_{\mathrm{s}}$) erneut in die entgegengesetzte Richtung bis der Endschalter auslöst. Mit dieser Methode lässt sich der Achsenursprung mit einer Genauigkeit von

$$\Delta\mathrm{HOME}_{\mathrm{X}} \;=\; 0.010\,\mathrm{mm} \text{ und } \Delta\mathrm{HOME}_{\mathrm{Y}} \;=\; 0.015\,\mathrm{mm}$$

anfahren. Bestimmt wurden diese Werte aus der Standardabweichung von zehn "homing"s, ausgehend von verschiedenen Startpunkten auf der respektiven Achse (vgl. Tabelle B.3 im Anhang). Die letztendliche Messung der Verschiebung wurde mittels einer Messuhr ($\Delta \;=\; 0.01\,\mathrm{mm}$), welche am XY-Tisch fixiert war, gemessen.

Die Funktion des "homing" ist fest im Treiber für den Schrittmotorcontroller integriert, sodass lediglich die Geschwindigkeit des "homen" gesetzt werden kann.

Kalibration der Fahrstrecke der Motoren

Um den Verfahrweg nicht nur in Schritten, sondern auch in standardisierten Längeneinheiten zu wissen, muss eine Kalibration im EPICS Motorrecord vorgenommen werden. Diesem Record wird eine Konstante der Form

$$c_{\mathrm{Resolution}} \;=\; 0.0001565\,{}^{\mathrm{mm}}/_{\mu\mathrm{steps}}$$

übergeben. Die hier verwendete Konstante ergibt sich aus dem einfachen Zusammenhang, dass für einen Verfahrweg von $200\,\mathrm{mm} \pm 0.25\,\mathrm{mm}$ 1277955 μ-Schritte getätigt wurden. Hieraus ergibt sich der verwendete Umrechnungsfaktor mit einem Fehler von

$$c_{\mathrm{Resolution}} \;=\; 1.565 \times 10^{-4}\,{}^{\mathrm{mm}}/_{\mu\mathrm{steps}} \;\pm\; 1.96 \times 10^{-7}\,{}^{\mathrm{mm}}/_{\mu\mathrm{steps}}$$

Mit anderen Worten ist davon auszugehen, dass der relative Fehler auf den Verfahrweg 0.125% beträgt. Also 0.07 mm für einen Verfahrweg von 55.00 mm und 0.54 mm für einen Verfahrweg von $2 \times 216.00\,\mathrm{mm}$[10].

[8] Für die Anwendung im Teststand werden lediglich zwei Achsen verwendet.

[9] Diese Funktion ist nur teilweise programmiert. Daher wird der maximale Fahrweg durch Limits im EPICS-Motortreiber geregelt.

[10] Diese Strecken sind die Standardfahrwege für die spätere Standardmessung

Abschätzung von Schrittverlusten

Diese Kalibration samt Fehler geht davon aus, dass zu keinem Zeitpunkt Schritte am Motor verloren gehen. Ein solches Verlieren von Schritten kann durch verschiedene Fehler entstehen. Z.B. kann sich, bei zu stramm eingestellter Gewindestange, die Kupplung beim Abschalten des Haltestroms zurückdrehen. Außerdem ist es möglich, dass einzelne Schritte wegen einer zu stramm eingestellten Gewindestange und aufgrund eines zu geringen Stroms am Motor nicht korrekt ausgeführt werden, der Motor also zu wenig Kraft für einen Schritt ausüben kann. Zuletzt ist es auch möglich, dass die Kommunikation zwischen Motorcontroller und Motor fehlerhaft ist.

Dass der Motor aufgrund eines zu geringen Stroms einige Schritte nicht korrekt ausführt, lässt sich z.T. durch die sog. "stallGuard" Funktion des Controllers ausschließen. Diese Funktion registriert das Überschreiten eines gewissen Pegels des Motorstroms und stoppt dann den Motor.

Es wurde zur Überprüfung, ob und in welcher Häufigkeit Schrittverluste vorliegen, ein Test durchgeführt. Für den Test wurde nach 14 vollständigen Messungen von vier MAPMTs jeweils untersucht, wie weit der Achsenursprung von der tatsächlichen "home"-Position, also der Position, an der der Endschalter auslöst, abweicht. Hierzu wurde in 0.1 mm Schritten in Richtung Endschalter gefahren und die Abweichung beim Auslösen des Endschalters notiert. Diese Schrittweite wurde gewählt, obwohl sie schon fast 650 μ-Schritten entspricht, da erst bei Betrachtung aller 14 Messungen eine Aussage über die Abweichung in der Größenordnung der vorherig beschriebenen Ungenauigkeiten auf den Fahrweg gemacht werden kann. Die Werte hierzu finden sich in Tabelle B.1 im Anhang und weisen im Mittel eine Verschiebung von $-0.01\,\mathrm{mm} \pm 0.026\,\mathrm{mm}$ in x-Richtung und $-0.05\,\mathrm{mm} \pm 0.026\,\mathrm{mm}$ in y-Richtung auf. Direkt ersichtlich ist, dass die Abweichung für die x-Achse im Fehler bei 0 mm liegt. Weiter ist für die y-Achse eine Abweichung in negativer Richtung zu erkennen. Diese Abweichung ergibt Sinn, da eine negative Verschiebung bedeutet, dass der Achsenursprung zu Beginn der Messung höher lag, als gegen Ende. Dies deutet darauf hin, dass in der Tat ein Abrutschen des Tisches bei abgestelltem Haltestrom vorliegen könnte. Ausgeschlossen werden kann hingegen ein signifikanter Verlust an Schritten durch fehlerhafte Kommunikation zwischen Motor und Controller, da ein solcher Einfluss auf beiden Achsen sichtbar wäre. Insgesamt lässt sich aber festhalten, dass der Verlust von Schritten gegenüber dem größeren Fehler auf die Kalibration vernachlässigt werden kann.

Messung des Motorinduzierten elektronischen Rauschens

Wie bereits beschrieben, ist der Haltestrom für die Motoren abgestellt. Hierdurch wird das Rauschen am ADC minimiert. Hier bezeichnet das Rauschen nicht die natürliche Dunkelrauschrate des MAPMTs, sondern eine im ADC messbare Rate von Pulsen, welche selbst bei ausgeschaltetem MAPMT (also MAPMT ohne Versorgungsspannung) vorliegt. Trotz durchgeführter Rausch-vermindernder Maßnahmen, wie dem Einfügen von Ferrit-Ringen und dem Erden aller Bauteile des Teststandes, lässt sich ein solches Rauschen nicht komplett ausschließen. Allerdings ist es wichtig dieses Rauschen möglichst gering zu halten, da solche Rauschpulse als Dunkelrauschpulse des MAPMTs fehlinterpretierte werden könnten.

Um den Einfluss des Motors zu quantifizieren, wurde eine Messung gemacht, bei der die Rauschrate am ADC bei verschiedenen Zuständen des Motors (Controller aus, Haltestrom an/aus und bewegte Motoren) für verschiedene Schwellen (Threshold) gemessen wurde. Die Messfehler ergeben sich aus der Wurzel der Messevents und dem inversen der Messzeit von 5 Sekunden. Eine logarithmische Darstellung ist in Abb. 3.6 gezeichnet und zeigt deutlich, dass das Rauschen am ADC erhöht ist, sobald ein Strom am Motor anliegt. Das obere Limit der Rauschrate von $\sim 1300\,\mathrm{kHz}$ ist durch die maximale Übertragungsrate der Auslesekette bedingt. Am größten ist das Rauschen, wenn eine Bewegung des Motors vorliegt. Weiter ist immer noch ein erhöhtes Rauschen bei anliegendem Haltestrom erkennbar. Die geringsten Rauschraten liegen bei ausgeschaltetem Haltestrom und Controller vor. Die einzelnen ausreißenden Werte, welche

vor allem bei ausgeschaltetem Controller für hohe Schwellen immer noch hohe Raten anzeigen, sind nicht zu erklären, lassen sich aber wahrscheinlich durch Vergrößerung der Messzeit eliminieren. So zeigen die Punkte in Graphik 3.6 lediglich die statistischen Fehler der Messung und drücken damit nicht den korrekten Fehlerwert aus.

Insgesamt wird ersichtlich, dass ohne angeschalteten Haltestrom und Bewegung der Motoren eine Schwelle größer 30 ausreichen sollte. Allerdings sollte zum vollständigen Ausschluss zufälliger Rauschpeaks die größtmögliche Schwelle verwendet werden. Jedoch sollte selbst bei Wahl einer hohen Schwelle der Haltestrom des Motors abgeschaltet werden, da dies im Rahmen der Messungenauigkeit auf die Fahrstrecke keine Auswirkung hat.

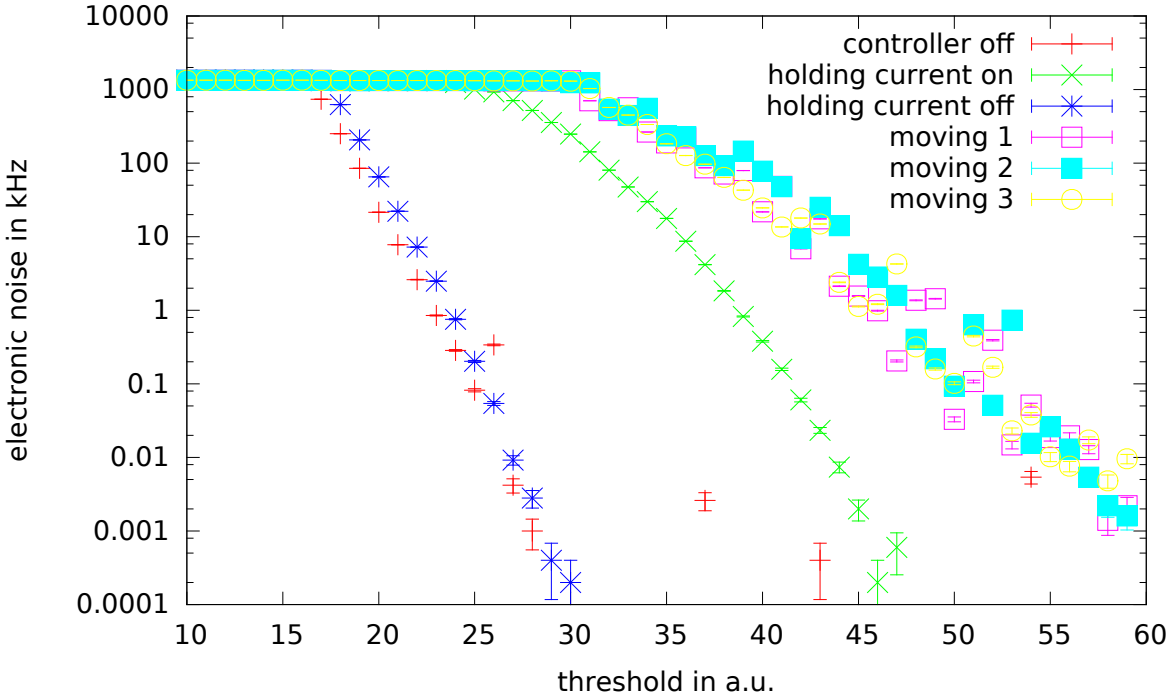


Abb. 3.6 ♦ *Logarithmische Darstellung der Rauschrate (noise) am n-XYTER gegenüber am eingestellter ADC-Schwelle (threshold) für verschiedene Motorzustände. "moving" bezeichnet die Daten, die bei Bewegung des Motors aufgenommen wurden. "holding current on" bezeichnet die Daten, die bei am Controller eingeschalteten Haltestrom aufgenommen wurden. Die Messzeit pro Punkt betrug 5 Sekunden.*

3.5 n-XYTER-FEB Aufbau und Kalibration

Der n-XYTER-FEB hat einen dynamischen Bereich von etwa 120000 e (siehe Abschnitt 2.3 in der Theorie). Dieser Bereich ist zu klein für die zu messenden Ladungen eines MAPMT-Kanals von $\approx 6 \times 10^6$ e .

Der Abschwächer

Daher wird eine Abschwächung des Messsignals jedes MAPMT-Anodenpads mittels eines kapazitiven Spannungsteilers vorgenommen. Diese Abschwächung muss in der Größe von $\sim {}^{6\times10^6\,e}/_{0.12\times10^6\,e} = 50$ sein, wenn man davon ausgeht, dass MAPMTs mit einer mittleren Verstärkung von 3×10^6 durchaus vorkommen können und man für diese MAPMTs das volle Einzelphotonenspektrum (also fast bis zum Doppelphotonenpeak) messen möchte. Daher wurde für den Messstand ein kapazitiver Spannungsteiler mit den Kapazitäten 10 pF über 470 pF verwendet. Die Schaltungsskizze hierfür ist in Abb. 3.7 dargestellt und weist zusätzlich zwei Widerstände auf. Der 100 Ω Widerstand dient hier als Abschlusswiderstand. Der 10 kΩ Widerstand gegen Masse soll ein Aufladen des Anodenpads am MAPMT verhindern, ist jedoch aufgrund der selben Widerstandsanordnung im MAPMT (siehe [Ham14]) obligatorisch.

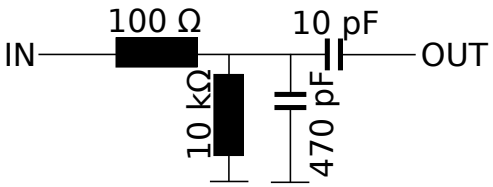


Abb. 3.7 ♦ *Skizzierte Schaltung des vor dem n-XYTER verwendeten Abschwächers. Es handelt sich um einen kapazitiven Spannungsteiler mit vorgeschalteten Widerständen. Die Teilung reduziert das zu große MAPMT-Signal um einen Faktor 50 und passt das MAPMT-Signal dem dynamischen Bereich des n-XYTERs an.*

Mit den Kapazitäten lässt sich das Eingangssignal um ${}^{10\,\mathrm{pF}}/_{(10\,\mathrm{pF}+470\,\mathrm{pF})} = 48$ abschwächen.

Ladungskalibration

Da durch die Verwendung des Abschwächers sowie Temperatureffekte die Standardkalibration zwischen ADC-Einheiten und Ladung nicht mehr korrekt ist, muss eine neue Kalibration durchgeführt werden. Diese Kalibration geschieht mittels verschiedener Spannungspulse mit der Höhe −0.25 V, −0.50 V, −0.75 V, −1.00 V und Breite von 8 ns, welche über einen 10 kΩ Widerstand in Reihe einen Ladungspuls am ADC erzeugen. Das Kabel ist vor dem 10 kΩ mit 50 Ω gegen Masse abgeschlossen, da der n-XYTER intern nicht abgeschlossen ist. Vom 10 kΩ Widerstand ausgehend führt ein kurzes Kabel direkt auf den Stecker des n-XYTERs. Dieses kurze Kabel ist wichtig, da möglichst alle vom n-XYTER (oder hier Abschwächer) reflektierten Pulse wieder in die Messung der Ladung einfließen sollen. Eine Skizze des Kabels ist in Abb. 3.8 zu sehen. Die Methode ist gültig solange die Eingangsimpedanz des n-XYTERs (oder hier Abschwächers) gering gegenüber der Impedanz des Kabels ist. Das ist aufgrund des Abschlusses des Abschwächers mit einem Kondensator gegen Masse der Fall.

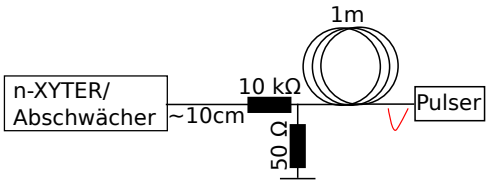


Abb. 3.8 ♦ *Skizze des zur Ladungskalibration verwendeten Kabels. Es handelt sich um ein mit 50 Ω abgeschlossenes Kabel, welches am Ende, über ein mit 10 kΩ bestücktes kurzes Kabel, Pulse zum n-XYTER leitet.*

Die Peaks im ADC-Spektrum sind im Anhang in Abb.en A.3 und A.4 dargestellt und weisen eine Doppelpeakstruktur auf. Diese Doppelpeakstruktur könnte von der extrem schmalen Pulsbreite des angelegten Spannungspulses herrühren. Genauer wurde dieses Verhalten nicht

untersucht. Da es sich bei dieser Kalibration lediglich um eine qualitative Kalibration handelt, ist nur der Peak bei größerer Ladung angefittet. Die Fitresultate sind in Tabelle B.2 im Anhang dargestellt und in Abb. 3.9 mit einer Gerade der Form $Q(\text{ADC}) = c \times \text{ADC}$ angefittet. Die Annahme einer Nullordinate stützt sich darauf, dass lt. [BBS+09, S. 31f] der n-XYTER, bei einer Ladung $Q = 0$, einen ADC-Wert von 0 ausgibt. Die Fehler ergeben sich aus der Standardabweichung σ der Gaußfits und dem Fehler auf die Peakhöhe des eingespeisten Pulses von $\pm 0.1\,\text{V}$, welcher nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung in einen Fehler auf die Elektronenanzahl umgerechnet ist.

Das Fitresultat von

$$m = 6480.48\,{}^{e}/\text{ADC-Counts} \pm 88\,{}^{e}/\text{ADC-Counts}$$

bei einem $\chi/\text{NDF} = 0.37$ dient gut als qualitative Kalibration des ADC-Spektrums. Eine weitere Möglichkeit zur Kalibration wäre ein Anpassen der gemessenen Einzelelektronenvervielfachungen an die vom Hersteller angegebenen Werte. Allgemein wird aber schon hier auffällig, dass Vervielfachungen kleiner $< 1 \times 10^6$ schwierig zu messen sein werden, da für Peaks dieser Größe bereits der halbe Peak am unteren Rand des ADC-Spektrums (Start bei ~ 60 ADC-Einheiten) liegt.

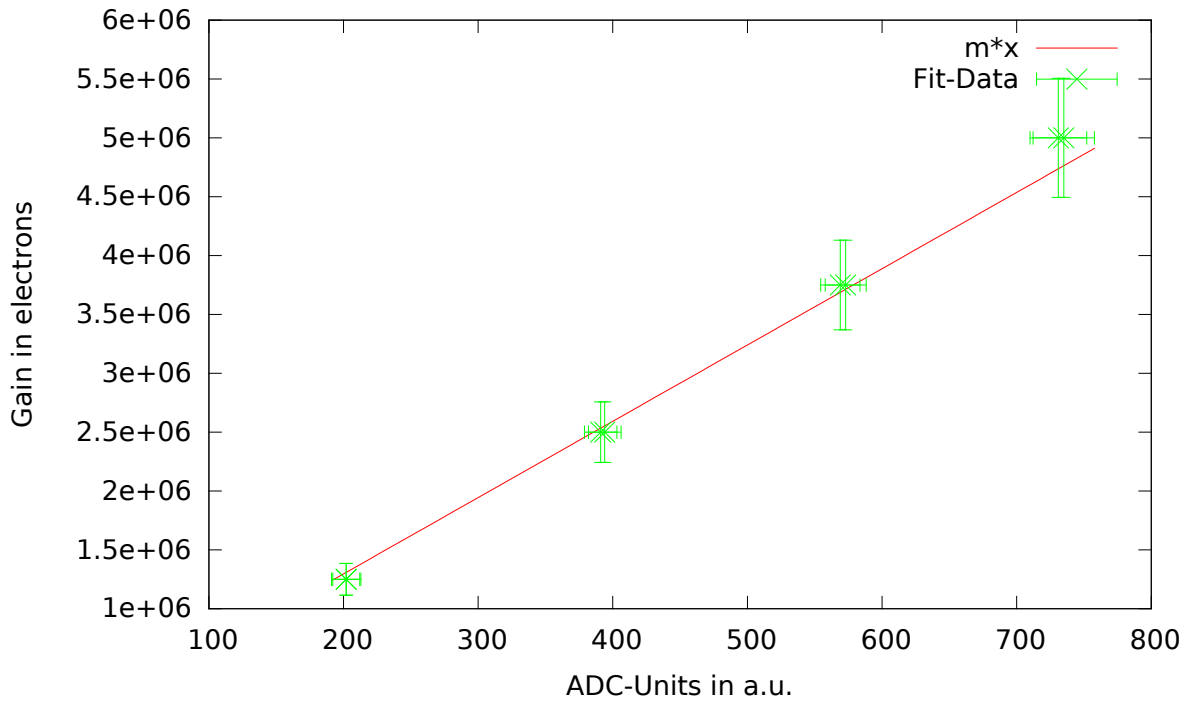


Abb. 3.9 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung (Gain) für verschiedene ADC-Einheiten zur Kalibrierung des ADC-Spektrums. Die Werte sind den Gaußfits aus Abb.en A.4 und A.3 entnommen und in Tabelle B.2 aufgelistet. Die Fehler auf die Werte ergeben sich aus der Standardabweichung der Gaußfits und aus der Ungenauigkeit auf die angelegten Kalibrationspulse. Angefittet ist eine Gerade mit Nulldurchgang mit dem Parameter* $m = 6480.48\,{}^{e}/\text{ADC-Counts} \pm 88\,{}^{e}/\text{ADC-Counts}$ *bei einem* $\chi/\text{NDF} = 0.37$.

Temperaturabhängigkeit

Da der n-XYTER-FEB, wie in Abschnitt 2.3 der Theorie beschrieben, eine starke Temperaturabhängigkeit hat, sind Verschiebungen dieser Kalibration zu erwarten. Zwar wird der FEB mit einem wassergekühlten Aluminiumblock gekühlt, jedoch scheint die Kühlungsregulation mittels

eines Kühlers vom Typ "Lauda RE 630 GW"[11] nicht genügend gut, um Verschiebungen im ADC-Spektrum zu vermeiden. Speziell der lange Laufweg des gekühlten Wassers, welcher sich aufgrund des für mehrere Messaufbauten eingesetzten "Laudakühlers" nicht vermeiden lässt, stellt hier ein Problem dar. Um die Verschiebungen zu korrigieren, macht man sich zunutze, dass alle Messungen bei gleicher ADC-Schwelle durchgeführt werden und damit die untere Kante des Spektrums gleich bleibt. Dass diese Korrektur gültig ist bzw. dass die Temperatur am FEB mit dem Verschieben der unteren Spektrumskante korreliert ist, zeigt Abb. 3.10 . Sie zeigt die ADC-Verschiebung gegenüber der Temperatur am FEB aus 54 Messungen des Referenz-MAPMTs.

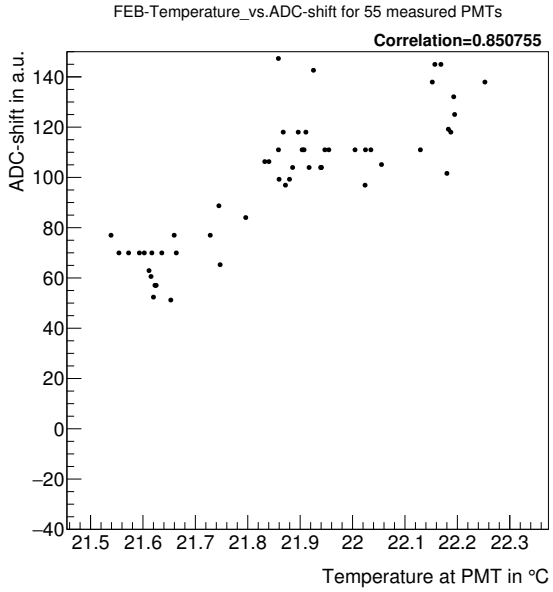


Abb. 3.10 ♦ *Verschiebung des ADC-Spektrums ("ADC-shift") aufgetragen gegen die Temperatur am n-XYTER-FEB für 55 Messungen des Referenz-MAPMTs (also nur an FEB-2 gemessen). Die Daten haben einen Korrelationskoeffizienten von* 0.8508 *und sind damit stark korreliert.*

Deutlich in dieser Abb. zu erkennen ist, dass Temperatur und Verschiebung im Spektrum korreliert sind. Lediglich zu großen Verschiebungen in negative Richtung, also bei einem "ADC-shift" von 140, weichen Werte für Verschiebung und Temperatur von einem linearen Verhalten ab. Dennoch ist die Korrelation, mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.8508 über alle Temperaturen und ADC-shifts, klar belegbar. Das kann durch die Tatsache erklärt werden, dass die Analyse einen maximalen negativen ADC-Wert von -200 hat und damit evtl. eine Art Sättigungseffekt am ADC auftritt. Ein besseres Ergebnis für die Korrelation wird erwartet, sobald Messungen mit kühleren Temperaturen gemacht worden sind. Dies war bisher nicht möglich, da der Temperatursensor erst im Sommer (10.06.2016) eingesetzt wurde. Spezifische Analysen dieser Temperaturkorrelation durch Variation der Kühlleistung am n-XYTER-FEB wurden noch nicht durchgeführt.

[11] `http://www.lauda.de/shop/en/temperiergerate/warme-und-kaltethermostate-eco/eco-kaltethermostate-wassergekuhlt/re-630-gw/`

3.6 Gehäuse und Lichtdichtigkeit

Die den Teststand umgebende Box soll verhindern, dass Licht von außen eindringt. Nur durch eine vollständige Abdunklung der MAPMTs ist eine korrekte Bestimmung der Dunkelrate und der Nachpulshäufigkeit zu gewährleisten.

Die auf den Messtisch mittels Seilwinde absenkbare Box ist hierfür aus item-Aluminiumprofilen mit zwischengesetzen Aluminiumplatten gebaut. Für einen lichtdichten Abschluss sind in die item-Profile Dichtungen eingelassen, welche die Aluminiumplatten fest umfassen. Zusätzlich wurden alle Dichtungen weiter mit undurchsichtigem Silikon abgedichtet. An den Ecken der Box wurde auf die direkten Kontaktflächen zwischen den item-Profilen Filz aufgebracht. Alle Kabelkanäle, die ins Innere der Dunkelbox führen, sind ebenfalls mit Filz und zusätzlich über einen verstellbaren Gummiring abgedichtet. In den item-Profilspalt, welcher auf den Tisch aufsetzt, fügt sich eine am Messtisch angebrachte Metallleiste mit aufgesetztem Dichtgummi ein. Die Metallleiste wirkt damit als optische Schikane, sobald die Box abgelassen ist. Weiter wurde der komplette Messtisch, sowie die Innenseite der Box mit Spektrometerfarbe des Typs "811/21 NEXTEL VELVET COATING" der Firma Mankiewicz, welche 98% des Lichtes unabhängig von der Einstrahlrichtung absorbiert ([IBZ16]), lackiert. Um Licht der nicht ausschaltbaren LED des n-XYTER-FEBs sowie der größeren Kabelkanäle zum n-XYTER-FEB zu unterdrücken, wurde um die Ausleseelektronik ein weiteres mit Masse verbundenes Aluminiumgehäuse aufgesetzt. Dieses Gehäuse dient zusätzlich zur Rauschunterdrückung und umschließt den n-XYTER-FEB daher auch in Richtung der Tischplatte.

Da MAPMTs schwere Schäden bei starker Illumination unter Spannung erleiden können, ist als Absicherung ein sog. "kill-switch" an beiden Enden der Dunkelbox angebracht, welche ein sofortiges Abschalten der Hochspannung beim Anheben der Box um etwa 1 mm auslösen.

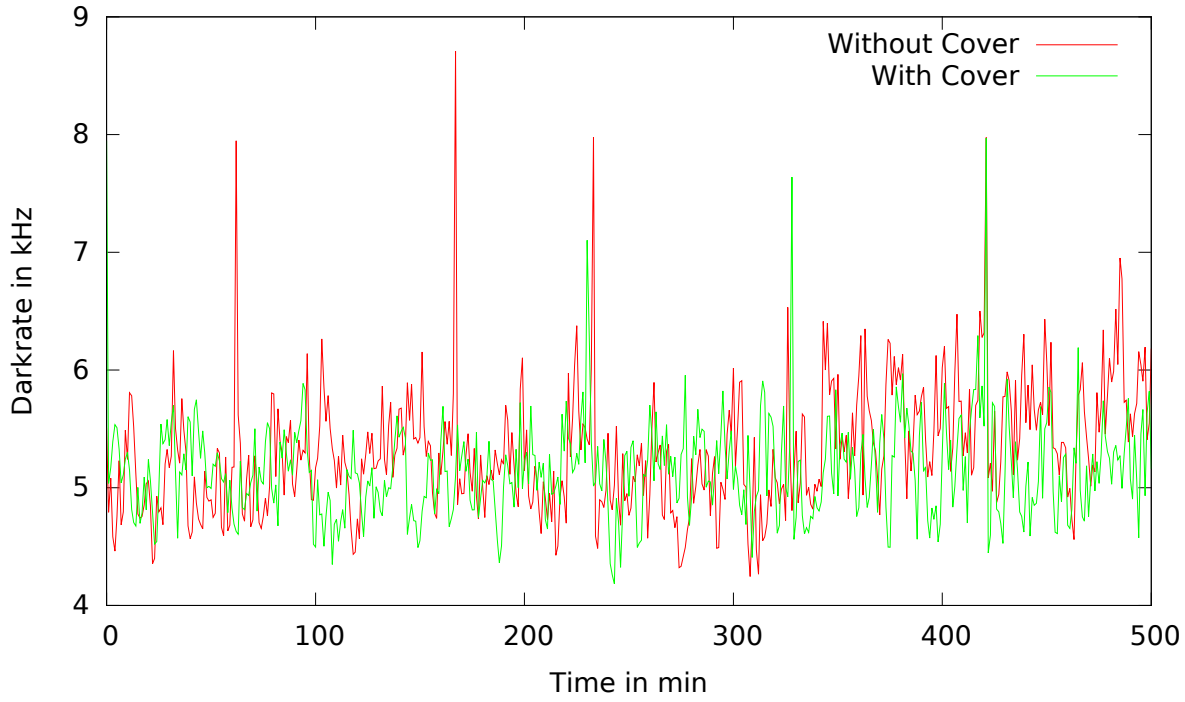


Abb. 3.11 ♦ *Dunkelrate als Funktion der Zeit für vier MAPMTs (HA0150, HA0151, HA0185 und HA0230). Eine Messung wurde mit auf die MAPMTs aufgesetzten lichtdichten Abdeckungen gemacht (rot), eine ohne diese Abdeckungen (grün). Die MAPMTs wurden jeweils mit* $-1000\ V$ *über einen Zeitraum von etwa 8 Stunden betrieben.*

Um die Güte der Abdichtungen abzuschätzen, wurden vier MAPMTs (HA0150, HA0151, HA0185, HA0230), einmal versehen mit einer Abdeckung und einmal ohne diese, über acht Stunden in die Dunkelbox unter Spannung ($-1000\,\mathrm{V}$) eingesetzt und ihre Dunkelrate aufgezeichnet. In Abb. 3.11 ist die Rate gegenüber der Zeit dargestellt. Diese Messung zeigt keine Änderung der Dunkelrate bei Abnahme der Abdeckung der vier MAPMTs. So sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Dunkelrate mit Abdeckung und ohne Abdeckung

$$\begin{aligned} \overline{\mathrm{PXDARK}}_{\mathrm{Abgedeckt}} &= 5.146\,\mathrm{kHz} \pm 0.675\,\mathrm{kHz} \\ \overline{\mathrm{PXDARK}}_{\mathrm{Unabgedeckt}} &= 5.017\,\mathrm{kHz} \pm 0.560\,\mathrm{kHz} \end{aligned}$$

, und damit im Fehler gleich. Auffällig ist die große Standardabweichung, welche auf Peaks im Rauschspektrum zurückzuführen sind. Diese Peaks könnten auf ein höheres Umgebungsrauschen hindeuten oder Artefakte des MAPMTs sein. Allerdings sollten diese Peaks auf die spätere Messung des Rauschens über zwei Stunden keine größere Auswirkung haben.

4 Software und die Standardmessung

In diesem Kapitel sollen Software und die Standardmessprozedur vorgestellt werden. Beschrieben werden die verwendeten und entwickelten Softwarekomponenten, sowie Motorsteuerung und Bewegung während der Messung, die Benutzeroberfläche und das Vorgehen bei einer Standardmessung vierer MAPMTs. Die Regelung des Aufbaus übernimmt ein EPICS Input-Output-Controller (IOC). Der IOC ist hier in mehrere miteinander kommunizierende IOCs unterteilt. Diese Aufteilung hat aber keinerlei Vor- oder Nachteile und macht die einzelnen Steuerungen der Hardware lediglich übersichtlicher. Dieser IOC soll hier genauer vorgestellt werden. Gesteuert werden der XY-Tisch, der Messablauf und das Hochspannungs-Crate. Das "CSS"[1]-Interface wird vorgestellt, welches Zugriff auf einzelne Parameter der Messung und Hardware gibt. Zuletzt werden noch einige grundlegende Erläuterungen der Datenanalyse vorgestellt.

4.1 Der EPICS IOC

Der, für den Teststand geschriebene EPICS Input-Output-Controller (IOC) teilt sich in mehrere Bereiche für verschiedene Anwendungen: den Bereich zur Steuerung des Motors mittels des sog. "motor"-records, zur Durchführung der Messung selbst mittels einer Kombination aus "sequence"-records, "calc"-records und "sscan"-records und zur Steuerung der Hochspannung am ISEG-Crate mittels des iseg-"control"-records.

Zur Verwendung des "motor"-records wurde ein Treiber passend zum verwendeten drei-Achsen-Schrittmotorcontroller geschrieben. Der Treiber beinhaltet die "homing"-Funktion (siehe Abschnitt 3.4), Funktionen zur Einstellung verschiedener Motorparameter, eine Funktion zur kontinuierlichen Fahrt in eine Richtung, eine Funktion zur Bewegung um relative Distanzen und zur Überprüfung verschiedener Statusmeldungen am Controller, wie dem Bewegungs- oder Endschalterstatus.

All diese im Treiber vorhandenen Funktionen sind dann nach Starten des IOCs zur Ausführung des Scans verwendbar. Der Scan soll hierbei mäanderförmig in vertikaler Richtung geschehen und jeweils immer am obersten Punkt ein "homing" in vertikaler Richtung durchführen. Ein "homing" wird durchgeführt um jegliche Schrittverluste in vertikaler Richtung (siehe Abschnitt 3.4, durch z.B. schwerkraftbedingtes Abrutschen des XY-Tisches, gering zu halten. Solche Schrittverluste würden zu Abweichungen zwischen realer Position und Position im IOC-record führen. Das "homing" soll so oft wie möglich durchgeführt werden, ohne dabei die Messdauer signifikant zu erhöhen.

Für jeden Messpunkt ist eine Wartezeit vom Erreichen des Messpunktes bis zum Start der Messung einstellbar, eine Messzeit und eine Wartezeit zwischen Ende der Messung und Weiterfahrt zum nächsten Messpunkt. Ein Messpunkt ist im IOC eine Zeitspanne, in der der Motor an einer Position verharrt. Während dieser Zeit setzt der EPICS-record einen Messindikator ($-1 \rightarrow n$ mit $n \in \mathbb{N}^*$), welcher in den Datenstrom einfließt. Dieser Indikator signalisiert, dass die nun folgenden Daten des n-XYTER-FEB verwendbar sind. Vor der Weiterfahrt des Motors wird der Indikator wieder zurück gesetzt ($n \rightarrow -1$).

Weiter ist am Ende der Messung ein Hochspannungsscan durchführbar. Der Hochspannungsscan (HV-Scan) soll für verschiedene Betriebsspannungen am MAPMT die Einzelelektronenvervielfachung mehrerer Pixel des MAPMTs vermessen. Hierfür wird für verschiedene Hochspannungen am MAPMT ein X-förmiger Scan von 16 Pixeln pro MAPMT durchgeführt. Die

[1] `http://controlsystemstudio.org/`

Messzeit pro Messpunkt und somit MAPMT-Pixel ist größer, um pro MAPMT-Pixel genügend Statistik zu sammeln.

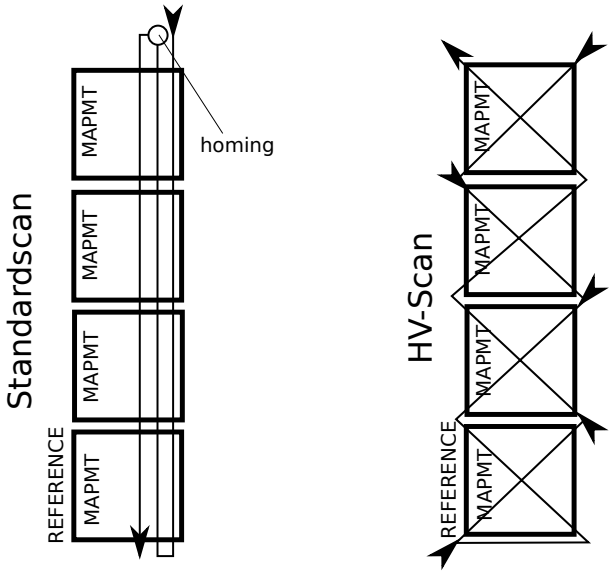


Abb. 4.1 ♦ *Skizze der beiden Scanbewegungen des XY-Tisches. Der Standardscan (links) wird mäanderförmig und mit einem "homing" nach zwei Fahrten in vertikaler Richtung durchgeführt. Der HV-Scan wird zuerst X-förmig von rechts oben nach unten durchgeführt. In einem zweiten Messteil, der an die X-förmige Abwärtsfahrt anschließt, werden die MAPMTs von links unten nach oben X-förmig abgefahren.*

Hierfür sind drei "sscan"-records, ein "sequence"-record und ein "calc"-record vonnöten. Der erste "sscan"-record führt die Bewegungen entlang der horizontalen Achse aus und startet beim Erreichen jedes Messpunktes den "calc"-record. Dieser Record entscheidet welcher "sscan"-record ausgeführt werden soll, und damit über die Bewegung in vertikaler Richtung (von kleinen zu großen y-Werten, oder anders herum). Mittels dieses Tricks ist eine mäanderförmige Messbewegung möglich, welche die Messdauer reduziert. Jeder Messpunkt in vertikaler Richtung startet den "sequence"-record, welcher lediglich mit vom Benutzer verstellbaren Wartezeiten den Messstatus setzt. Somit sind die verschiedenen Messzeiten und Wartezeiten justierbar. Dargestellt ist dieses Schema auch in Abb. 4.1 .

