Einsatz neuer Vorverstärkerelektronik im Flüssig-Argon-Kalorimeter des H1-Detektors am HERA-Speicherring

Diplomarbeit an der Fakultät für Physik
der
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Burkard Reisert

München
22. August 1997

Erstkorrektor: Prof. Dr. Christian Kiesling

Zweitkorrektor: Prof. Dr. Martin Faessler

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Elektron-Proton-Streuung 3

3 Beschleuniger und Detektor 6
- 3.1 Die Beschleuniger bei DESY 6
- 3.2 Der H1-Detektor 7
- 3.3 Das Flüssig-Argon-Kalorimeter 9
- 3.4 Das Triggersystem 11
  - 3.4.1 Anforderungen an den Trigger 11
  - 3.4.2 Realisierung des Triggers 11
- 3.5 Kalorimeter- und Trigger-Elektronik 15
  - 3.5.1 Signal-Auskopplung 15
  - 3.5.2 Signalverarbeitung im Trigger 15
  - 3.5.3 Signalweg in der Kalorimeter-Auslese 18
  - 3.5.4 Kalibrationssysteme 20

4 Verstärkung und Rauschen 21
- 4.1 Feldeffekt-Transistor 21
- 4.2 Das Modell des Weißen Rauschens 23
- 4.3 Diskussion der Rauschformel 25
- 4.4 Rauschverringerung am Vorverstärker 26

5 Messungen im Labor 29
- 5.1 Der Aufbau des Meßstands 29
- 5.2 Datenaquisition im Meßstand 31
- 5.3 Rauschverhalten des Meßstands 35
- 5.4 Test der Analogkarten 43

6 Messungen im Detektor 44
- 6.1 Trigger-Kalibrations-Programm TriCal 44
- 6.2 Rauschmessungen 45
- 6.3 AGM-Schwellenmessung 51
- 6.4 t0-Schwellenmessung 56

7 Zusammenfassung und Ausblick 59

Anhang

A Rauschen einer Trigger-Zelle **61**

B Durchführung der Labormessung **62**
B.1 Inbetriebnahme des Meßstands 62
B.2 Anleitung zur Datennahme 64
B.3 Datenaufbereitung und Analyse 64

C Ergänzungen zu TriCal **71**
C.1 TriCal-Request 71
C.2 TriCal-Steeringfile 72
C.3 Überwachung eines TriCal-runs 73
C.4 θ-ϕ-Karten der AGM- und t0-Schwellen 73

1 Einleitung

Woraus besteht die Welt? Was hält sie im Innersten zusammen? Diese Fragen haben die Menschheit seit ihren Anfängen beschäftigt. Um Antworten näherzukommen, schaffen moderne Naturwissenschaften, insbesondere die Physik, in Experimenten kontrollierte Bedingungen, unter denen genau zu beobachtende Vorgänge ablaufen sollen. Ziel ist es, aus den Beobachtungen Gesetze abzuleiten, welche die Beobachtungen in geordneter Weise zusammenfassen, komplizierte Erscheinungen auf einfachere zurückführen und quantitative Voraussagen über physikalische Vorgänge ermöglichen [1].

Fast alles, was wir über die Struktur der Materie im subatomaren Bereich wissen, verdanken wir Streuexperimenten mit hochenergetischen Teilchen. Ernest Rutherford lenkte 1910 α-Strahlung mit einer Energie von einigen MeV auf Goldfolien [2]. Aus der Winkelverteilung der gestreuten α-Teilchen, die er mit Szintillatorzählern nachwies, schloß er auf den Aufbau der Goldatome: Eine diffuse Wolke von Elektronen umgibt einen positiv geladenen Kern, in dem fast die gesamte Masse des Atoms konzentriert ist. Die inelastische Streuung von α-Teilchen an leichteren Kernen führte James Chadwick 1932 zur Entdeckung des Neutrons, des neutralen Bindungspartners des Protons im Atomkern [3].

In den folgenden Jahrzehnten ermöglichte die Steigerung der Energie der Projektile stetig einen tieferen Einblick in den Mikrokosmos der subatomaren Teilchen. Höhere Energien - genauer höhere Impulse im Schwerpunktsystem - entsprechen nämlich nach der Gleichung von de Broglie ($\lambda = h/p$) kürzeren Wellenlängen und somit besserem Auflösungsvermögen. 1956 fand R. Hofstadter aus Streuversuchen von 400 MeV Elektronen an ruhenden Protonen und Deuteronen heraus, daß die Protonen bei der verfügbaren Auflösung nicht mehr als punktförmige Teilchen erscheinen, sondern eine Ausdehnung von etwa $0,8 \cdot 10^{-15}$ m haben [4]. In Kollisionen, bei denen Protonen und Antiprotonen mit Energien von jeweils einigen 100 GeV frontal aufeinander treffen, wurden anfangs der 80er Jahre bei CERN und Fermilab die schweren Eichbosonen, $W^{\pm}$ und Z^0, der elektroschwachen Wechselwirkung gefunden [5].

Zur Untersuchung der Kollisionen benötigt man aufwendige Nachweisgeräte („Detektoren“). Diese Detektoren erfassen nicht nur die Richtung der Teilchen aus den Kollisionen, sondern messen auch deren Energien, Impulse und Ladungen. Moderne Hochenergie-Experimente können längst nicht mehr von einzelnen Forscherteams durchgeführt werden. Internationale Kollaborationen sind an deren Stelle getreten. Bis zur Inbetriebnahme der Beschleuniger und der Detektoren sind für Planung und Aufbau dieser technischen Voraussetzungen für Hochenergie-Experimente mehrere Jahre anzusetzen.

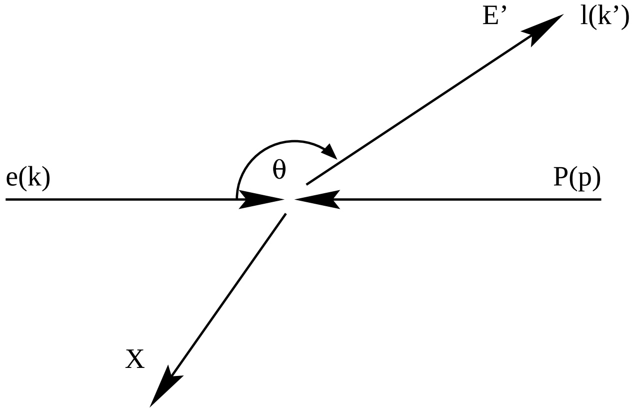
Diese Experimente haben typischerweise Laufzeiten von ebenfalls mehreren Jahren. Physikalisch aufschlußreiche Kollisionen werden mit steigenden Energien zunehmend seltener: Die Wirkungsquerschnitte, ein Maß für die Häufigkeit mit der bestimmte Reaktionen auftreten, nehmen für Kollisionen von punktförmigen Streupartnern mit dem Quadrat der Schwerpunktsenergie ab.
Während der langen Aufbau- und Betriebsphase werden nicht selten Fortschritte in der Detektortechnologie erzielt. Diese Verbesserungen in bestehende Anlagen zu integrieren, trägt wesentlich zur Steigerung der Meßgenauigkeit und Nachweisempfindlichkeit bei.
An der Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA am Deutschen Elektronen SYnchrotron DESY werden Kollisionen von Protonen und Elektronen bzw. Positronen bei der höchsten bisher erzielten Energien im Schwerpunktsystem von 300 GeV untersucht. Eines der Nachweisgeräte, mit denen diese Kollisionen vermessen werden, ist der H1-Detektor. Neuentwickelte Halbleitertransistoren ermöglichen es, die Elektronik des Flüssig-Argon-Kalorimeters, eine der Hauptkomponenten des H1-Detektors, zu verbessern. Wichtige Grundlagen für erfolgreiche Umrüstung und Einsatz der Elektronik zu erarbeiten, ist Gegenstand dieser Arbeit.