Die Bewegung beim Hochspannungsscan ist nicht abänderbar und in Abb. 4.1 dargestellt. Der Motor fährt bei der Abwärtsbewegung immer auf die Pixel 64, 55, 46, 37, 28, 19, 10, 1 am obersten PMMAT, die Pixel 57, 50, 43, 36, 29, 22, 15, 7 beim nächst tieferen MAPMT, beim von oben gesehenen dritten MAPMT wieder wie beim ersten MAPMT auf die Pixel 64, 55, 46, 37, 28, 19, 10, 1 und beim letzten MAPMT wieder auf die Pixel 57, 50, 43, 36, 29, 22, 15, 7. Bei der danach folgenden Aufwärtsbewegung wird das Schema der Abwärtsbewegung umgedreht, so dass beim untersten MAPMT die Pixel 1,10,19,28,37,46,55,64 angefahren werden u.s.w.. Diese Form des Abfahrens der MAPMTs wurde gewählt, um jegliche Zeiteffekte bei der Messung auszuschließen. Somit sind für diese Messung lediglich Mess-, Wartezeit und Spannungsschritte vom Benutzer einstellbar.

Die n-XYTER-FEB-Auslese und Motorbewegung laufen in vollständig getrennten Prozessen unabhängig voneinander. Die n-XYTER-FEB-Steuerung (das sog. "ROCUTIL") greift lediglich in regelmäßigen Abständen auf definierte Variablen der EPICS-records zu und bettet diese in den n-XYTER-FEB-Datenstrom ein. Diese Variablen sind Messstatus, Motorposition, Messpunkt, MAPMT-Seriennummern, Temperatur der Elektronik, Temperatur am MAPMT und Spannung am MAPMT. Anhand dieser Variablen lässt sich der Messablauf in der späteren Analyse wieder vollständig zusammensetzen. Die Auslese der Variablen der EPICS-records erfolgt immer bei Änderung des Messstatus[2], aber maximal mit einer Frequenz von 10 Hz.

[2]Der Messstatus ist n mit $n \in \mathbb{N}^*$ wenn sich der XY-Tisch auf einem Messpunkt befindet, wobei n hier ein Iterator über die Messpunkte ist. Befindet sich der XY-Tisch auf keinem Messpunkt ist der Indikator -1. Für die HV-Messung ist $n - 20000$ der momentane Messpunkt.

4.2 CSS-Hauptbenutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche basierend auf dem "Control-System-Studio"[3] besteht aus vier verschiedenen Fenstern. Das Hauptfenster ist in Abb. 4.2 dargestellt und ist so ausgelegt, dass dieses Fenster allein zum Starten und Überwachen der Messung reicht. Es beinhaltet daher Knöpfe zum Start, Stopp und Initialisieren des XY-Tisches (unten links), (neu)starten des IOCs (was eine Initialisierung des XY-Tisches zur Folge hat) und neu starten des n-XYTER-Setups (oben links). Ein Knopf zum Einlesen der MAPMT-Seriennummer, mit Hilfe eines QR-Code-Lesers. Auch oben links finden sich Knöpfe zum Überprüfen des Datenstroms und der momentanen Rate am MAPMT[4] Weiter gibt es Knöpfe zum Start und Stopp der Messung sowie zur Datenaufnahme (unten).

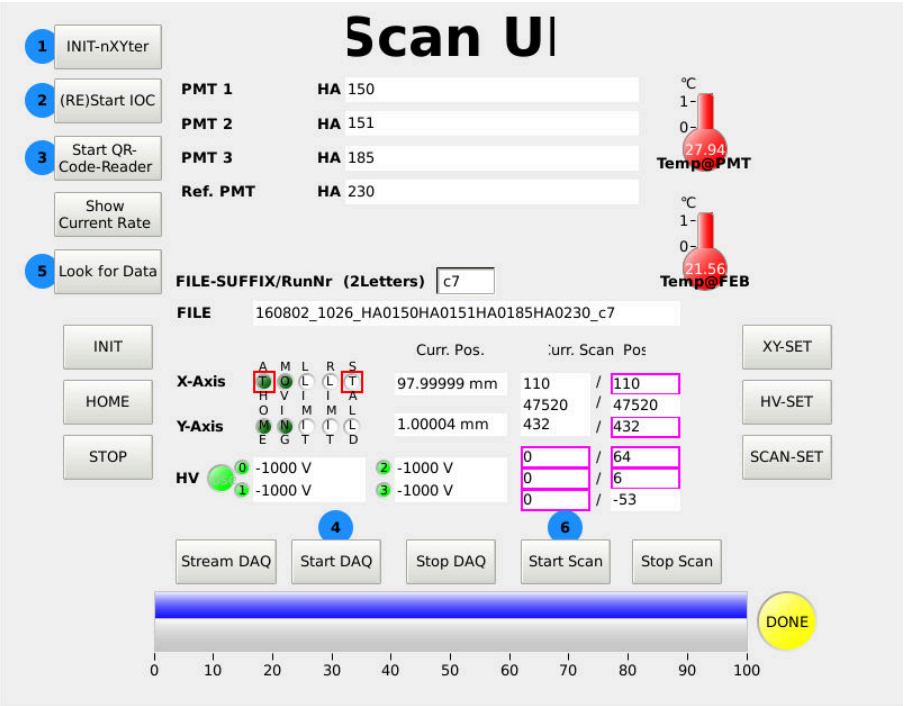


Abb. 4.2 ♦ *Bild des Hauptbenutzerbedienfeldes zur Steuerung des Teststandes. Es basiert auf dem "Control-System-Studio" und bietet Übersicht und Zugriff auf alle wichtigen Funktionen des Teststandes.*

Weitere Knöpfe rechts dienen zum Wechseln in weitere Fenster zur Einstellung und Überwachung des XY-Tisches, des HV-Crates und zur Einstellung der Messung.

In der Benutzeroberfläche geben die blau unterlegten Ziffern einen groben Anhalt, welche Aktionen in welcher Reihenfolge zum Start einer Standardmessung durchzuführen sind.

Zum Starten einer Messung sollte zuerst der n-XYTER Setup neu gestartet werden. Hierbei wird jeglicher Datenaufnahmeprozess, welcher über das "ROCUTIL" läuft, abgebrochen und der n-XYTER neu initialisiert. Die Initialisierung bewirkt, dass dem n-XYTER wieder seine Standarddaten zu Schwelle und Grundspannung übergeben werden. Dann sollte der IOC neu gestartet werden. Dieser Neustart bewirkt den Verlust aller Änderungen der Einstellungen am Motor, der Messung und der Dateinamen. Bei Neustart des IOCs werden somit alle Messeinstellungen wieder auf die in Abschnitt 4.3 diskutierten Werte zurückgesetzt. Einstellungen wie Motorgeschwindigkeit und Motorbeschleunigung werden ebenfalls zurückgesetzt und zuletzt die Seriennummern der MAPMTs sowie der Dateiname gelöscht. Der Neustart hat weiter zur Folge,

[3] `http://controlsystemstudio.org/`
[4] Diese Auskunft über die Rate ist nur bei nicht laufender Messung einholbar.

dass der XY-Tisch ge-"homed" wird.

Dann sollten die QR-Codes der MAPMTs durch Druck auf den zugehörigen Knopf neu eingelesen werden[5]. Es öffnet sich dann ein Fenster, welches die momentane Sicht der Kamera zum QR-Code-Lesen anzeigt. Nach erfolgreichem Einscannen des obersten MAPMTs ertönt ein Audiosignal. Nach Einscannen aller vier MAPMTs wird der Dateiname aus momentanem Datum und Uhrzeit, den MAPMT-Nummern und dem Suffix gebildet.

Dann sollte die Datenaufnahme mittels "Start DAQ" gestartet werden, um dann mittels des passenden Knopfes das Ankommen neuer Daten zu bestätigen. Der folgende Druck auf den Knopf "Start Scan" startet dann nach einer fest definierten Zeit den beschriebenen Scan.

Auf dem Hauptfenster angezeigt werden Seriennummern der eingescannten MAPMTs, der Dateiname, die Temperatur am n-XYTER-FEB und MAPMT, der momentane Motorstatus beider Achsen und der momentane Messfortschritt. Die Motorstatus beider Achsen zeigt mit fünf LEDs, ob der Motor sich in seiner "home"-Position befindet, gerade fährt, am linken oder rechten Endschalter ist oder Fahrprobleme hat ("stalled"). Auch angezeigt wird die momentane Motorposition in relativen Koordinaten bzgl. des ge-"home"-ten Ursprunges. Die Messfortschrittanzeige besteht neben der Anzeige der bereits durchgeführten Schritte und Gesamtschrittanzahl für Standardmessung und HV-Messung aus zwei Fortschrittsbalken und einer Status-LED. Der obere Fortschrittsbalken beschreibt den Fortschritt während der Standardmessung und der untere den Fortschritt während der HV-Messung. Die Status-LED unterscheidet zwischen nicht gestarteter Messung, fahrendem Motor, Messung an einem Messpunkt und fertiger Messung.

[5] Vorher muss aber bei Bedarf der Datei-Suffix neu gesetzt werden.

4.3 Standard Messeinstellungen und weitere Benutzeroberflächen

Die Messparameter wie Messpunktanzahl, Messbereich, Warte- sowie Messzeit sind zwar veränderbar, sollten aber zur besseren Vergleichbarkeit aller Messungen während der Standardmessung jedes MAPMTs gleich gehalten werden. Es wurde wie in Abb. 4.3 nachvollziehbar, eine Messbreite in horizontaler Richtung von 55 mm und einer Schrittweite von 1 mm verwendet, so dass um den MAPMT der Größe $52 \times 52\,\mathrm{mm}^2$ ein zusätzlicher Bereich von mindestens einem Messschritt liegt. In vertikaler Richtung ist ein Messbereich von 216 mm ebenfalls mit einer Auflösung von 1 mm gesetzt. Dieser Messbereich deckt die $4 \times (52 + 2)$ mm der vier MAPMTs mit 2 mm Zwischenabstand ebenfalls ab und lässt am oberen und unteren Rand jeweils 1 mm bzw. einen Messschritt Abstand zum MAPMT.

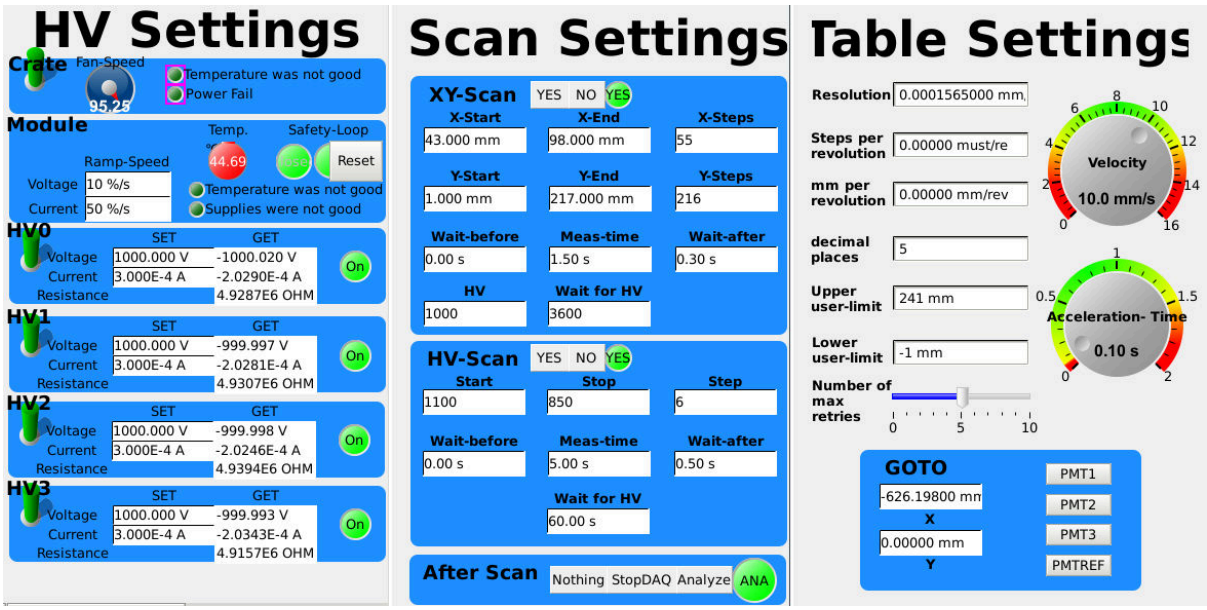


Abb. 4.3 ♦ *Bild der drei Bedienfelder des Teststandes für Motor, HV-Crate und Messung. Sie basieren auf dem "Control-System-Studio" und bieten Zugriff auf alle wichtigen Motorfunktionen, alle wichtigen Einstellungen der Hochspannung (Einstellungen am HV-Crate) und Zugriff auf alle in EPICS änderbaren Messparameter.*

Die Wartezeit vor Start der Messung, welche erlaubt, dass die Dunkelrate auf ein für den jeweiligen MAPMT typisches Level im Dunkeln absinkt, ist auf eine Stunde gesetzt. Diese Wartezeit reicht aus, da lediglich die letzten drei Stunden der $\sim$ 7-stündigen Messung[6] zur Dunkelratenbestimmung verwendet werden und von einem exponentiellen Abfall der Dunkelrate mit der Zeit ausgegangen werden kann.

Die Messzeit pro Punkt beträgt 1.5 Sekunden, bei einer Pulserfrequenz von 13 kHz und einem emittierten Photon in jedem 10ten Lichtpuls, und erlaubt damit die Erfassung von

$$13\,\mathrm{kHz} \times 10\% \times 1.5\,\mathrm{s} \approx 2000 \;\pm\; 45$$ [7]

Events pro Messpunkt, also eine statistische Ungenauigkeit von $1/\sqrt{2000} \;=\; 2\%$ pro Messpunkt. Nach jeder Messung wird 0.3 Sekunden gewartet um ausschließen zu können, dass Daten während der Motorfahrt genommen werden. Dieses Warten ist vor der Messung nicht notwendig, da das Startsignal für eine Messung in der Analyse das Setzen des Messindikators in EPICS ist.

[6] $(1.5\,\mathrm{s} + 0.3\,\mathrm{s} + 0.3\,\mathrm{s}) \times 55 \times 216 \;=\; 24948\,\mathrm{s} \;\approx\; 7\mathrm{h}$

[7] Die Erläuterug der Rechnung findet sich im Abschnitt 4.3 unten. Der Fehler ist hier nur der statistische Fehler. Die Fluktiation dürfte allgemein deutlich größer sein, da sie stark von der Messzeit, Intensität und Effizienz des MAPMTs abhängt.

Da dieser Messindikator erst nach Erreichen des Messpunktes gesetzt wird, können die Messdaten direkt verwendet werden. Würde EPICS direkt nach Ende der 1.5 Sekunden Messzeit den Befehl zum Losfahren erteilen, könnte es passieren, dass die Änderung des Messindikators erst bei bereits gestarteter Motorbewegung von der Datennahme und somit späteren Analyse, wahrgenommen würde. Hierzu ist anzumerken, dass das Abrufintervall der EPICS-Variablen von der Datennahme 0.1 s beträgt und somit eine Wartezeit von 0.3 s voll ausreicht. Die Standardspannung für die Messung ist auf 1000 V gesetzt, kann aber bei Bedarf für jeden MAPMT einzeln variiert werden.

Die Messzeit für die Hochspannungsmessung ist mit 5 -Sekunden deutlich größer bemessen, um auf eine ausreichende Statistik pro MAPMT-Pixel ($\approx$ 6500 Events) zu kommen. Eine große Statistik pro Pixel ist vonnöten, da nur bei großer Statistik die genaue Position des Einzelphotonenpeaks des Pixels gut bestimmt werden kann. Nach jedem Verstellen der HV ist eine Wartezeit von 60 Sekunden eingestellt, um dem MAPMT eine gewisse Einstellungszeit zu gewähren. Insgesamt werden sechs Spannungen zwischen -1100 V und -850 V eingestellt. Allgemein werden Standardmessung, Hochspannungsmessung und Analyse nacheinander ausgeführt. Dies kann aber bei Bedarf vom Anwender, durch Pressen der zugehörigen Knöpfe, abgeändert werden.

In Abb. 4.3 ist links die CSS-Oberfläche zum Einstellen der Hochspannung am HV-Crate gezeigt. Diese Oberfläche weist neben den Anschaltern für jeden Hochspannungskanal einen Anschalter für das Crate auf. Die "ramping"-Zeit für die Spannung, also die Zeit, die das HV-Crate braucht, um auf den eingestellten Spannungswert am Kanal zu kommen, ist mit 10 %/s gesetzt. Die Einstellung für den Strom ist nicht relevant, da diese nur greift wenn man das Crate in einem Konstantstrom-Modus betreibt. Weiter angezeigt werden Signalleuchten für den "kill-switch" und weitere Fehlfunktionen am Crate. Löst der "kill-switch" aus, muss erst der "Reset"-Knopf gedrückt werden, bevor die Spannung wieder gestartet werden kann. Weiter angezeigt wird die Temperatur des Hochspannungsmoduls und die Umdrehungszahl der Lüfter. Es existieren für jeden verwendeten Hochspannungskanal Eingabefelder zum Einstellten der Spannung und des Maximalstroms. Weiter zeigt eine Status-LED den momentanen Status des Hochspannungskanals an (On, Off, Ramping, Error).

Das rechte Fenster in Abb. 4.3 zeigt die Einstellung am Motor. In diesem Fenster unter dem Punkt "GOTO" lässt sich eine Anfahrtsposition angeben. Weiter finden sich hier die Einstellungen für die Kalibration des Motors, der Geschwindigkeit und Beschleunigung, sowie die maximalen Fahrbereiche der Achsen. Der Schieberegler "Number of maximum retries" stellt die maximale Anzahl an Versuchen ein, die EPICS durchführt, wenn eine an den Controller gesendete Bewegung nicht korrekt ausgeführt wird. Die eingestellten Geschwindigkeiten wurden in allen in Abschnitt 3.4 beschriebenen Messungen verwendet und daher auch für die Standardmessung der MAPMTs übernommen.

4.4 Weitere Hardwareeinstellungen der Standardmessung

Weiter müssen standardisierte Einstellungen für n-XYTER und LED bzw. Pulser getroffen werden. Auch muss der Referenz-MAPMT festgelegt werden, auf welchen sich dann alle gemessenen Daten beziehen.

Der Pulser betreibt die LED mit 13 kHz, 8 ns Pulsbreite, und einer Spannung von 3.880 V. Die bereits in Abschnitt 3.3 diskutierte Pulsbreite von 8 ns wurde für die Standardmessung übernommen. Die 13 kHz sind durch den Datenstrom limitiert, da in der Auslese pro synchronisierungs-"timestamp" (oder hier "sync-message") lediglich der erste Trigger-Puls (oder hier "AUX-message") wahrgenommen wird. Die Pulserrate muss also kleiner als die Rate an "sync-messages" gewählt werden, welche etwa 15 kHz beträgt. Die an die LED angelegte Spannung von 3.880 V ist zwar aufgrund der späteren Kalibrierung der Daten durch den Referenz-MAPMT variierbar, wurde hier jedoch auf einen Wert gesetzt, welcher etwa eine Rate von 1.3 kHz am MAPMT erzeugt, also etwa in 10% der Pulse ein Event am MAPMT bzw. ein registriertes Einzelphoton erzeugt. Nimmt man an, dass die Wahrscheinlichkeit für das Erzeugen eines Photons poissonverteilt ist, lässt sich berechnen, dass für diese Häufigkeit an Einzelphotonpulsen die Wahrscheinlichkeit zwei Photonen zu erzeugen auf 0.5% sinkt:

$$10\% \;=\; {}^{\lambda}\!/_{1} \times e^{-\lambda} \Rightarrow \lambda \approx 0.1 \vee \lambda \approx 3.6$$

$$P^{2}_{0.1} \approx 0.5\%$$

Es kann also davon ausgegangen werden, dass für diese Intensität in $\approx 89.5\%$ aller Fälle kein Photon den MAPMT erreicht, in $\approx 10\%$ aller Fälle ein Photon den MAPMT erreicht und in $\approx 0.5\%$ aller Fälle zwei Photonen vom MAPMT registriert werden. Pulse mit drei Photonen oder mehr sind nahezu ausgeschlossen ($< 3 \times 10^{-5}\%$).

Der n-XYTER wird wegen der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Rauschquellen mit einer Schwelle von 60 betrieben. Die Operationslinie (Baseline) wurde mittels einer vorprogrammierten Bestimmungsmethode zu Beginn aller standardisierten MAPMT-Messungen und auch vor der Kalibration des ADC-Spektrums (siehe Abschnitt 3.5) durchgeführt. Hierbei wurde über das Finden der Rauschkante jedem Kanal ein "offset" zugewiesen.

Als Referenz-MAPMT wird der MAPMT mit der Seriennummer HA0230 verwendet. Dieser MAPMT wurde arbiträr aus der ersten Lieferung ausgewählt und weist sich als leicht überdurchschnittlich effizienter und leicht unterdurchschnittlich rauschender H12700 MAPMT aus.

4.5 Datenanalyse und zeitliche Einordnung von Events

Zur Analyse werden die Events am n-XYTER-FEB zeitlich in drei Bereiche gefasst. Diese Bereiche unterteilen sich grob in "mit dem Lichtpuls korreliert", vor dem eigentlichen Lichtpuls, nach dem eigentlichen Lichtpuls. Der Zeitraum in dem Messpulse mit dem Lichtpuls korreliert sind liegt um etwa 980 ns (vgl. hierzu Abschnitt 3.3). Dieser Bereich liegt aufgrund verschiedener Verzögerungen nicht beim ebenfalls vom Pulser ausgegebenen Trigger-Signal bei 0 ns.

Der zeitlich gesehen erste Bereich reicht von −1000 ns bis 600 ns bzgl. des Trigger-Signals. Fällt ein Event in diesen Bereich, so wird dieses Event als nicht mit der Leuchtquelle korrelliert gewertet (vgl. hierzu Abschnitt 3.3). Ein nicht mit dem Lichtpuls (bzw. dem Trigger des Pulsers) korreliertes Signal kann entweder elektronisches Rauschen oder Dunkelrauschen des MAPMTs sein. Ein konstantes elektronisches Rauschen ist hierbei wegen der hohen Schwelle nahezu ausgeschlossen. Einzelne Rauschspitzen könnten zwar durchaus einzelne solche Events erzeugen, sollten aber bei späterer genügend großer Messzeit nicht ins Gewicht fallen. Daher werden diese Events als Dunkelrauschevents in den weiteren Analyseschritten verwendet.

Der zweite Bereich beginnt bei 925 ns und endet bei 1025 ns nach dem Trigger-Signal. In diesem Bereich sind die Events mit der Leuchtquelle korreliert (vgl. hierzu Abschnitt 3.3) und werden daher in den folgenden Analyseschritten als Signalevents verwendet.

Der letzte Zeitbereich erstreckt sich von 1025 ns bis 4000 ns nach dem Trigger-Signal. Events in diesem Bereich werden Nachpulsen zugeordnet. Hierbei ist zu erwähnen, dass ein Nachpuls nur dann als Nachpuls in die weitere Analyse einfließt, wenn zu demselben Trigger-Puls im selben Pixel oder einem anderen Pixel des selben MAPMTs ein Signalevent festgestellt wurde. Hierbei werden Signalevents auch in weiteren Pixeln gesucht, da die Totzeit in einem n-XYTER-FEB-Kanal wahrscheinlich größer ist als die im Handbuch angegebenen 50 ns [BBS$^+$09, S. 21]. Diese Vermutung stützt sich darauf, dass in späteren Analysen keine Nachpulse gesehen wurden, wenn lediglich nach Pulsen im Pixel mit Signalevent gesucht wurde. Ein Signalevent muss vorliegen, da sonst alle Dunkelpulse des MAPMTs in die Messung der Nachpulse einfließen würden. Zwar kann ein Einfluss der Dunkelrate auf die Nachpulsrate nicht ausgeschlossen werden und ist bei stark rauschenden MAPMTs sichtbar, wird aber durch die beschriebene Bedingung reduziert.

5 Standard Messgrößen

In jedem der folgenden Abschnitte wird eine Messgröße der Standardmessung eines MAPMTs beschrieben. Hierbei wird auf die Bestimmung und den Fehler jeder Messgröße eingegangen. Für die Abschätzung des Fehlers werden z.B. die Daten des 159-mal vermessenen Referenz-MAPMTs verwendet. Auch wurden zusätzlich drei MAPMTs der ersten Lieferung häufiger vermessen. Diese Messungen liegen z.T. mehrere Monate auseinander und sind daher gut zur Abschätzung einiger Messungenauigkeiten geeignet. Als Messgrößen werden die Effizienz, die effektive Fläche, die "Schiefheit der Effizienzebene", die Einzelelektronenvervielfachung, die Dunkelrate (auch pro Pixel) und das Nachpulsen beschrieben. Nicht näher beleuchtet werden das Übersprechen verschiedener Pixel in Nachbarpixel ("Crosstalk" oder "charge-sharing") und die Einzelelektronenvervielfachung als Funktion der Betriebsspannung am MAPMT.

5.1 Effizienz und der "Efficiency-Index"

Die Effizienz des MAPMTs ist wie in Abschnitt 2.1 beschrieben eine Faltung aus Quanteneffizienz, Kollektionseffizienz und dem Einfluss der Dynoden. Unter dem Einfluss der Dynoden versteht sich, dass diese durch eventuelle Schäden an einzelnen Dynodenstufen (oder Teilen dieser) in bestimmten Bereichen eine Ineffizienz im MAPMT erzeugen können. Solche Ineffizienzen können sich auch ergeben, wenn bei der Produktion einzelne Dynodenstufen ungenau oder verkippt eingesetzt werden.

Die Effizienz pro Messpunkt bestimmt sich durch Zählen eingegangener Signalevents gegenüber eingegangenen Trigger-Signalen für diesen Messpunkt. Hierbei ist erneut darauf hinzuweisen, dass die Anzahl der Trigger-Events, also Anzahl der Pulse der Lichtquelle pro Messpunkt leicht voneinander abweichen können. Zurückzuführen ist dies auf die leicht unterschiedlichen Messzeiten pro Messpunkt (siehe Abschnitt 4.3). Es muss daher trotz späterer Kalibrierung auf den Referenz-MAPMT eine vorherige Kalibration auf die Trigger-Event-Anzahl gemacht werden.

Die über die Fläche gemittelte, mittlere Anzahl an gemessenen Photonen pro Trigger-Event des Referenz-MAPMT wird nun zur Kalibrierung aller weiteren Messpunkte verwendet. Zur Mittelung der Effizienz werden lediglich Messpunkte auf dem MAPMT verwendet. Ein Messpunkt befindet sich dann auf dem MAPMT, wenn dieser mindestens 2 mm innerhalb der äußeren Umrandung des MAPMTs liegt. Die Position der Ecken des MAPMTs ist hierfür im Code der Analyse hinterlegt.

Die somit auf Triggerpulse und Referenz-MAPMT kalibrierten Messpunkte lassen sich unter Verwendung der Messposition zu einem zweidimensionalen Abbild des MAPMTs zusammenfügen. Ein solches zweidimensionales Abbild ist in Abb. 5.1 für den MAPMT mit Seriennummer HA0150 dargestellt. Durch die Kalibrierung spiegelt ein Effizienzwert (z-Achse) von 1 die mittlere Effizienz des Referenz-MAPMTs wieder. In schwarzer Umrandung sind die MAPMT Außenabmessungen dargestellt, der schwarze Pfeil zeigt wie in den HAMAMATSU Datenblättern (z.B. in [Ham14]) die Orientierung des MAPMTs[1] an. In feinen dunkelorangenen Linien ist auf dem MAPMT das Pixelraster dargestellt. Der MAPMT ist somit, dem Achsenursprung oben rechts (Photonsicht) folgend, in allen Messungen gegenüber der "Normalbetrachtung" um 180° gedreht.

[1] Der Pfeil befindet sich bei normaler Frontansicht des MAPMTs, mit HV-Eingängen auf der rechten Seite, oben links und zeigt nach rechts. Das erste Pixel befindet sich damit beim Startpunkt des Pfeils.

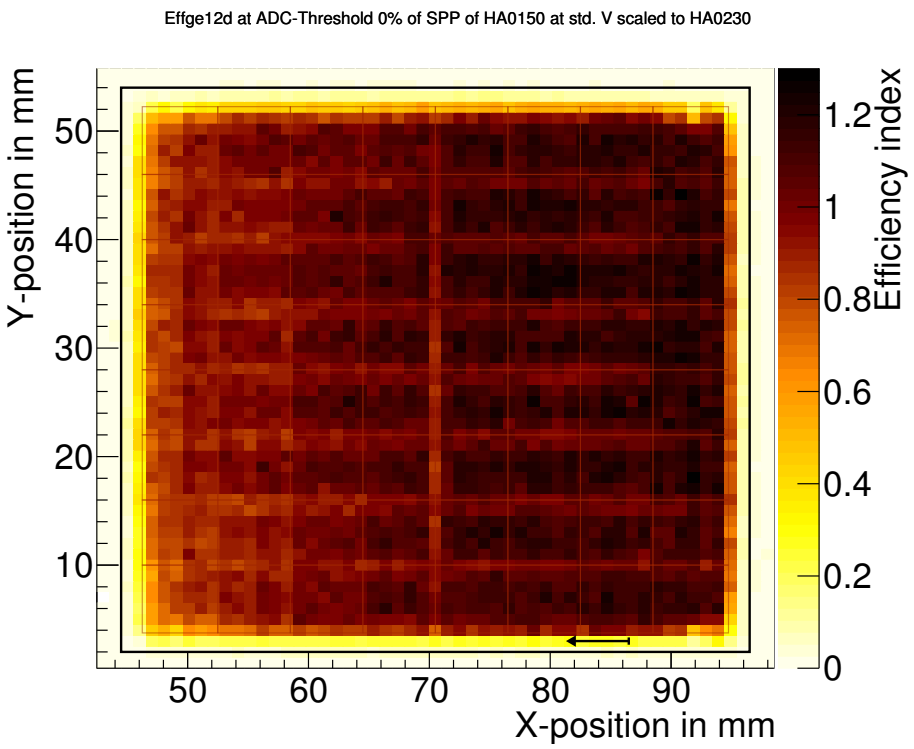


Abb. 5.1 ♦ *Zweidimensionale Abb. einer Effizienzmessung eines MAPMTs (HA0150). Der Effizienzindex (z-Achse) ist auf den Referenz-MAPMT bezogen. Hat ein Messpunkt einen Effizienz-Index von 1, bedeutet das, dass dieser Messpunkt genauso effizient ist wie die mittlere Effizienz des Referenz-MAPMTs. Der MAPMT ist gegenüber der "Normalansicht" um* 180° *verdreht, d.h. Pixel 1 befindet sich unten rechts. Eingezeichnet sind der HAMAMATSU-Markerpfeil (vgl. Abb. 2.5), die MAPMT-Umrandung (schwarze Linie) und die einzelnen Pixel (orangene Linie).*

Die nach Kalibration mittels des Referenz-MAPMTs ermittelbare mittlere Effizienz des Mess-MAPMTs wird im folgenden als Effizienzindex oder "Efficiency-Index" bezeichnet. Diese Effizienz ist ein guter Indikator für die Nachweiseffizienz des MAPMTs.

Die Güte dieses Wertes lässt sich aus der Standardabweichung verschiedener Messungen der MAPMTs mit Seriennummern HA0150 (7 Messungen), HA0151 (8 Messungen) und HA0185 (10 Messungen) bestimmen. Diese MAPMTs wurden im Zuge von Konsistenzprüfungen mehrfach über einen Zeitraum von über sechs Monaten an verschiedenen Positionen in Teststand (Messposition 1,2 oder 3) gemessen. Die jeweiligen Effizienz-Indizes finden sich in Abb. 5.2 . Dort zu sehen ist der Effizienzindex für die drei MAPMTs gegenüber dem Messdatum (JJMMTT[2]), wobei die verschiedenen Messpositionen mit farbigen Markern dargestellt sind. Direkt auffällig ist, dass die einzelnen Effizienzwerte nur minimal schwanken. Es scheint für diese Messungen keine zeitliche Abhängigkeit zu geben, da die Messungen aller drei MAPMTs keinen ähnlichen Verlauf gegenüber dem Messdatum aufweisen. Weiter scheint es auch keine Abhängigkeit von der Messposition zu geben, da für jeden MAPMT die Effizienzen für verschiedene Messpositionen unterschiedlich fluktuieren. Es lässt sich speziell über den Zusammenhang zwischen Messposition und Effizienz noch keine endgültige Aussage treffen, da die Statistik hierfür noch zu gering ist.

Da die Fluktuationen der Effizienz-Indizes weder mit dem Messdatum noch der Messposition korreliert scheinen, sind in Abb. 5.3 die Verteilungen der Effizienz-Indizes jedes MAPMTs gezeigt.

[2]Zweistellige Jahresnoation z.B. 16 für 2016, zweistellige Monatsnotation z.B. 06 für Juni und zweistellige Notation des Tages im Monat.

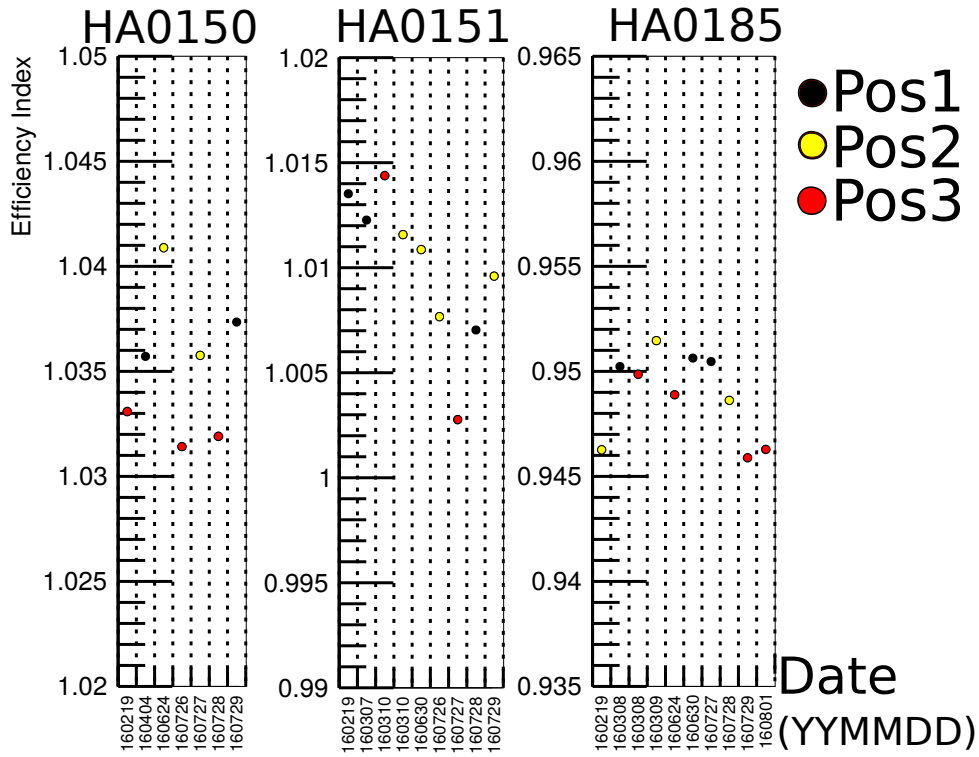


Abb. 5.2 ♦ *Darstellung des Effizienzindex des HA0150 über 7 Messungen, des HA0151 über 8 Messungen und des HA0185 über 10 Messungen. Die Effizienzen sind nach dem auf der Y-Achse aufgetragenen Messdatum (JJMMTT) sortiert und farblich nach Messposition unterschieden. Messposition eins bezeichnet hier die oberste Position im Serienteststand. Ein Effizienz-Index von 1 bedeutet, dass dieser MAPMT im Mittel genauso effizient ist wie der Referenz-MAPMT.*

Aus der Standardabweichung der Verteilung lässt sich nun der Fehler des Effizienz-Index abschätzen. So ergibt sich aus den Standardabweichungen der verschiedenen Verteilungen (der Abb. 5.3 bei Eintrag RMS entnehmbar) der Fehler auf den Effizienzindex ΔEFF nach:

$$\Delta\mathrm{EFF} = {}^{2}/_{\sqrt{n_1+n_2+n_3-1}} \times \sqrt{\sigma_1^2 \times (n_1-1) + \sigma_2^2 \times (n_2-1) + \sigma_3^2 \times (n_3-1)} \tag{5.1}$$

$$= {}^{2}/_{\sqrt{26-1}} \times \sqrt{0.003097^2\,(7-1) + 0.001941^2\,(10-1) + 0.003443^2\,(9-1)} \tag{5.2}$$

$$\approx 0.0027 \tag{5.3}$$

, mit der jeweiligen Messanzahl $n_{(1,2,3)}$ und den jeweiligen Standardabweichungen $\sigma_{(1,2,3)}$. Der geringe Fehler von $\Delta\mathrm{EFF} = \pm 0.0027$ ist erstaunlich, betrachtet man die Tatsache, dass die Leuchtquelle und damit die Effizienz des Referenz-MAPMTs bei leichten Veränderungen am Messstand bereits stark schwankt. Dieses Verhalten wird ersichtlich, wenn man sich den in Abb. 5.4 dargestellten Verlauf des Kalibrationswertes des Referenz-MAPMTs anschaut. Der Kalibrationswert hängt hier lediglich von der Leuchtquelle und der Effizienz des Referenz-MAPMTs ab. Hier wird jede Änderung am Setup besonders deutlich, wenn man die verschiedenen Sprünge zu verschiedenen Messdaten betrachtet. Weiter sind dort Eigenschaften der Lichtquelle zu erkennen, welche einer genaueren Analyse bedürfen. So sieht man deutlich gegen Ende einen Anstieg der Effizienz des Referenz-MAPMTs, welche evtl. auf eine Erwärmung der LED im Hochsommer hindeuten könnte. Da sich hier jedoch viele Effekte überlagern, ist die Bestimmung einer Korrelation zwischen Temperatur und Effizienz des Referenz-MAPMTs schwierig.

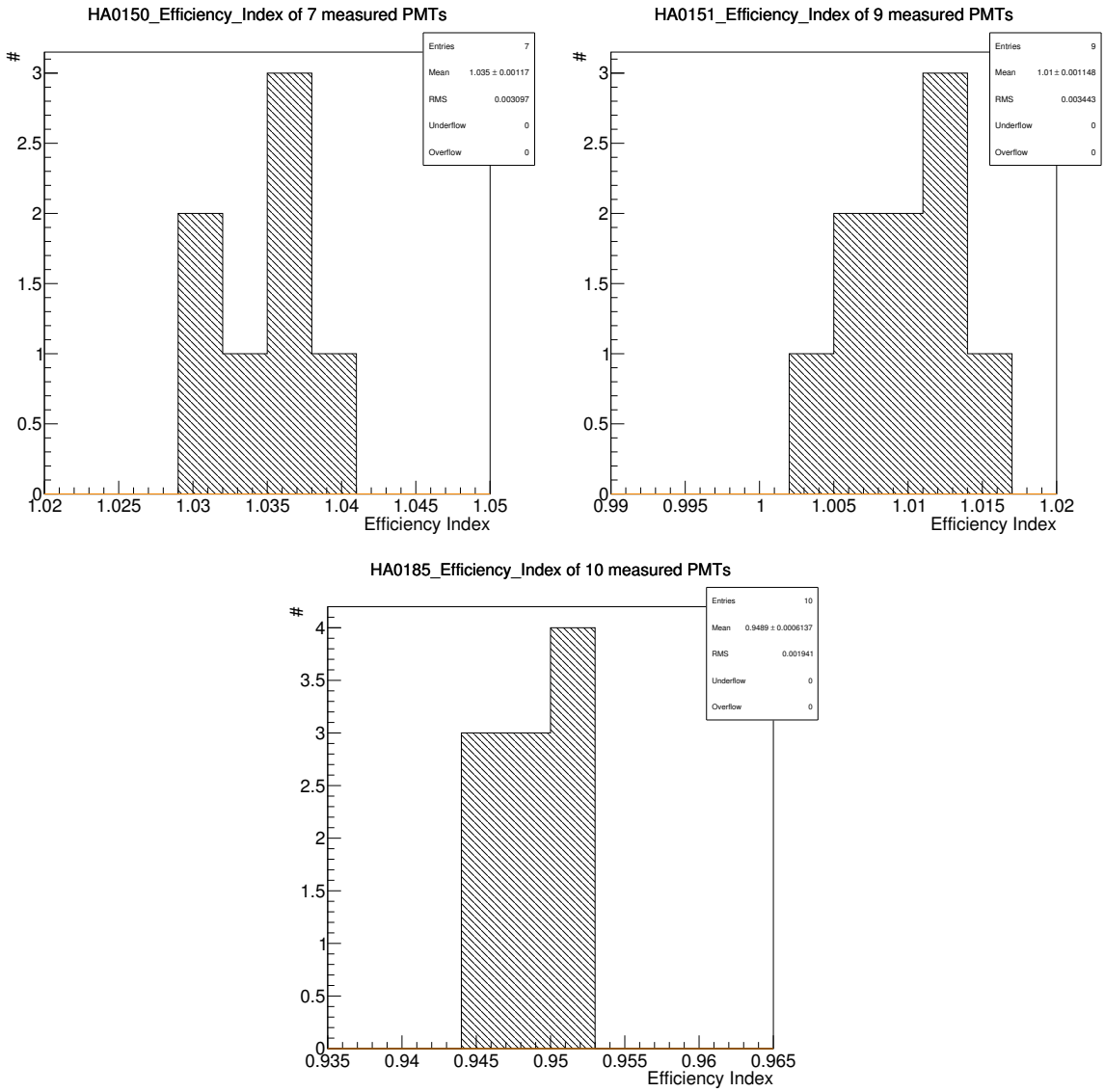


Abb. 5.3 ♦ *Häufigkeitsverteilung des Effizienzindex des HA0150 über 7 Messungen, des HA0151 über 8 Messungen und des HA0185 über 10 Messungen. Ein Effizienz-Index von 1 bedeutet, dass dieser MAPMT im Mittel genauso effizient ist wie der Referenz-MAPMT. Den Verteilungen entnimmt sich eine std. Abweichung von 0.003097 für den HA0150, von 0.003443 für den HA0151 und von 0.001941 für den HA0185.*

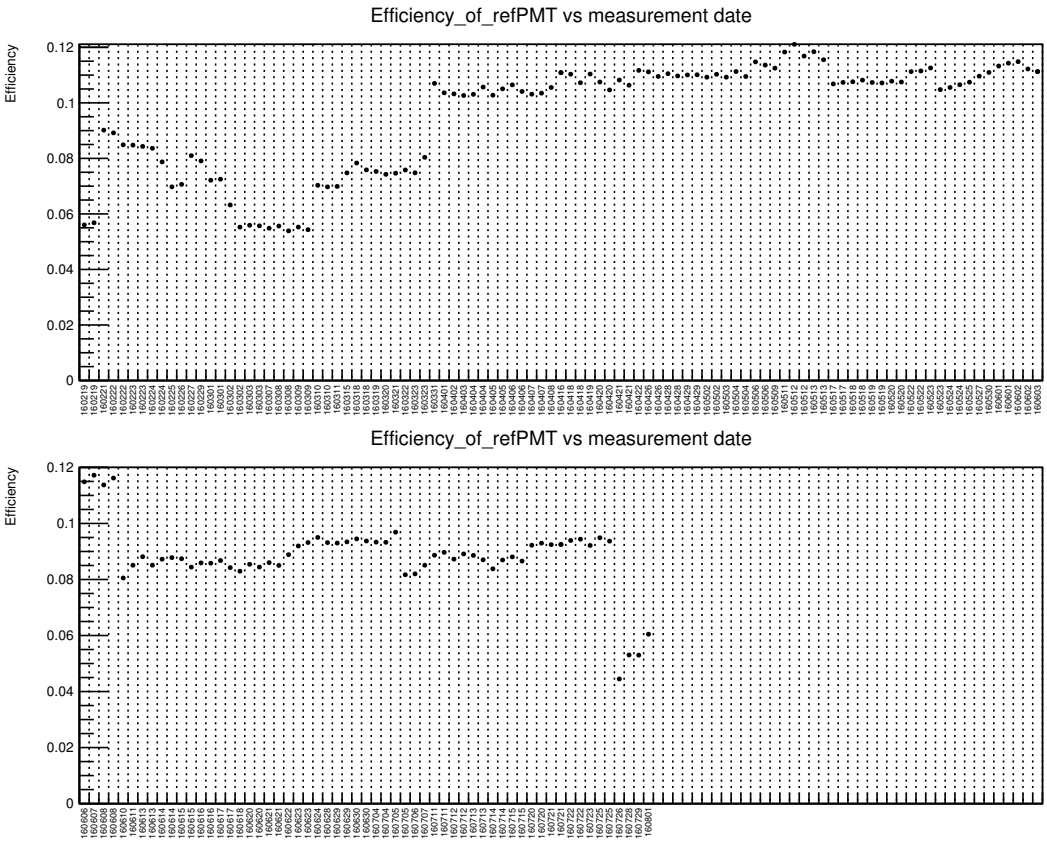


Abb. 5.4 ♦ *"Effizienz" des Referenz-MAPMT für 159 verschiedene Messungen. Der Y-Achse ist das Messdatum (JJMMTT) in aufsteigender Reihenfolge entnehmbar. Die "Effizienz" des Referenz-MAPMT ist der in Abschnitt 5.1 beschriebene Kalibrationswert für die anderen Messpunkte. Also ist die dargestellte "Effizienz" die über die MAPMT-Fläche gemittelte Anzahl an gemessenen Photonen geteilt durch die Anzahl an Pulsen der LED. Somit sind die dargestellten Schwankungen in der "Effizienz" Effekte der Leuchtquelle und des Referenz-MAPMTs.*

5.2 Effektive Fläche

Die Effektive Fläche berechnet sich durch Abzählen von Messpunkten oberhalb der relativen Effizienzschwelle von 60% des MAPMT Maximums. Die maximale MAPMT-Effizienz bestimmt sich hierbei aus der Effizienz der drei effizientesten Messpixel. Nach Division der gezählten $1\,\mathrm{mm}^2$ großen Messpunkte durch die MAPMT-Größe von $52 \times 52\,\mathrm{mm}^2$ ergibt sich eine effektive Fläche, die aufgrund der inhärenten effektiven MAPMT-Fläche von 87%, diesen Wert nicht übersteigen kann. Um den Fehler auf die effektive Fläche abzuschätzen, ist in Abb. 5.5 die effektive Fläche des Referenz-MAPMTs gegenüber dem Messdatum aufgetragen.

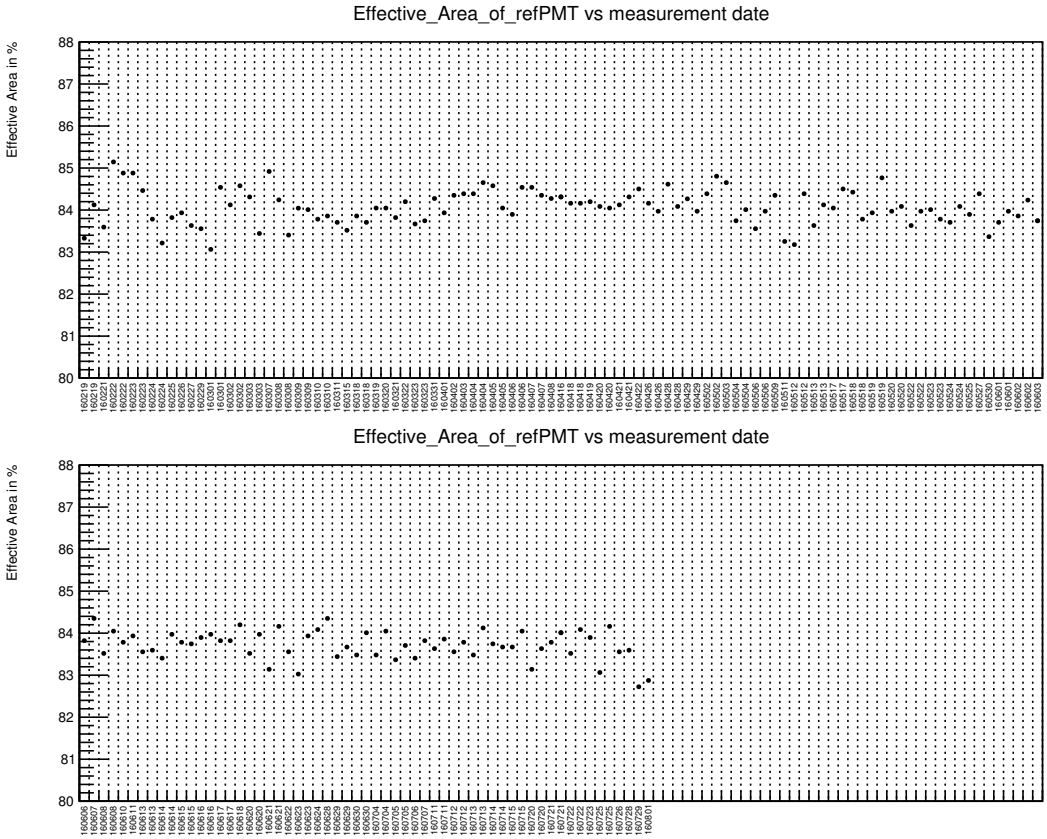


Abb. 5.5 ♦ *Effektive Fläche des Referenz-MAPMT für 159 verschiedene Messungen. Der Y-Achse ist das Messdatum (JJMMTT) in aufsteigender Reihenfolge entnehmbar. Die effektive Fläche ist die Fläche mit einer relativen Effizienz größer 60% gegenüber den Außenabmessungen des MAPMTs.*

Hier ist direkt zu erkennen, dass keine systematische Schwankung gegenüber dem Messdatum vorliegt. Es lässt sich daher erneut der Fehler mittels der Standardabweichung aus Abb. 5.6 (RMS) abschätzen. Der Wert der Standardabweichung und somit des Fehlers auf die effektive Fläche beträgt:

$$\Delta\text{EFFAR} \;=\; 0.4208\,(\text{pp})$$

Diese Größe entspricht einem Einfluss von

$$\frac{0.4208(52 \times 52\text{mm}^2)}{(1 \times 1)\text{mm}^2} \;=\; 11.38$$

anders gemessenen Messpunkten/-pixeln. Dieser Fehler ist in Anbetracht dessen, dass mit dieser Methode eine Selektion auf MAPMTs zwischen 80% und 87% getroffen werden soll groß, ($^{0.5\%}/_{7\%} \;\approx\; 7\%$), liefert jedoch bei MAPMTs mit kleiner effizienter Fläche ein signifikantes Ablehnungskriterium (siehe in Abschnitt 6.4).

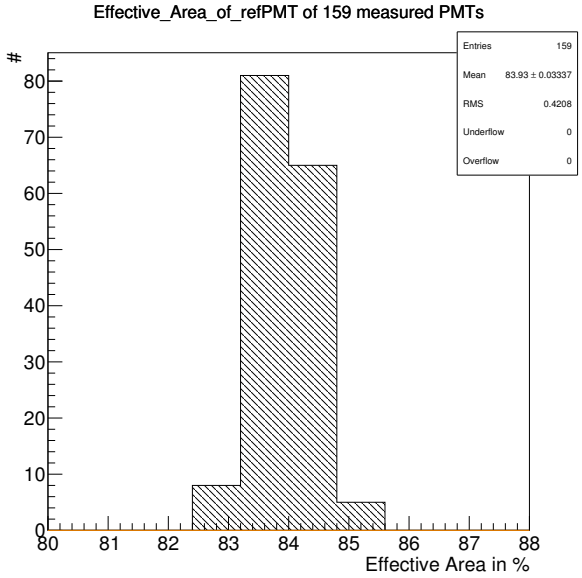


Abb. 5.6 ♦ *Verteilung der effektive Fläche des Referenz-MAPMT für 159 verschiedene Messungen. Die effektive Fläche ist die Fläche mit einer relativen Effizienz größer 60% gegenüber den Außenabmessungen des MAPMTs. Der Verteilung ist eine Standardabweichung von* 0.4208 *(pp) entnehmbar.*

Eine andere Methode, wie das Anfitten der MAPMT-Außenkanten, könnte hierbei verlässlichere und konstantere Werte liefern und sollte daher für die Zukunft in Betracht gezogen werden. Diese Methode wird im Rahmen dieser Thesis jedoch nicht weiter betrachtet.

5.3 Schiefheit (Skeweness)

Die Schiefheit des MAPMTs ist ein Selektionskriterium, entstanden aus der Notwendigkeit der Beschreibung eines kontinuierlich auftretenden Artefaktes der Verkippung der Effizienzfläche des MAPMTs. Unter "Verkippung der Effizienzfläche" versteht sich das einseitige Absenken der Effizienz z.B. in horizontaler Richtung[3]. Hierdurch entsteht in der horizontalen Projektion der Effizienz eines MAPMTs ein Gefälle in eine Richtung. Beispielhaft ist in Abb. 5.7 die Verkippung in einer horizontalen Projektion eines besonders "verkippten" MAPMTs (HA0355) dargestellt. Deutlich zu sehen ist hier, dass der linke Teil der Projektion kleinere Effizienzen aufweist als der rechte. Um dies zu quantifizieren, ist der Wert der horizontalen Schiefheit der Mittelwert der Effizienz der linken Hälfte des MAPMTs dividiert durch die mittlere Effizienz der rechten Hälfte. Die linke MAPMT-Hälfte ist hierbei vom äußeren Rand des MAPMTs beginnend die Fläche bis zur Mitte des MAPMTs. Die rechte Hälfte erfasst den verbleibenden Anteil des MAPMTs. Eine Darstellung der beiden Hälften am Beispiel des HA0355 findet sich in Abb. 5.8 .

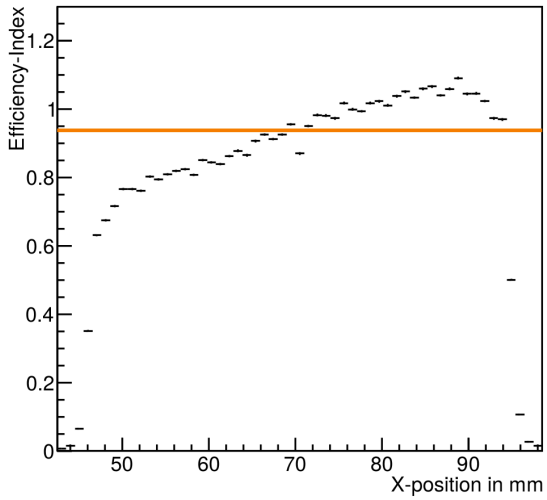


Abb. 5.7 ♦ *Verkippung in einer horizontalen Projektion eines besonders "verkippten" MAPMTs (HA0355). Auf der Y-Achse findet sich der Effizienz-Index als Mittelwert über die MAPMT-Projektion auf die horizontale Achse. In gelb dargestellt ist der mittlere Effizienzindex.*

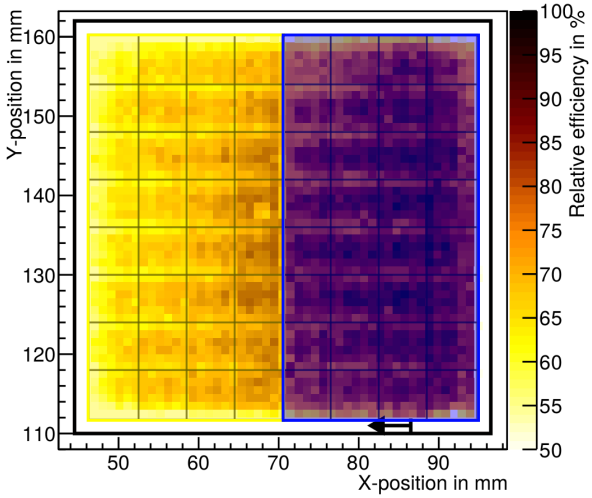


Abb. 5.8 ♦ *Darstellung der beiden zur Berechnung der Verkippung verwendeten Hälften auf dem MAPMT, beispielhaft am MAPMT HA0355 gezeigt. Die Verkippung ergibt sich durch Division der beiden mittleren Effizienzen beider Hälften.*

Dividiert man die mittlere Effizienz der linken durch die der rechten Hälfte erhält man einen Wert kleiner eins für nach links abfallende Effizienzen und einen Wert größer eins für nach rechts abfallende Effizienz-Projektionen. Obwohl dieser Wert lediglich Aufschluss geben soll, ob eine Verkippung vorliegt oder nicht, soll hier trotzdem der Fehler dieser Größe diskutiert werden.

[3] Hier soll lediglich die Schiefheit in horizontaler (x-)Richtung diskutiert werden. Zwar gelten alle hier angestellten Überlegungen auch für die Schiefheit in vertikaler Richtung, jedoch tritt eine solche Verkippung bei MAPMTs nicht signifikant auf und ist daher nicht von Interesse.

Hierfür wird die Verteilung über die 159 Messungen des Referenz-MAPMTs in Abb. 5.9 herangezogen. Diese Verteilung hat eine Standardabweichung von

$$\sigma_{\text{Skew}} \;=\; 0.01299 \;=\; \Delta\text{SKEW}$$

, welche dem Fehler auf die Schiefheit gleichzusetzen ist. Ein Fehler dieser Größe passt gut zum in Abschnitt 5.2 bestimmten Fehler auf die effektive Fläche von $\Delta\text{EFFAR} \;=\; 0.4208\,(\text{pp})$. So ergibt sich der Zusammenhang der Fehler mit

$$\Delta\text{SKEW} \;=\; 2 \times \sqrt{2} \times \Delta\text{EFFAR}$$

nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung[4].

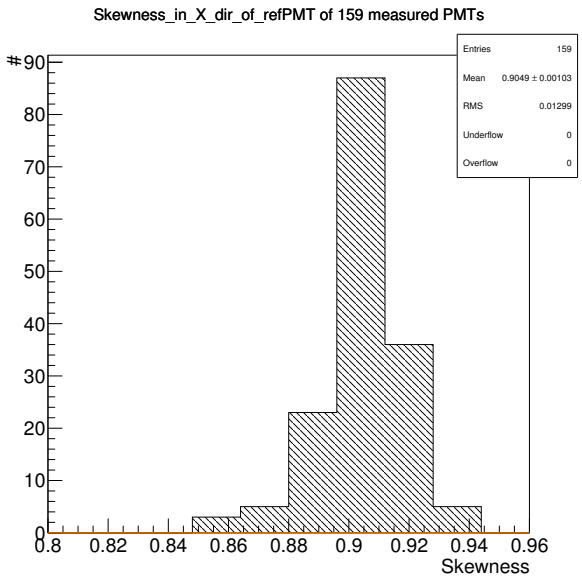


Abb. 5.9 ♦ *Verteilung der Verkippung des Referenz-MAPMT für 159 verschiedene Messungen. Die Verkippung ergibt sich durch Division der beiden mittleren Effizienzen beider horizontaler MAPMT-Hälften. Der Verteilung ist eine Standardabweichung von* 0.01299 *entnehmbar.*

Dieser Fehler auf den Wert der Verkippung reicht vollkommen zur Unterscheidung zwischen einer vorliegenden oder keiner vorliegenden Verkippung im Sinne der hier vorgestellten Bestimmung aus. Allerdings ist der Referenz-MAPMT ein nicht übermäßig verkippter MAPMT, so dass der Fehler auf die Verkippung unterschätzt sein könnte. Dieser Wert ist auch deshalb nur eingeschränkt aussagekräftig, da er nur exakt die Verkippungen beschreibt, die einen starken Unterschied zwischen linksseitiger und rechtsseitiger Effizienz aufweisen. Andere örtliche Variationen in der Effizienz werden somit nicht abgedeckt. Weiter ist der Wert der Verkippung sogar z.T. irreführend, da nicht in Betracht gezogen wird, wenn ein MAPMT einseitig eine besonders hohe Effizienz aufweist, während die andere Seite durchschnittlich effizient ist. Ein solcher MAPMT ist insgesamt immer noch effizienter als andere. Für einen solchen MAPMT ist also die effizientere Seite ein Bonus. Daher sollte der Wert der Verkippung immer zusammen mit dem Effizienz-Index betrachtet werden, um einen ersten Eindruck von der Güte der Effizienz zu erhalten.

[4] Die halbe Anzahl an Messpunkten verdoppelt den Messfehler für beide Mittelwerte, die bei Annahme einer ähnlichen Größe nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung der Division einen Faktor $\sqrt{2}$ an-multipliziert bekommen.

5.4 Einzelelektronenvervielfachung

Die Einzelelektronenvervielfachung ist der in Abschnitt 2.1 der Theorie beschriebene Wert, welcher ausdrückt, wie stark ein einzelnes Photoelektron durch die Dynodenkette verstärkt wird. Da in diesem Setup hauptsächlich einzelne Photonen detektiert werden (siehe Abschnitt 4.3) bietet es sich an, vom größten Peak im kalibrierten ADC-Spektrum, in diesem Falle also dem Einzelphotonenpeak, den Mittelwert als Einzelelektronenvervielfachung zu nehmen.

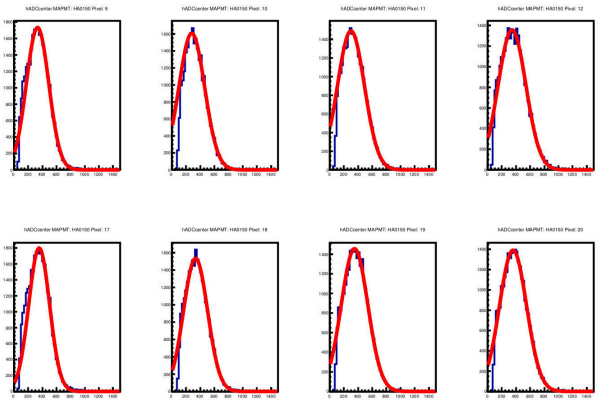


Abb. 5.10 ♦ *Darstellung von acht ADC-Spektren verschiedener Pixel mit sichtbarem Einzelphotonenpeak. Angefittet sind die Spektren mit einer Gaußverteilung zur Bestimmung der Einzelelektronenvervielfachung. Die ADC-Spektren sind gefüllt mit Einzeleventsignalen, welche in der Mitte des jeweiligen MAPMT-Pixels aufgetroffen sind. Die Spektren sind die der Pixel 9, 10, 11, 12, 17, 18, 19 und 20 des HA0150.*

Dazu wird eine Gaußverteilung an das ADC-Spektrum jedes einzelnen Kanals gefittet. Mit den theoretisch vorliegenden 20800 [5] Events pro Kanal gelingt ein Fit bei einer Einzelelektronenvervielfachung größer 1×10^6 gut. Beispielhaft sind hierfür in Abb. 5.10 die Fits an acht ADC-Verteilungen verschiedener Pixel des HA0150 gezeigt. Um lediglich volle Signalhits zu haben und nicht evtl. auftretende Teilladungen, verursacht durch "charge-sharing" zwischen Pixeln, im ADC-Spektrum zu haben, sind die ADC-Spektren lediglich mit den Events gefüllt, welche registriert wurden, als die Faser sich mittig auf dem Pixel befand. Mittig auf dem Pixel bezeichnet hier alle Positionen der Faser, welche ± 2 mm um den Pixelmittelpunkt liegen. Weiter müssen die Events der Bedingung genügen, dass kein weiteres simultanes Signalevent in einem anderen Pixel vorliegt. Simultan bedeutet, dass beide Events dem gleichen Trigger-Puls der Lichtquelle zugeordnet werden. Durch diesen Schnitt reduziert sich die Anzahl an "charge-sharing" Events kleiner Amplitude im Spektrum. Mit diesen Schnitten reduziert sich zwar die Anzahl an Events und damit die Füllanzahl des ADC-Spektrums, aber ein Gaußfit ist wie in Abb. 5.10 zu sehen immer noch gut möglich.

Um abzuschätzen, wie konstant bzw. fehleranfällig diese Methode der Bestimmung der Einzelelektronenvervielfachung ist, wird die Standardabweichung des Referenz-MAPMTs untersucht. In Abb. 5.11 ist daher der Verlauf der Einzelelektronenvervielfachung gegenüber dem Messdatum dargestellt. Direkt ersichtlich ist ein systematischer und konstanter Anstieg der Einzelelektronenvervielfachung mit dem Messdatum. Dieser Anstieg könnte temperaturbedingt sein oder mit dem verwendeten ADC-shift zu tun haben. Für eine genauere Betrachtung ist in Abb. 5.12 die Einzelelektronenvervielfachung des Referenz-MAPMTs gegen den ADC-shift aufgetragen. In der Abb. ist eine starke positive Korrelation, mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.9198, zu erkennen. Die Einzelelektronenvervielfachung steigt mit stärkerer Verschiebung des ADC-Spektrums an.

[5] Mit 4×4 Messpunkten auf den $4 \times 4\text{mm}^2$ großen Pixeln 13 kHz Pulserrate und 10% Signaleventwahrscheinlichkeit und 1.5 Sekunden Messzeit

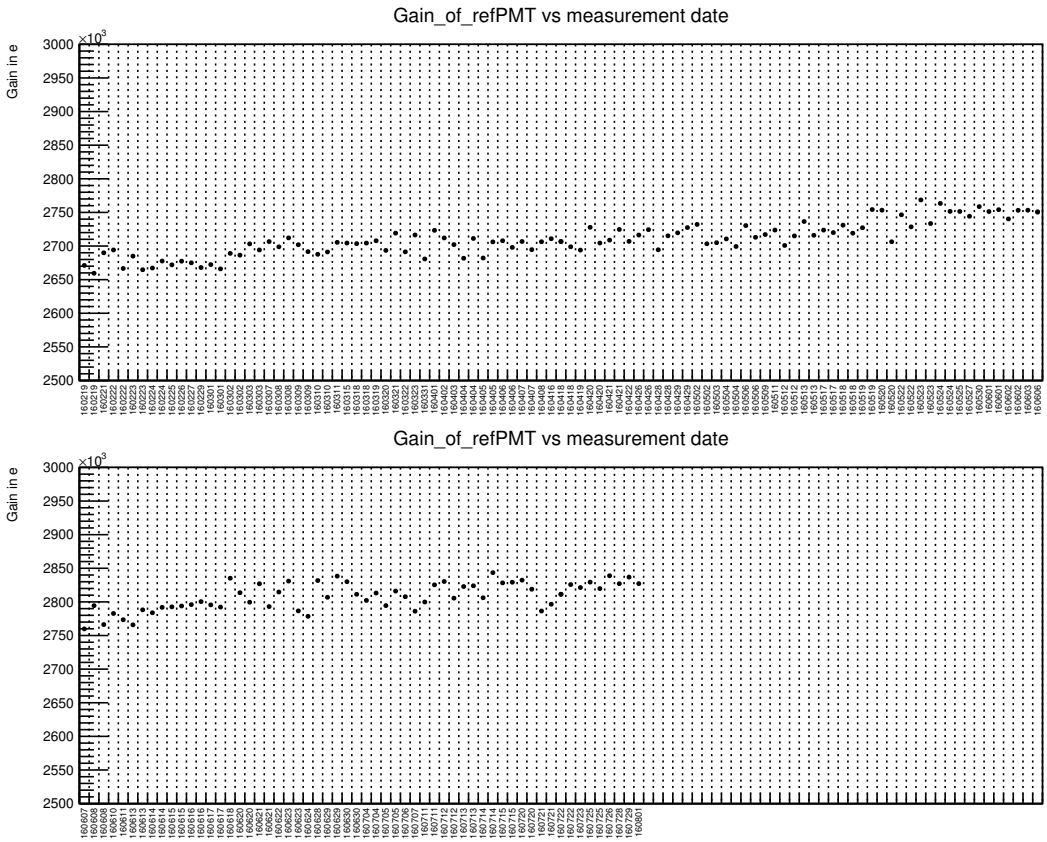


Abb. 5.11 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung (Gain) des Referenz-MAPMT für 158 verschiedene Messungen. Der Y-Achse ist das Messdatum (JJMMTT) in aufsteigender Reihenfolge entnehmbar. Eine Messung wurde aus der Messreihe aufgrund fehlerhafter Schwelleneinstellung (Schwelle 40) entfernt. Die Einzelelektronenvervielfachung bestimmt sich aus dem Mittelwert der Einzelelektronenvervielfachung aller Pixel. Die Einzelelektronenvervielfachung des jeweiligen Pixels bestimmt sich aus dem Parameter für den Mittelwert eines Gaußfits an das jeweilige ADC-Spektrum. Die ADC-Spektren sind gefüllt mit Einzeleventsignalen, welche in der Mitte des jeweiligen MAPMT-Pixels aufgetroffen sind.*

Ob aber Temperatur oder die Verschiebung des ADC-Spektrums für den Anstieg in der Einzelelektronenvervielfachung verantwortlich sind, kann nicht gesagt werden, da ADC-shift und Temperatur korreliert sind (vgl. Abschnitt 3.5). Allerdings findet sich in [CCC$^+$15, S. 13] eine Messung, die zeigt, dass die Einzelelektronenvervielfachung für höhere Temperaturen sinkt. Mit den Messungen lässt sich also der Zusammenhang zwischen ADC-shift und Einzelelektronenvervielfachung festmachen.

Bis zum vollständigen Verständnis dieser systematischen Abweichung sowie einer besseren Kalibration des ADC-Spektrums (siehe Unterabschnitt 3.5) muss daher ein großer Fehler auf die Einzelelektronenvervielfachung angenommen werden. Der Fehler wird hier auf

$$\Delta\mathrm{GAIN} \;=\; 2.5 \times 10^5\, e$$

gesetzt und umfasst damit auch die Standardabweichungen der im Anhang dargestellten Verteilungen der Einzelelektronenvervielfachungen der mehrfach gemessenen MAPMTs HA0150 (Abb. A.5), HA0151 (Abb. A.6), HA0185 (Abb. A.7). Der Fehler ist hier zwar groß abgeschätzt, ist aber gegenüber dem Messintervall von 1×10^6 e bis 6×10^6 e, mit einem Anteil von nur $\sim 5\%$, klein.

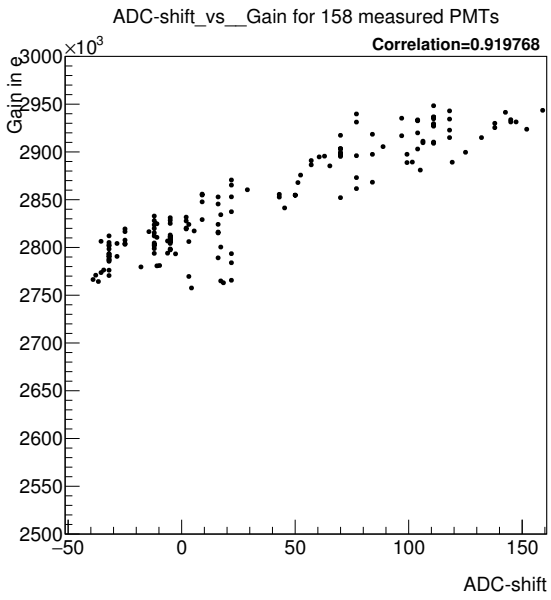


Abb. 5.12 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung (Gain) gegenüber der Verschiebung des ADC-Spektrums für 158 Messungen des Referenz-MAPMTs (also nur an FEB-2 gemessen). Der Graph weist eine positive Korrelation, mit einem Korrelationskoeffizienten von* 0.9198*, zwischen "Gain" und "ADC-shift" auf.*

5.5 Dunkelrate

Die Dunkelrate bestimmt sich nach Anwendung des in 4.5 beschriebenen Zeitschnitts aus:

$$\mathrm{DARK} = \frac{\mathrm{N_{Dunkelrauschevent}}}{\tau_{\mathrm{window}} \times \mathrm{N_{trigger}}} \tag{5.4}$$

$$= \frac{\mathrm{N_{Dunkelrauschevent}}}{1600\mathrm{ns} \times \mathrm{N_{trigger}}} \tag{5.5}$$

wobei τ_{window} die Breite des Zeitschnittfensters, $\mathrm{N_{Dunkelrauschevent}}$ die Anzahl an Events in diesem Fenster und $\mathrm{N_{trigger}}$ die Gesamtanzahl an Triggern während der gesamten Standardmessung ist. Da die Dunkelrate eines MAPMTs bei erstmaligem Betrieb und nach vorheriger starker Beleuchtung abnimmt, werden zu ihrer Bestimmung lediglich die Dunkelrauschevents der letzten zwei Stunden der insgesamt siebenstündigen Messung verwendet. Für einen mit einer Rate von 1 kHz rauschenden MAPMT bedeutet dies einen statistischen Fehler auf diesen Wert von:

$$\frac{1}{\sqrt{2 \times 60 \times 60 \times 1000}} = \frac{1}{\sqrt{7.2 \times 10^6}} = 0.037\%$$

Zur Betrachtung systematischer Schwankungen ist in Abb. 5.13 der Verlauf der Dunkelrate des Referenz-MAPMTs gegenüber dem Messdatum aufgetragen. Neben einigen zufällig für manche Messungen auftauchenden Peaks im Rauschen ist für die ersten Messungen des Referenz-MAPMTs ein Abfall der Dunkelrate zu erkennen. Dieser Abfall könnte damit zusammenhängen, dass der MAPMT nach der Produktion eine deutlich längere Zeit als sieben Stunden unter Hochspannung verbringen muss, bevor dieser seine normale Dunkelrate erreicht. Weiter fällt auf, dass gerade zu späteren Messdaten, also während des Sommers, die Dunkelrate anzusteigen scheint. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass wie auch in [HAM07, S. 68f] beschrieben die Temperatur einen Einfluss auf die Dunkelrate hat.

Um dies zu untersuchen, ist in Abb. 5.14 die Dunkelrate des Referenz-MAPMTs gegen die Temperatur aufgetragen. Aus dieser Graphik geht direkt hervor, dass Temperatur und Dunkelrate bei kleinen Temperaturänderungen positiv korreliert sind. Ferner wird ersichtlich, dass für kleine Temperaturänderungen die Dunkelrate linear anzusteigen scheint. Diese Aussage lässt sich jedoch nur festigen, wenn die Temperatur bzgl. der Rate dasselbe Verhalten für abfallende Temperaturen, also für Messungen während der Winterzeit, zeigt. Ist dies nicht der Fall liegt hier ein zeitlicher Trend vor, welcher korrigiert werden muss. Bei Bestimmung der Funktionsparameter der lt. [HAM07, S. 69] exponentiell mit der Temperatur ansteigenden Dunkelrate ließe sich mit den jeweiligen gemessenen Dunkelraten der MAPMTs also auch der Wert bei Einsatz im späteren evtl. ungekühlten Experiment extrapolieren. Weiter lässt sich diese Korrelation nicht auf Temperaturartefakte im n-XYTER zurückführen, da auf Dunkelrauschevents keine Ladungsschnitte durchgeführt werden.

Als Schätzer für den Fehler auf die Dunkelrate sollte die Standardabweichung der Dunkelrate des Referenz-MAPMTs verwendet werden, die keinen starken systematischen Schwankungen unterliegt. Genommen wird daher die Standardabweichung der Messungen vom 02.04.2016 bis zum 06.06.2016. Die Verteilung der Dunkelraten des Referenz-MAPMTs über diesen Zeitraum ist in Abb. 5.15 dargestellt. Die Verteilung hat eine Standardabweichung von:

$$\sigma_{\mathrm{Darknoise}} = 0.3756\,\mathrm{kHz} = \Delta\mathrm{DARK}$$

Dieser Wert wird für die zukünftigen Messungen als Fehler auf die Dunkelrate verwendet. Dieser Fehler ist sehr groß, was jedoch bei der Anzahl an Ausreißern zu großen Dunkelraten nicht überrascht. Diese Ausreißer können nicht ohne weiteres erklärt werden, scheinen jedoch eine MAPMT Eigenschaft zu sein. Das lässt sich an der Tatsache festmachen das manche Sprünge in der Dunkelrate nicht bei allen, in einer Messung gleichzeitig vermessenen, MAPMTs auftritt.