Kapitel 2 stellt die Reaktionen vor, die bei der Untersuchung von e-p-Kollisionen bei HERA von besonderem Interesse sind. In Kapitel 3 werden Beschleuniger und Detektor beschrieben, die die technischen Voraussetzungen für diese Untersuchungen sind. Kapitel 4 zeigt die Verbesserungen an der Kalorimeterelektronik auf. Tests der Kalorimeterelektronik im Labor werden in Kapitel 5 beschrieben. Kapitel 6 stellt das Kalibrationsprogramm vor, mit dem wichtige Daten zur Anpassung des Flüssig-Argon-Triggers an die neue Elektronik erarbeitet werden.

2 Elektron-Proton-Streuung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten physikalischen Prozesse bei der Streuung von Elektronen an Protonen vorgestellt, die Forschungsgegenstand des H1-Experiments bei HERA ist [6].

Die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Protonen wird im Standardmodell der Teilchenphysik durch den Austausch elektroschwacher Bosonen vermittelt. Es können zwei grundsätzlich verschiedene Reaktionen auftreten: Wird ein ungeladenes Teilchen (γ oder Z^0) ausgetauscht, liegt ein Ereignis des ungeladenen Stroms (engl. neutral current: NC) vor. Wird dagegen ein geladenes W^+- oder W^--Teilchen ausgetauscht, spricht man vom geladenen Strom (engl. charged current : CC).



e einlaufendes Elektron
P einlaufendes Proton
l auslaufendes Lepton
X hadronischer Endzustand
(P, Resonanzen, Jets)
θ Streuwinkel
E' Energie des auslaufenden Leptons

Abbildung 2.1: *Elektron-Proton-Streuung.*

Die Kinematik eines Elektron-Proton-Streuprozesses (Abb. 2.1) kann durch zwei Parameter beschrieben werden. Bei Hochenergie-Streuexperimenten sind dies üblicherweise das Quadrat des Viererimpulsübertrags Q^2 und die dimensionslose Bjorken'sche Skalenvariable x. Im Rahmen des Parton-Modells beschreibt x den Impulsanteil des wechselwirkenden Partons am Gesamtimpuls des Protons [7].

Neutraler Strom

Als Ereignisse des neutralen Stroms bezeichnet man Streuprozesse bei denen das einlaufende Lepton, in Abbildung 2.2 ein Elektron, erhalten bleibt: Zwischen Lepton und Proton wird keine Ladung ausgetauscht. Das gestreute Lepton wird zusammen mit den Hadronenjets im Detektor nachgewiesen. NC-Ereignisse zeichnen sich dadurch aus, daß der nachgewiesene transversale Impuls balanciert ist.

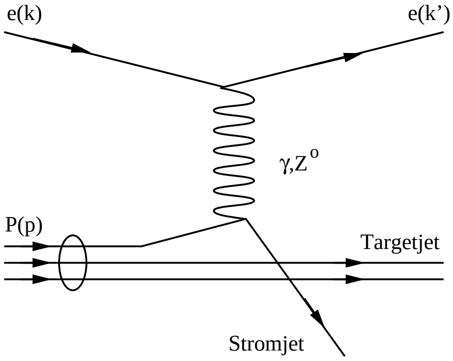


Abbildung 2.2: *Feynman-Graph eines Ereignisses des neutralen Stroms.*

Geladener Strom

Abbildung 2.3 zeigt den Feynman-Graph eines Ereignisses des geladenen Stroms. Charakteristisch für den Endzustand dieser Ereignisse ist, daß das Elektron durch den Austausch eines geladenen Bosons in ein Neutrino umgewandelt wird. Dieses Neutrino verläßt den Detektor ohne weitere Wechselwirkung und kann daher nicht direkt nachgewiesen werden. Im Detektor wird nur der hadronische Endzustand registriert. Das „fehlende“ Neutrino wird indirekt über den nicht balancierten transversalen Impuls nachgewiesen.

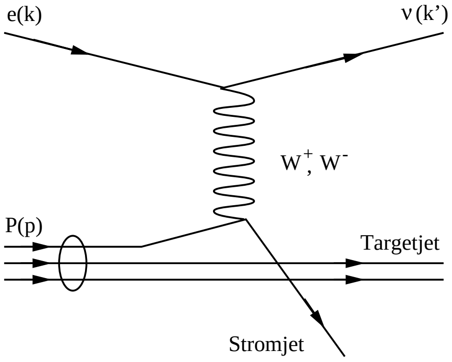


Abbildung 2.3: *Feynman-Graph eines Ereignisses des geladenen Stroms.*

Boson-Gluon-Fusion

Bei der Boson-Gluon-Fusion wechselwirkt das elektroschwache Boson mit den ungeladenen Konstituenten des Proton, den Gluonen. Das Gluon wird virtuell vom Proton abgestrahlt und ist über ein Quark-Antiquark-Paar an das elektroschwache Boson gekoppelt. Neben der bevorzugten Produktion von leichten Quarks (u,d,s) werden auch schwere Quarks (c,b)[1] erzeugt. Quark und Antiquark können in einem Meson aneinander gebunden sein oder als Konstituenten von Hadronenpaaren mit entgegengesetzten Flavorquantenzahlen auftreten. Gebunden in Hadronen zerfallen schwere Quarks innerhalb kürzester Zeit und können nur indirekt über ihre Zerfallsprodukte nachgewiesen werden. Abbildung 2.4 verdeutlicht dies für Erzeugung und Zerfall des J/Ψ-Mesons.

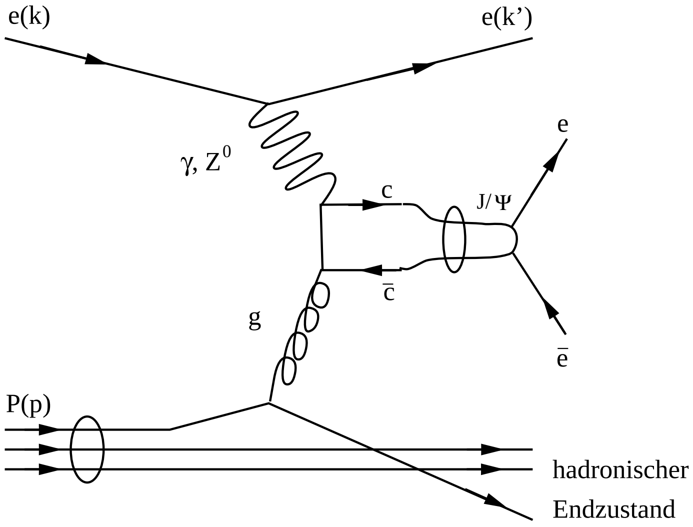


Abbildung 2.4: *Feynman-Graph einer Quark-Antiquark Erzeugung.*

Bei all diesen Reaktionen sind Flüssig-Argon-Trigger-Elemente von zentraler Bedeutung. Bei NC-Ereignissen erkennt der Elektrontrigger die Energiedeposition des gestreuten Elektrons im Kalorimeter. Das Triggern von CC-Ereignissen erfolgt über die fehlende transversale Energie (missing E_T). Der Big-Ray-Trigger (BR) korreliert Teilchenspuren mit lokalen Energiedepositionen im Kalorimeter und ermöglicht so das Triggern des oben gezeigten J/Ψ-Ereignisses.