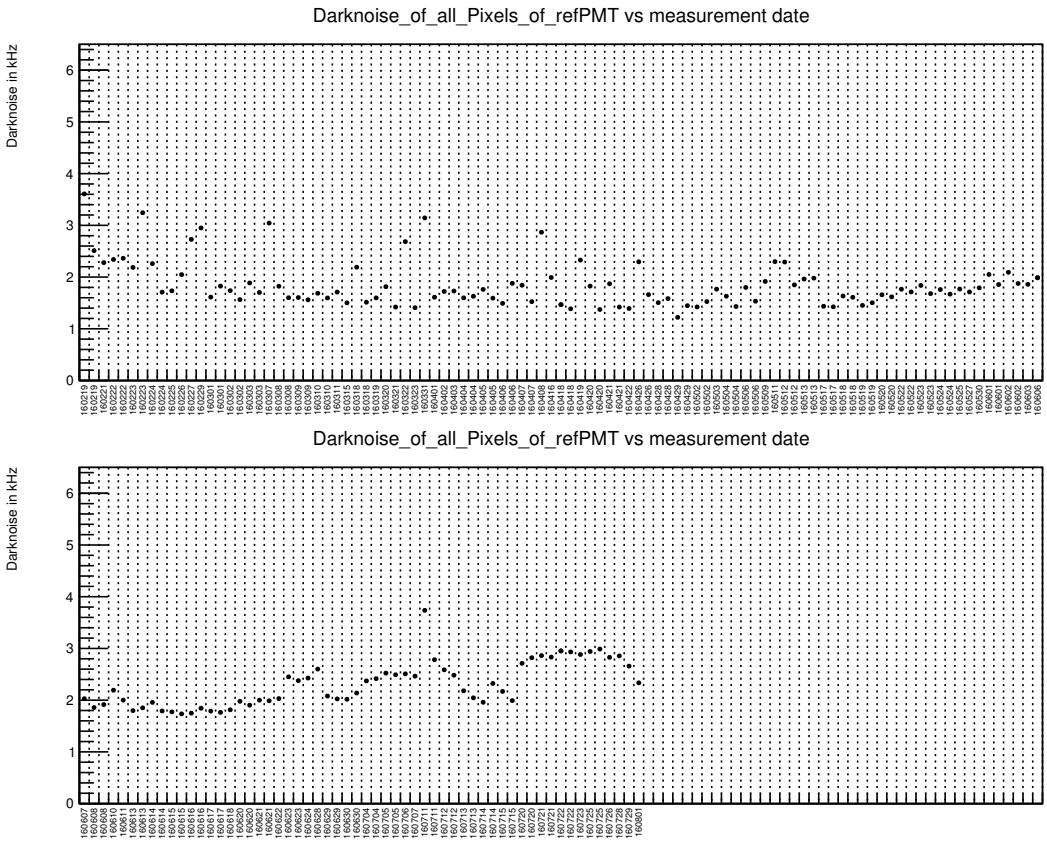


Abb. 5.13 ♦ *Dunkeltrate des Referenz-MAPMT für 159 verschiedene Messungen. Der Y-Achse ist das Messdatum (JJMMTT) in aufsteigender Reihenfolge entnehmbar. Die Dunkelrate bestimmt sich aus der Anzahl an Rauschevents über der Messzeit.*

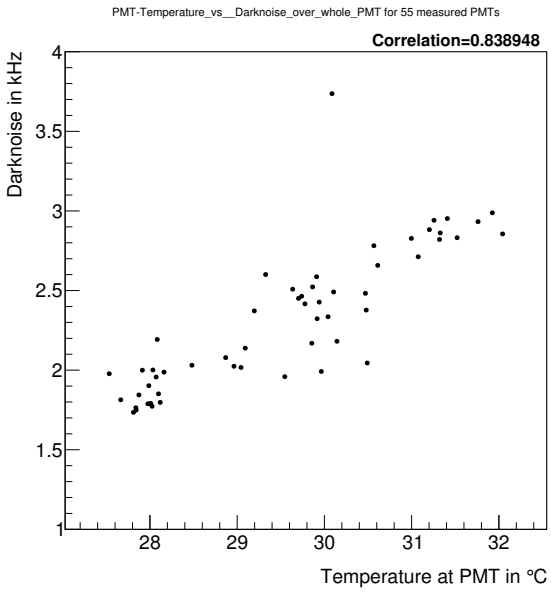


Abb. 5.14 ♦ *Dunkelrate dargestellt gegenüber der MAPMT-Temperatur für 55 Messungen (mit Temperatursensor) des Referenz-MAPMTs. Der Graph weist eine positive Korrelation auf. Der Korrelationskoeffizient beträgt* 0.8389*, was auf einen starken Zusammenhang zwischen Temperatur und Dunkelrate schließen lässt.*

Da abgesehen von der Dunkelrate über den gesamten MAPMT auch die größte Dunkelrate eines Pixels von Interesse ist, wird auch diese Eigenschaft des MAPMTs in diesem Teststand untersucht. Da die Dunkelraten einzelner Pixel durchaus starken Schwankungen unterworfen sein können, wird anstatt einer Bestimmung der größten Dunkelrate in einem Pixel, der Mittelwert der Rauschraten dreier Pixel verwendet. Um trotz Verwendung nur dreier Pixel genügend

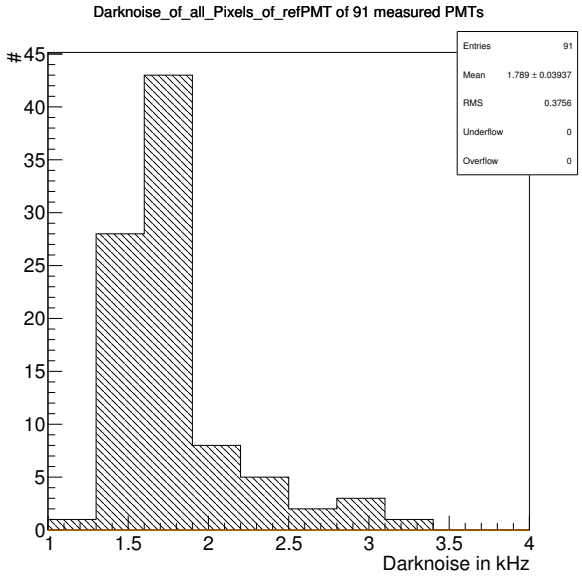


Abb. 5.15 ♦ *Verteilung der Dunkelrate des Referenz-MAPMT für 91 verschiedene Messungen im Zeitraum vom 02.04.2016 bis 06.06.2016. Der Zeitraum wurde wegen einer sehr wahrscheinlich vorliegenden Konstanz in der Temperatur gewählt. Die Dunkelrate bestimmt sich aus der Anzahl an Rauschevents über der Messzeit. Der Verteilung ist eine Standardabweichung von* 0.3756 *kHz entnehmbar.*

Statistik für eine gute Dunkelrauschratenbestimmung zu haben, wird zur Bestimmung dieses Wertes die Dunkelrate über die volle Messzeit bestimmt.

Da für den Wert der maximalen gemittelten drei-Pixel-Dunkelrate eine ähnliche Systematik erwartet wird wie bei der vorher diskutierten Dunkelrate über den gesamten MAPMT, ist in Abb. 5.16 lediglich die Verteilung des Wertes für den Referenz-MAPMT im oben angegebenen Zeitraum gezeigt. Die Standardabweichung der Verteilung und damit der von nun an auf diese Messgröße verwendete Fehler ist

$$\sigma_{\text{max-Pixel-Darknoise}} = 0.05376\,\text{kHz} = \Delta\text{PXDARK}$$

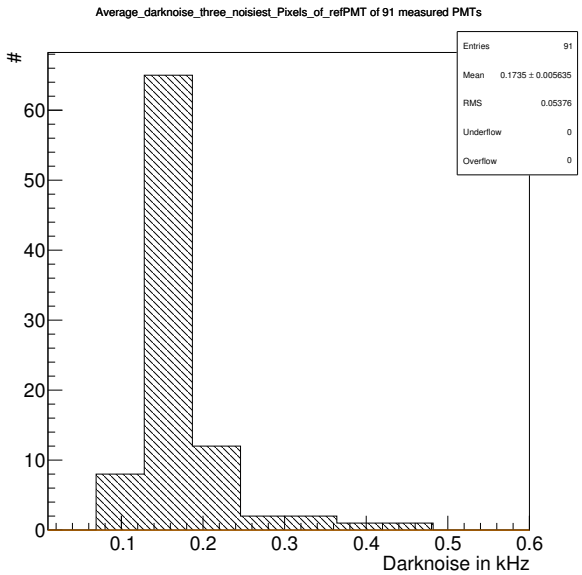


Abb. 5.16 ♦ *Verteilung der maximalen gemittelten drei-Pixel Dunkelrate des Referenz-MAPMT für 91 verschiedene Messungen im Zeitraum vom 02.04.2016 bis 06.06.2016. Der Zeitraum wurde wegen einer sehr wahrscheinlich vorliegenden Konstanz in der Temperatur gewählt. Die Dunkelrate bestimmt sich aus der mittleren Anzahl an Rauschevents über der Messzeit in den drei Pixeln mit höchster Dunkelrate. Der Verteilung ist eine Standardabweichung von* 0.05376 *kHz entnehmbar.*

5.6 Nachpulshäufigkeit

Die Nachpulshäufigkeit drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass zu einem Signalevent noch ein nachfolgender Puls registriert wird (siehe auch Abschnitt 4.5). In der Analyse wird zwischen Nachpulsen und "wahren" Nachpulsen unterschieden. Normale Nachpulse sind Pulse im in Abschnitt 4.5 beschriebenen Zeitfenster mit mindestens einem, demselben Triggerpuls zugehörigen, Signalevent in allen Pixeln des MAPMTs. "Wahre" Nachpulse bezieht sich hierbei lediglich auf die Nachpulse, die ein Signalevent in einem benachbarten Pixel haben. Weiter werden die Pulse nach ihrem Abstand zum Signalevent sortiert. Hier sollen jedoch alle solche Nachpulse betrachtet werden. Um die Nachpulshäufigkeit zu bekommen, dividiert man die Anzahl an Nachpulsen durch die Anzahl an Signalevents des MAPMTs während der selben Messung.

Ein Vergleich zwischen normalen und "wahren" Nachpulsen ist in Abb. 5.17 am Beispiel des HA1116 gezeigt. Der dort sichtbare Verlauf ist normal und bei den meisten anderen MAPMTs ebenso zu finden. Deutlich wird der Unterschied zwischen "wahren" und normalen Nachpulsen. So fällt die "wahre" Nachpulshäufigkeit nach etwa 2000 ns nach dem Signalevent unter 3×10^{-5} ab, während die normale Nachpulshäufigkeit gegen einen Wert von 2×10^{-4} läuft. Ein unkorrelierter Rauschpuls wird, sofern er nach einem Signalevent auftritt, immer als Nachpuls gewertet. Somit ist der Grenzwert der Nachpulshäufigkeit mit dem Dunkelrauschen korreliert. Dieser Effekt wird durch die Verwendung der "wahren" Nachpulse in Nachbarpixeln stark unterdrückt.

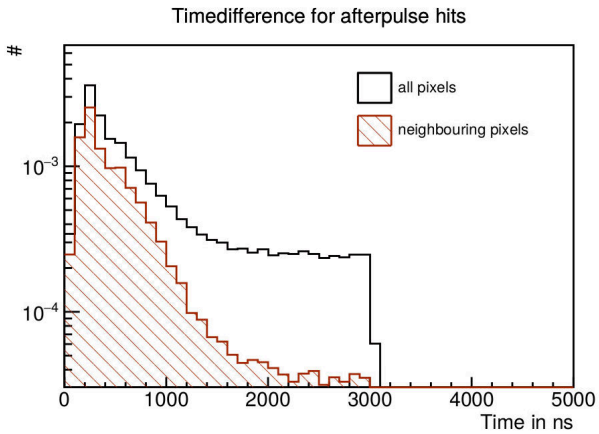


Abb. 5.17 ♦ *Typische zeitliche Verteilung von Nachpulsen am Beispiel des HA1116 logarithmisch dargestellt. Unterschieden wird zwischen normal bestimmten Nachpulsen in schwarz und "wahren" Nachpulsen in orange. "Wahre" definieren sich durch ihren auftritt in einem Nachbarpixel des Hauptsignals.*

Betrachtet man die Graphik in Abb. 5.18, in der die normale Nachpulswahrscheinlichkeit gegen die Dunkelrate abgebildet ist, so ist dort eine Korrelation zu erkennen. Der Korrelationskoeffizient der beiden Größen beträgt 0.9339, was eine starke positive Korrelation ausdrückt. Auch die "wahren" Nachpulse, die in Abb. 5.18 gegen die Dunkelrate abgebildet sind, weisen eine Korrelation auf (Korrelationskoeffizient 0.7053). Diese Korrelation scheint aber geringer auszufallen, als bei Verwendung der normalen Nachpulswahrscheinlichkeit. Es sollte daher untersucht werden, ob eine Korrektur der Nachpulswahrscheinlichkeit in Bezug auf die Dunkelrate sinnvoll möglich ist und die Korrelation dieser beiden Größen reduzieren würde.

Zu beachten ist, dass Nachpulse im selben Pixel, welche den Großteil aller Nachpulse darstellen sollten, aufgrund der langen Totzeit der einzelnen n-XYTER-Kanäle nicht registrierbar sind. Somit wird die Nachpulswahrscheinlichkeit systematisch zu gering abgeschätzt. Dieser systematische Fehler ist jedoch nicht quantifizierbar, da keine Relation zwischen der Häufigkeit an Nachpulsen im selben Pixel und in Nachbarpixeln gefunden wurde.

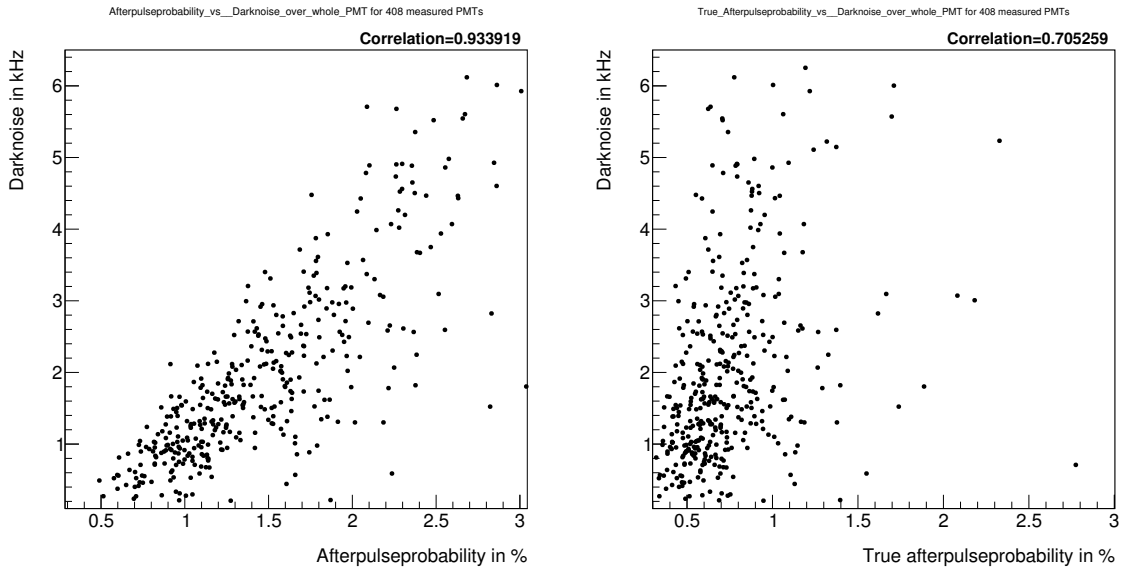


Abb. 5.18 ♦ *Dunkelrate dargestellt gegenüber der Nachpulswahrscheinlichkeit für 408 Messungen aller MAPMTs. Links der Graph mit normal bestimmten Nachpulsen weist eine stärkere Korrelation (Korrelationskoeffizient* 0.9339*) auf als der rechte Graph mit "wahren" Nachpulsen (Korrelationskoeffizient* 0.7053*) auf der x-Achse. Die Reduktion der Korrelation erschließt sich aus der, an die "wahren" Nachpulse gestellten, Bedingung, nur auf Signale in Nachbarpixeln zu triggern.*

Zur Abschätzung des Fehlers auf die Nachpulswahrscheinlichkeit werden wegen der Korrelation zwischen Nachpulswahrscheinlichkeit und Dunkelrate, der Argumentation in Abschnitt 5.5 folgend, Messungen des Referenz-MAPMTs im Zeitraum vom 02.04.2016 bis zum 06.06.2016 analysiert. Die Verteilung der "wahren" Nachpulswahrscheinlichkeiten ist in Abb. 5.19 zu finden und weist eine Standardabweichung von

$$\sigma_{\text{Afterpulse-Probability}} \;=\; 0.0478\,(\text{pp}) \;=\; \Delta\text{AFTERPP}$$

auf, welche im folgenden als Fehler auf die Nachpulswahrscheinlichkeit angenommen wird.

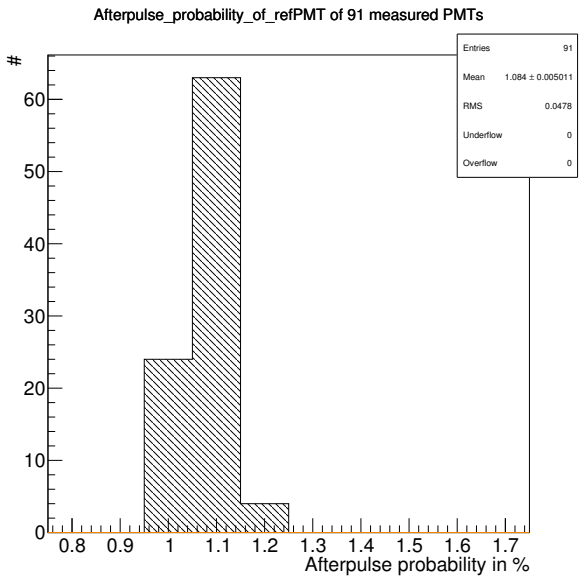


Abb. 5.19 ♦ *Verteilung der "wahren" Nachpulswahrscheinlichkeit des Referenz-MAPMT für 91 verschiedene Messungen im Zeitraum vom 02.04.2016 bis 06.06.2016. Der Zeitraum wurde wegen einer sehr wahrscheinlich vorliegenden Konstanz in der Temperatur gewählt. Die "wahre" Nachpulswahrscheinlichkeit bestimmt sich aus der Anzahl an Events nach einem Hauptpuls in direkt benachbarten Pixeln gegenüber der Anzahl an Hauptpulsen. Der Verteilung ist eine Standardabweichung von* 0.0478 *(pp) entnehmbar.*

5.7 Zusammenfassung aller Standardmessgrößen

In diesem Abschnitt soll eine kurze Zusammenfassung, der in diesem Kapitel diskutierten Messgrößen, gegeben werden. In tabellarischer Form werden hierfür die einzelnen ermittelten systematischen Fehler der verschiedenen Messgrößen rekapituliert.

Tabelle 5.1 ♦ *Ungenauigkeiten der verschiedenen Standardmessgrößen, hergeleitet in den Abschnitten aus Kapitel 5 . Bei den typischen Messwerten handelt es sich um Abschätzungen aus den bisher 400 Messungen und den oberen/unteren Grenzen der in Abschnitt 2.2 besprochenen Kaufspezifikationen.*

Messgröße	Kürzel	syst. Fehler	typische Messwerte
Effizienzindex	EFF	0.0027	0.8 – 1.2
Effektive Fläche	EFFAR	0.4208 (pp)	80% – 87%
Schiefheit	SKEW	0.01299	0.8 – 1.0
Einzelelektronenvervielfachung	GAIN	$2.5 \times 10^5\, e$	$1 \times 10^6\, e - 6 \times 10^6\, e$
Gesamtdunkelrate	DARK	0.3756 kHz	0.5 kHz – 6.4 kHz
Maximale mittlere Dunkelrate dreier Pixel	PXDARK	0.05376 kHz	0.05 kHz – 1.0 kHz
Nachpulshäufigkeit	AFTERPP	0.0478 (pp)	0.25% – 3.00%

Die Genauigkeit auf den Effizienzindex ergibt sich aus der Standardabweichung von insgesamt 25 Messungen dreier MAPMTs (HA0150, HA0151 und HA0185). Die Genauigkeit auf die effektive Fläche und die Schiefheit ergibt sich aus der Standardabweichung von 159 Messungen des Referenz-MAPMTs (HA0230). Für die Bestimmung des Fehlers auf die Gesamtdunkelrate, die maximale mittlere Dunkelrate dreier Pixel und die Nachpulshäufigkeit sind 91 Messungen des Referenz-MAPMTs (HA0230) analysiert worden. Die den zwischen dem 02.04.2016 bis zum 06.06.2016 aufgenommenen Daten entnommene Standardabweichung der respektiven Standardmessgröße, ergibt den Fehler auf die jeweilige Standardmessgröße. Der Fehler auf die Einzelelektronenvervielfachung entnimmt man einer groben oberen Abschätzung und korrespondiert mit den 25 Messungen dreier MAPMTs (HA0150, HA0151 und HA0185).

6 Analyse von 400 H12700 MAPMTs

Dieses Kapitel stellt die Messungen der ersten 400 gelieferten H12700 MAPMTs dar. Hierbei wird zuerst ein doppelseitiges Übersichtsblatt vorgestellt, welches zu jedem MAPMT angefertigt wird und alle Schlüsselcharakteristika des MAPMTs zusammenfasst. Es soll dann der H12700 mit dem H8500 MAPMT verglichen werden, welcher einer der Vorläufer[1] zum H12700 ist. Dann sollen die einzelnen, bisher eingetroffenen und vermessenen Lieferchargen des H12700 verglichen werden. Der letzte Abschnitt widmet sich der Diskussion einzelner ausgewählter MAPMTs. Diese werden in Hinblick auf ihre Besonderheiten in verschiedenen Charakteristika betrachtet.

6.1 Doppelseitiges MAPMT-Infoblatt

Um alle MAPMTs schnell vergleichen zu können, wird zu jedem gemessenen MAPMT ein doppelseitiges Infoblatt erstellt. Dieses Infoblatt listet alle Schlüsselcharakteristika auf und soll im folgenden am Beispiel des HA0355 aufgeschlüsselt werden. Das vollständig zusammengesetzte Datenblatt des MAPMTs findet sich im Anhang in Abb. A.9 .

Effizienz

Das Infoblatt zeigt den bereits vorgestellten ortsaufgelösten relativen Effizienzgraph (siehe Abb. 6.1) und die Projektionen des Effizienzindex auf X- und Y-Achse. Der zweidimensionalen Darstellung lassen sich direkt einzelne Fehler in Kathode oder einzelnen Dynodenkanälen entnehmen. So erscheint ein mittiger, vertikaler Balken, mit einer horizontalen Ausdehnung von einem Pixel (vgl. Abb. 6.2 bei 70 mm), der weniger effizient als der Rest des MAPMTs. Dieser "Balken" tritt bei fast allen MAPMTs diesen Typs auf und ist bei genauerer Betrachtung des MAPMTs einer, an dieser Stelle verbreiterten, fokussierenden Elektrode zuzuweisen. Der zweidimensionale Graph zeigt nur Werte über 50% relativer Effizienz, um Variationen in dieser besser darzustellen. In der Projektion auf die Vertikale (vgl. Abb. 6.3) wird ein Muster deutlich, welches ebenfalls bei nahezu allen MAPMTs diesen Typs zu sehen ist. Dieses ist eindeutig mit den, in dieser Richtung verbreiterten Dynodenkanälen erklärbar. Zuletzt ist in der Projektion auf die Horizontale, die bereits besprochene, Verkippung der Effizienz zu erkennen.

[1] Der H8500 bietet die selben Außenabmessungen mit 12 Dynoden, schlechterer Kollektions- und Quanteneffizienz und leicht schlechterem PV-Verhältnis ([Ham11]).

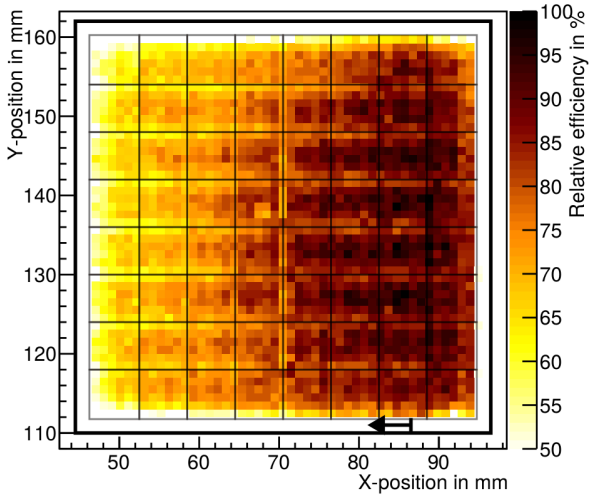


Abb. 6.1 ♦ *Ortsaufgelöste relative Effizienz des HA0355. Der schwarze Rahmen deutet den Außendurchmesser des MAPMTs an, der schwarze Pfeil symbolisiert den HAMAMATSU-Pfeilmarker und das feine schwarze Gitter stellt die einzelnen MAPMT-Pixel dar. Die relative Effizienz auf der z-Achse ist auf 50% geschnitten, um Variationen in dieser besser nachvollziehen zu können.*

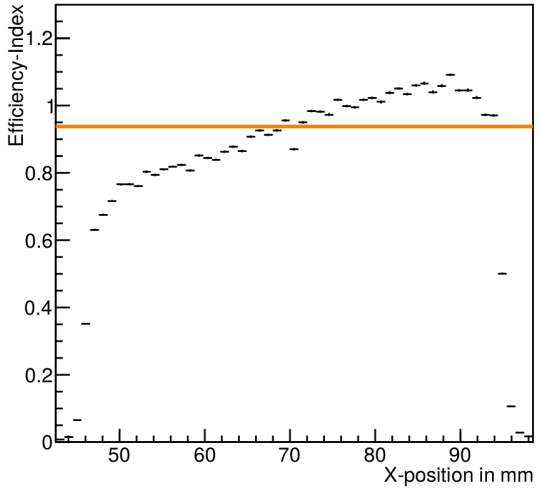


Abb. 6.2 ♦ *Effizienzprojektion auf die Horizontale (x-Achse) des HA0355. Eine Effizienz von 1 bedeutet, dass der jeweils projizierte Bereich im Mittel genauso effizient ist wie der Referenz-PMT. Die Projektion berechnet sich als Mittelwert über die in vertikaler Richtung (y-Achse) liegenden Messpunkte. Als orangene Linie ist der Effizienzindex des gemessenen MAPMTs gezeigt. Zu erkennen ist eine schiefe Effizienz und eine weniger effiziente Messspalte in der Mitte des MAPMTs bei* 70 *mm.*

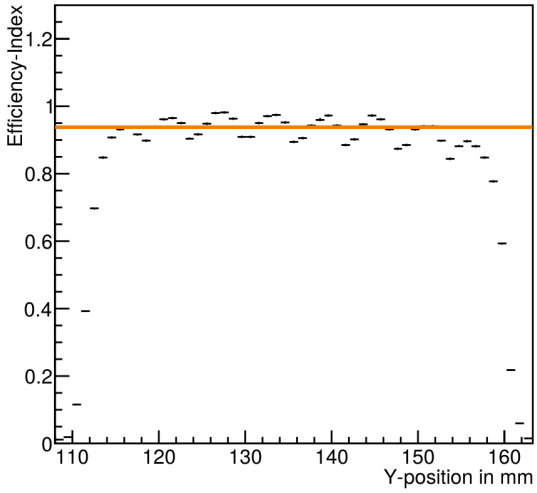


Abb. 6.3 ♦ *Effizienzprojektion auf die Vertikale (y-Achse) des HA0355. Eine Effizienz von 1 bedeutet, dass der jeweils projizierte Bereich im Mittel genauso effizient ist wie der Referenz-PMT. Die Projektion berechnet sich als Mittelwert über die in horizontaler Richtung (x-Achse) liegenden Messpunkte. Als orangene Linie ist der Effizienzindex des gemessenen MAPMTs gezeigt. Zu erkennen sind Effizienzerhöhungen, welche aufgrund ihrer Breite den MAPMT-Pixeln zuzuschreiben sind.*

Mehrfachevents

Weiter zeigt das Infoblatt die noch nicht vorgestellte ortsaufgelöste Darstellung von Mehrfachevents. Ein Mehrfachevent liegt vor, wenn zu einem Lichtpuls in mehr als nur einem MAPMT-Pixel Signale (also im Signalfenster) detektiert wurden. Diese Events liegen nicht im gleichen MAPMT-Pixel und deuten daher auf "charge-sharing" oder "cross-talk" hin. Die Anzahl an Mehrfachevents wird durch die Anzahl aller Signalevents, also mit einem Signalevent oder mehr,

geteilt. Es erfolgt also eine Normierung der Mehrfachevents auf die Gesamtanzahl aller Events. Dieser Wert entspricht somit der Mehrfacheventwahrscheinlichkeit. Die zweidimensionale Darstellung der Mehrfachevents für den HA0355 ist in Abb. 6.4 gezeigt. Zu sehen ist ein Anstieg der Mehrfachevent-Rate zwischen Pixeln. Dieses Verhalten ist aufgrund der Ausdehnung des Lichtflecks der Lichtquelle normal. Selbst bei einem infinitesimal schmalen Lichtfleck sollte jedoch ein solches Verhalten sichtbar sein, da "charge-sharing" und "cross-talk" zum Pixelrand hin häufiger wird. Die wahre Anzahl an Pulsen mit "charge-sharing" lässt sich daher nur beim Betrachten der Pulsladungen in solchen Mehrfachevents abschätzen. So sollte bei Pulsen mit "charge-sharing" die Ladung der beiden (oder mehr) einzelnen Signalpulse kleiner sein. Dieser weitere Analyseschritt wurde jedoch in dieser Thesis nicht angewandt. Weiter ist der Abb. zu entnehmen, dass außerhalb des MAPMTs häufig mehr als zwei Signalpulse gleichzeitig auftreten. Diese Signale sind lediglich durch die Art der Normierung auffällig. Hier handelt es sich lediglich um eine geringe Anzahl zufälliger Signale, welche aufgrund der extrem geringen Gesamtanzahl an Signalen (im Idealfall 0), hervorgehoben sind.

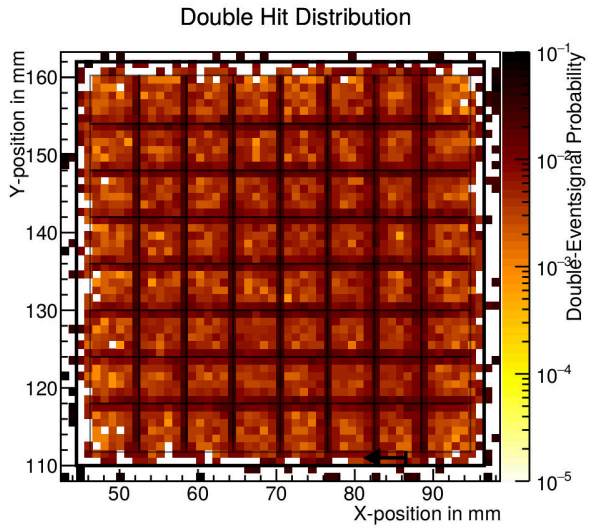


Abb. 6.4 ♦ *Ortsaufgelöste Darstellung der Mehrfacheventwahrscheinlichkeit des HA0355. Ein Doppelpuls bezeichnet zwei oder mehr zu einem Triggerpuls gehörende Signalevents. Die Anzahl an Doppelpulsen ist auf die Anzahl aller Signalpulse normiert. Zu sehen ist, dass die Doppelpulshäufigkeit zwischen zwei MAPMT-Pixeln ansteigt. Die MAPMT-Pixel sind in feinen schwarzen Linien dargestellt. Die dickere schwarze Linie zeigt die Außenabmessungen des MAPMTs an, während der Pfeil, als HAMAMATSU-Pfeilmarker, die Orientierung angibt.*

Dunkelrate

Auf dem Infoblatt ist die, bereits in Abschnitt 5.5 diskutierte, Dunkelrate gegenüber der Messzeit und pro Pixel dargestellt (vgl. Abb. 6.5 und Abb. 6.6). Die Dunkelraten sind jeweils für drei Schwellen eingezeichnet. Für 0%(schwarz), 30%(rot) und 60%(gelb) des Einzelphotonenpeaks. Der Unterschied zwischen den Schwellen 0% und 30% ist hierbei nicht sehr groß, da der n-XYTER-FEB bereits durch seine Schwelleneinstellung Werte bis etwa 20% des Einzelphotonenpeaks verwirft. Sollte jedoch der Unterschied zwischen Schwelle 30% und 60% groß sein, deutet dies meist auf ein elektronisches Rauschen im n-XYTER-FEB hin. Diese Aussage lässt sich treffen, da das Dunkelrauschen, außer bei stark rauschenden MAPMTs, meist Ladungen um den Einzelphotonenpeak hat. Die Ladung des elektronischen Rauschens ist meist exponentiell verteilt.

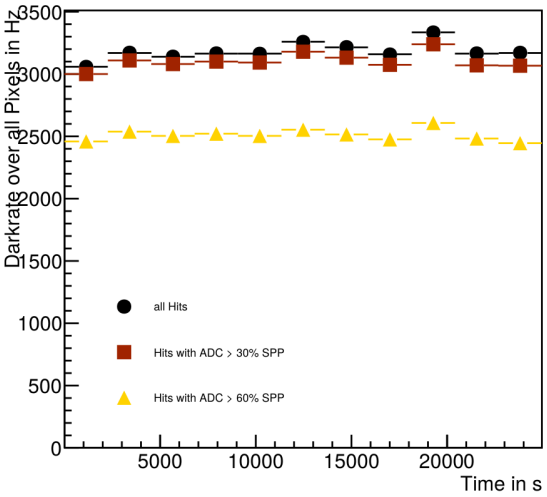


Abb. 6.5 ♦ *Zeitlicher Verlauf der Dunkelrate des HA0355. Dargestellt ist die Dunkelrate im gesamten MAPMT für die Ladungsschwellen von 0%(schwarz), 30%(rot) und 60%(gelb), in prozentualer Ladung des Einzelphotonenpeaks. Die Bestimmung der später gezeigten Gesamtdunkelrate des MAPMTs geschieht in den letzten vier Messbins (∼ 2 h). Zu sehen ist, dass Schwelle 0% und Schwelle 30% nahezu gleiche Dunkelraten zeigen. Das bedeutet, dass nahezu kein elektronisches Rauschen im n-XYTER-FEB mitgemessen wurde.*

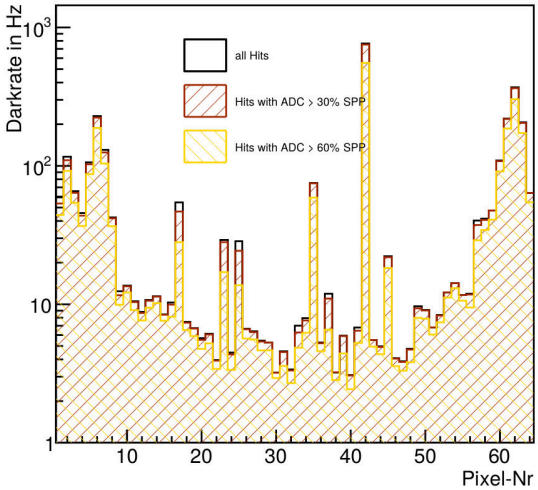


Abb. 6.6 ♦ *Dunkelrate pro Pixel des HA0355. Dargestellt ist die Dunkelrate des einzelnen MAPMT-Pixel für die Ladungsschwellen von 0%(schwarz), 30%(rot) und 60%(gelb), in prozentualer Ladung des Einzelphotonenpeaks. Die Dunkelrate pro Pixel ist über den gesamten Messzeitraum bestimmt. Zu sehen ist, dass meist einzelne Pixel höhere Dunkelraten aufweisen. Speziell zum MAPMT-Rand (oben und unten also Pixel 1-8,57-64) wird die Dunkelrate größer.*

Dunkelrate gegenüber Effizienz

Eine weitere Graphik auf dem Infoblatt ist eine Gegenüberstellung von Effizienz und Dunkelrate für acht verschiedene Schwellen (siehe Abb. 6.7) Dieser Graphik ist die Güte des MAPMTs direkt zu entnehmen. Ein besonders rauscharmer MAPMT liegt bei hoher Effizienz in der Graphik unten rechts, während ein ineffizienter rauschender MAPMT oben links läge. Die meisten MAPMTs befinden sich in dieser Darstellung mindestens in der Effizienz mittig (vgl. Abb. 7.1 im Fazit). Weiter lässt sich der Graphik die Einzelelektronenvervielfachung teilweise entnehmen. Ein MAPMT mit besonders niedriger Einzelelektronenvervielfachung weist für die verschiedenen Schwellen Punkte auf nahezu der selben Stelle auf. Das folgt aus der Tatsache, dass für diese MAPMTs die, in der Analyse gesetzten, Schnitte nichts vom Spektrum entfernen können, da dieses sowieso schon durch den n-XYTER-FEB abgeschnitten ist. Je höher die Vervielfachung, desto weiter rückt das gesamte Spektrum aus dem Schnitt des n-XYTER-FEBs, und ist damit wieder von der Analyse durch die Schnitte differenzierbar. Wie in den Graphiken für die Dunkelrate deutet auch in dieser Graphik ein plötzlicher Abfall der Dunkelrate für eine erhöhte Schwelle auf elektronisches Rauschen hin.

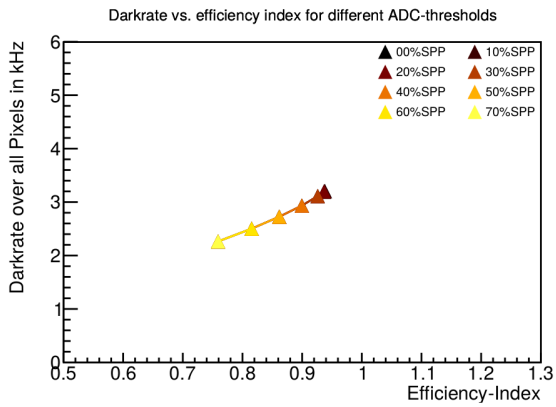


Abb. 6.7 ♦ *Dunkelrate in kHz aufgetragen gegen Effizienz (als Effizienzindex im Vergleich zum Referenz-PMT) des HA0355 für acht verschiedene Ladungsschwellen von für 0%(schwarz) bis 70%, in prozentualer Ladung des Einzelphotonenpeaks. Mithilfe dieses Graphen lässt sich die "Güte" eines MAPMT direkt ablesen.*

Hochspannungsscan

Die nächste Graphik zeigt den Verlauf der Einzelelektronenvervielfachung (Gain) für verschiedene Hochspannungen. Diese Einzelelektronenvervielfachung wurde aus den 16, während der Hochspannungsmessung angeleuchteten, Pixeln bestimmt (siehe Abb. 6.8). Der geringere Abfall der Vervielfachung für geringe Spannungen ist ein Artefakt der bereits in Abschnitt 3.5 diskutierten Begrenzung des n-XYTER-FEBs und damit keine MAPMT-Eigenschaft.