---

[1] Die Schwerpunktsenergie bei HERA (Seite 7) von 300 GeV reicht nicht aus um t-$\bar{t}$-Paare zu erzeugen.

3 Beschleuniger und Detektor

3.1 Die Beschleuniger bei DESY

Die Stiftung Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) betreibt seit ihrer Gründung 1959 in den Hamburger Labors intensiv Forschung auf dem Gebiet der Hochenergie- und Beschleunigerphysik. In bereits mehr als 30 Jahren wurden an Linearbeschleunigern (LINACs), Kreisbeschleunigern (DESY I-III) und Speicherringen (DORIS und PETRA) grundlegende, wichtige physikalische Erkenntnisse gewonnen. 1992 wurde mit HERA die erste und bislang weltweit einzige Elektron/Positron-Protonkollisionsmaschine in den Dienst der Forschung gestellt. Nach anfänglichen Experimenten mit Elektronen werden gegenwärtig Positronen als leptonische Projektile verwendet [8]. Die bestehenden Beschleuniger, Labors und wissenschaftlichen Einrichtungen werden als Infrastruktur für HERA weiter verwendet.
Abbildung 3.1 zeigt einen schematischen Überblick über den Speicherring und seine Vorbeschleuniger, deren Status im folgenden kurz erläutert wird[9].

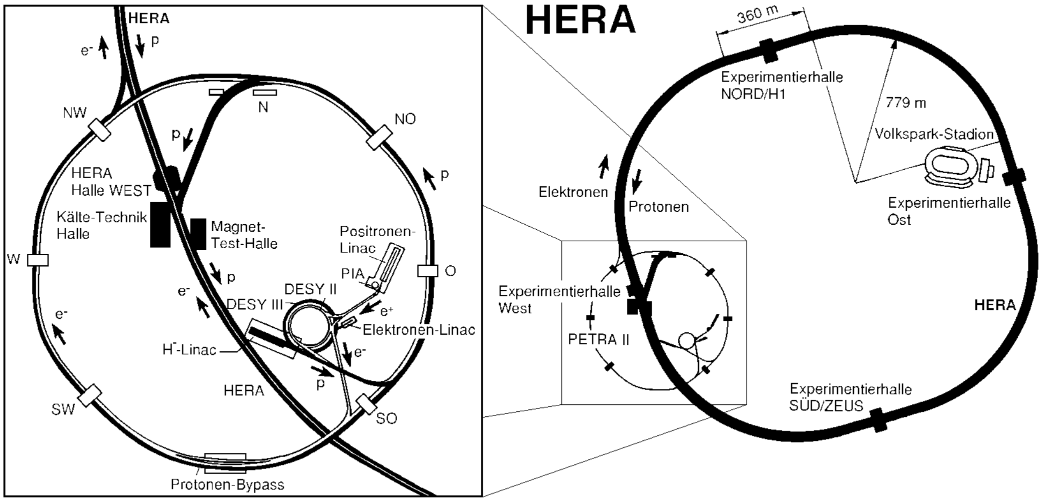


Abbildung 3.1: *Der HERA Speicherring (rechts) mit der Vorbeschleunigerkaskade in der Ausschnittsvergrößerung (links).*

Vorbeschleuniger für HERA

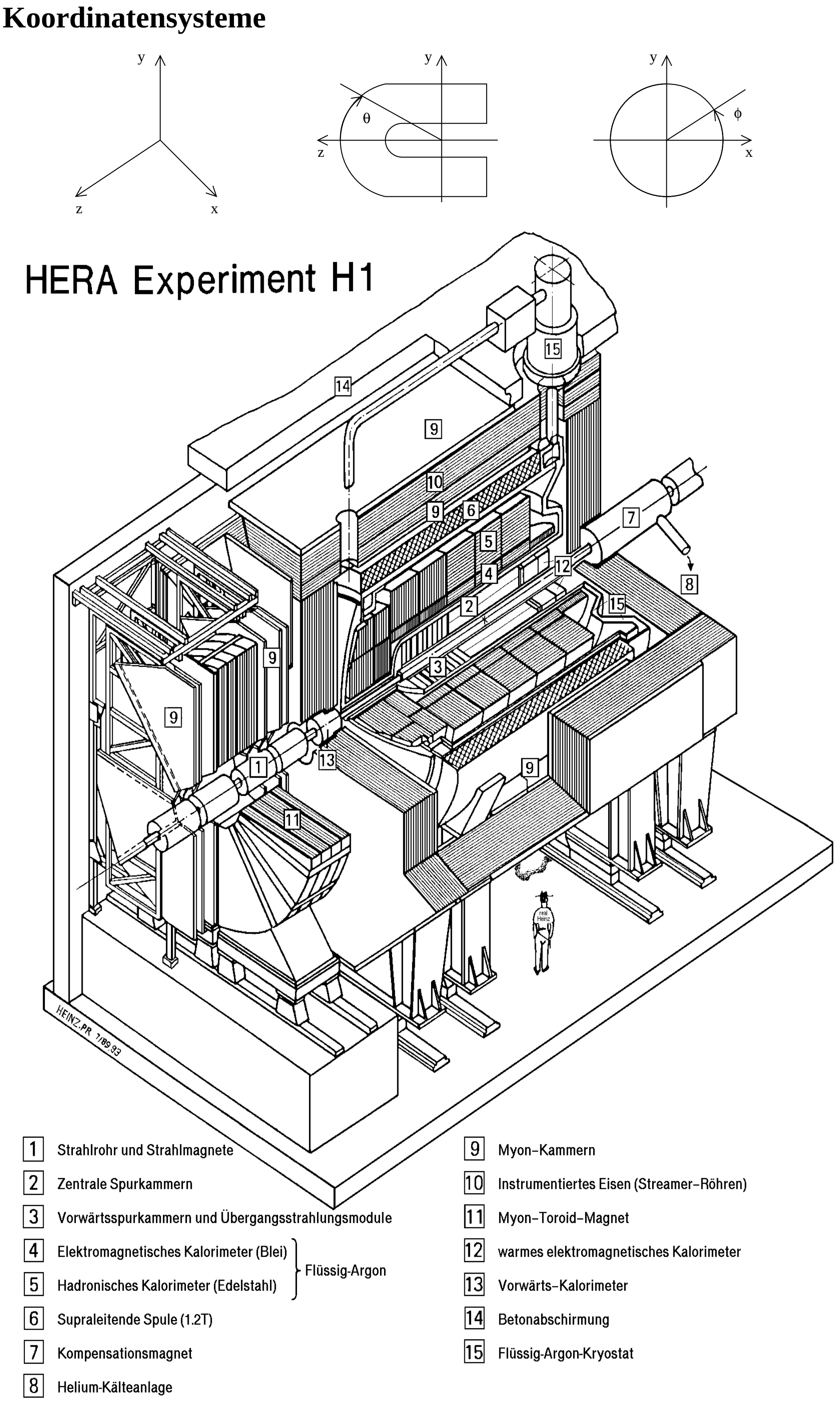
Die Positronen werden von einem 500-MeV-Linearbeschleuniger (LINAC) in einen kleinen Speicherring (Positronen-Intensitäts-Akkumulator PIA) injiziert und dort zu einem 60-mA-Bündel angesammelt. Dann werden sie zu DESY II weitergeleitet, wo sie auf 7 GeV beschleunigt und an PETRA II weitergereicht werden. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis PETRA II mit 70 Bündeln angefüllt ist, die nach HERA überführt werden.
Die Protonen werden zunächst als H^--Ionen in einem 50-MeV-LINAC vorbeschleunigt. Bei der Injektion in DESY III werden beide Elektronen von einer *Stripperfolie* abgestreift. DESY III faßt die Protonen in 11 Abschnitten (*buckets*) zusammen, beschleunigt sie auf 7.5 GeV und übergibt sie an PETRA II. Nach Ansammlung der maximalen Zahl von 70 Bündeln werden diese auf eine Energie von 40 GeV gebracht und nach HERA extrahiert.

Die HERA-Speicherringe

In den Heratunnel, der mit einer Länge von 6,3 km in einer Tiefe von 10 bis 15 m unter der Stadt Hamburg liegt, sind übereinander die beiden Speicherringe für Positronen und Protonen eingebaut. Für die Strahlführung der Positronen werden herkömmliche Dipolmagnete verwendet, die ein Magnetfeld von 0,165 T erzeugen. Teilweise supraleitende Hohlraumresonatoren, die mit einer Frequenz von 500 MHz betrieben werden, liefern eine Leistung von 13,2 MW. Sie dient der Beschleunigung von 7 auf 27,5 GeV und vor allem zum Ausgleich der Synchrotronstrahlungsverluste.
Um die Protonen auch bei ihrer endgültigen Energie von 820 GeV auf ihrer Bahn zu halten, werden wesentlich stärkere Führungsfelder von 4,68 T benötigt. Diese werden von supraleitenden Magneten erzeugt, die durch Heliumkühlung auf einer Betriebstemperatur von 4,4 K gehalten werden.
In beiden Speicherringen können jeweils maximal 210 Teilchenbündel umlaufen, gegenwärtig werden 196 Bündel (*buckets*) gefüllt. Diese werden nach Beendigung der Beschleunigung in zwei Experimentierhallen aufeinander gelenkt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Bündeldurchdringungen (*bunch crossing, BC*) beträgt 96 ns.

3.2 Der H1-Detektor

In der nördlichen Experimentierhalle des Heratunnels befindet sich der H1-Detektor [10]. Er ist zum Nachweis hochenergetischer Teilchenkollisionen auf die präzise Vermessung von Elektronen und Hadronen optimiert. Als Anpassung an die erwartete Verteilung der aus der Kollision auslaufenden Teilchen ergibt sich der asymmetrische Aufbau entlang der Strahlachse, wie er in Abbildung 3.2 zu sehen ist. Die innerhalb der H1-Kollaboration verwendeten Koordinaten sind ebenfalls dort zu entnehmen.



1	Strahlrohr und Strahlmagnete	
2	Zentrale Spurkammern	
3	Vorwärtsspurkammern und Übergangsstrahlungsmodule	
4	Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)	Flüssig-Argon
5	Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)	
6	Supraleitende Spule (1.2T)	
7	Kompensationsmagnet	
8	Helium-Kälteanlage	
9	Myon–Kammern	
10	Instrumentiertes Eisen (Streamer–Röhren)	
11	Myon–Toroid–Magnet	
12	warmes elektromagnetisches Kalorimeter	
13	Vorwärts–Kalorimeter	
14	Betonabschirmung	
15	Flüssig-Argon-Kryostat	

Abbildung 3.2: *Schematische Ansicht des H1-Detektors.*

Um das Strahlrohr $\boxed{1}$ aus kohlefaserverstärktem Aluminium ist ein Vertexdetektor in Siliziumstreifen-Technik aufgebaut. Wechselwirkungszone und Vertexdetektor sind von zylindrischen Spurkammern $\boxed{2}$ umgeben, die in Vorwärtsrichtung[1] durch zusätzliche Spurkammern radialer Ausrichtung $\boxed{3}$ ergänzt werden.
Die Systeme zur Spurerkennung sind von elektromagnetischen und hadronischen Kalorimetern zur Energiemessung und Teilchenidentifikation umschlossen. Den größten Winkelbereich, $4° < \theta < 153°$, deckt ein feinsegmentiertes Flüssig-Argon-Kalorimeter ($\boxed{4}$ und $\boxed{5}$) ab, das in Abschnitt 3.3 eingehender beschrieben wird. In Rückwärtsrichtung, $151° < \theta < 176°$, ist ein andersartiges Kalorimeter im Einsatz, das nach der Anordnung der aktiven Szintillator- und der absorbierenden Bleielemente als Spaghettikalorimeter (SPACAL) $\boxed{12}$ bezeichnet wird. Den extremen Vorwärtsbereich, $0,6° < \theta < 3,5°$, deckt ein Kupfer-Silizium-Kalorimeter (PLUG) $\boxed{13}$ ab. Zur Beobachtung noch kleinerer Ablenkwinkel der Protonen und Positronen werden Luminositätsdetektoren (für Elektronen und Positronen) und sogenannte Roman Pots (für Protonen) verwendet, die in bis zu 100 m Entfernung vom Wechselwirkungspunkt aufgebaut sind.
Spurkammern und Kalorimeter sind von einer supraleitenden Solenoid-Spule $\boxed{6}$ umgeben. Das so erzeugte Magnetfeld von 1,15 T besitzt ausreichend Biegekraft, um durch Krümmung der Spuren eine Impulsbestimmung bis zu Transversalimpulsen von 50 GeV/c zu ermöglichen. Das eiserne Rückflußjoch des Magneten ist mit Streamer-Röhren $\boxed{10}$ instrumentiert, die der Energiemessung aus den Kalorimetern herausleckender hadronischer Schauer und der Myonidentifikation dienen. Myonkammern $\boxed{9}$ mit eigenem Toroidmagnetfeld $\boxed{11}$ schließen den Detektor in Vorwärtsrichtung ab.

3.3 Das Flüssig-Argon-Kalorimeter

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter ist ein Schichtkalorimeter. Als aktives Medium dient flüssiges Argon bei einer Betriebstemperatur von 90,2 K. Zur genauen Energiemessung elektromagnetisch und stark wechselwirkender Teilchen ist es in einen inneren elektromagnetischen und einen äußeren hadronischen Teil unterteilt. Im elektromagnetischen Teil dienen 2,4 mm starke Bleiplatten als Absorber, die Dicke der dazwischenliegenden Argonschicht beträgt 2,35 mm. Zum Abstoppen hadronischer Schauer werden 16 mm starke Edelstahlplatten verwendet, die Argonschicht ist hier 2,4 mm dick [11].
Primäre Teilchen aus den Reaktionen am Wechselwirkungspunkt erzeugen in den Absorberplatten im wesentlichen durch Bremsstrahlung und Paarbildung sekundäre Teilchenschauer, die das flüssige Argon ionisieren. Die freigesetzten Elektronen werden nach dem Prinzip der Ionisationskammer von Ausleseflächen aufgesammelt. In den Auslesezellen (GP: geometric pads) wird nur

---

[1] Als Vorwärtsrichtung wird im folgenden die Richtung des einlaufenden Protonenstrahls bezeichnet.