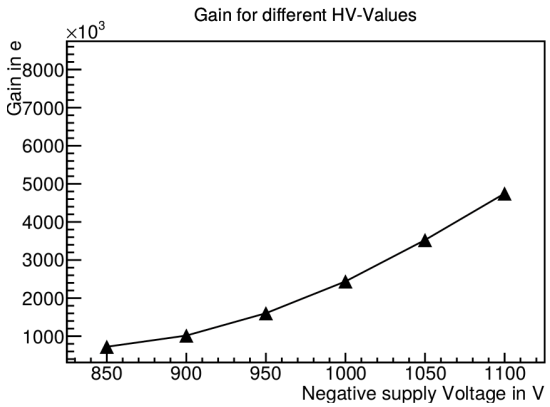


Abb. 6.8 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung als Funktion der Betriebsspannung des HA0355. Die Einzelelektronenvervielfachung ergibt sich aus den ADC-Spektren der 16, während der Hochspannungsmessung angeleuchteten Pixel. Hierzu wurde den Spektren eine Gaußfunktion angefittet. Das auslaufen der Einzelelektronenvervielfachung zu geringen Spannungen ist ein Artefakt der Messung und hängt mit der Schwelle am n-XYTER-FEB zusammen.*

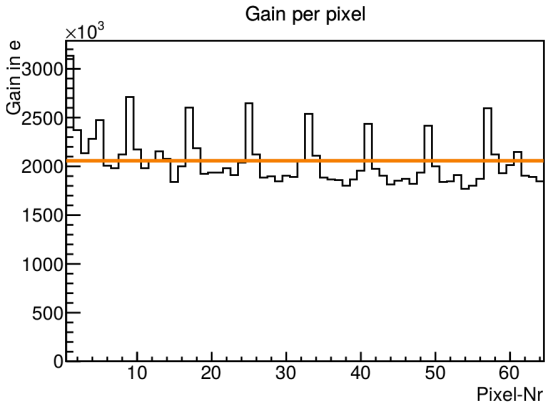
Nachpulswahrscheinlichkeit

Auf dem Infoblatt findet sich auch die, bereits in Abschnitt 5.6 diskutierte, Darstellung der Nachpulshäufigkeit gegenüber der Zeit nach dem Signalevent.

Einzelelektronenvervielfachung pro Pixel

Weiter ist eine nach Pixelnummer aufgeschlüsselte Darstellung der Einzelelektronenvervielfachung zu finden (vgl. Abb. 6.9) Dieser Graphik lässt sich direkt die Varianz der Vervielfachungen über die Pixel entnehmen, sowie das Versagen einiger Pixel feststellen.

Abb. 6.9 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung der einzelnen Pixel des HA0355. Die Einzelelektronenvervielfachung ergibt sich aus den ADC-Spektren der 64 einzelnen Pixel. Zur Befüllung der Spektren wurden nur Signalevents verwendet, bei deren Messung die Lichtfaser über der Mitte des MAPMTs stand. Den Spektren wurde zur Vervielfachungsbestimmung eine Gaußfunktion angefittet.*



ADC- und Einzelphotonspektra

Die letzten beiden Graphiken widmen sich der Darstellung des ADC-Spektrums. Abb. 6.10 zeigt die übereinandergelegten ADC-Spektren aller Kanäle in gelb. Als schwarze Linie darüber gelegt findet sich das gemittelte ADC-Spektrum über alle Kanäle. Die aus den einzelnen Fits ermittelte Einzelelektronenvervielfachung ist als orangene vertikale Linie dargestellt. Abb. 6.11 zeigt gain-normierte ADC-Spektren aller 64 Pixel. Mit Hilfe eines Fits werden hierfür die ADC-Spektren so normiert, dass ihr Peak bei 1 liegt. Das sich so ergebende Spektrum hat damit die Anzahl Einzelphotonen als Einheit auf der x-Achse. Aus dieser Graphik lässt sich direkt die allgemeine Einzelphotonenpeakform entnehmen. Diese Peakform gibt gerade zu geringeren Ladungen Aufschlüsse über MAPMT-Artefakte, wie das bereits beschriebene "charge-sharing".

Abb. 6.10 ♦ *Übereinander gelegte ADC-Spektren aller Pixel des HA0355 (gelbe Linien). Die schwarze Linie ist das über alle Pixel gemittelte ADC-Spektrum. Der orangene Strich zeigt den Wert für die Einzelelektronenvervielfachung an. Die x-Achse ist in ADC-Units, welche über den ebenfalls dort gezeigten Kalibrationsfaktor in einen Wert für die Einzelelektronenvervielfachung umgerechnet werden können. An der oberen x-Achse der Graphik ist das kalibrierte ADC-Spektrum in fC zu sehen.*

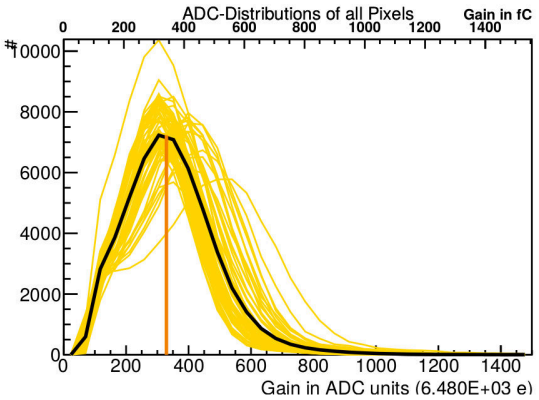
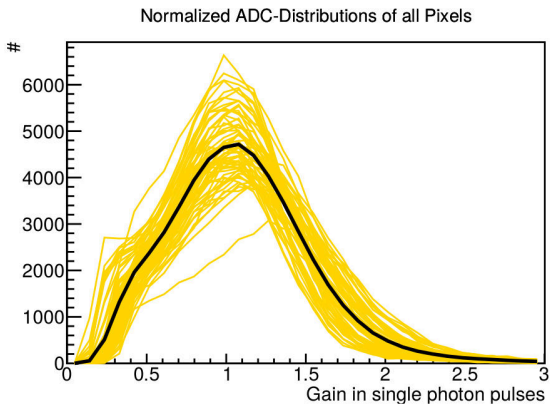


Abb. 6.11 ♦ *Übereinander gelegte auf den Einzelphotonenpeak normierte ADC-Spektren aller Pixel des HA0355 (gelbe Linien). Die schwarze Linie ist das, über alle Pixel, gemittelte ADC-Spektrum. Der orangene Strich zeigt den Wert für die Einzelelektronenvervielfachung an. Die x-Achse ist in Einzelphotonenpeak-Schritte unterteilt. Der Graph gibt direkten Aufschluss über die exakte Einzelphotonenpeakform jedes Kanals.*



Mess- und MAPMT-Parameter

Den letzten Abschnitt des Infoblattes macht eine Zusammenfassung aller Schlüsselparameter aus. Eine Darstellung dieser Zusammenfassung findet sich für den beschriebenen HA0355 in Abb. 6.12 . Die Zusammenfassung beginnt mit der MAPMT-Seriennummer, dem Messdatum, der Messposition im Setup (Position 1 ist die oberste) und den extrapolierten Punkten. Unter extrapolierten Punkten versteht man das Befüllen einzelner leerer Messpunkte mit dem Mittelwert ihrer umgebenden Messpunkte. Solche leeren Messpunkte können entstehen, wenn in der Messung einzelne EPICS-Statusmeldungen nicht korrekt in den Datenstrom gelangt sind. Als nächstes finden sich die Werte zu Effizienzindex, effektiver Fläche, "Schiefheit" und Nachpulswahrscheinlichkeit. Die nächste Zeile zeigt den Mittelwert über die Mehrfacheventwahrscheinlichkeit an. Der Mittelwert wurde über den kompletten MAPMT, also seine Außenabmessungen abzgl. 2 mm, gebildet. Die nächste Zeile zeigt die mittlere Einzelelektronenvervielfachung ,gemittelt für alle Pixel, an. Die angezeigte Spannung "Average Gain at -****V" gibt die Betriebsspannung am MAPMT während der Standardmessung an. Weiter sind die ADC-Verschiebungen der beiden FEBs (FEB1/FEB2) angegeben. Die nächste Zeile zeigt den Abfall der Einzelelektronenvervielfachung pro reduziertem Volt der Betriebsspannung an. Bestimmt wird dieser Wert aus einem linearen Fit an die in Abb. 6.8 gezeigten Messdaten des Hochspannungsscans. Die nächsten beiden Zeilen geben das gesamte Dunkelrauschen und das mittlere Rauschen der drei am stärksten rauschenden Pixel für die ebenfalls gezeigte Temperatur an FEB und PMT an.

H13708 HA0355 / meas.-date: 160623_0946 / meas. -pos: 3 / extrapolated meas.-points: 0	
Efficiency Index:	**0.938**
Effective Area (Area w. rel. Eff.>60%):	**78.90%**
Efficiency Skewness in X-direction:	**0.811**
Afterpulse Probability:	**0.433%**
Average Double-Eventsignal Probability:	**0.939%**
Average Gain at -1000 V over all Pixels:	**2.133E+06 e (ADC-shift:118.01/91.05)**
Gain reduction for decreasing HV:	**1.487E+04 e/V**
Darknoise of all Pixels:	**3206.262 Hz @ 29.70 deg.C(PMT)/22.02 deg.C(FEB)**
Average Darknoise over the 3 noisiest Pixels:	**454.162 Hz**

Abb. 6.12 ♦ *Schlüsselparameter des HA0355 wie sie dem Infoblatt des MAPMTs entnehmbar sind. Gezeigt werden MAPMT-Seriennummer, Messdatum, Messposition, Anzahl an extrapolierten Punkten, Effizienzindex, effektive Fläche, "Schiefheit", Nachpulswahrscheinlichkeit, Betriebsspannung bei Standardmessung, Einzelelektronenvervielfachung, ADC-Verschiebungen, Einzelelektronenvervielfachungsreduktion, Gesamtdunkelrate, Temperatur an FEB und MAPMT und maximale mittlere Dunkelrate in drei Pixeln.*

6.2 Vergleich mit dem H8500 MAPMT

In diesem Abschnitt sollen der H12700[2] MAPMT und der H8500[3] MAPMT miteinander verglichen werden. Für diesen Vergleich werden die Messdaten der 400 verschiedenen H12700 MAPMTs gegenüber den 8 Messungen verschiedener H8500 dargestellt. Verglichen werden Effizienz, Dunkelrate, Einzelelektronenvervielfachung, effektive Fläche, "Schiefheit" und Nachpulsen. Die statistischen Fehler für die Werte ergeben sich für beide MAPMTs nach $\sigma/\sqrt{N}$, mit σ als Standardabweichung der Verteilung und N als Anzahl der gemessenen MAPMTs. Der systematische Fehler folgt aus den jeweiligen Diskussionen in Kapitel 5 .

Effizienzindex

In Abb. 6.13 sind die Verteilungen der Effizienzen der beiden MAPMT-Typen dargestellt. Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei in der Abbildung mit 10 gewichtet, um sie in der Abbildung sichtbar zu machen. Hierbei ist der H8500 in orangenen gefüllten Bins und der H12700[2] in schwarzen gefüllten Bins dargestellt. Trotz der großen Unterschiede in der Anzahl der vermessenen MAPMTs wird ersichtlich, dass der H12700 MAPMT effizienter ist als der H8500. Die mittleren Effizienzen der beiden MAPMT-Typen sind:

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{EFF}}_{\mathrm{H12700}} &= 0.981 \pm 0.0035(\mathrm{stat.}) \pm 0.0027(\mathrm{syst.})\\ \overline{\mathrm{EFF}}_{\mathrm{H8500}} &= 0.695 \pm 0.0191(\mathrm{stat.}) \pm 0.0027(\mathrm{syst.})\end{aligned}$$

Der große Unterschied lässt sich direkt durch die Unterschiede in Quanteneffizienz und Kollektionseffizienz erklären. Es folgt mit nach Gauß fortgepflanzten Fehlern:

$$0.981 \times \frac{0.7}{0.9} \times \frac{0.30}{0.33} = 0.693 \pm 0.0040 \approx 0.695 \pm 0.0218$$

mit einer Kollektionseffizienz von 70% beim H8500 und 90% beim H12700 ([Sch13]), sowie einer Quanteneffizienz von 30% beim H8500 (siehe Abb. 2.6) und 33% beim H12700 ([Ham14]). Zwar sind die Quanteneffizienten als Peakquanteneffizienz angegeben, aber die Quanteneffizienz verläuft zu höheren Wellenlängen, bei beiden MAPMTs, ähnlich.

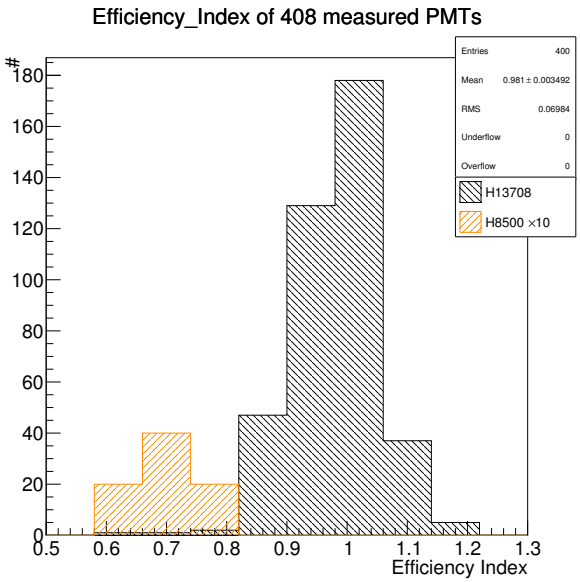


Abb. 6.13 ♦ *Verteilung des Effizienzindex von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* 0.981 ± 0.0035*(stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* 0.695 ± 0.0191*(stat.).*

[2] Hier sind die H12700 MAPMTs in den Graphiken unter ihrer internen Bezeichnung HA13708 aufgeführt.

[3] Der H8500 bietet die selben Außenabmessungen mit 12 Dynoden, schlechterer Kollektions- und Quanteneffizienz und leicht schlechterem PV-Verhältnis ([Ham11]).

Dunkelrate

In Abb. 6.14 sind die Verteilungen der Dunkelraten von H8500 und H12700 dargestellt. In der Verteilung der Dunkelrate sind MAPMTs außerhalb der Spezifikationen im "Overflow" und damit nicht in die Berechnung des Mittelwertes einbezogen. Die mittleren Dunkelraten der beiden MAPMT-Typen sind:

$$\overline{\mathrm{DARK}}_{\mathrm{H12700}} = 2.057\,\mathrm{kHz} \pm 0.0667\,\mathrm{kHz}\,(\mathrm{stat.}) \pm 0.3756\,\mathrm{kHz}\,(\mathrm{syst.})$$
$$\overline{\mathrm{DARK}}_{\mathrm{H8500}} = 0.284\,\mathrm{kHz} \pm 0.0263\,\mathrm{kHz}\,(\mathrm{stat.}) \pm 0.3756\,\mathrm{kHz}\,(\mathrm{syst.})$$

Die Abschätzung des systematischen Fehlers auf die Verteilung der H12700 MAPMTs ist hier nicht voll korrekt, da diese Daten eher einer Poissonverteilung und keiner Gaußverteilung folgen. Der Unterschied zwischen den beiden Dunkelraten ist sehr groß und nicht mit den angegebenen Fehlern erklärbar. Betrachtet man die in den Datenblättern angegebenen Dunkelströme, ist auch dort keine so große Abweichung zu erkennen (beide 6 nA). Da aber bereits bekannt ist, dass sich Dunkelrate und Dunkelstrom durchaus unterschiedlich verhalten können, ist dieses Ergebnis trotzdem plausibel. Außerdem wurden die H12700 MAPMTs "direkt" nach ihrer Produktion vermessen. Wie in Abschnitt 5.5 diskutiert fällt die Dunkelrate gerade in den ersten Tagen unter Hochspannung noch stark ab. Die H8500 sind z.T. schon mehrere Jahre alt, wurden schon oft vermessen und waren schon für mehrere Tage unter Hochspannung in Dunkelheit. Es kann daher durchaus sein, dass die Dunkelrate der H12700 bis zum Einsatz im Experiment, oder im Experiment selbst, noch deutlich absinkt. Es ist aber nicht davon auszugehen, dass der Wert für die Dunkelrate um mehr als $1/3$ absinkt. Dies folgt aus einer Abschätzung der nach Abschnitt 5.5 von 3 kHz auf 2 kHz abfallenden Dunkelrate des Referenz-MAPMTs. Das bedeutet, dass selbst unter dauerhafter Verwendung, die Dunkelrate der H12700 MAPMTs im Mittel mindestens oberhalb von 1kHz bleiben wird. Leider ließen sich keine früheren Messergebnisse für die H8500 MAPMTs finden, sodass keine weiteren Aussagen über noch stärkeres Abfallen der Dunkelrate mit der Zeit getroffen werden kann.

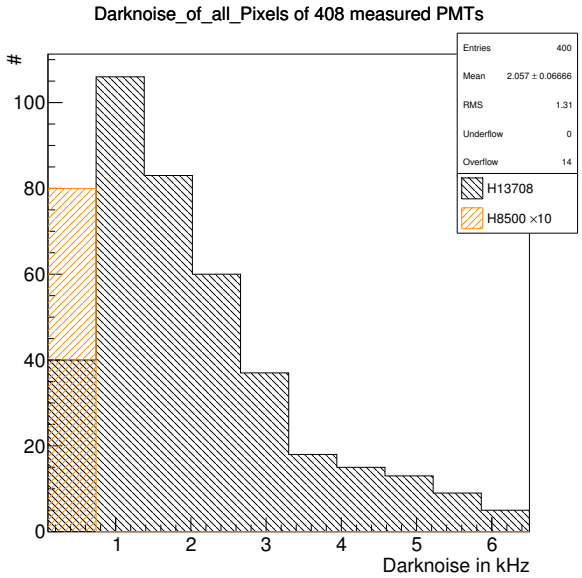


Abb. 6.14 ♦ *Verteilung der Gesamtdunkelrate von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* 2.057 *kHz* ± 0.0667 *kHz (stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* 0.284 *kHz* ± 0.0263 *kHz (stat.).*

Für die maximale drei-Pixel-Dunkelrate der beiden MAPMT-Typen ergibt sich für die im Anhang in Abb. A.8 befindlichen Verteilungen ein Mittelwert von:

$$\overline{\mathrm{PXDARK}}_{\mathrm{H12700}} = 265.0\,\mathrm{Hz} \pm 11.04\,\mathrm{Hz}\,(\mathrm{stat.}) \pm 53.76\,\mathrm{Hz}\,(\mathrm{syst.})$$
$$\overline{\mathrm{PXDARK}}_{\mathrm{H8500}} = 26.1\,\mathrm{Hz} \pm 4.71\,\mathrm{Hz}\,(\mathrm{stat.}) \pm 53.76\,\mathrm{Hz}\,(\mathrm{syst.})$$

Auch diese Werte bestätigen die Tendenz der deutlich höheren Rauschrate der H12700 MAPMTs.

Effektive Fläche

Die Verteilungen der effektiven Fläche für die beiden MAPMT-Typen sind in Abb. 6.15 dargestellt. Den Verteilungen entnimmt man, unter Vernachlässigung der nicht den Spezifikationen genügenden MAPMTs, einen Mittelwert von:

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{EFFAR}}_{\mathrm{H12700}} &= 84.75\% \pm 0.07\,(\mathrm{pp})\,(\mathrm{stat.}) \pm 0.42\,(\mathrm{pp})\,(\mathrm{syst.})\\ \overline{\mathrm{EFFAR}}_{\mathrm{H8500}} &= 84.56\% \pm 0.52\,(\mathrm{pp})\,(\mathrm{stat.}) \pm 0.42\,(\mathrm{pp})\,(\mathrm{syst.})\end{aligned}$$

Die effektiven Flächen der beiden MAPMT-Typen sind im Fehler gleich. Dieses Ergebnis ist verwunderlich, da laut den Datenblättern der beiden MAPMT-Typen der H12700 eine effektive Fläche von nur $^{87\%}/_{89\%} = 97.75\%$ der des H8500 haben sollte. Es ist allerdings anzumerken, dass eine solche geringere effektive Fläche immer noch im Fehler der beiden Werte liegt.

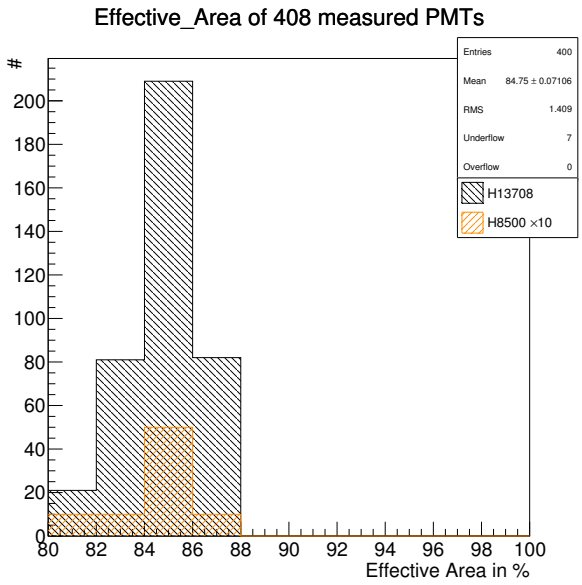


Abb. 6.15 ♦ *Verteilung der effektiven Fläche von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* 84.75% ± 0.07 *(pp) (stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* 84.56% ± 0.52 *(pp) (stat.).*

Schiefheit

Die Verteilungen der "Schiefheit" sind in Abb. 6.16 dargestellt. Die Mittelwerte der Verteilungen sind:

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{SKEW}}_{\mathrm{H12700}} &= 0.939 \pm 0.0024(\mathrm{stat.}) \pm 0.0130(\mathrm{syst.})\\ \overline{\mathrm{SKEW}}_{\mathrm{H8500}} &= 1.007 \pm 0.0137(\mathrm{stat.}) \pm 0.0130(\mathrm{syst.})\end{aligned}$$

Die "Schiefheit" des H12700 liegt also selbst unter Betrachtung der Fehler unter 1. Das bedeutet, dass die Effizienzebene des H12700 im Mittel nach links verkippt ist, während der H8500 im Mittel links genauso effizient ist wie rechts.

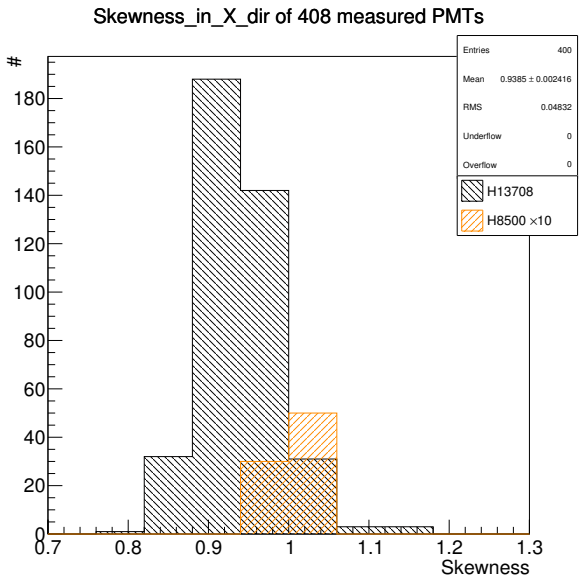


Abb. 6.16 ♦ *Verteilung der "Schiefheit" von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* 0.939 ± 0.0024*(stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* 1.007 ± 0.0137*(stat.).*

Nachpulswahrscheinlichkeit

Die Verteilung der Nachpulswahrscheinlichkeit ist in Abb. 6.17 dargestellt. Aus den Verteilungen ergeben sich für H8500 und H12700 MAPMT Mittelwerte für die Nachpulswahrscheinlichkeit von:

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{AFTERPP}}_{\mathrm{H12700}} &= 0.757\% \pm 0.0159\% \,(\mathrm{stat.}) \pm 0.0478\% \,(\mathrm{syst.})\\ \overline{\mathrm{AFTERPP}}_{\mathrm{H8500}} &= 0.834\% \pm 0.1093\% \,(\mathrm{stat.}) \pm 0.0478\% \,(\mathrm{syst.})\end{aligned}$$

Der Wert für die mittlere Nachpulswahrscheinlichkeit des H12700 liegt unter Vernachlässigung der MAPMTs außerhalb der Spezifikationen bei etwa 0.75% Dieser Wert ist im Fehler genauso groß wie die Nachpulswahrscheinlichkeit des H8500. Dass die Werte nahezu identisch sind, lässt sich auch gut in der Graphik der Verteilung nachvollziehen, auch wenn der Mittelwert für den H8500 auf den ersten Blick größer erscheint.

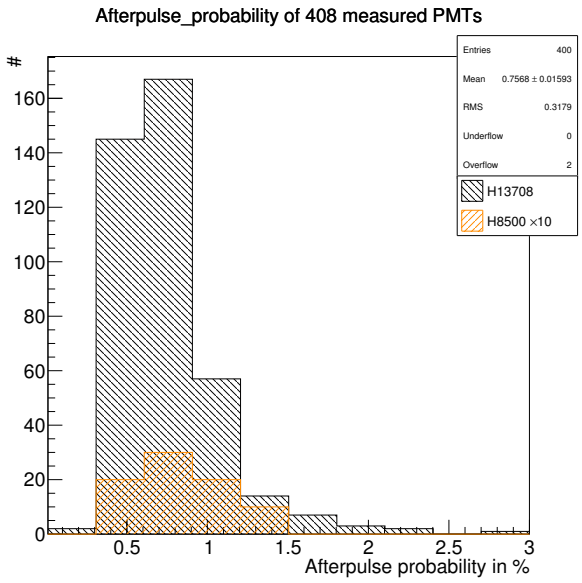


Abb. 6.17 ♦ *Verteilung der Nachpulswahrscheinlichkeit von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* 0.757% ± 0.0159% *(stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* 1.007 ± 0.0137*(stat.).*

Einzelelektronenvervielfachung

Um die Einzelelektronenvervielfachung zwischen H8500 und H12700 zu vergleichen, ist in Abb. 6.18 die Verteilung dieser für die beiden MAPMTs dargestellt. Aus den Verteilungen der beiden MAPMT-Typen ergeben sich die Mittelwerte für die Einzelelektronenvervielfachung zu:

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{GAIN}}_{\mathrm{H12700}} &= 2.77 \times 10^6\, e \;\pm\; 0.4 \times 10^5\, e\,(\mathrm{stat.}) \;\pm\; 2.5 \times 10^5\, e\,(\mathrm{syst.})\\ \overline{\mathrm{GAIN}}_{\mathrm{H8500}} &= 2.66 \times 10^6\, e \;\pm\; 3.2 \times 10^5\, e\,(\mathrm{stat.}) \;\pm\; 2.5 \times 10^5\, e\,(\mathrm{syst.})\end{aligned}$$

Der Mittelwert der Einzelelektronenvervielfachung des H8500 ist kleiner als der des H12700. Allerdings ist der Fehler auf den Wert für den H8500, wegen großer Schwankungen zwischen den verschiedenen H8500 und geringer Anzahl an verschiedenen H8500 Mess-MAPMTs, groß. In Anbetracht der Fehler stimmen daher die Einzelelektronenvervielfachungen der beiden MAPMTs im Mittel überein.

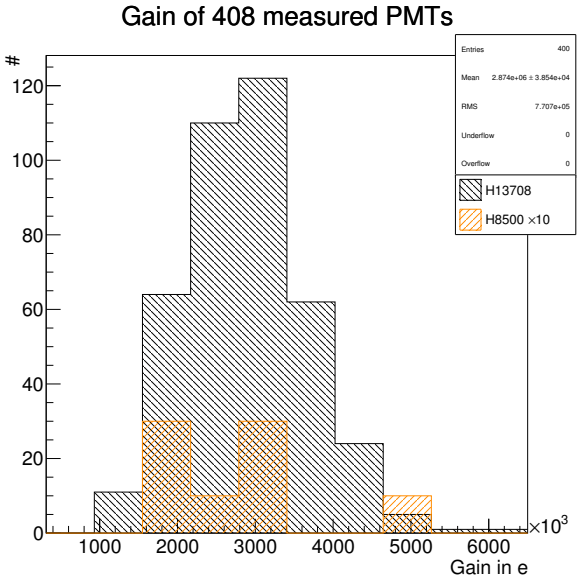


Abb. 6.18 ♦ *Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* $2.77 \times 10^6\, e \;\pm\; 0.4 \times 10^5\, e$ *(stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* $2.66 \times 10^6\, e \;\pm\; 3.2 \times 10^5\, e$ *(stat.).*

Zusammenfassung

Betrachtet man alle gemessenen Hauptcharakteristika der beiden MAPMT-Typen H12700 und H8500 wird deutlich, dass diese mit Ausnahme von Dunkelrate, Effizienz und Schiefheit übereinstimmen. Der H12700 weist gegenüber dem H8500 eine deutlich höhere Effizienz auf, welche sich aus einer besseren Kollektionseffizienz und Quanteneffizienz ergibt. Der H8500 weist gegenüber dem H12700 eine deutlich geringere und damit bessere Dunkelrate auf. Hier ist erneut darauf hinzuweisen, dass die Dunkelrate der neu produzierten H12700 MAPMTs noch abnehmen wird. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass der H12700 die niedrigen Dunkelraten des H8500 jemals erreicht. Weiter ist die Effizienz des H12700 im Mittel links größer als rechts[4]. Diese Eigenschaft ist beim H8500 nicht zu erkennen. Allerdings hat der H8500 MAPMT eine Art Effizienzloch in der Mitte des MAPMTs, welches natürlich vom "Schiefheits"-Parameter nicht registriert wird und hier nicht weiter behandelt werden soll. Weiter ist anzumerken, dass trotz dieser Verkippung der Effizienzebene, die gesamte Effizienz des H12700 immer noch größer ist als die des H8500. Sogar gering effiziente H12700 sind immer noch mindestens genauso effizient wie ein H8500 MAPMT. Es sollte daher eher von einer größeren Effizienz auf einer MAPMT-Seite gesprochen werden, anstatt von einer kleineren auf der anderen Seite des MAPMTs.

[4] Die rechte Seite ist hier, wie auch zuvor, die Seite auf der Pixel 1 zu finden ist. Auf dieser Seite startet der HAMAMATSU-Pfeilmarker. Die HV-Anschlüsse befinden sich auf der linken Seite.

6.3 Vergleich der Lieferchargen

In diesem Abschnitt sollen die verschiedenen Lieferchargen der H12700 MAPMTs miteinander verglichen werden. Für diesen Vergleich herangezogen werden Effizienz, Dunkelrate (auch pro Pixel), effektive Fläche, Schiefheit, Nachpulsen und Einzelelektronenvervielfachung. Das Schema aus Abschnitt 6.2 wird nun zum Vergleich verschiedener Lieferchargen verwendet. Dazu wurden zu jeder Liefercharge die Verteilungen zu den hier verwendeten Messgrößen erstellt. Die aus diesen Verteilungen genommenen Mittelwerte sind mit statistischen Fehlern ($\sigma/\sqrt{N}$) und den in Kapitel 5 vorgestellten systematischen Fehlern im folgenden dargestellt. Die Werte finden sich in Tabellen 6.1 (für EFF, DARK und DARKPX), 6.2 (für EFFAR und SKEW) und in 6.3 (für AFTERPP und GAIN).

Tabelle 6.1 ♦ *Mittelwerte der Effizienz, Dunkelrate und Dunkelrate pro Pixel für die bisher vermessenen Lieferchargen 1 bis 8. N bezeichnet die Anzahl an vermessenen MAPMTs in der jeweiligen Liefercharge. Die statistischen Fehler berechnet sich nach $\sigma/\sqrt{N}$. Die systematischen Fehler sind Kapitel 5 entnommen.*

Liefer-charge	N	$\overline{\text{EFF}}$ ± 0.00270(syst.)	$\overline{\text{DARK}}$ in kHz ± 0.3756 kHz(syst.)	$\overline{\text{PXDARK}}$ in Hz ± 53.76 Hz(syst.)
1	29	0.9480 ± 0.01828(stat.)	1.727 ± 0.2114(stat.)	227.8 ± 26.26(stat.)
2	50	0.9883 ± 0.00733(stat.)	2.046 ± 0.2190(stat.)	296.7 ± 34.04(stat.)
3	50	0.9271 ± 0.00781(stat.)	1.871 ± 0.1584(stat.)	259.3 ± 27.75(stat.)
4	50	0.9455 ± 0.00835(stat.)	2.125 ± 0.2115(stat.)	281.6 ± 32.36(stat.)
5	42	1.0000 ± 0.00653(stat.)	2.326 ± 0.2184(stat.)	318.3 ± 37.46(stat.)
6	58	0.9806 ± 0.00826(stat.)	2.146 ± 0.1556(stat.)	289.5 ± 29.41(stat.)
7	50	1.0070 ± 0.00673(stat.)	1.725 ± 0.1625(stat.)	228.2 ± 32.98(stat.)
8	70	1.0290 ± 0.00742(stat.)	2.325 ± 0.1650(stat.)	224.8 ± 23.12(stat.)

Tabelle 6.2 ♦ *Mittelwerte der effektiven Fläche und der "Schiefheit" für die bisher vermessenen Lieferchargen 1 bis 8. N bezeichnet die Anzahl an vermessenen MAPMTs in der jeweiligen Liefercharge. Die statistischen Fehler berechnet sich nach $\sigma/\sqrt{N}$. Die systematischen Fehler sind Kapitel 5 entnommen.*

Liefer-charge	N	$\overline{\text{EFFAR}}$ in % ± 0.42 (pp)(syst.)	$\overline{\text{SKEW}}$ ± 0.013(syst.)
1	29	84.01 ± 0.303(stat.)	0.9423 ± 0.01042(stat.)
2	50	84.15 ± 0.199(stat.)	0.9176 ± 0.00719(stat.)
3	50	84.99 ± 0.178(stat.)	0.9290 ± 0.00539(stat.)
4	50	84.98 ± 0.210(stat.)	0.9523 ± 0.00738(stat.)
5	42	84.86 ± 0.212(stat.)	0.9391 ± 0.00550(stat.)
6	58	84.56 ± 0.175(stat.)	0.9381 ± 0.00789(stat.)
7	50	84.86 ± 0.214(stat.)	0.9411 ± 0.00745(stat.)
8	70	85.18 ± 0.137(stat.)	0.9473 ± 0.00367(stat.)

Auffällig ist, dass für viele Messparameter kein Trend zu erkennen ist. So schwanken zwar Einzelelektronenvervielfachung, Nachpulswahrscheinlichkeit und Schiefheit um Werte größer als deren Messfehler. Aber es lässt sich kein Zusammenhang zwischen Schwankung und Liefercharge erkennen. Die Dunkelrate, sowohl als Mittelwert über die drei maximal rauschenden Pixel, als auch über den gesamten MAPMT, ist über alle Lieferchargen hinweg im Fehler gleich. Für die Effizienz und die effektive Fläche lässt sich eine minimale Tendenz erkennen. So scheinen die

Tabelle 6.3 ♦ *Mittelwerte der Nachpulswahrscheinlichkeit und der Einzelelektronenvervielfachung für die bisher vermessenen Lieferchargen 1 bis 8. N bezeichnet die Anzahl an vermessenen MAPMTs in der jeweiligen Liefercharge. Die statistischen Fehler berechnet sich nach $\sigma/\sqrt{N}$. Die systematischen Fehler sind Kapitel 5 entnommen.*

Liefer-charge	N	$\overline{\text{AFTERPP}}$ in % $\pm\,0.0478$ (pp)(syst.)	$\overline{\text{GAIN}}$ in e $\pm\,25.00 \times 10^4$ e(syst.)
1	29	0.8940 ± 0.07648(stat.)	$3.12 \times 10^6 \pm 18.29 \times 10^4$(stat.)
2	50	0.7745 ± 0.05654(stat.)	$2.46 \times 10^6 \pm 6.36 \times 10^4$(stat.)
3	50	0.6191 ± 0.02709(stat.)	$2.57 \times 10^6 \pm 9.08 \times 10^4$(stat.)
4	50	0.6530 ± 0.02818(stat.)	$2.70 \times 10^6 \pm 9.18 \times 10^4$(stat.)
5	42	0.6455 ± 0.02735(stat.)	$3.23 \times 10^6 \pm 9.50 \times 10^4$(stat.)
6	58	0.7211 ± 0.03176(stat.)	$2.85 \times 10^6 \pm 9.79 \times 10^4$(stat.)
7	50	0.8540 ± 0.04131(stat.)	$3.22 \times 10^6 \pm 10.49 \times 10^4$(stat.)
8	70	0.8945 ± 0.04696(stat.)	$2.44 \times 10^6 \pm 7.31 \times 10^4$(stat.)

MAPMTs der letzten Lieferchargen effizienter zu sein und eine größere effektive Fläche zu haben. Dieser Zuwachs in diesen zwei Messgrößen ist aber nicht groß und könnte über die betrachteten acht Lieferchargen auch lediglich eine statistische Schwankung in der Produktion bedeuten.

Insgesamt lässt sich auch sagen, dass keine Liefercharge in allen Messparametern positiv oder negativ heraussticht. So ist z.B. die letzte Liefercharge (8) die effizienteste Liefercharge, mit der größten effektiven Fläche und der geringsten Verkippung (ohne Betrachtung der Fehler). Gleichzeitig ist diese Liefercharge aber auch eine mit großem gesamten Rauschen, mit der größten Nachpulswahrscheinlichkeit und der geringsten Einzelelektronenvervielfachung. Auch wenn sich argumentieren lässt, dass Effizienz und Rauschen anti-korreliert sein könnten, zeigt diese Liefercharge gut, dass die Parameter nicht miteinander zusammenhängen und zwischen den Lieferchargen unabhängig voneinander schwanken.

Weiter dürfte es interessanter sein, die MAPMTs einzeln und nicht als Teil einer Liefercharge zu sehen. Betrachtet man z.B. Abb. 6.19, in der die Effizienz gegenüber der MAPMT-Seriennummer aufgetragen ist, so fällt auf, dass die Effizienz zu neueren MAPMTs anzusteigen scheint. Auch wenn sich dieses Verhältnis mit den hier vorgestellten Werten deckt, ist diese Betrachtung doch deutlich prägnanter und aussagekräftiger.

Um einen vollständigen Überblick über alle vermessenen MAPMTs und deren Daten zu bekommen sind im Anhang im Kapitel C die Gegenüberstellungen einer Messgröße gegenüber der MAPMT-Seriennummer für alle Messgrößen und MAPMTs gezeigt.

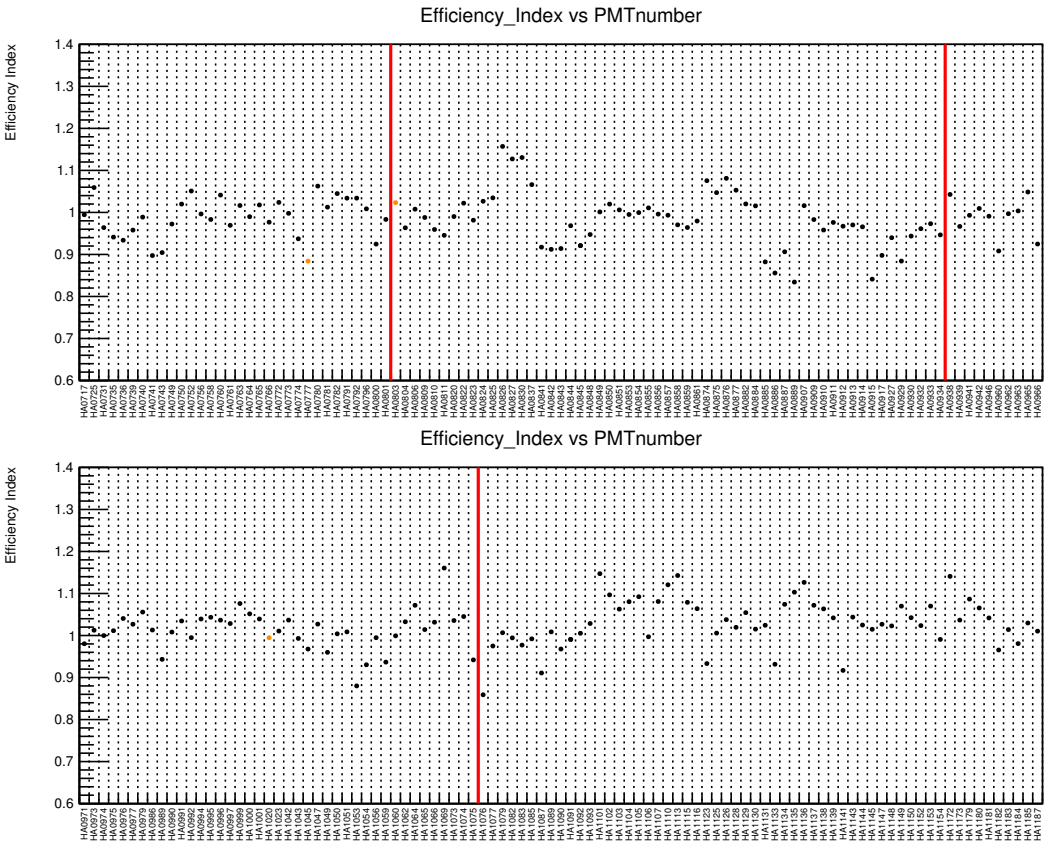


Abb. 6.19 ♦ *Effizienzindex (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien begrenzen einzelne Lieferchargen. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wider. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* -1100 *V vermessen. Zu erkennen ist, dass über die hier gezeigten Lieferchargen 5, 6, 7 und 8 der Effizienzindex anzusteigen scheint.*

6.4 Artefakte bei vermessenen MAPMTs und Retouren

Mit Hilfe des Teststandes konnten bereits einige MAPMTs aufgrund schlechter Eigenschaften reklamiert und zurückgesendet werden. In diesem Abschnitt sollen einige in Messungen aufgetretene MAPMT-Artefakte diskutiert und die retournierten MAPMTs vorgestellt werden. Der Fokus liegt hierbei auf den Messgrößen der Effizienz, der Dunkelrate und der Nachpulswahrscheinlichkeit.

Hohe Nachpulswahrscheinlichkeit

Es gibt unter allen vermessenen MAPMTs einen MAPMT mit zu "hohen" Nachpulswahrscheinlichkeit, welche nicht mit einer extrem hohen Dunkelrate einhergeht. Der HA0318 hat in seiner ersten Messung (160601) eine Nachpulswahrscheinlichkeit von 2.744% $\pm$ 0.0478 (pp) bei einer Dunkelrate von 722.4 Hz $\pm$ 375.6 Hz , bei einer späteren Messung (160628) eine Nachpulswahrscheinlichkeit von 2.774% $\pm$ 0.0478 (pp) bei 709.5 Hz $\pm$ 375.6 Hz Dunkelrate. Da wie in Abschnitt 5.6 beschrieben die Nachpulswahrscheinlichkeit unterschätzt wird, reicht dieser Wert für eine Reklamation aus. Betrachtet man die in Abb. 6.20 dargestellte zeitliche Verteilung der Nachpulse, so sieht man, dass die Nachpulse definitiv nicht durch ein Dunkelrauschen erklärt werden können. Der konstante Abfall der Nachpulshäufigkeit hin zu großen Zeitdifferenzen zum Hauptpuls ist ein Indiz dafür, dass hier die in Abschnitt 2.1 beschriebene Restgasionisation auftritt. Ein solches Phänomenen ist meist mit einem schlechten Vakuum im MAPMT verbunden. Ein schlechtes Vakuum hätte auch einen Anstieg in der Nachpulswahrscheinlichkeit mit der Zeit, wie für diesen MAPMT zu sehen, zur Folge.

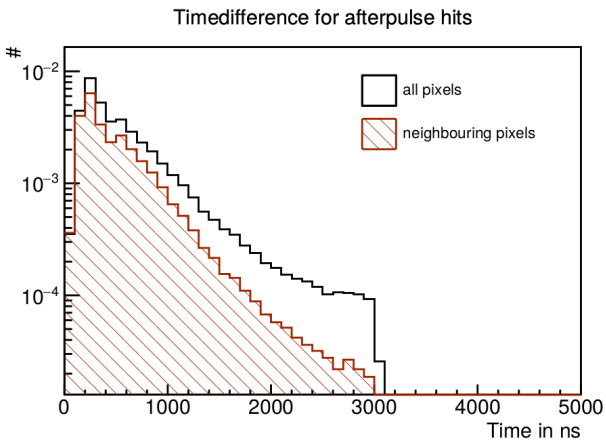


Abb. 6.20 ♦ *Zeitliche Verteilung von Nachpulsen des HA0318. Die aufgetragene Zeitdifferenz ist die zwischen prompten Signalpuls und verzögertem Nachpuls. Unterschieden wird zwischen normal bestimmten Nachpulsen in schwarz und "wahren" Nachpulsen in orange. "Wahre" Nachpulse definieren sich durch ihren Auftritt in einem Nachbarpixel des Hauptsignals. Zu erkennen ist ein langsamer Abfall in der auf die Anzahl an Signalpulsen normierten Nachpulsrate. Dieser Abfall zeigt, dass hier richtige Nachpulse vorliegen und kein Dunkelrauschartefakt.*

Hohe Dunkelrate

In allen 400 MAPMTs sind insgesamt sieben MAPMTs mit einer zu großen Dunkelrate zu finden. Bei diesen MAPMTs (HA0129,HA0133,HA0142,HA0201,HA0283,HA0372,HA0974) ist immer mindestens ein Pixel zu finden, mit einer Dunkelrate oberhalb von 1 kHz. Ein MAPMT mit zu großer Gesamtdunkelrate, aber keinem Pixel oberhalb von 1 kHz, wurde bisher nicht vermessen. Solche extrem verrauschten MAPMT-Pixel weisen häufig ein ADC-Spektrum in diesem Kanal auf, welches nahezu exponentiell abfällt (vgl. Abb. 6.21). Die Rauschquelle scheint in diesen Fällen von den Dynoden zu kommen.

Einigen MAPMTs kann das Rauschen auch der Kathode zugeschrieben werden. Ein Beispiel hierfür ist der ist der HA0283 (vgl. Abb. 6.22). Das ADC-Spektrum dieses MAPMTs weist keinen Überschuss an Pulsen geringer Ladung auf, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass die Amplitudenverteilung der Dunkelrauschpulse der typischen Form eines Einzelphotonenspektrums entspricht. Um solche Dunkelrauschpulse zu erzeugen, muss das Elektronenlawinen

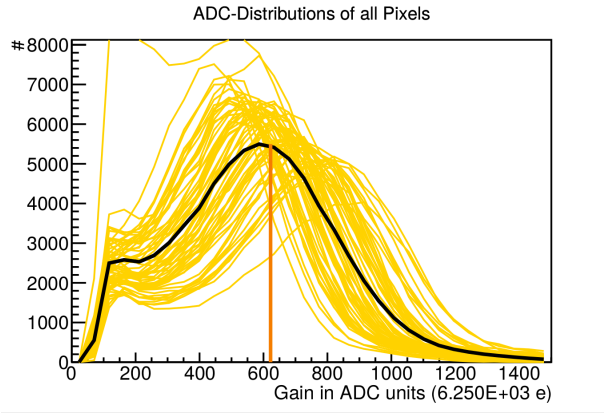


Abb. 6.21 ♦ *Übereinander gelegte ADC-Spektren aller Pixel des HA0129 (gelbe Linien). Zu erkennen ist, dass das ADC-Spektrum des rauschenden Pixels für diesen MAPMT eine große Anzahl an Pulsen geringer Ladung hat. Man könnte interpretieren, dass der Abfall fast exponentiell ist. Ein solches Rauschen lässt sich am besten durch ein Rauschen in einem Dynodenkanal erklären.*

auslösende Einzelelektron von der Kathode kommen. Dass die Kathode wahrscheinlich Auslöser des Dunkelrauschens bei diesem MAPMT ist, drückt sich auch darin aus, dass relativ viele Pixel ein recht hohes Dunkelrauschen aufweisen.

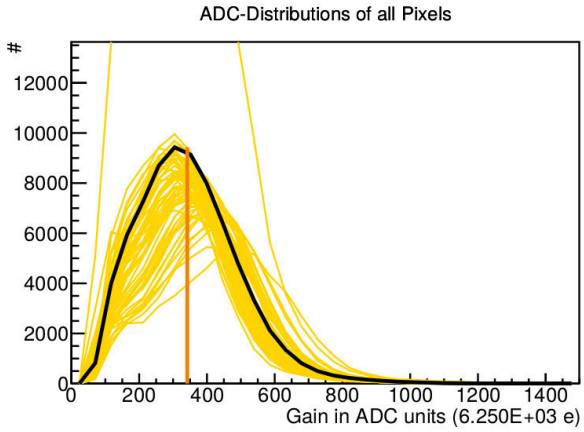


Abb. 6.22 ♦ *Übereinander gelegte ADC-Spektren aller Pixel des HA0283 (gelbe Linien). Das ADC-Spektrum des rauschenden Pixels für diesen MAPMT hat eine große Anzahl an Pulsen im Bereich des Einzelphotonenpeaks. Ein solches ADC-Spektrum lässt sich durch ein Rauschen an der Kathode erklären.*

Die Seriennummern der rauschenden MAPMTs sind über alle Lieferchargen verteilt. Es kann also kein Zusammenhang zwischen Produktionszeitraum und Rauschverhalten gesehen werden. Lediglich anzumerken ist, dass die erste Liefercharge bestehend aus 29 (eigentlich $30 = 29 +$ Referenz-PMT) MAPMTs im Vergleich relativ viele, zu stark rauschende, MAPMTs aufweist (4 Stück). Drei dieser MAPMTs aus der ersten Liefercharge weisen zusätzlich Fehlstellen in den Dynodenkanälen auf (siehe unten).

Mit Quanteneffizienz zusammenhängende Effizienzartefakte

Insgesamt wurden 13 MAPMTs aufgrund von Effizienzartefakten reklamiert. Von diesen Artefakten zuerst zu erwähnen ist die bereits in Abschnitt 5.3 besprochene Schiefheit. Als einziger zu "schiefer" MAPMT wurde der ebenfalls in diesem Abschnitt gezeigte HA0355 reklamiert. Diese Schiefheit zeigt sich auch in der Quanteneffizienz (vgl. Abb. 6.23 mit 6.1 (s.o.)), aus welcher sich ein relativer Unterschied zwischen Minimum ($\sim 25\%$) und Maximum ($\sim 35\%$) von $^{25\%}/_{35\%} \approx 71\%$ ergibt und somit ein Reklamationsgrund. Die Quanteneffizienz wurde hierbei mit einer Wolframlampe bei 400 nm unter Vergleich mit einer kalibrierten Photodiode gemessen. Die Bilder der Quanteneffizienz sind hierbei immer um 180° gegenüber den Messungen mit dem Serienteststand gedreht.

Die MAPMTs HA0395, HA0503, HA0712, HA0717, HA0777 und HA0801 haben ebenfalls inhomogene Effizienzen, welche sich auch in der Quanteneffizienz widerspiegeln. Der HA0777 zeigt in der Abb. 6.24 sowohl für Quanteneffizienz als auch für die im Serienteststand gemessene Effizienz sieben weniger effiziente Streifen. Die ineffizienten Stellen liegen hierbei mittig zwischen

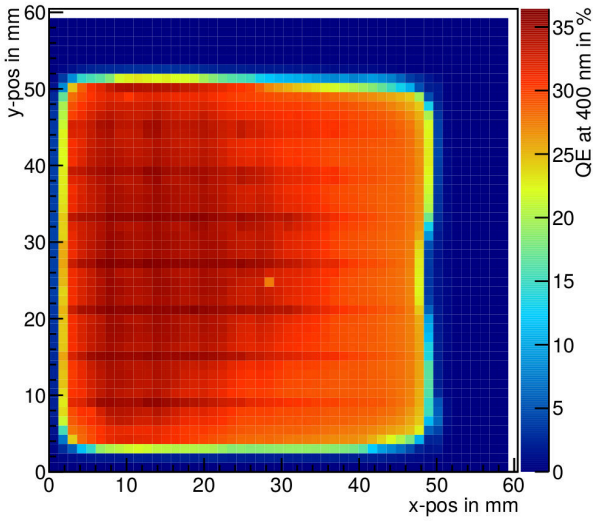


Abb. 6.23 ♦ *Ortsaufgelöste Quanteneffizienz des HA0355. Zu erkennen ist, dass wie in der in Abb. 6.1, dargestellten relativen Effizienz eine starke Verkippung der Effizienz zur linken Seite hin zu sehen ist. Die Quanteneffizienzmessung ist [Pat16] entnommen.*

zwei Pixeln. Man könnte vermuten, dass die Photokathode an diesen Stellen zu wenig oder zu stark bedampft wurde. Der dargestellte MAPMT ist der einzige MAPMT, der dieses Artefakt so ausgeprägt zeigt. Andere MAPMTs, die ähnliche Artefakte weniger ausgeprägt zeigen, sind z.B. HA1020, HA0576 und HA0498. Solche Artefakte sind also über alle Lieferchargen verteilt.

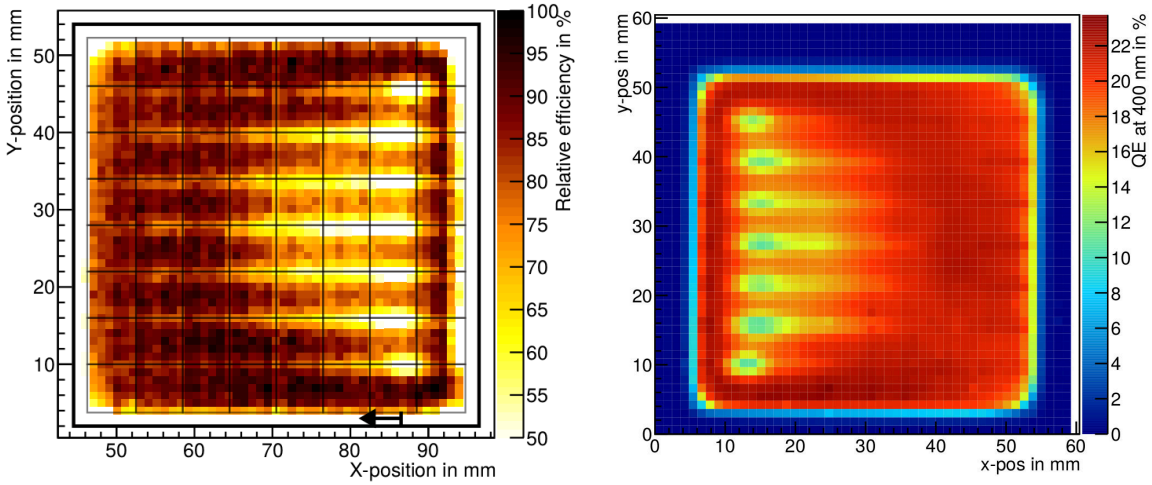


Abb. 6.24 ♦ *Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0777. Zu erkennen ist sowohl in der linken Abbildung die relative Effizienz der Einzelphotonenmessung wie auch in der rechten Abbildung der Quanteneffizienz, dass bei diesem PMT sieben Fehlstellen in der Effizienz vorliegen. Zu beachten hierbei ist, dass die Messung der Quanteneffizienz gegenüber der Messung am Serienteststand um* 180° *gedreht ist. Die Fehlstellen passen gut zu den in der linken Abbildung dargestellten Pixelverläufen. Die Quanteneffizienzmessung ist [Pat16] entnommen.*

Der HA0712 und der HA0717 sind zwei MAPMTs bei denen eine kreisrunde Fläche an einer Ecke des MAPMTs ineffizient ist. Die ineffiziente Ecke ist bei den MAPMTs nicht die selbe. Der HA0712 weißt seine ineffiziente Ecke oben rechts auf, der HA0717 oben links. Allgemein tritt das Problem einer ineffizienten Ecke häufiger auf, jedoch weist kein anderer MAPMT Ineffizienzen dieser in Abb. 6.25 dargestellten Größe auf. Meist sind die ineffizienten Ecken deutlich kleiner und maximal einen MAPMT-Pixel groß.

Kleinere Artefakte in der Quanteneffizienz, wie ineffiziente Punkte kleiner einem viertel Pixel, treten häufig auf. Solche Fehlstellen fallen jedoch bei Betrachtung des gesamten MAPMTs nicht weiter ins Gewicht.

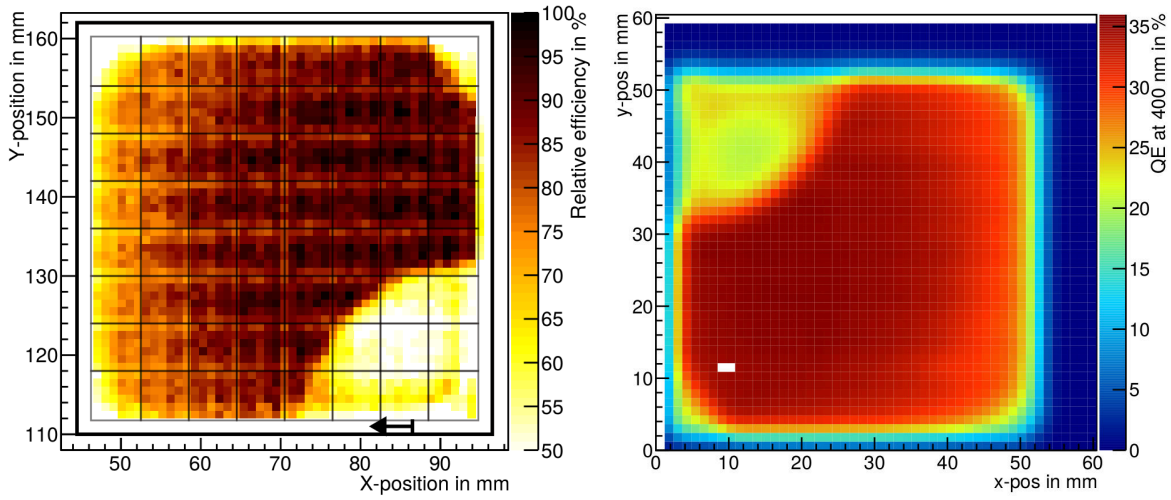


Abb. 6.25 ♦ *Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0717. Zu erkennen ist sowohl in der linken Abbildung der relativen Effizienz der Einzelphotonenmessung, wie auch in der rechten Abbildung der Quanteneffizienz, dass bei diesem PMT eine Kreisrunde Fläche um die untere rechte Ecke komplett ineffizient ist. Zu beachten hierbei ist das die Messung der Quanteneffizienz gegenüber der Messung am Serienteststand um* 180° *gedreht ist. Die obere rechte Ecke ist in einem deutlich geringeren Kreis ebenfalls ineffizient. Die Quanteneffizienzmessung ist [Pat16] entnommen.*

Weitere Effizienzartefakte

Die MAPMTs HA0077, HA0084, HA0109, HA0390, HA0546 und HA0803 zeigen Strukturen in der Effizienz, die sich nicht mit der Quanteneffizienz erklären lassen. Gesondert zu erwähnen sind die reklamierten MAPMTs der ersten Liefercharge: HA0077, HA0084, HA0109, HA0133 und HA0142. Diese MAPMTs weisen alle sehr ähnliche Effekte in der Effizienz auf. Beispielhaft für den HA0084 zu sehen ist, dass die Effizienz starken Schwankungen unterworfen ist und im Allgemeinen sehr gering ausfällt (siehe Abb. 6.26). Betrachtet man die ortsaufgelöste Quanteneffizienz, so wird deutlich, dass sowohl Schwankung als auch die allgemein geringe Effizienz nicht mit der Quanteneffizienz zu begründen sind. Die ortsaufgelöste Quanteneffizienz hat einen sehr konstanten Effizienzwert um 35%. Für die MAPMTs der ersten Liefercharge merkte HAMAMATSU, während eines internen Meetings, eine nicht hinreichend dicke Kathodenschicht an (42 Å statt 45 Å). Diese Kathodenschichtdicke kann jedoch nicht zur Erklärung der gezeigten Artefakte herangezogen werden, da die Quanteneffizienz keine Verringerung zeigt.

Andere, nicht durch die Quanteneffizienz erklärbare Effizienzartefakte sind einzelne fehlende Dynodenkanäle. Dies ist ein Effekt, der sich in den MAPMTs HA0390, HA0133, HA0717, HA0777 und HA0801 bemerkbar macht. Als Beispiel hierfür ist in Abb. 6.27 der HA0546 MAPMT gezeigt.

Der in der Abb. dargestellte Effizienzverlauf des PMTs zeigt deutlich einige klar abgegrenzte Fehlstellen in der Effizienz auf. Die Fehlstellen sind in horizontaler Richtung etwa so groß wie ein halber MAPMT-Pixel und scheinen in vertikaler Richtung so groß wie ein Pixel zu sein. Diese Größe passt sehr gut zu den sichtbaren Strukturen auf dem MAPMT (siehe Abb. 2.5). So sind im Foto "Balken" mit vertikaler Ausdehnung von einem Pixel und horizontaler Ausdehnung eines viertel Pixels zu sehen. Diese "Balken" sind entweder Teile der fokussierenden Elektrode oder schon Teil der ersten Dynode. Die in der Effizienzgraphik dargestellten Fehlstellen ließen sich also gut durch zwei fehlerhafte "Balken"/Dynodenkanäle erklären. Für die den fehlerhaften Dynodenkanälen zugehörigen MAPMT-Pixel lässt sich auch eine stark verminderte Einzelelektronenvervielfachung feststellen (siehe Abb. 6.28), welche gut mit der Idee fehlerhafter Dynodenkanäle korrespondiert.

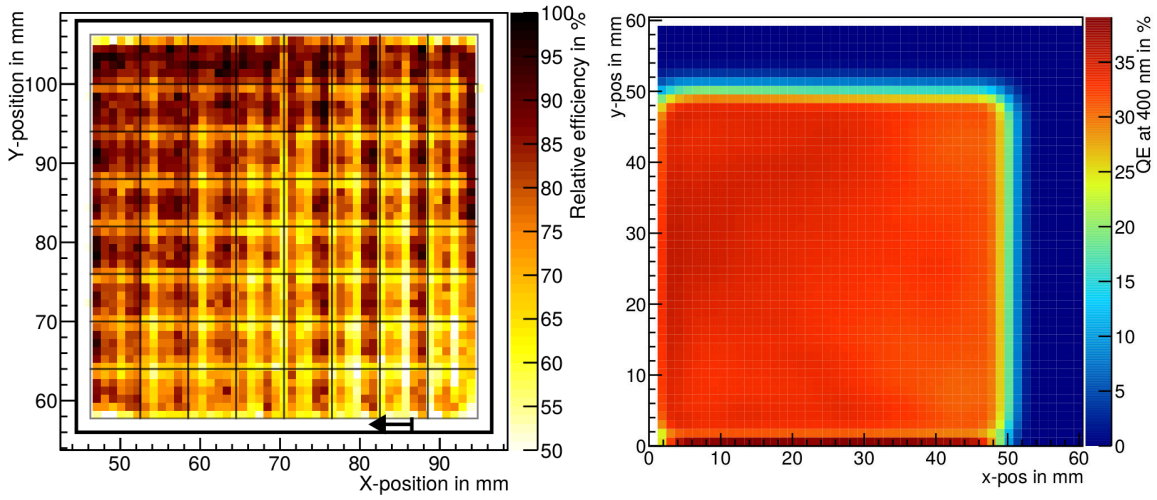


Abb. 6.26 ♦ *Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0084. Zu erkennen ist in der linken Abbildung bei der relativen Effizienz der Einzelphotonenmessung eine starke Schwankung in der Effizienz. Diese Schwankung ist der rechten Abbildung der Quanteneffizienz nicht entnehmbar. Zu beachten hierbei ist das die Messung der Quanteneffizienz gegenüber der Messung am Serienteststand um* 180° *gedreht ist. Die Effizienzschwankung ist daher kein Artefakt der Quanteneffizienz, sondern entweder der Kollektions-, oder Dynodeneffizienz. Die Quanteneffizienzmessung ist [Pat16] entnommen.*

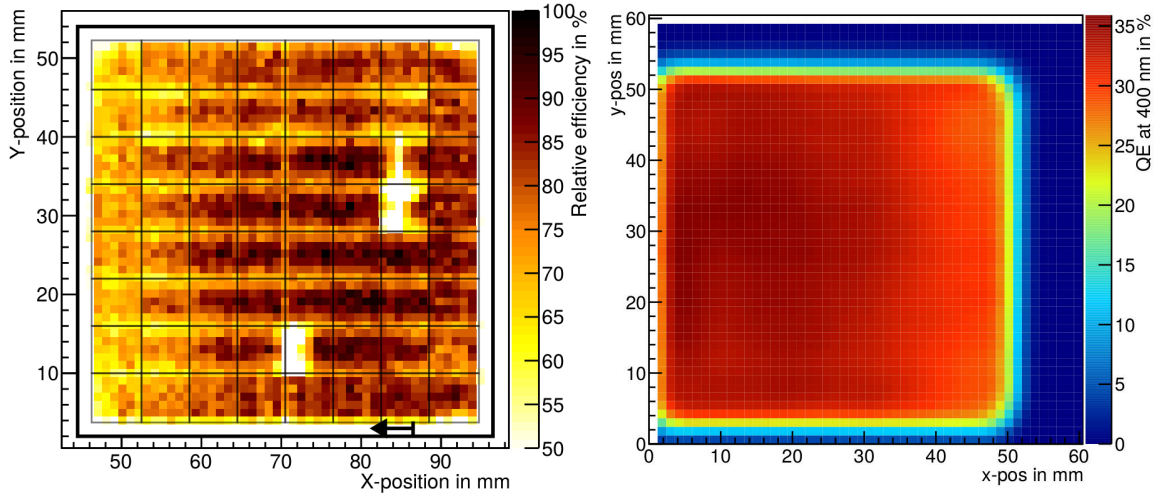


Abb. 6.27 ♦ *Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0546. In der linken Abbildung bei der relativen Effizienz der Einzelphotonenmessung sind einzelne ineffiziente Fehlstellen auszumachen. Diese Fehlstellen sind in der rechten Abbildung der Quanteneffizienz nicht zu sehen. Zu beachten hierbei ist das die Messung der Quanteneffizienz gegenüber der Messung am Serienteststand um* 180° *gedreht ist. Die Effizienzschwankung ist daher kein Artefakt der Quanteneffizienz, sondern einzelner beschädigter Dynodenkanäle. Die Quanteneffizienzmessung ist [Pat16] entnommen.*

Deutlicher wird dies noch, betrachtet man die Effizienz des HA0803 (vgl. Abb. 6.29). Dieser MAPMT ist auf der rechten Seite komplett ineffizient. Die Ineffizienz zieht sich auch für diesen MAPMT über einen halben MAPMT-Pixel.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die hier beschriebenen Artefakte zwar bei vielen der MAPMTs auftreten, aber meist weniger auffällig sind, als in den hier beschriebenen Fällen retournierter MAPMTs. Die Häufigkeit kleiner und großer Artefakte in der Effizienz lässt sich schwierig

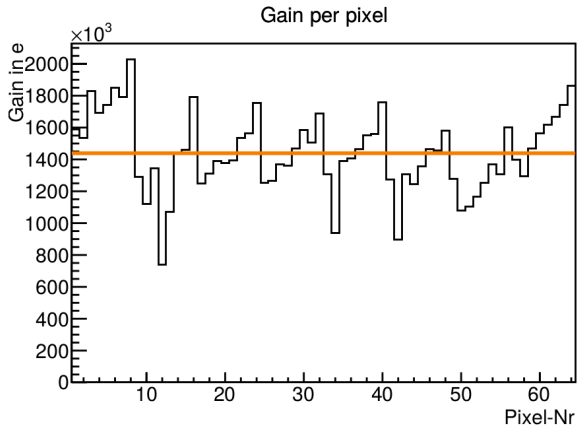


Abb. 6.28 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung der einzelnen Pixel des HA0546. Auffällig ist, dass einige Pixel eine extrem kleine Einzelelektronenvervielfachung haben. Das steht im Konsens zu den in Abbildung 6.27 gezeigten ortsaufgelösten Effizienzverläufen.*

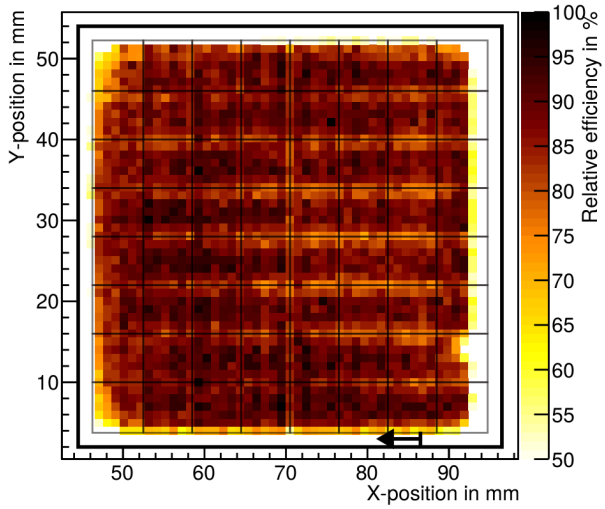


Abb. 6.29 ♦ *Ortsaufgelöste relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0803. Die relative Effizienz der Einzelphotonenmessung zeigt deutlich, dass der komplette rechte Rand des MAPMTs ineffizient ist. Dies ist ein Artefakt von fehlerhaften Dynodenkanälen.*

abschätzen. Das liegt vor allem daran wie man einige Unebenheiten in der Quanteneffizienz bewertet oder anschaut (relativ oder absolut). Hier empfiehlt es sich dringend objektive Parameter zur Untersuchung heranzuziehen. Hierfür böte sich die Effizienz pro Pixel oder die Effizienzvarianz pro Pixel an. Allerdings sind auch solche Größen schwierig zu interpretieren, da z.B. Pixel am Rand des MAPMTs immer eine größere Varianz in der Effizienz aufweisen, als andere.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufbau

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Serienteststand aufgebaut. Der Teststand wurde systematisch vermessen um seine, für die Serienmessung ausreichende, Funktionalität zu bestätigen. Aus den Voruntersuchungen ergeben sich präzise Messungenauigkeiten für die einzelnen Bauteile. Speziell untersucht wurden Lichtquelle, XY-Tisch, Lichtdichte und der ADC. All diese Bauteile wurden als für den Teststand voll ausreichend befunden.

Die in der Arbeit programmierten Motortreiber, Messsoftware und das Messbedienfeld wurden beschrieben. Die Standardmessung wurde mit ihren Messparametern motiviert und erklärt.

Es wurden die einzelnen mit dem Serienteststand erfassbaren Messgrößen gezeigt. Hierzu wurde die Analysesoftware in ihren Schritten dargelegt und jede Messgröße motiviert. Zur Beschreibung der einzelnen Messgrößen und ihrer Fehler wurden Referenz-MAPMT und andere häufig vermessene MAPMTs herangezogen. Aus der Analyse der Daten der Messungen, dieser MAPMTs ergab sich ein systematischer Fehler auf die Messgrößen. Diese systematischen Fehler bewegen sich alle in Größenordnungen, welche eine gute Beschreibung der zu untersuchenden Messgrößen immer noch gewährleistet. Die relativen Messfehler, bezogen auf den zu untersuchenden typischen Messwertbereich, liegen hierbei um 5% (vgl. Tabelle 5.1).

Analysen von 400 gemessenen MAPMTs

Diese Messfehler wurden im folgenden dazu verwendet Messdaten der 400 vermessenen MAPMTs einzuordnen. Die 400 MAPMTs des Typs H12700 wurden mit dem älteren gleichgroßen Modell H8500 verglichen. Hierbei ergab sich, dass der H8500 eine deutlich geringere Effizienz hat. Selbst die H12700 MAPMTs mit der geringsten gemessenen Effizienz, haben immer noch eine etwa so große Effizienz wie gute bis sehr gute H8500 MAPMTs. Auch unterscheidet sich die ortsaufgelöste Effizienz, welche beim H12700 meist ein Gefälle zu einer MAPMT-Seite zeigt. Solche schiefe Effizienzflächen sind bei den H8500 MAPMTs nicht zu sehen. Allerdings haben H8500 MAPMTs ein deutlich geringeres Dunkelrauschen. Der mittlere Unterschied zwischen den Dunkelraten ist mit $\sim 1/7$ sehr groß. Allerdings ist zu erwarten, dass das Dunkelrauschen der H12700 MAPMTs über die Zeit des Betriebes im Dunkeln noch abnimmt. Die Einzelelektronenvervielfachung, die effektiven Fläche und die Nachpulswahrscheinlichkeit der beiden MAPMTs sind nahezu gleich.

Außerdem wurden die einzelnen Lieferchargen auf Trends untersucht. Hierbei wurde keine Tendenz zu besonders guten/schlechten MAPMTs in einzelnen Chargen entdeckt. Allerdings lässt sich ein Trend, in z.B. der Effizienz, vermuten, wenn man sich den Verlauf der Effizienz mit der laufenden Seriennummer der MAPMTs anschaut. Auch hier ist es aber für endgültige Schlüsse bzgl. Verbesserung oder Verschlechterung der MAPMT-Produktion zu früh.

Mit Hilfe des Teststandes wurden aus den 400 MAPMTs 21 MAPMTs mit schlechten, den Kaufspezifikationen meist nicht genügenden, Eigenschaften ausgemacht. Diese schlechten Eigenschaften sind meist inhomogene Effizienzen auf dem MAPMT, welche mit der ortsaufgelösten Effizienzmessung des Teststandes ausgemacht werden konnten. Die Artefakte hierbei sind sehr unterschiedlich und reichen von einzelnen ineffizienten Pixeln bis zu fehlenden MAPMT-Ecken oder ineffizienten Streifen. Die Herkunft solcher Effekte konnte, mit einer zusätzlichen ortsaufgelösten Quanteneffizienzmessung, der Photokathode oder den Dynoden zugeordnet werden. Weitere schlechte MAPMTs waren meist aufgrund einer zu hohen Dunkelrauschrate nicht ak-

zeptabel. Das zu starke Dunkelrauschen war hier meist in einzelnen Pixeln auszumachen. Die 21 schlechten MAPMTs wurden nach wiederholter Messung im Teststand retourniert und befinden sich zur weiteren Evaluierung bei HAMAMATSU.

Die anderen, den Kaufspezifikationen genügenden MAPMTs, weisen meist eine nicht weit streuende, gute Effizienz auf. Die Dunkelrate und die Variation in der Dunkelrate der einzelnen MAPMTs ist groß. Deutlich wird das beim Übereinanderlegen der, in Abschnitt 6.1 vorgestellten, Effizienz gegenüber Dunkelrate-Verläufen aller vermessenen MAPMTs (vgl. Abb. 7.1). Deutlich wird in dieser Darstellung, dass die Effizienzen der verschiedenen MAPMTs keinen großen Schwankungen unterliegen, sowie Effizienz und Dunkelrate nicht korreliert sind. Die Dunkelrate schwankt deutlich und zeigt keine Abhängigkeit von der Seriennummer (bzw. dem Produktionsdatum). Hierbei ist hervorzuheben, dass die Farbe der Linie die Seriennummer widerspiegelt. Somit bedeutet Hell→Alt/kleine SN und Dunkel→Neu/große SN.

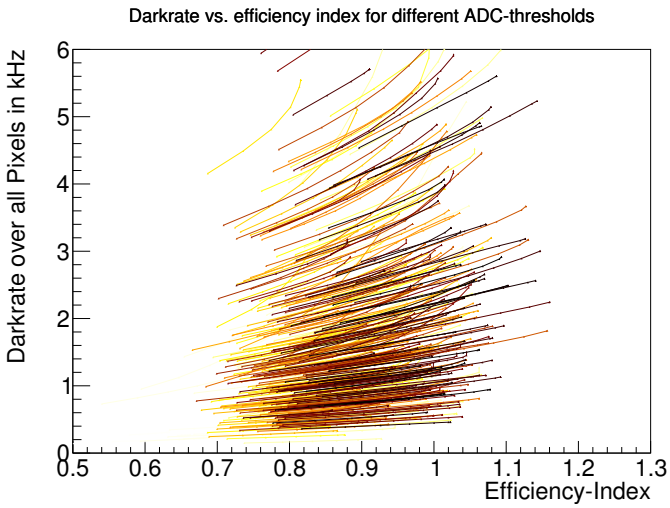


Abb. 7.1 ♦ *Dunkelrate in kHz aufgetragen gegen Effizienz (als Effizienzindex im Vergleich zum Referenz-PMT) als Überlagerung aller MAPMTs für acht verschiedene Ladungsschwellen von für 0% bis 70%, in prozentualer Ladung des Einzelphotonenpeaks. Mithilfe dieser Graphen lässt sich die "Güte" eines MAPMTs direkt ablesen. Die Farbe der jeweiligen Linien gibt die MAPMT-Seriennummer wieder. Dunklere Linien sind neuere MAPMTs, während hellere gelbere Linien ältere MAPMTs zeigen.*

Ausblick

Da im Rahmen dieser Arbeit der Teststand und seine Limitierungen voll erfasst wurden, bieten sich nun tiefer gehende Studien an. Speziell Korrelationen einzelner Messgrößen können interessante Ansatzpunkte weiterer Untersuchungen sein.