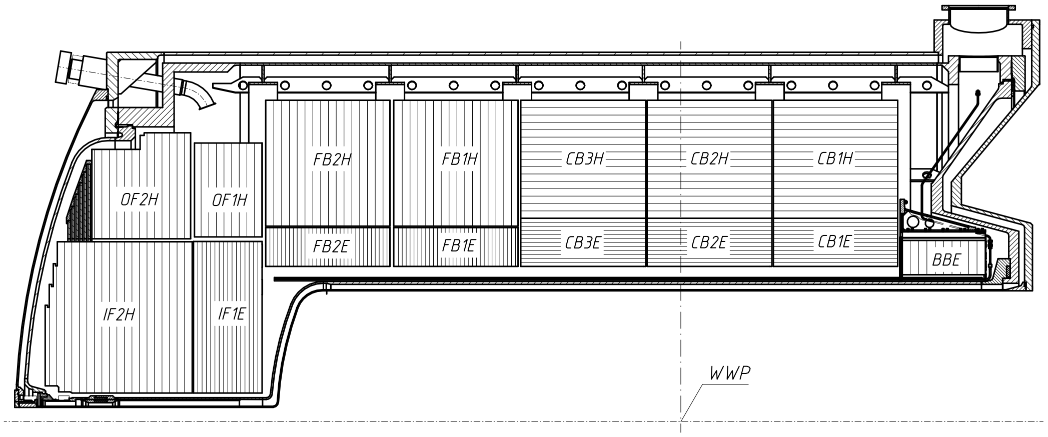


Abbildung 3.3: *Schematischer Längsschnitt durch das Flüssig-Argon-Kalorimeter. Zu sehen ist die Ausrichtung der Absorberplatten gegen den nominellen Wechselwirkungspunkt (WWP).*

die im aktiven Medium deponierte Energie als Stichprobe des Gesamtschauers registriert. Die Energieauflösung des Kalorimeters ist durch die statistischen Schwankungen der Stichprobe dominiert. Für die Energieauflösung gilt daher:

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \tag{3.1}$$

Die Energieauflösung sollte möglichst unabhängig von der Richtung der vom Wechselwirkungspunkt kommenden Teilchen sein. Dazu ist es notwendig, daß alle Teilchen unter möglichst großen Winkeln auf die Absorberplatten treffen. Die im Längsschnitt des Kalorimeters (Abb. 3.3) gezeigte Anordnung entspricht weitgehend dieser Anforderung. Im Zentralteil ist die Schichtung des Kalorimeters parallel zur Strahlachse, im Vorwärts- und extremen Rückwärtsbereich senkrecht ausgerichtet.

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter ist ein nicht kompensierendes Kalorimeter. Bei gleicher Primärenergie erzeugt ein nur elektromagnetisch wechselwirkendes Teilchen, z. B. ein Elektron, ein höheres Signal als ein hadronisches Teilchen. Die wahren Energien hadronischer Schauer können aber durch geeignete Gewichtungsverfahren rekonstruiert werden, die in hadronischen Schauern lokale elektromagnetische Schauer erkennen [12]. Die dazu notwendige feine Segmentierung des Kalorimeters verwirklicht außerdem eine gute Ortsauflösung und bietet die Möglichkeit zur Teilchenidentifikation durch Analyse von Schauerprofilen. Die mittlere Ausdehnung der Kalorimeterzellen beträgt longitudinal einige Strahlungslängen. Die radiale Ausdehnung entspricht etwa dem Molière-Radius. Insgesamt wird das Kalorimeter über rund 44300 elektronische Kanäle ausgelesen. Davon befinden sich etwa 32700 im elektromagnetischen Teil, 11600 im hadronischen Teil des Kalorimeters.

3.4 Das Triggersystem

3.4.1 Anforderungen an den Trigger

Die gesamte Detektorinformation wird über 270000 elektronische Kanäle ausgelesen. Für ein einzelnes Ereignis ergibt sich ein Datenumfang von etwa 3 Mbyte, der sich durch Nullpunktunterdrückung (zero-suppression) auf 50 bis 100 kbyte komprimieren läßt. Bei einer maximalen Schreibgeschwindigkeit von 1,2 Mbyte/s ist die Rate, mit der Ereignisse dauerhaft auf Magnetbänder weggeschrieben werden können, auf etwa 10 Ereignisse pro Sekunde beschränkt.

Alle 96 ns durchdringen sich Positron- und Protonbündel. Daraus ergibt sich eine Rate von 10,4 MHz für mögliche Ereignisse. Nicht jede der Bündeldurchdringungen führt jedoch zu einer Elektron-Proton-Kollision. Bei Design-Luminosität erwartet man pro Sekunde etwa 1000 Ereignisse mit geringem Energieübertrag. Für viele interessante Physikklassen wie CC-Ereignisse oder Produktion schwerer Quarkflavor liegen die Raten weit unter 1 Hz. Umbauten der Strahlführungs- und Fokusierungs-Magnete im Bereich der Wechselwirkungszone, die bis zum Jahr 2000 durchgeführt werden sollen, zielen auf eine Verdreifachung der Physikraten [13].

Neben den interessanten physikalischen Reaktionen treten eine Vielzahl von Untergrundereignissen auf. Am häufigsten sind Strahl-Wand-Reaktionen mit einer Rate von 40 bis 150 kHz und Strahl-Gas-Reaktionen von 45 kHz [14]. Die von den Positronen emittierte Synchrotronstrahlung und hochenergetische kosmische Myonen können nicht vollständig abgeschirmt werden und tragen mit zum Untergrund bei.

3.4.2 Realisierung des Triggers

Für jeden Ereigniskandidaten muß entschieden werden, ob ein Ereignis stattgefunden hat, ob es sich dabei um ein physikalisches Ereignis handelt, das aufgezeichnet werden soll, oder ob das Ereignis als Untergrund verworfen werden soll. Diese Entscheidung, die die Eingangsrate von 10,4 MHz auf eine Ausgangsrate von 10 Hz um sechs Größenordnungen reduziert, wird von einem mehrstufigen Triggersystem getroffen. Der schematische Aufbau des H1-Triggersystems wird in Abbildung 3.4 gezeigt.