Die Daten des HV-Scans lassen sich noch deutlich weiter untersuchen, um damit oder mit der Einzelelektronenvervielfachung an sich, Rückschlüsse auf die spätere beste Betriebsspannung zu treffen. Viele weitere interessante Größen, wie z.B. "cross-talk" oder die Art der Nachpulse, oder Dunkelpulse lassen sich noch deutlich tiefgehender untersuchen.

Es sollte noch weiter untersucht werden, wie der Teststand auf Temperatureinflüsse reagiert und wie sich diese besser regulieren oder korrigieren lassen.

Weiter sollten aussagekräftige Parameter zur Beschreibung der Effizienz gesucht werden. Gerade die Varianz auf der MAPMT-Fläche, oder die Varianz im einzelnen Pixel scheinen hier interessante Aufschlüsse über MAPMT-Artefakte zu liefern.

Als nächster Schritt sollte auch eine Datenbank für die Messdaten der MAPMTs angelegt werden. Eine solche Datenbank böte nicht nur leichteren Zugriff auf die Daten sondern auch deutlich einfachere Wege, Korrelationen verschiedener Parameter festzustellen.

Weiter sollte ein Webinterface für die Messdaten eingerichtet werden, um dem Hersteller einen besseren und direkteren Zugriff zu gewähren. Somit ließe sich die Produktion deutlich schneller und besser anpassen.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Darstellungen des CBM-RICH-Detektors und HADES-RICH-Detektors 1

2.1 Schematische Darstellung eines Photomultipliers 5
2.2 Quanteneffizienzen zu verschiedenen Wellenlängen verschiedener Kathodenmaterialien 6
2.3 Darstellung des Einzel-Photon-Spektrums 7
2.4 Skizze eines MAPMT 8
2.5 Photo eines H12700 10
2.6 Quanteneffizienz gegenüber Wellenlänge für H12700 10
2.7 n-XYTER-Schema 14

3.1 Darstellung des Teststandes 16
3.2 Teststandphotos 17
3.3 Pulsankunftszeit bei LED-Licht und Laser-Licht 18
3.4 Relative zeitliche Schwankung der LED 20
3.5 Relative zeitliche Schwankung der LED über 7 Stunden 20
3.6 Rauschrate gegen Schwelle für verschiedene Motorzustände 24
3.7 Schaltzeichung des vor dem n-XYTER verwendeten kapazitiven Spannungsteilers 25
3.8 Skizze des zur Ladungskalibration verwendeten Kabels 25
3.9 ADC-Kalibrationsgerade 26
3.10 Verschiebung des ADC-Spektrums gegen Temperatur am FEB 27
3.11 Dunkelrate als Funktion der Zeit für vier MAPMTs 28

4.1 Skizze der beiden Scanbewegungen 32
4.2 Bild des Hauptbenutzerbedienfeldes des Teststandes 33
4.3 Bild der drei Bedienfelder des Teststandes für Motor, HV-Crate und Messung . . 35

5.1 Zweidimensionale Abb. der Effizienzmessung des HA0150 MAPMTs 40
5.2 Darstellung des Effizienzindex dreier MAPMTs (HA0150,HA0151,HA0185) . . . 41
5.3 Jeweilige Häufigkeitsverteilung des Effizienzindex dreier MAPMTs 42
5.4 ”Effizienz” des Referenz-MAPMT 43
5.5 Effektive Fläche des Referenz-MAPMT 44
5.6 Verteilung der effektive Fläche des Referenz-MAPMT 45
5.7 Verkippung besonders ”verkippten” MAPMTs (HA0355) 46
5.8 Darstellung der beiden zur Berechnung der Verkippung verwendeten Hälften auf dem MAPMT 46
5.9 Verteilung der Verkippung des Referenz-MAPMT 47
5.10 Darstellung von acht ADC-Spektren verschiedener Pixel eines MAPMTs 48
5.11 Einzelelektronenvervielfachung des Referenz-MAPMT 49
5.12 Einzelelektronenvervielfachung gegenüber Verschiebung des ADC-Spektrums . . 50
5.13 Dunkeltrate des Referenz-MAPMT 52
5.14 Dunkelrate gegenüber MAPMT-Temperatur 52
5.15 Verteilung der Dunkelrate des Referenz-MAPMT 53
5.16 Verteilung der maximalen gemittelten drei-Pixel Dunkelrate des Referenz-MAPMT 53
5.17 Zeitliche Verteilung von Nachpulsen 54

5.18 Nachpulswahrscheinlichkeit gegenüber Dunkelrate 55
5.19 Verteilung der Nachpulswahrscheinlichkeit des Referenz-MAPMT 55

6.1 Ortsaufgelöste relative Effizienz des HA0355 58
6.2 Effizienzprojektion auf die Horizontale des HA0355 58
6.3 Effizienzprojektion auf die Vertikale des HA0355 58
6.4 Ortsaufgelöste Darstellung der Mehrfacheventwahrscheinlichkeit des HA0355 . . 59
6.5 Zeitlicher Verlauf der Dunkelrate des HA0355 60
6.6 Dunkelrate pro Pixel des HA0355 60
6.7 Dunkelrate aufgetragen gegen Effizienz des HA0355 61
6.8 Einzelelektronenvervielfachung als Funktion der Betriebsspannung des HA0355 . 61
6.9 Einzelelektronenvervielfachung der einzelnen Pixel des HA0355 62
6.10 ADC-Spektren des HA0355 62
6.11 Auf den Einzelphotonenpeak normierte ADC-Spektren des HA0355 62
6.12 Schlüsselparameter des HA0355 63
6.13 Verteilung des Effizienzindex von 400 H12700 und 8 H8500 MAPMTs 64
6.14 Verteilung der Gesamtdunkelrate von 400 H12700 und 8 H8500 MAPMTs 65
6.15 Verteilung der effektiven Fläche von 400 H12700 und 8 H8500 MAPMTs 66
6.16 Verteilung der "Schiefheit" von 400 H12700 und 8 H8500 MAPMTs 67
6.17 Verteilung der Nachpulswahrsch. von 400 H12700 und 8 H8500 MAPMTs 67
6.18 Verteilung der Einzelelektronenvervielf. von 400 H12700 u. 8 H8500 MAPMTs . . 68
6.19 Effizienzindex aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 71
6.20 Zeitliche Verteilung von Nachpulsen des HA0318 72
6.21 ADC-Spektren des verrauschten HA0129 73
6.22 ADC-Spektren des verrauschten HA0283 73
6.23 Ortsaufgelöste Quanteneffizienz des HA0355 74
6.24 Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0777 74
6.25 Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0717 75
6.26 Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0084 76
6.27 Ortsaufgelöste Quanteneffizienz und relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0546 76
6.28 Einzelelektronenvervielfachung der einzelnen Pixel des HA0546 77
6.29 Ortsaufgelöste relative Effizienz der Einzelphotonenmessung des HA0803 77

7.1 Dunkelrate aufgetragen gegen Effizienz als Überlagerung aller MAPMTs 80

A.1 Zeitliche Schwankung der LED 87
A.2 Zeitliche Schwankung der LED über 7 Stunden 88
A.3 ADC-Spektrum des nXYTER-Kanals Nr. 39 zur Kalibration 88
A.4 ADC-Spektrum des nXYTER-Kanals Nr. 106 zur Kalibration 89
A.5 Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung des H0150 90
A.6 Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung des H0151 91
A.7 Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung des HA0185 92
A.8 Verteilung der maximalen gemittelten drei-Pixel Dunkelrate von 400 H12700 und 8 H8500 MAPMTs 93
A.9 Komplettes MAPMT-Informationsblatt des HA0355 94

C.1 Effizienzindex aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 98

C.2 Einzelelektronenvervielfachung aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 99
C.3 ”Schiefheit” aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 100
C.4 Effektive Fläche aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 101
C.5 Gesamtdunkelrate aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 102
C.6 Maximale gemittelte Dunkelrate dreier Pixel aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 103
C.7 Nachpulswahrscheinlichkeit aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer 104

Tabellenverzeichnis

5.1 Ungenauigkeiten der verschiedenen Standardmessgrößen 56

6.1 Mittelwerte der Effizienz, Dunkelrate und Dunkelrate pro Pixel für die Lieferchargen 1 bis 8 69
6.2 Mittelwerte der effektiven Fläche und der "Schiefheit" für die Lieferchargen 1 bis 8 69
6.3 Mittelwerte der Nachpulswahrscheinlichkeit und der Einzelelektronenvervielfachung für die Lieferchargen 1 bis 8 70

B.1 Abweichung des der Achsenursprungs von der tatsächlichen "home"-Position nach 14 vollständigen Messungen 95
B.2 Fitresultate der Gaußfits an ADC-Spektra zur Kalibration 95
B.3 Messwerte zur Bestimmung der Genauigkeit des "homings" 96

A Weitere Graphiken

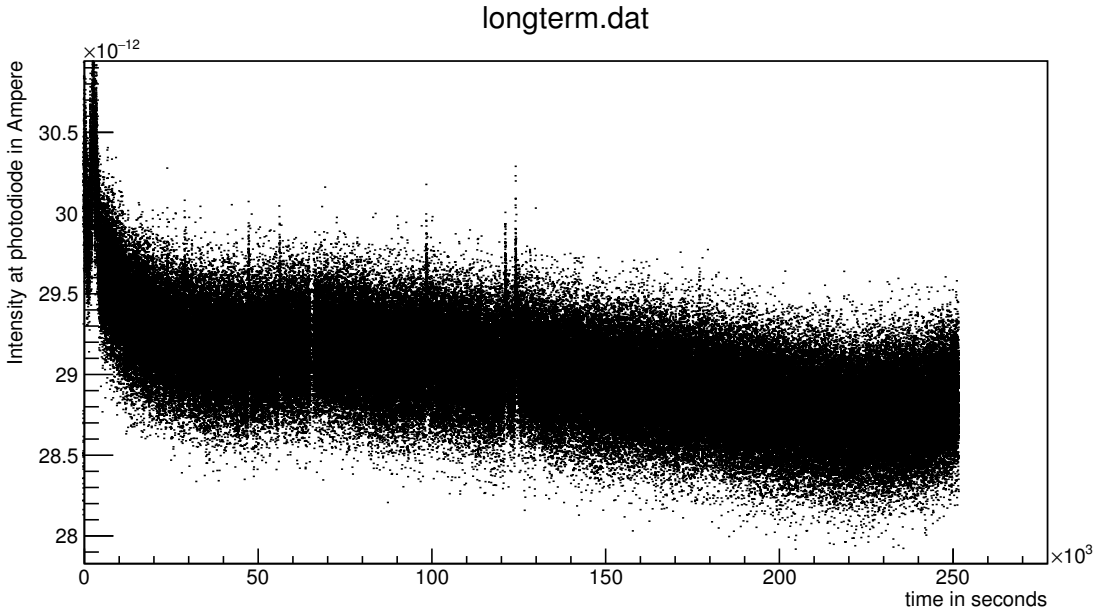


Abb. A.1 ♦ *Zeitliche Schwankungdes Photostroms, induziert durch die im Teststand verwendete Leuchtdiode.* 10 *ns-Breite und* +5 *V hohe Pulse gemessen mit einem an einer Photodiode angeschlossenen Pikomaperemeter über eine Messdauer von 69 Stunden.*

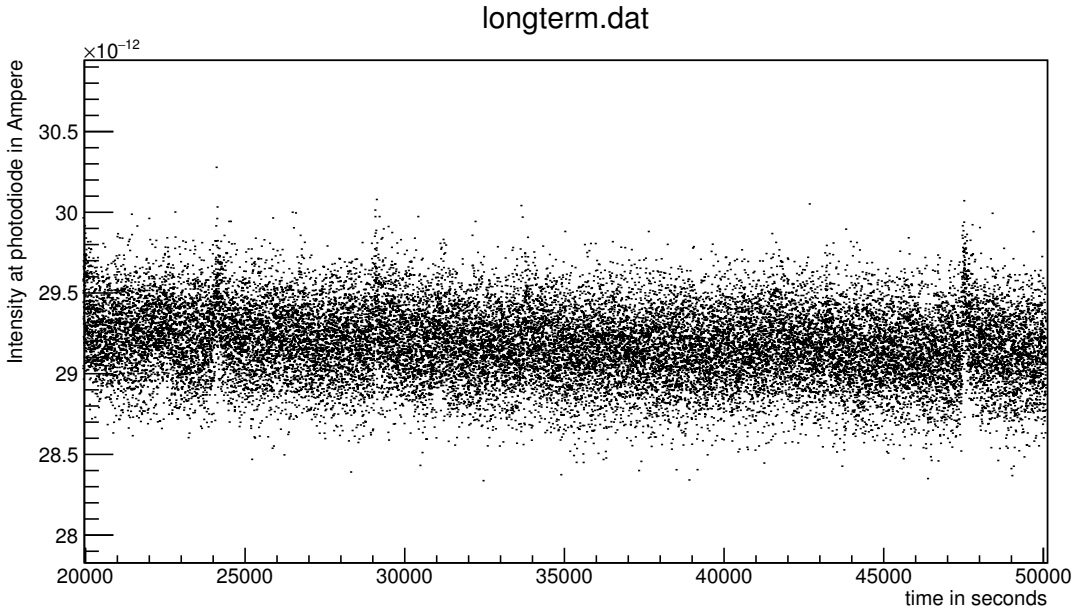


Abb. A.2 ♦ *Zeitliche Schwankungdes Photostroms, induziert durch die im Teststand verwendete Leuchtdiode.* 10 *ns-Breite und* +5 *V hohe Pulse gemessen mit einem an einer Photodiode angeschlossenen Pikomaperemeter über eine Messdauer von 7 Stunden. Entnommen als Teil der in Abb. A.1 dargestellten Messung zwischen 7 und 14 Stunden.*

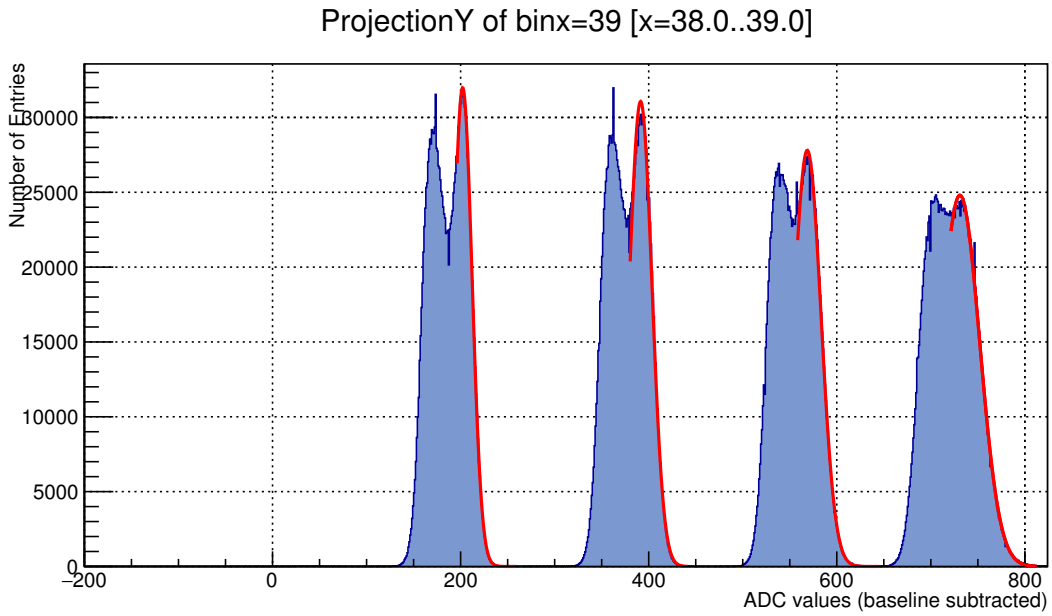


Abb. A.3 ♦ *ADC-Spektrum des nXYTER-Kanals Nr. 39 zur Kalibration mittels Pulsen der Höhe* −0.25 *V,* −0.50 *V,* −0.75 *V,* −1.00 *V mit Breite von* 8 *ns, welche über einen* 10 *kΩ Widerstand an den nXYTer geleitet wurden. Angefittet wurde an den oberen der beiden Peaks (doppelpeak ist Artefakt des schmalen Eingangspuls) eine Gaußverteilung. Die Ergebnisse des Fits finden sich in Tabelle B.2 .*

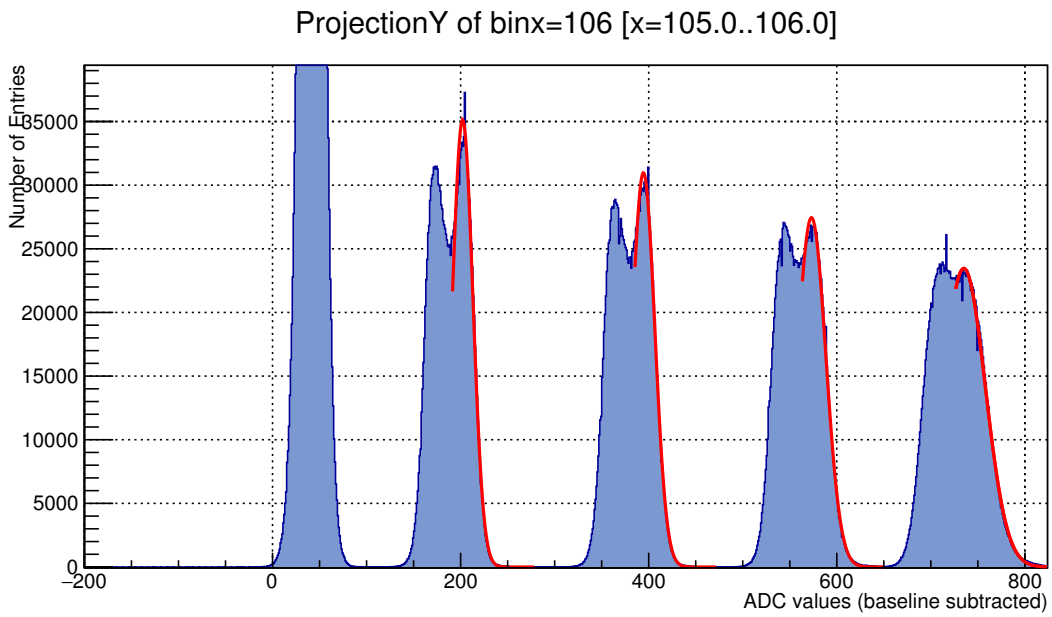


Abb. A.4 ♦ *ADC-Spektrum des nXYTER-Kanals Nr. 106 zur Kalibration mittels Pulsen der Höhe* $-0.25\ V$, $-0.50\ V$, $-0.75\ V$, $-1.00\ V$ *mit Breite von* $8\,ns$, *welche über einen* $10\,k\Omega$ *Widerstand an den nXYTer geleitet wurden. Angefittet wurde an den oberen der beiden Peaks (doppelpeak ist Artefakt des schmalen Eingangspuls) eine Gaußverteilung. Die Ergebnisse des Fits finden sich in Tabelle B.2 .*

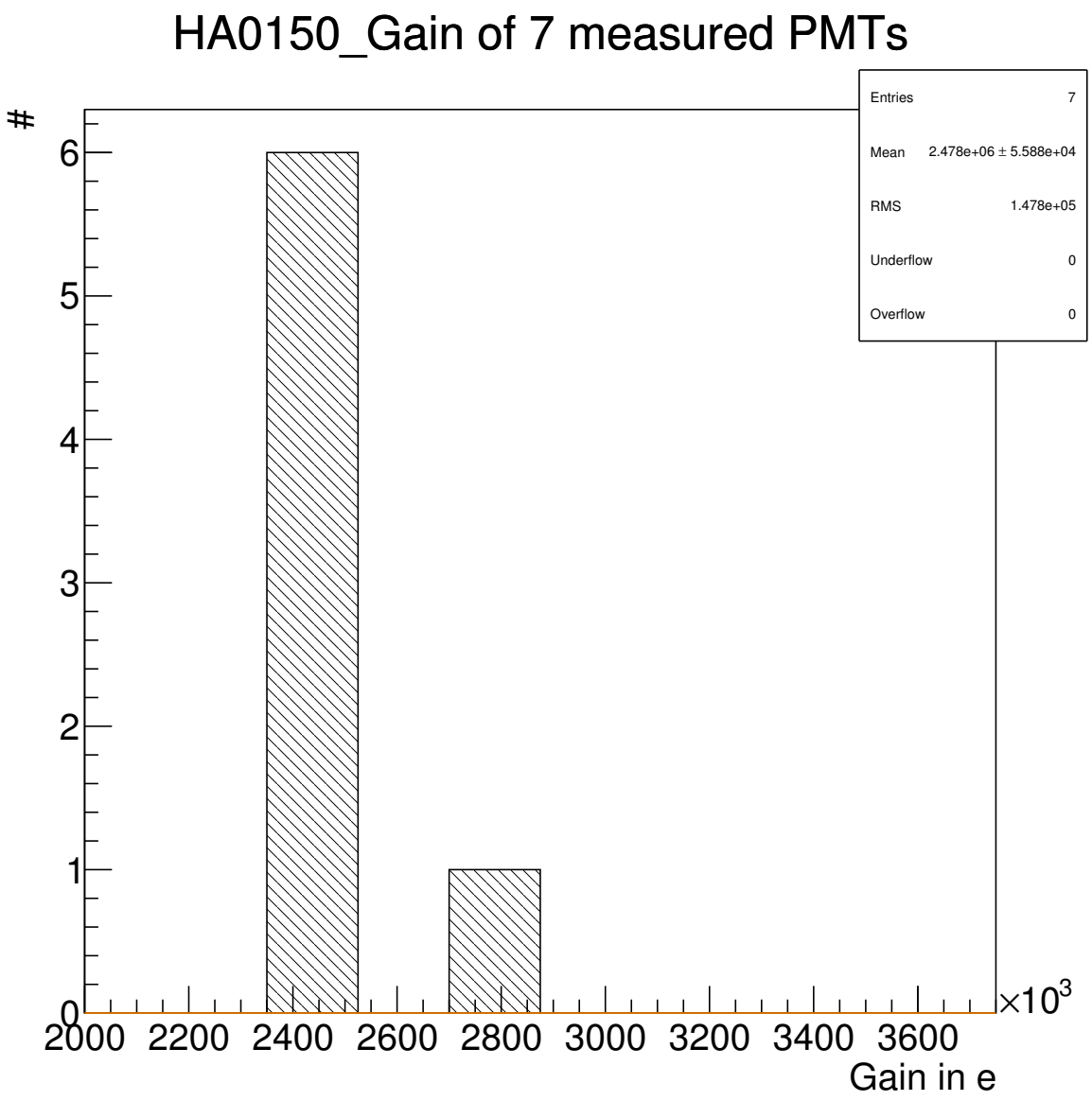


Abb. A.5 ♦ *Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung des siebenmal vermessenen HA0150. Die Standardabweichung beträgt* 1.478×10^5.

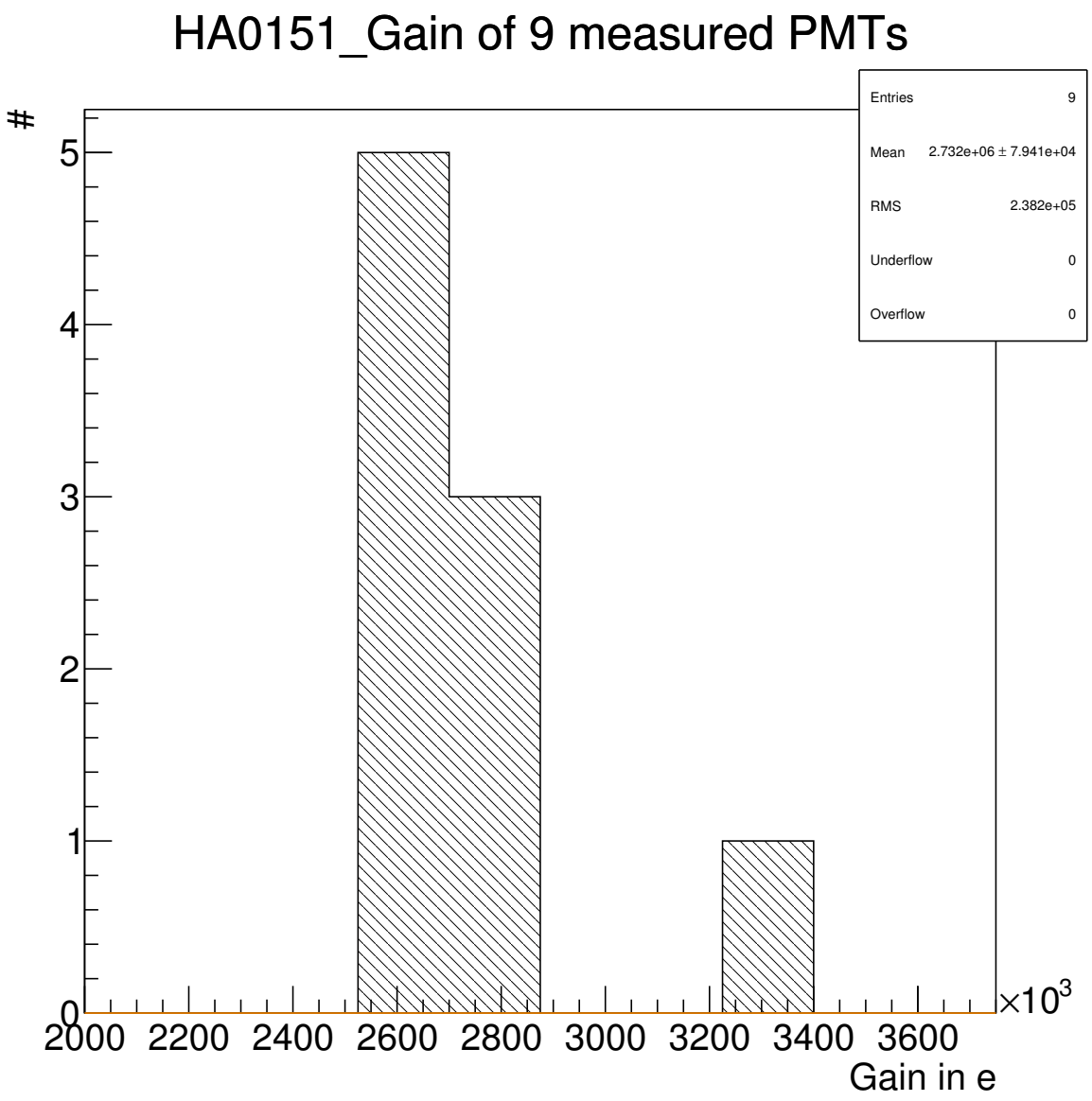


Abb. A.6 ♦ *Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung des neunmal vermessenen HA0151. Die Standardabweichung beträgt* 2.382×10^5.

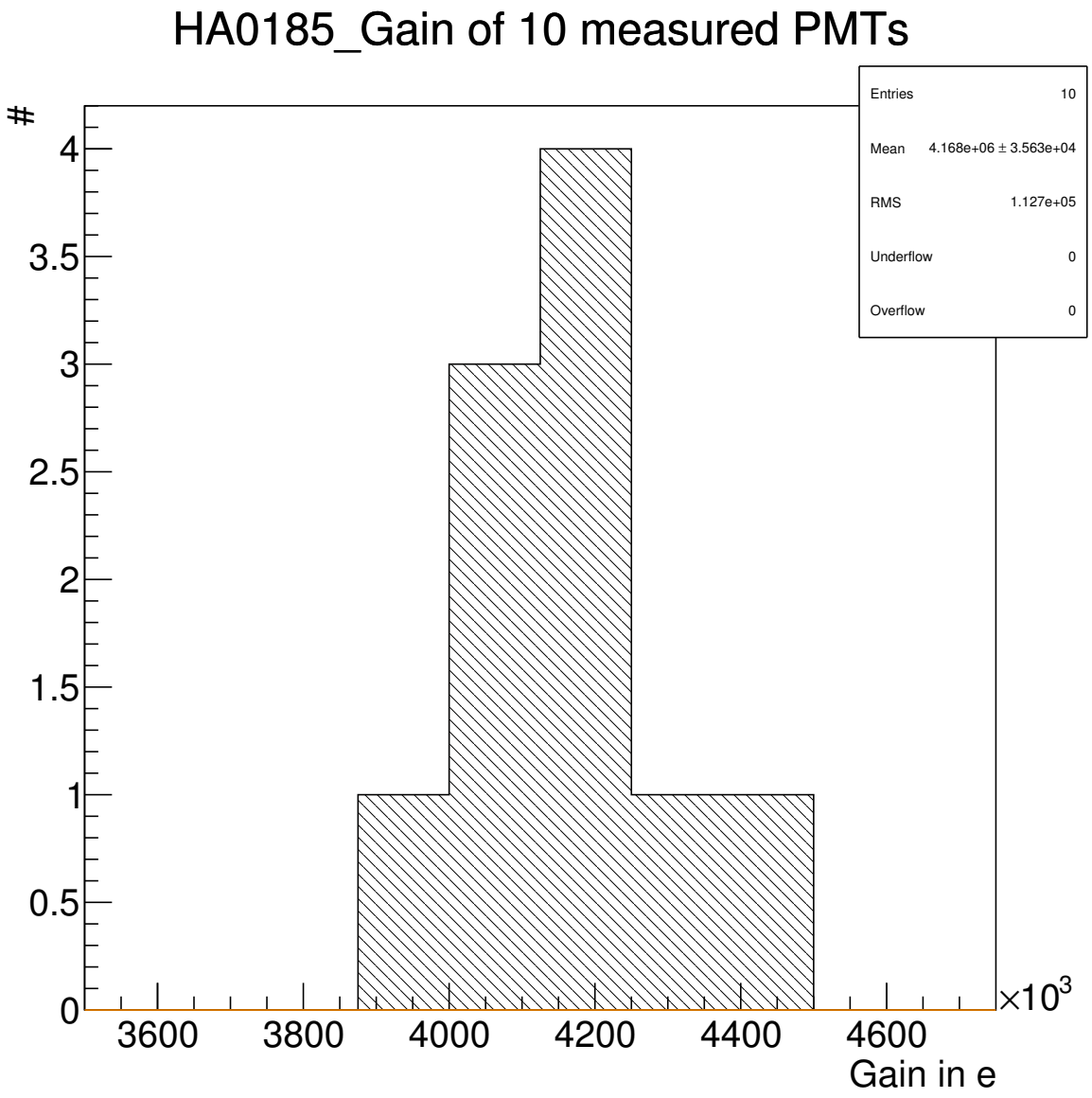


Abb. A.7 ♦ *Verteilung der Einzelelektronenvervielfachung des zehnmal vermessenen HA0185. Die Standardabweichung beträgt* 1.127×10^5.

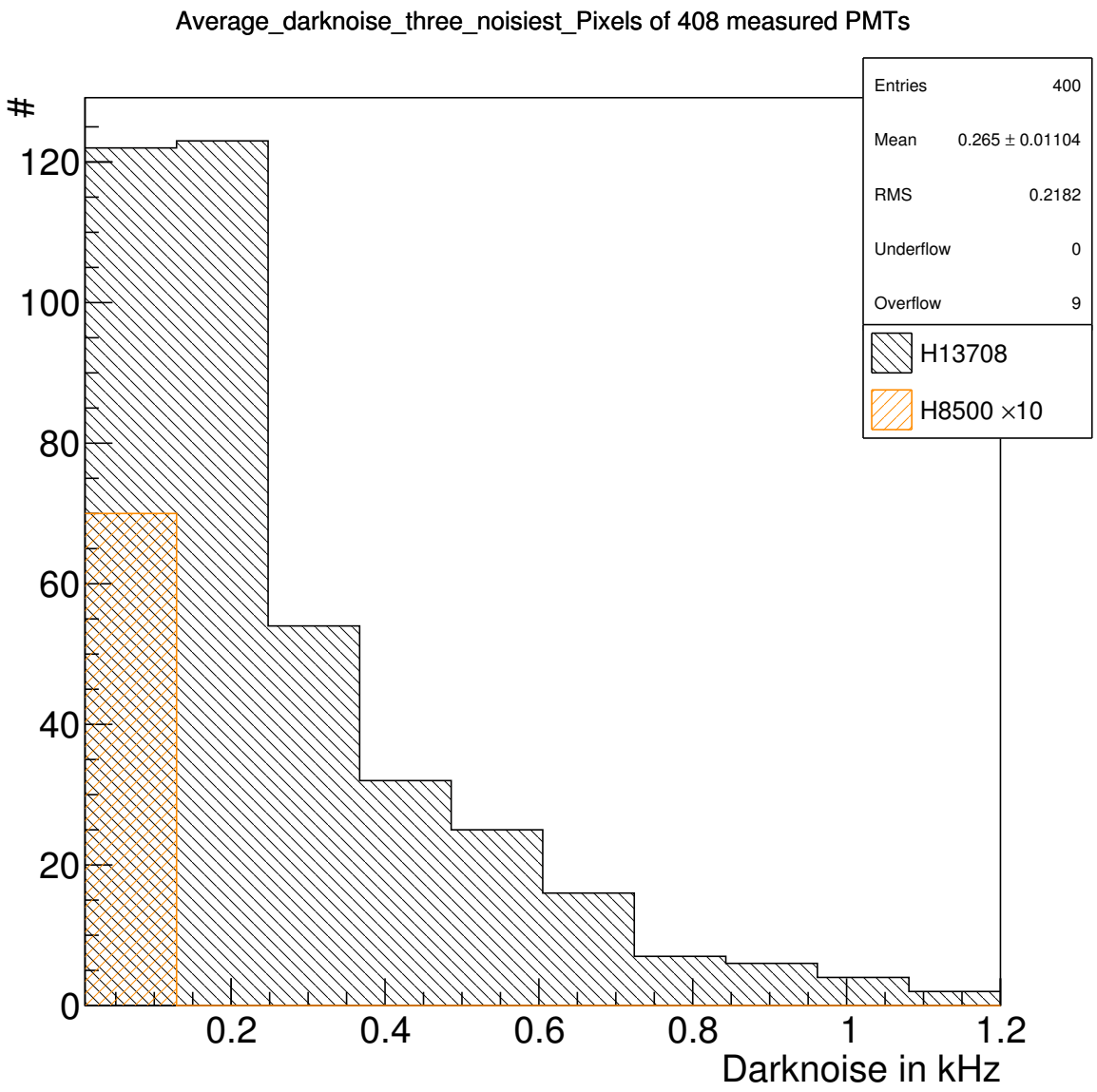


Abb. A.8 ♦ *Verteilung der maximalen gemittelten drei-Pixel Dunkelrate von 400 H12700 (hier mit interner Bezeichnung H13708) MAPMTs (schwarz) und von 8 H8500 MAPMTs (orange). Die Verteilung des H12700 hat ihren Mittelwert bei* $265.0\,Hz \pm 11.04\,Hz$ *(stat.). Die Werte für die Effizienzen der H8500 MAPMTs sind hierbei mit 10 gewichtet, um sie Sichtbar zu machen. Der Mittelwert der H8500 MAPMTs ohne diese Gewichtung beträgt* $26.1\,Hz \pm 4.71\,Hz$ *(stat.).*

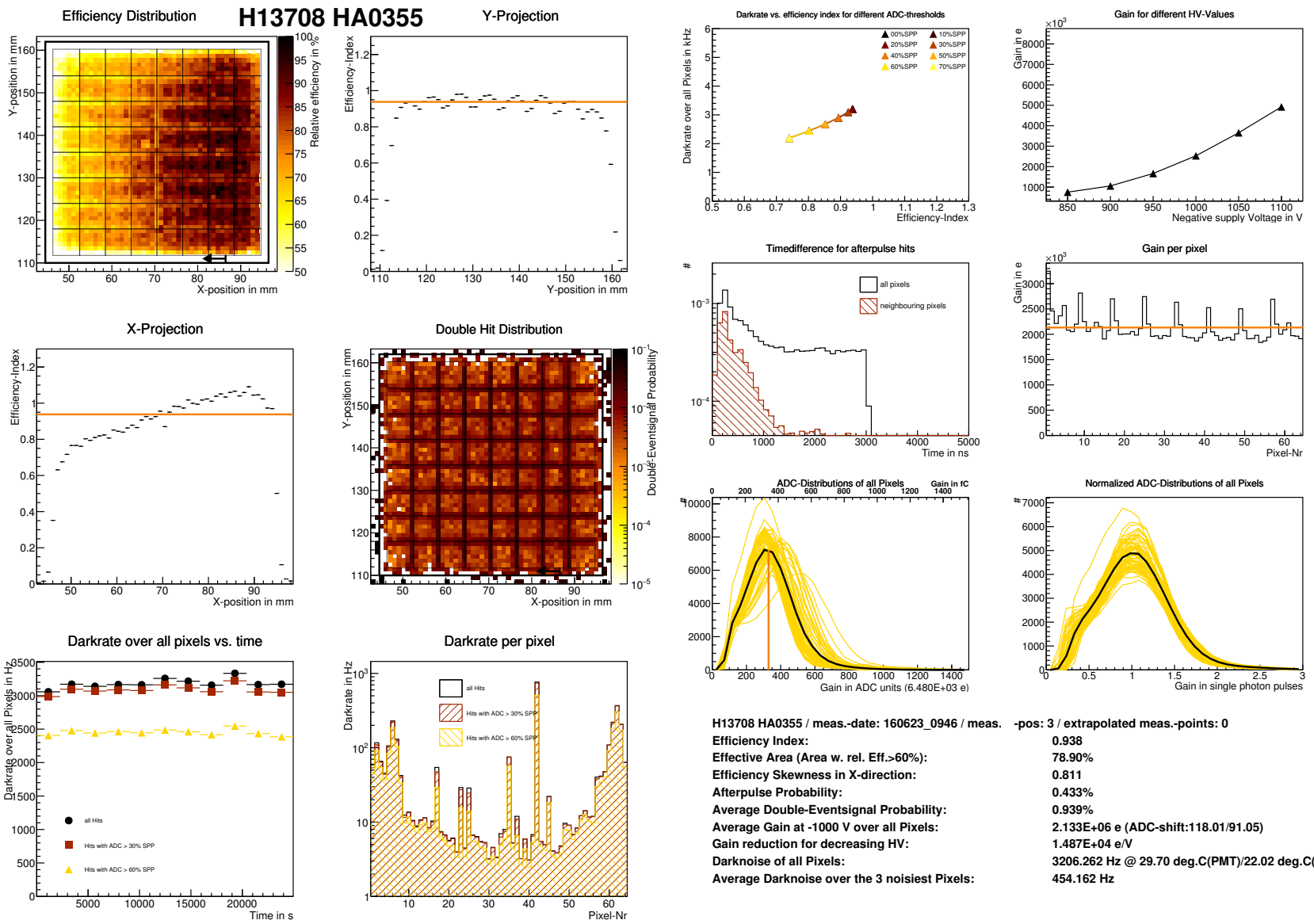


Abb. A.9 ♦ *Komplettes Informationsblatt, welches zu jedem vermessenen MAPMT von der Analyse ausgegeben wird. Hier am Beispiel des HA0355. Eine Erläuterung der einzelnen Graphiken findet sich in Abschnitt 6.1 .*

B Weitere Tabellen

Tabelle B.1 ♦ *Abweichung des der Achsenursprungs von der tatsächlichen "home"-Position nach 14 vollständigen Messungen. Hierzu wurde in* 0.1 *mm Schritten am Ende der Messung Richtung Endschalter gefahren und geschaut, wann der Endschalter auslöste. In Grau ist der Mittelwert der 14 gemessenen Werte gezeigt.*

	Abstand horizontale Achse in mm ±0.1 mm	Abstand vertikale Achse in mm ±0.1 mm
	-0.1	-0.1
	0.0	0.1
	-0.1	-0.1
	0.0	0.1
	0.0	-0.3
	0.0	-0.1
	0.0	-0.1
	0.0	-0.1
	0.0	-0.1
	0.0	0.1
	0.0	-0.1
	0.0	0.1
	0.0	-0.1
	0.0	-0.1
Mittelwert	-0.01	-0.05

Tabelle B.2 ♦ *Fitresultate der in Abb. A.4 und A.3 dargestellten Gaußfits an das jeweilige ADC-Spektrum, zur Bestimmung der Kalibration der ADC-Spektra. Fitresultate der Fits aus Abb. A.4 sind in Grau dargestellt.*

Peakhöhe in V ± 0.01 V	Ladung in e	χ^2/NDF	Fläche	Mean μ	Std.Abw. σ
-0.25	1250000 ± 135532.8028	$^{295}/_{80}$	8.01×10^5	2.02×10^2	9.99
-0.50	2500000 ± 256859.0324	$^{755}/_{71}$	9.40×10^5	3.91×10^2	1.21×10
-0.75	3750000 ± 381211.5759	$^{1243}/_{84}$	1.02×10^6	5.69×10^2	1.46×10
-1.00	5000000 ± 506365.7275	$^{1614}/_{89}$	1.31×10^6	7.31×10^2	2.10×10
-0.25	1250000 ± 135532.8028	$^{4002}/_{90}$	9.58×10^5	2.02×10^2	1.09×10
-0.50	2500000 ± 256859.0324	$^{1873}/_{79}$	9.41×10^5	3.94×10^2	1.21×10
-0.75	3750000 ± 381211.5759	$^{1878}/_{64}$	1.05×10^6	5.73×10^2	1.52×10
-1.00	5000000 ± 506365.7275	$^{3559}/_{95}$	1.34×10^6	7.35×10^2	2.28×10

Tabelle B.3 ♦ *Messwerte zur Bestimmung der Genauigkeit des "homings". Für diese Messung wurde aus verschiedenen Startpositionen die "home"-Position angefahren und gemessen wie stark diese schwankt. In Grau dargestellt ist die Standardabweichung der Messwerte.*

Startposition in mm $\pm 0.125\%$	horizontaler "homing"-offset in mm ± 0.01 mm	vertikaler "homing"-offset in mm ± 0.01 mm
10	0.02	-0.06
50	0.03	-0.07
100	0.03	-0.08
150	0.04	-0.10
200	0.02	-0.08
10	0.02	-0.10
50	0.03	-0.10
100	0.03	-0.10
150	0.04	-0.10
200	0.05	-0.10
std.dev. σ	0.010	0.015

C Verschiedene Messgrößen aller MAPMTs

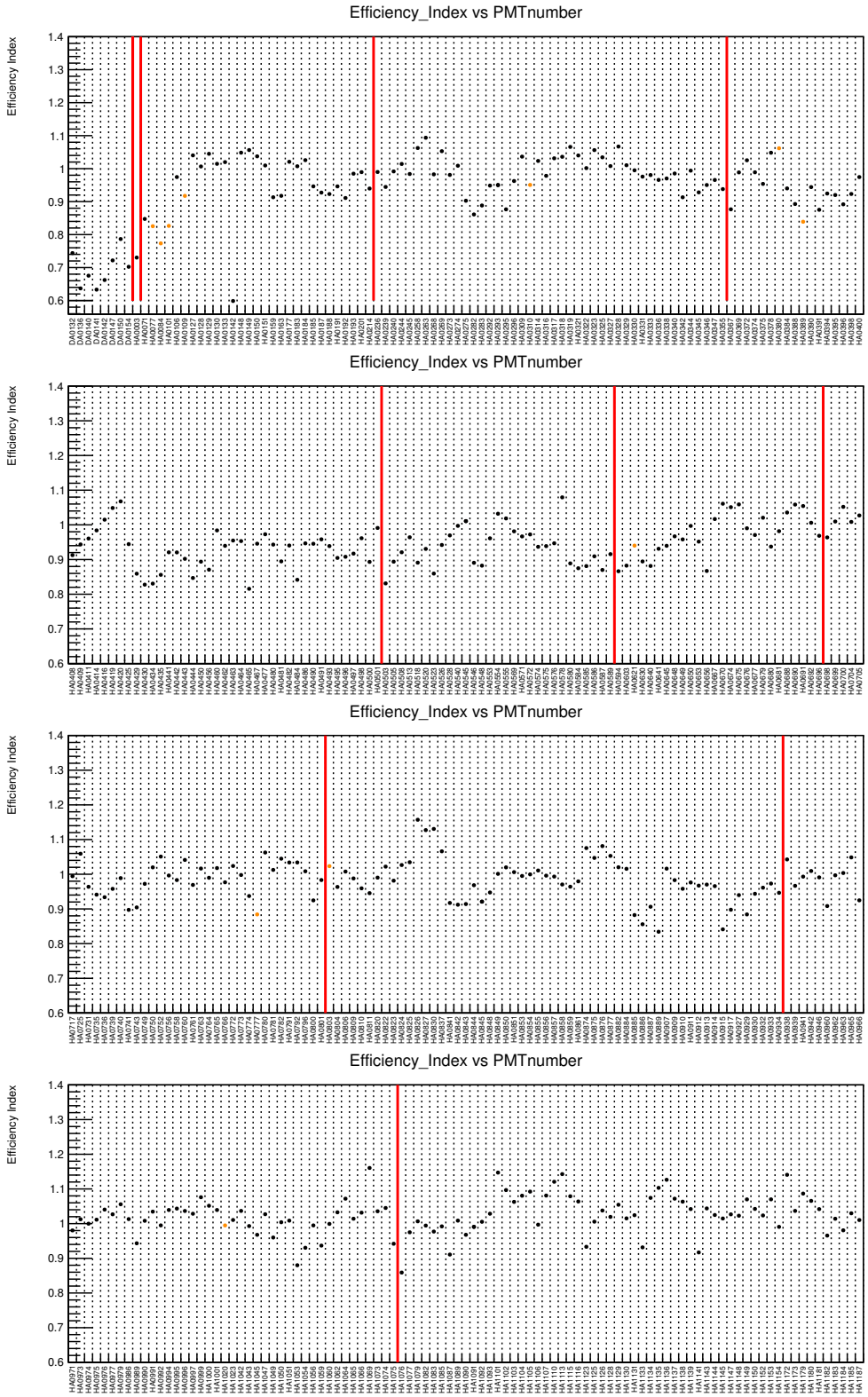


Abb. C.1 ♦ *Effizienzindex (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* -1100 *V vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

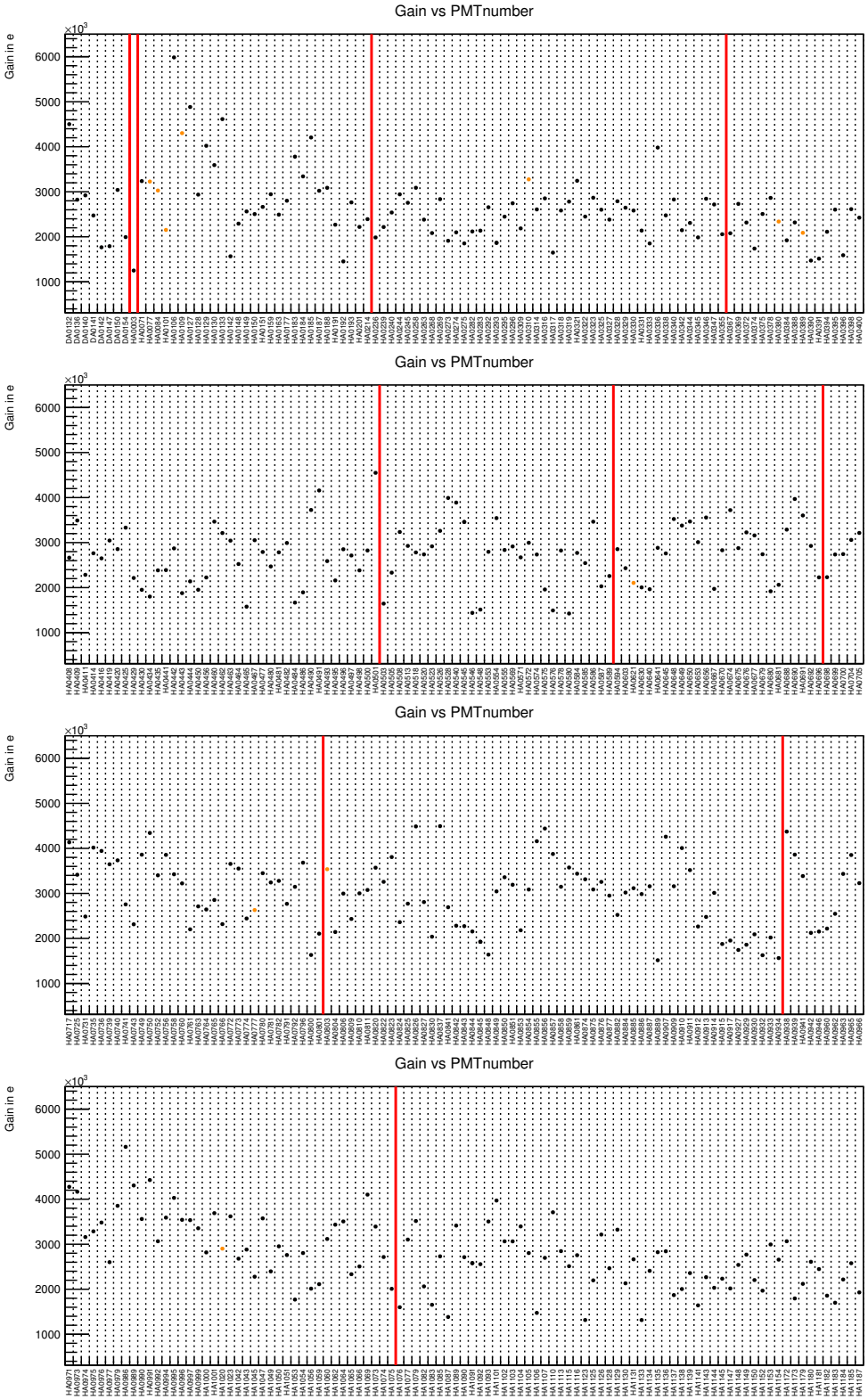


Abb. C.2 ♦ *Einzelelektronenvervielfachung (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* -1100 *V vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

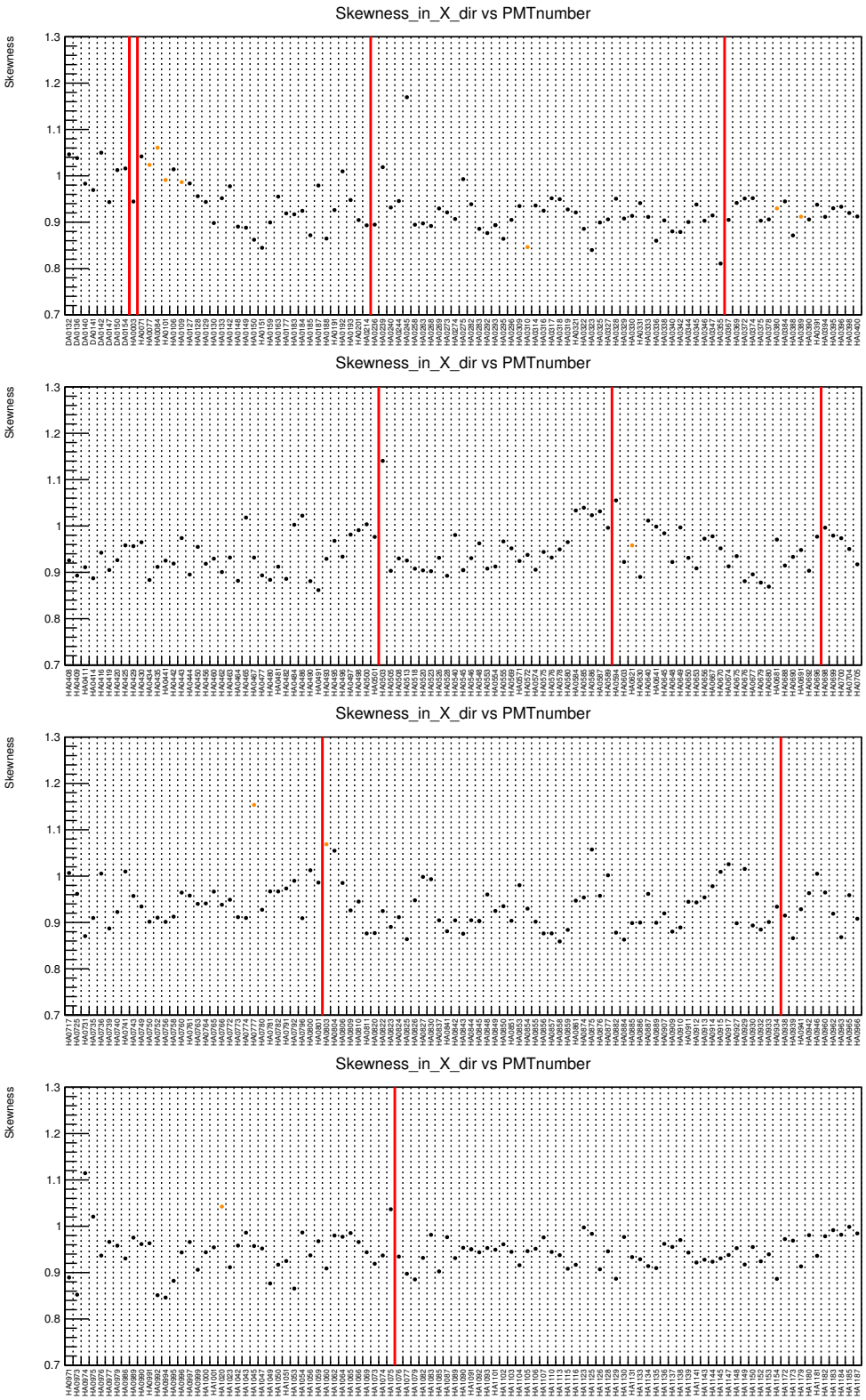


Abb. C.3 ♦ *"Schiefheit" (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* -1100 *V vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

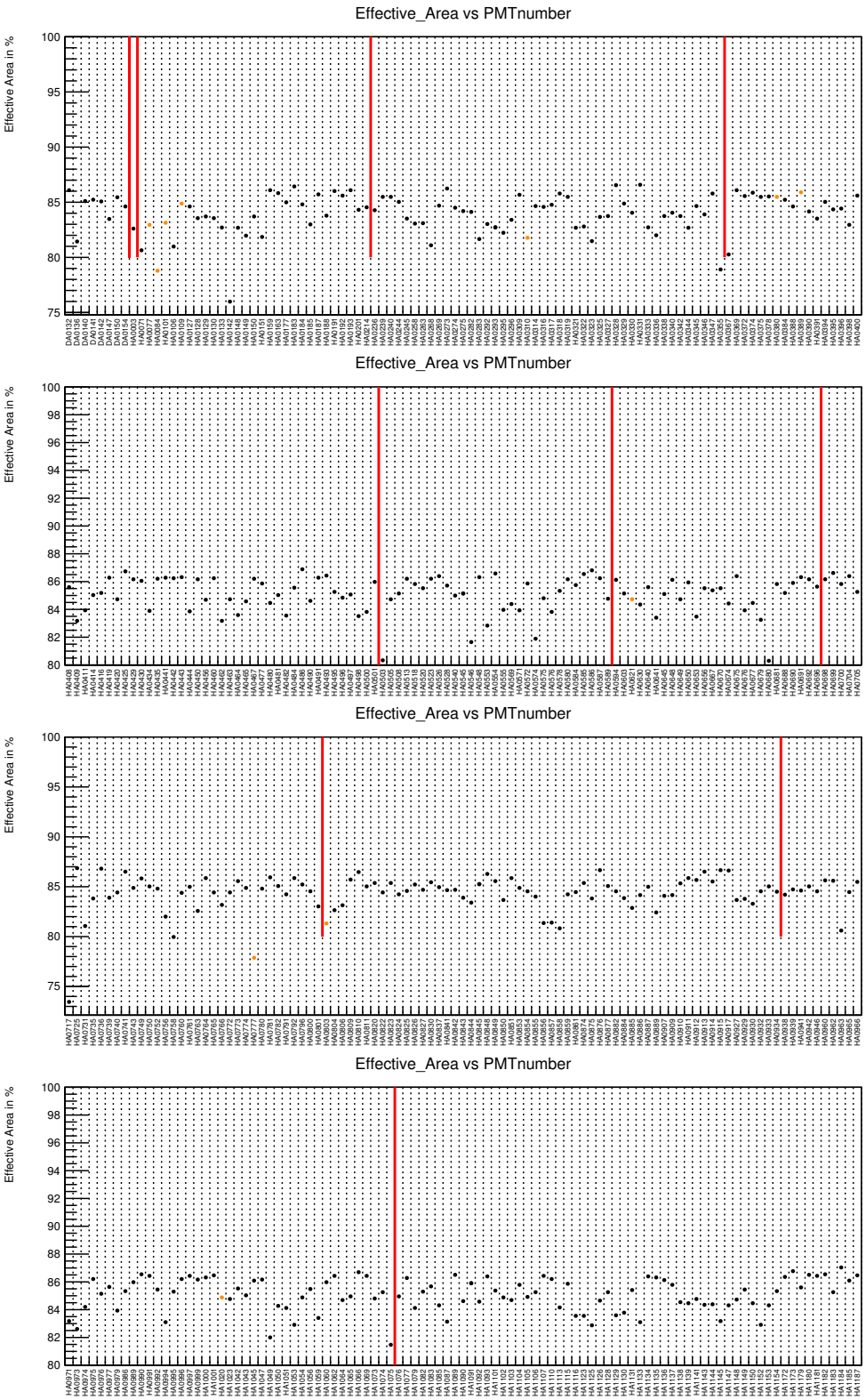


Abb. C.4 ♦ *Effektive Fläche (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* $-1100\,V$ *vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

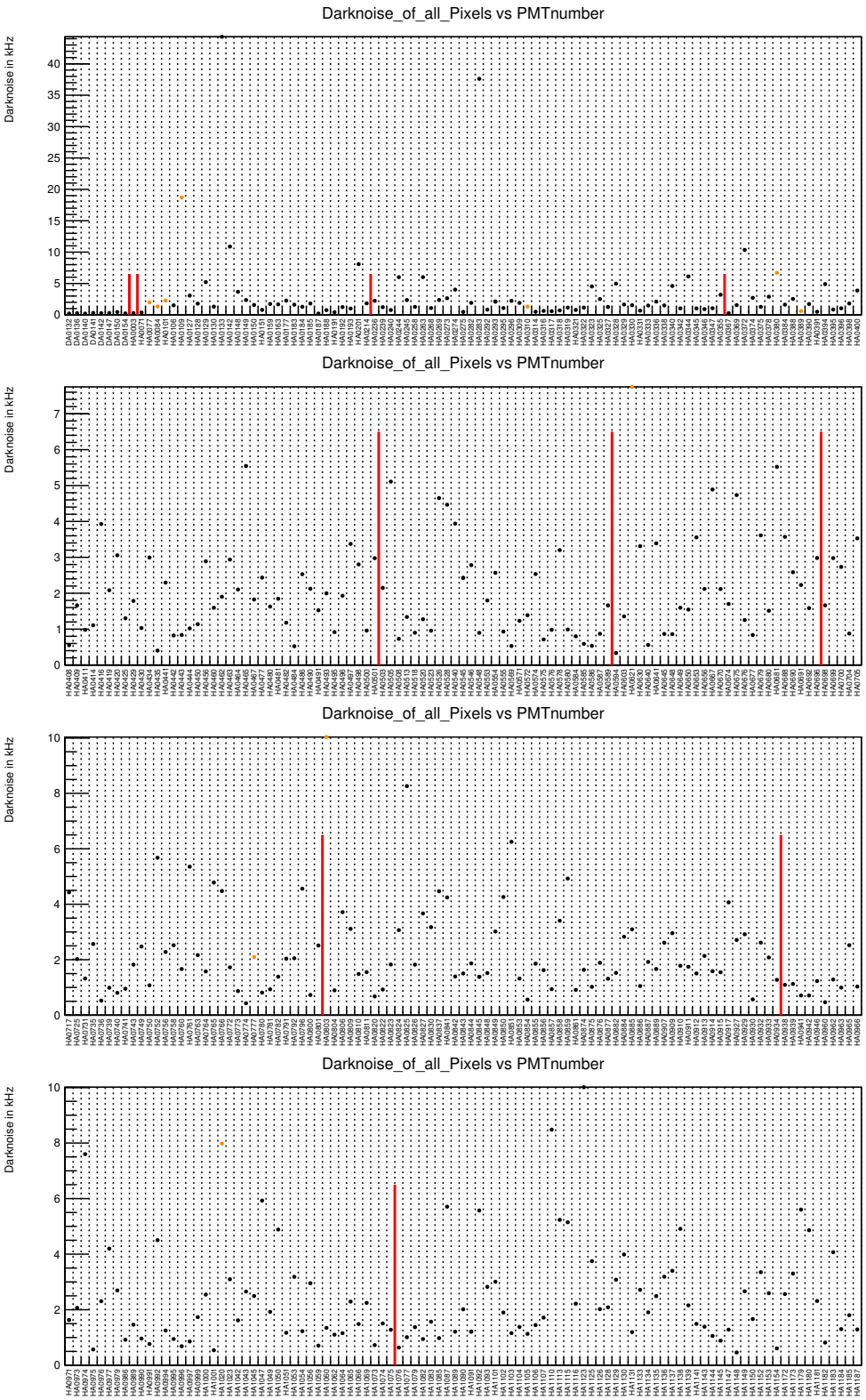


Abb. C.5 ♦ *Gesamtdunkelrate (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* $-1100\,V$ *vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

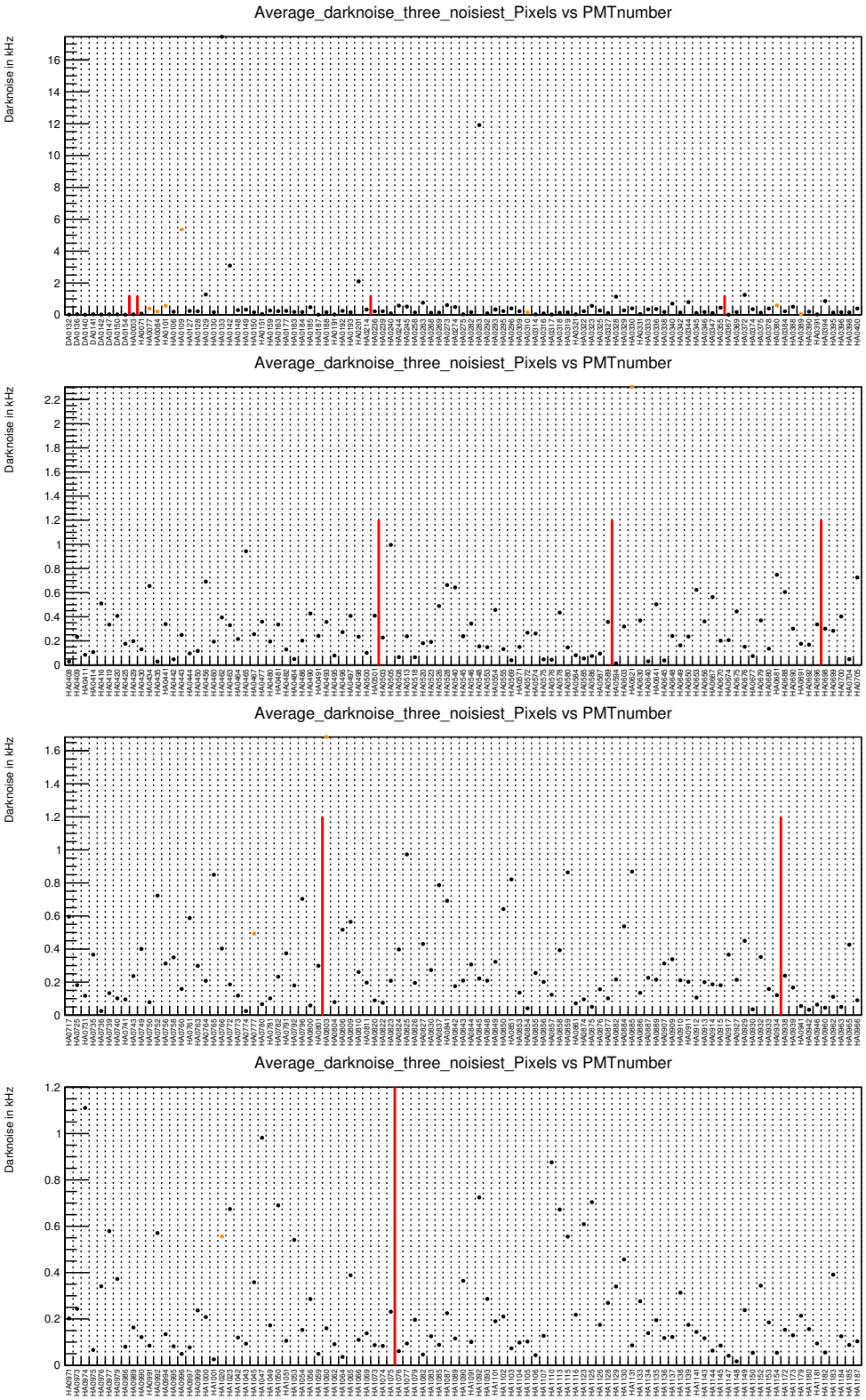


Abb. C.6 ♦ *Maximale gemittelte Dunkelrate dreier Pixel (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* $-1100\ V$ *vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

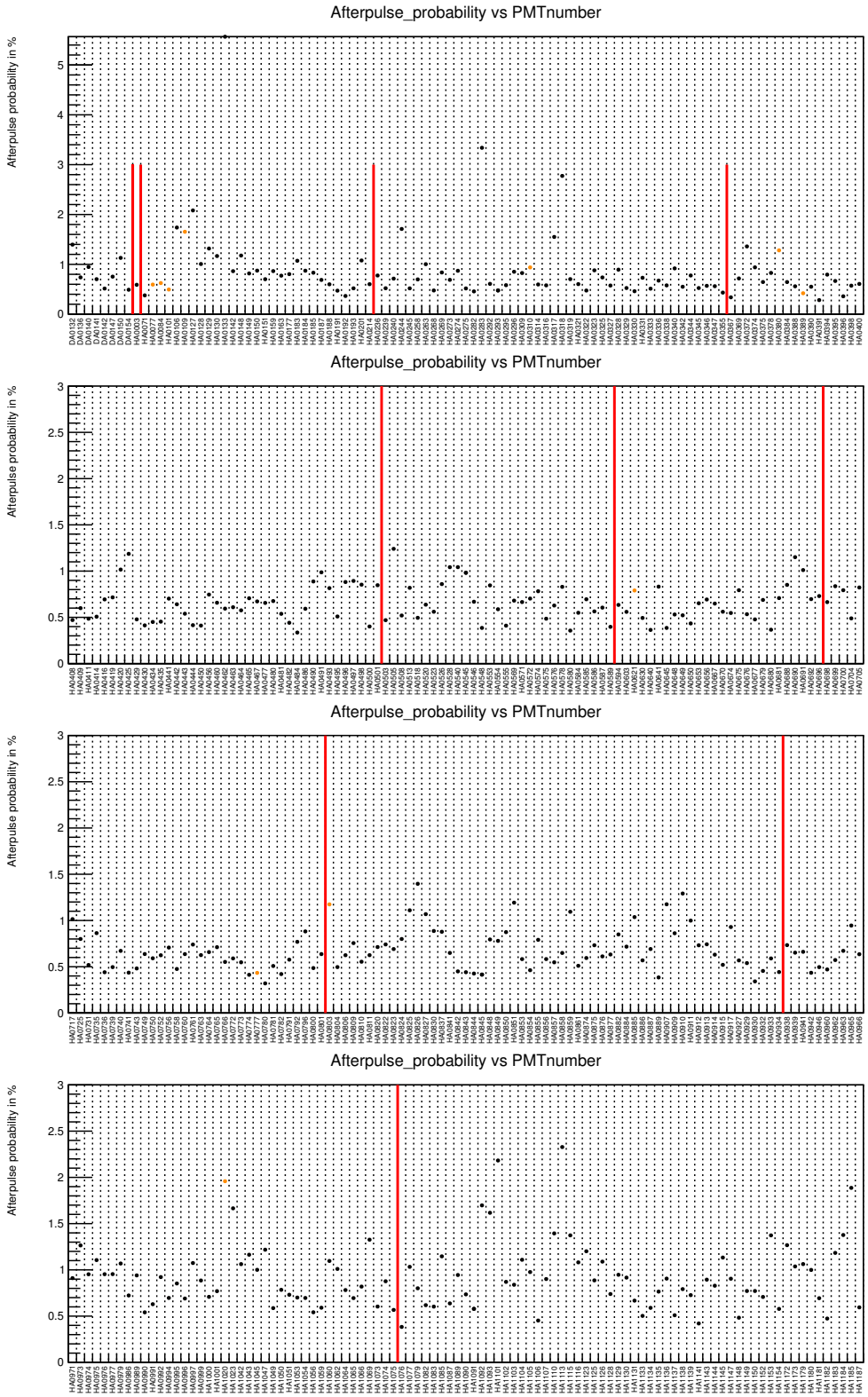


Abb. C.7 ♦ *Nachpulswahrscheinlichkeit (y-Achse) aufgetragen gegen ansteigende MAPMT-Seriennummer (x-Achse). Rote Linien deuten einzelne Lieferchargen an. Die Höhe der roten Linien spiegelt den Maximalwert lt. Kaufspezifikationen wieder. Orangene Punkte wurden bei einer Betriebsspannung von* -1100 *V vermessen. Gezeigt sind hier, aus Platzgründen, nur 400 der 408 gemessenen MAPMTs. MAPMTs mit einer Seriennummer DA**** sind H8500 MAPMTs.*

Literaturverzeichnis

[BBS+09] Brogna, A.S. ; Buzzetti, S. ; Schmidt, C.J. ; Dabrowski, W. ; Fiutowski, T. ; Szczygiea, T. ; Wiacek, P. ; Soltveit, H.K. ; Trunk, U. ; Schmidt, C.J. (Hrsg.) ; Hoehl, M. (Hrsg.): *The n-XYTER Reference Manual*. 1. https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Public/PublicNxyter/nXYTER.pdf, Dezember 2009

[CCC+15] Calvi, Marta ; Carniti, Paolo ; Cassina, Lorenzo ; Gotti, Claudio ; Maino, Matteo ; Matteuzzi, Clara ; Pessina, Gianluigi: Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and R12699-03 multi-anode photomultiplier tubes. In: *JINST* 10 (2015), Nr. 09, S. P09021. http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/09/P09021. – DOI 10.1088/1748–0221/10/09/P09021

[HAM07] HAMAMATSU PHOTONICS K. K. ; Hakamata, Toshikazu (Hrsg.): *PHOTOMULTIPLIER TUBES Basics and Applications*. 3a. Hamamatsu Photonics K.K. Electron Tube Division, 2007

[Pat16] Patel, Vivek: *Quanteneffizienzmessungen*. 2016. – Private Kommunikation vom 08.08.2016

[Rya16] Ryabov, Yury: *CBM RICH mechanical design*. https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=100&sessionId=12&resId=1&materialId=slides&confId=3620, April 2016

[Sch13] Schmid, Siegfried: *Geballte Ladung*. 2013. – Private Mail vom 08.01.2013

[ZEF+99] Zeitelhack, K. ; Elhardt, A. ; Friese, J. ; Gernhäuser, R. ; Homolka, J. ; Kastenmüller, A. ; Kienle, P. ; Körner, H.-J. ; Maier-Komor, P. ; Münch, M. ; Przygoda, W. ; Schön, W. ; Ulrich, A. ; Wieser, J. ; Hades Collaboration: The HADES RICH detector. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 433 (1999), August, S. 201–206. http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00371-X. – DOI 10.1016/S0168–9002(99)00371–X

Web-Referenzen

[Agi01] Agilent: *Agilent 33250A 80 MHz Waveform Generator User's Guide*. http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/33250-90002.pdf, 2001. – Eingesehen am 05.08.2016

[Ham11] Hamamatsu Photonics K.K.: *HAMAMATSU H8500 Datasheet*. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf, 2011. – Eingesehen am 08.08.2016

[Ham14] Hamamatsu Photonics K.K.: *HAMAMATSU H12700 Datasheet*. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf, 2014. – Eingesehen am 07.08.2016

[Ham16] Hamamatsu Photonics K.K.: *Photocathode technology*. https://www.hamamatsu.com/us/en/technology/innovation/photocathode/index.html, 2016. – Eingesehen am 07.08.2016

[IBZ16] IBZ Industrie AG: *811/21 NEXTEL VELVET COATING*. http://www.ibzagshop.ch/de_CH/e-shop/nextel-lackiersystem/lack/811-21-nextel-velvet-coating, 2016. – Eingesehen am 05.08.2016

[IGU15] IGUS: *igus Schrittmotoren*. http://www.igus.de/contentData/wpck/pdf/global/Motordatenblatt_DE.pdf, 2015. – Eingesehen am 07.08.2016

[LL03] LUCKY LIGHT, Wang: *5mm Round With Flange Type Blue LED Technical Data Sheet*. http://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A500/LL-504BC2E-B4-2GC.pdf, 2003. – Eingesehen am 05.08.2016

[Loi16] Loizeau, Pierre A.: *n-XYTER - Read-out ASIC for High Resolution Time and Amplitude Measurements*. https://cbm-wiki.gsi.de/cgi-bin/view/Public/PublicNxyter, 2016. – Eingesehen am 05.08.2016

[Tri14a] Trinamec: *TMCM351 Firmware-Manual*. http://www.trinamic.com/_scripts/download.php?file=_articles%2Fproducts%2Fmodules%2Ftmcm-351%2F_documentation%2FTMCM-351_TMCL_firmware_manual.pdf, 2014. – Eingesehen am 07.08.2016

[Tri14b] Trinamec: *TMCM351 Hardware-Manual*. http://www.trinamic.com/_scripts/download.php?file=_articles%2Fproducts%2Fmodules%2Ftmcm-351%2F_datasheet%2FTMCM-351_hardware_manual.pdf, 2014. – Eingesehen am 07.08.2016

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert bedanken. Nicht nur für die Möglichkeit der Arbeit an diesem Thema, sondern auch für seine immens große Hilfe in vielen anderen Bereichen.

Auch danken möchte ich Herr Prof. Dr. Christian Zeitnitz dafür, dass er sich als Zweitgutachter zur Verfügung gestellt hat.

Mein großer Dank gilt Dr. Christian Pauly. Er stand mir immer mit Rat und Tat zur Seite und erweitert meinen physikalischen Horizont täglich. Auch für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich ihm.

Ich danke Sven Querchfeld dafür, dass er für jegliche Hilfe in jeglichen Dingen immer Zeit fand. Im Speziellen danke ich ihm für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Weiter bedanke ich mich bei Dennis Pfeifer für seinen uneingeschränkten Einsatz bzgl. jeder Arbeit, bei der ich Hilfe brauchte. Speziell der, von ihm durchgeführte Bau des Teststandes machte diese Arbeit erst möglich.

Ich danke Vivek Patel für das Zurverfügungstellen der Quanteneffizienzmessungen und viele Interessante Gespräche. Ich danke Sascha Reinecke für die vielen Male, in denen er bei meinen ROOT-Fragen oder Wutausbrüchen Geduld zeigte. Ich danke Ievgenii "Levy" Kres dafür, dass mit ihm im Raum die Arbeit einfach doppelt so viel Spaß macht. Ich danke Dr. Julian Rautenberg für ein immer offenes Ohr bei Problemen und Fragen. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Karl-Heinz Becker, der zu jederzeit bereit war mir elektronische Geräte zu entleihen.

Ich bedanke mich bei Ruth für wundervolle Kaffeepausen und bei Stephanie für das Zurverfügungstellen ihres Büros.

Außerdem bedanke ich mich bei Jan, Sebastian, Uwe, Lukas, Jens, Norman, Philipp, Ingolf, Michael, Eric, David, Anna, Dennis, Frederik, Daniel, Daniel, Marvin und Simon für viele interessante Gespräche.

Ich danke Frau Prof. Dr. Claudia Höhne, Dr. Tariq Mahmoud und Jordan Bendarouach für die rege Teilnahme an den RICH-"SeeVogh"-Meetings.

Danken möchte ich Ingrid Schaarwächter für ihre Unterstützung bei jeglichen Formalia.

Außerdem gilt mein Dank meinen KommilitonInnen Katrin Jonuleit, Gunnar Jäkel, Sabrina Hintz, Alex Kääpä, Stepan Nassyr und Mirjam Lenz.

Vor allem aber danke ich meinen Eltern, die mir immer Rückhalt und Motivation in meinem Leben und zu dieser Arbeit gaben. Ohne sie wäre ich bei weitem nicht zu diesem Punkt in meinem Studium gekommen. Auch danke ich der großartigsten Schwester der Welt, Stefanie für anregende und unterstützende Gespräche.

Außerdem danke ich Patrick Süther, Yamine Bouchelaghem und Kevin Sabanovic für ihre Unterstützung.

Erklärung

Hiermit erkläre ich nach §14, Absatz 7 der Prüfungsordnung des Studiengangs Master Physik PO2013, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Wuppertal, 10.08.2016

(Jörg Förtsch)