Die Triggerentscheidung kann nicht in 96 ns zwischen zwei Ereigniskandidaten erfolgen. Schon die Signalformung einiger Detektorkomponenten erstreckt sich über mehrere BC. Zum Beispiel beträgt die Integrationszeit der Vorverstärker des Flüssig-Argon-Kalorimeters 13 BC, die Driftzeiten der in den Zentralen Spurkammern 11 BC. Deshalb wird die Triggerinformation jeder Detektorkomponente in einem 2,6 μs langen Pipeline-Zwischenspeicher abgelegt. Dies ist die Zeit, die der ersten Triggerstufe (L1)[2] für die Entscheidung bleibt, das

---

[2] engl. trigger-level 1 = L1

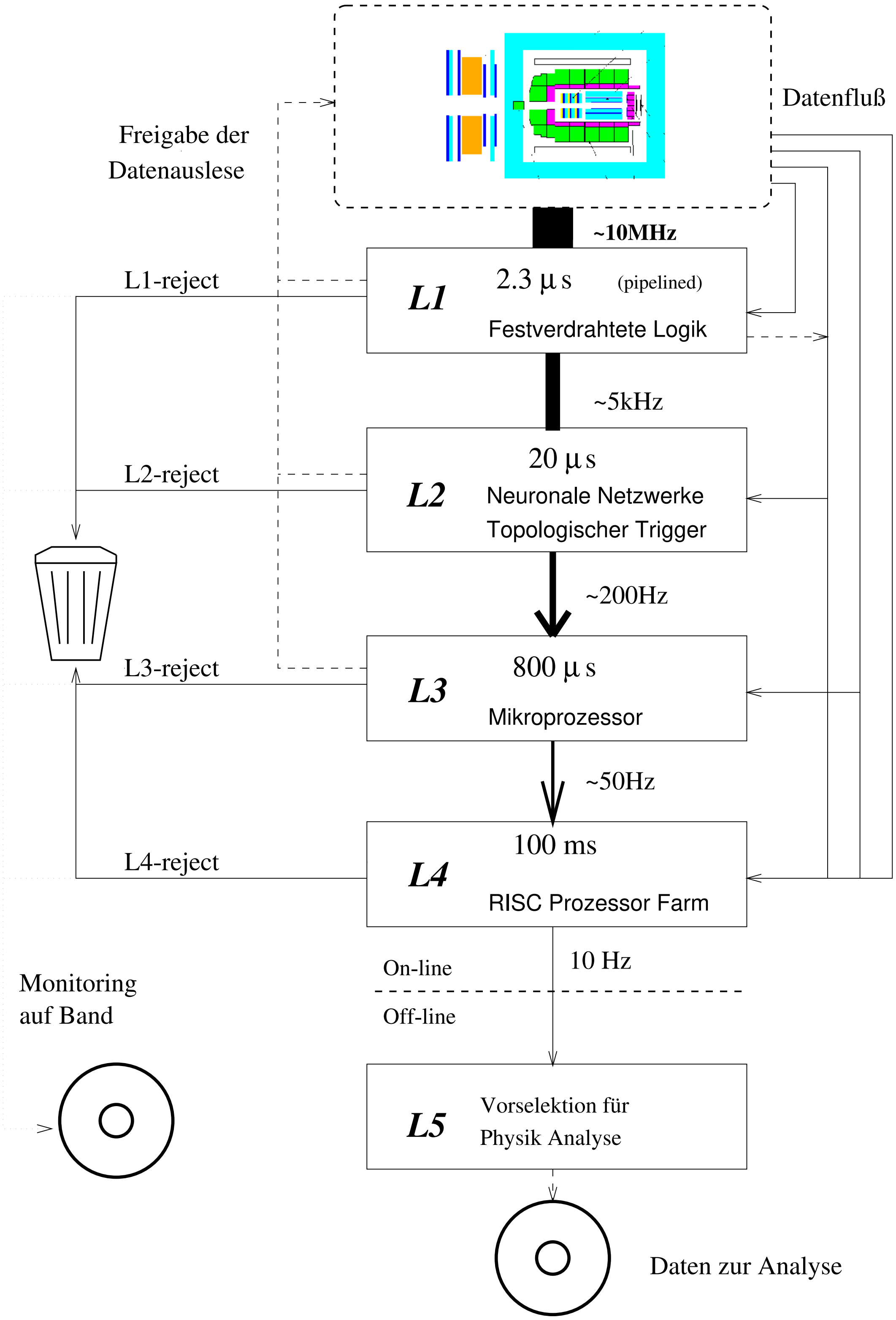


Abbildung 3.4: *Schematischer Aufbau des H1-Triggersystems.*

Ereignis zu verwerfen oder zu behalten. Soll das Ereignis behalten werden, wird die Pipeline angehalten. Gleichzeitig beginnen die nachgeordneten Triggerstufen (L2 bis L4) zu arbeiten. Verwerfen diese das Ereignis, wird die font-end-Elektronik nicht ausgelesen (L2-reject) bzw. die Auslese abgebrochen (L3- L4reject) und die Pipeline der ersten Triggerstufe erneut gefüllt.

Triggerstufe 1

Zur Formung der Trigger-Signale, zur Digitalisierung dieser Signale und zur Entscheidungsfindung stehen der ersten Triggerstufe 2,3 μs zur Verfügung. Für jedes BC werden in den einzelnen Detektorkomponenten durch fest verdrahtete elektrische Schaltungen einfache, meist topologische Größen gebildet wie Energiesummen, Spurmultiplizitäten und Vertexsignifikanz. Überschreitet eine dieser Größen eine festgelegte Schwelle, wird das entsprechende Triggerelement (TE) aktiviert. Die binäre Entscheidung, das Triggerelement zu aktivieren bzw. zu deaktivieren, wird an die zentrale Triggerlogik (CTL) übertragen. Dort werden durch logische Verknüpfung mehrerer TEs vorläufige Subtrigger (raw subtrigger) gebildet. Erfüllt ein Subtrigger nur eine lose Triggerbedingung und erzeugt so eine hohe L1-Rate, kann diese durch einen Prescale-Faktor reduziert werden. Somit wird nur bei einem bestimmten Bruchteil der Ereignisse, für die der Subtrigger aktiviert ist, dieser als tatsächlich gesetzt angesehen (actual subtrigger). Insgesamt können auf diese Weise 128 Subtrigger gebildet werden. Ist einer der Subtrigger gesetzt, beginnt die Auslese des Detektors.

Neben der Entscheidung, den Detektor auszulesen, liefern einige L1-Triggerelemente ein Zeitsignal (t0), das den Ereigniszeitpunkt festlegt. Dieser wird zum Beispiel benötigt, um aus Driftzeiten Teilchenspuren zu rekonstruieren.

Die Triggerentscheidung der ersten Triggerstufe erzeugt wegen der Verwendung des Pipeline-Zwischenspeichers keine Totzeit.

Triggerstufe 2

Da die Auslese eines Ereignisses etwa 1,5 ms benötigt, können die von L1 getriggerten Ereignisse noch vor der Datenauslese einer wesentlich genaueren Analyse unterzogen werden. Wird ein von L1 getriggertes Ereignis als Untergrund klassifiziert, wird die Auslese nicht durchgeführt, was die Totzeit wesentlich reduziert. Triggerstufe 2 führt diese Klassifizierung innerhalb von 20 μs durch. Als Eingabe stehen alle in L1 gebildeten Größen zur Verfügung. Es werden zwei Konzepte verfolgt: Der L2-Topo-Trigger projiziert die Triggergrößen in θ-ϕ Karten, mit denen topologische Relationen definiert werden. Daraus wird schließlich nach einem zuvor definierten Algorithmus ein „Abstand“ physikalischer Ereignisse zum Untergrund errechnet [15]. Der L2-Neuro-Trigger basiert auf künstlichen neuronalen Netzwerk-Algorithmen (KNN-Algorithmen), die im hochdimensionalen Raum der Triggergrößen

eine Mustererkennung durchführen. KNN-Algorithmen sind aufgrund ihrer inhärenten Parallelverarbeitung eine problemgerechte Methode zur schnellen Mustererkennung [16]. Die neuronalen Netze sind auf programmierbaren CNAPS/VME-Karten implementiert [17].
Beide Systeme werden derzeit nur für ausgewählte Physikklassen verwendet, um den Prescale-Faktor auf bestimmten L1-Subtriggern zu verringern. Die entsprechend erhöhte L1-Rate wird auf der zweiten Triggerstufe herabgesetzt [18, 19]. Für Ereignisse, die durch andere Subtrigger mit typisch niedriger Rate ausgewählt wurden, werden L2-Entscheidung nicht berücksichtigt.

Triggerstufe 3

Wird ein Ereignis von L2 akzeptiert (L2-keep), beginnen die zeitintensiven Ausleseoperationen wie die Nullpunktunterdrückung der digitalen Driftkammersignale und die Digitalisierung der analogen Kalorimetergrößen. Aufgabe des L3-Triggers ist es, Untergrundereignisse herauszufiltern, die von L2 nicht verworfen wurden. Dazu ist ein frei programmierbares System von AM 29000 RISC Prozessoren vorgesehen, dem außer den L1- und L2-Informationen auch ein Teil der genaueren Detektorinformation vorliegt. Als maximale Rechenzeit pro Ereignis stehen 800 μs zur Verfügung [20]. Der L3-Trigger wurde bisher nicht eingesetzt.

Triggerstufe 4

Der vierten Triggerstufe steht die gesamte Detektorinformation in Rohdatenformat zur Verfügung. Mehr als 30 Prozessoren vom Typ MIPS R3000, die in einer sogenannten Prozessorfarm parallel arbeiten, führen bereits eine Teilrekonstruktion des Ereignisses durch, worauf die Triggerentscheidung basiert [21].

Ereignisklassifizierung (L5)

Zur Vollständigkeit sei noch die erste Offline-Verarbeitungsstufe erwähnt, welche die auf Band geschriebenen Ereignisse klassifiziert. Sie wird unmittelbar nach Aufzeichnung der Ereignisse durchgeführt und beruht auf der vollständig rekonstruierten Ereignisinformation.

Monitoring

Zur Überwachung der Funktionsweise des Triggersystems und der Untergrundbedingungen wird etwa ein Prozent der nach L1-keep verworfenen Ereignisse auf Monitorbändern gespeichert. Sie stehen somit zur Offline-Analyse zur Verfügung.
Zur Online-Überwachung werden vielfältige Systeme und Programme eingesetzt. Ein wichtiges Instrument sind dabei Ratenmonitore. Für das Flüssig-

Argon-Kalorimeter ist dies der L1-Trigger-Rates-Monitor [22]. Ein entsprechender Monitor für die Überwachung des L2-Triggers, der seit der Datennahmeperiode 1996 in Betrieb ist, befindet sich noch im Aufbau [23].

3.5 Kalorimeter- und Trigger-Elektronik

In diesem Abschnitt werden der Signalweg und die wesentlichen Komponenten zur Signalverarbeitung in Flüssig-Argon-Trigger und Auslesesystem vorgestellt. Eine ausführliche Darstellung findet sich in [24] und [11].

3.5.1 Signal-Auskopplung

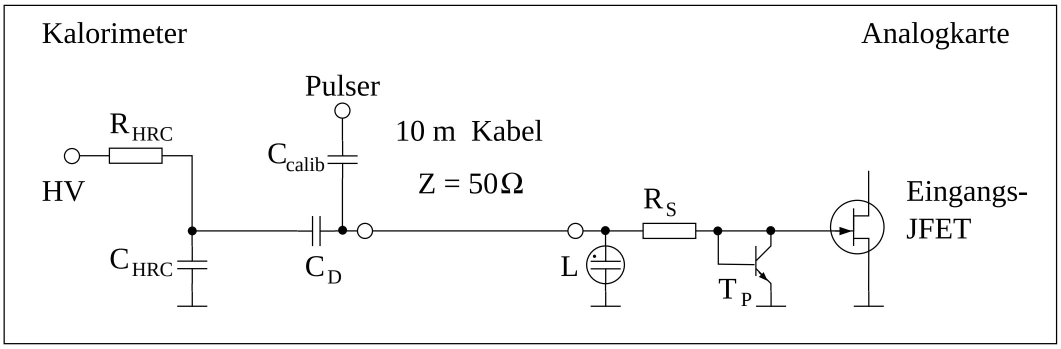


Abbildung 3.5: *Prinzipschaltbild der Ladungsauslese im Kalorimeter.*

Der Signalweg von der Signalentstehung in der Kalorimeterzelle bis zur ersten Vorverstärkung ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Hochspannung liegt über den Widerstand R_{HRC}[3] der Kaptonbeschichtung der Kalorimeterzelle an, C_D ist die Kapazität der Zelle. Das durch Ionisation des Flüssig-Argon erzeugte Signal wird über ein 10 m langes Kabel zum Eingangstransistor der ersten Vorverstärkerstufe übertragen. Zum Schutz gegen Hochspannungsüberschläge sind eine Glimmlampe L, ein Schutzwiderstand R_s und ein Schutztransistor T_P vorgeschaltet.

Die Vorverstärkung der Flüssig-Argon-Elektronik ist auf einer sogenannten Analogkarte (ANCD) realisiert. Die ANCDs sind in Analogboxen (ANBX) plaziert, die auf dem Kalorimeterkryostaten angebracht sind. Jede ANCD trägt Elektronik für 16 Kanäle. Nach der ersten Vorverstärkung verläuft die weitere Signalverarbeitung für Trigger und Kalorimeter getrennt.

3.5.2 Signalverarbeitung im Trigger

Für den Trigger werden noch auf der Analogkarte die Signale zu sogenannten Trigger-Zellen summiert. Elektromagnetische Trigger-Zellen bestehen aus

---

[3] HRC: engl.: high resistive coating

16 Kanälen, hadronische aus vier Kanälen. Diese Summensignale werden zur sofortigen Weiterverarbeitung zur Schaltwarte (trailor) übertragen. Der im folgenden beschriebene Informationsfluß in der Triggerelektronik läßt sich in Abbildung 3.6 nachvollziehen.

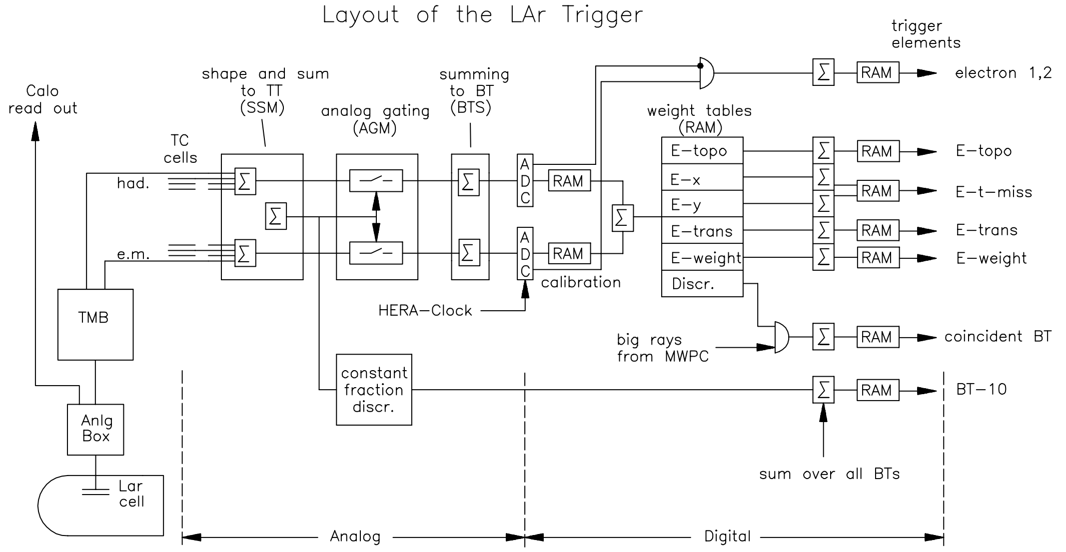


Abbildung 3.6: *Schematischer Aufbau der Elektronik des LAr-Triggers.*

Auf dem **Trigger Merging Board (TMB)** werden die Trigger-Zellen zu Trigger-Türmen (TT) umgruppiert, die auf den Wechselwirkungspunkt ausgerichtet sind. Die Lage der TT wurde so gewählt, daß ein vom Wechselwirkungspunkt kommendes Teilchen seine Energie in möglichst nur einem TT deponiert. Das Flüssig-Argon-Kalorimeter ist in θ-Richtung in 23, in ϕ-Richtung in bis zu 32 Trigger-Türme eingeteilt.

In den **Shaping and Summing Modulen (SSM)** werden die Signale der Trigger-Zellen mit kurzer Differenzierzeit filterverstärkt. Das Signal jeder Trigger-Zelle kann hinsichtlich seiner Verstärkung und dem Zeitpunkt des Signalmaximums so eingestellt werden, daß bei der Summierung zu TT die Signalmaxima exakt übereinander liegen. Wenn in einigen Trigger-Zellen z.B. durch Verunreinigung des flüssigen Argons oder durch Hochspannungsprobleme abnormal hohe Trigger-Signale registriert werden, können diese Zellen durch elektronische Schalter (engl.: switchs) in den SSMs abgeschaltet werden. Die Summierung zu TT faßt bis zu vier elektromagnetische und bis zu sechs hadronische TC zusammen. Die Switchs 0 bis 5 schalten die hadronischen Trigger-Zellen, Switchs 6 bis 9 die elektromagnetischen. Aus den SSMs werden die TT-Signale für den elektromagnetischen und hadronischen Teil sowohl getrennt als auch als Summe herausgeführt.

Die Summe beider Signale wird im **Analog Gating Modul (AGM)** mit einer Schwellenspannung verglichen. Es werden nur Signale weitergeleitet, die die AGM-Schwelle überschreiten. Durch die AGM-Schwelle wird schon sehr

früh elektronisches Rauschen reduziert und somit weitgehend verhindert, daß Rauschen, insbesondere kohärentes Rauschen durch externe Störquellen, die Triggerentscheidung beeinflußt. Dies ist wichtig, da auch Triggerelemente aus der Summe über alle Trigger-Zellen gebildet werden. Addiert man dabei viele kleine Rauschsignale, wird die Summe verfälscht und man verliert die Korrelation zur Energiedeposition im Kalorimeter. Liegt das Summensignal über der AGM-Schwelle, wird diese um das Äquivalent von 140 MeV abgesenkt. Erst wenn die abgesenkte Schwelle wieder unterschritten wird, werden die TT-Signale unterdrückt. Diese Hystere der AGM-Schwelle verhindert, daß zum Beispiel durch verrauschte Signale an der AGM-Schwelle unerwünschte Schwingungen entstehen.
Künftig ist der Einsatz neuer AGMs vorgesehen, die die elektomagnetischen und hadronischen TT-Signale vollkommen getrennt behandeln. Dies ermöglicht eine bessere Anpassung an die unterschiedlichen Rauschniveaus elektromagnetischer und hadronischer TT-Signale [25].

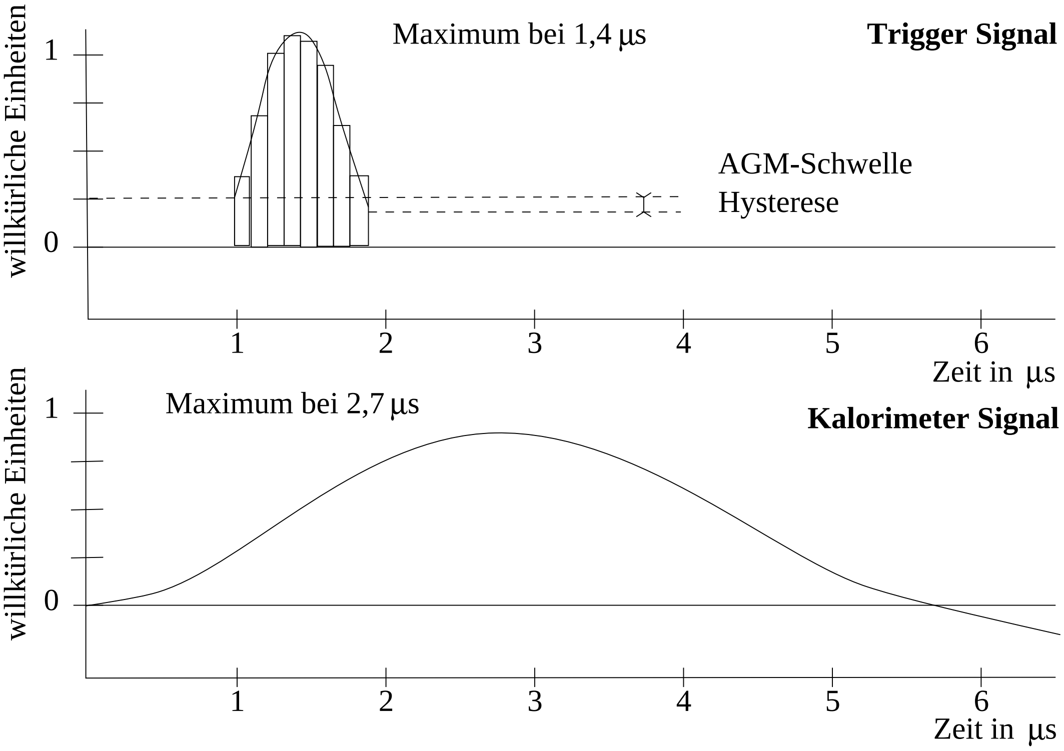


Abbildung 3.7: *Vergleich der Signalformen des LAr-Triggers (oben) und der Kalorimeter-Auslese (unten).*

Liegt das Signal über der Schwelle, wird es bei der Addition zu sogenannten Großtürmen (BT)[4] berücksichtigt. In der **Big-Tower-Summing-unit (BTS)** werden bis zu vier TT zu einem BT zusammengefaßt, wobei elektromagnetische und hadronische Signale der TT auch weiterhin getrennt behandelt werden. Insgesamt werden im Flüssig-Argon-Kalorimeter

---

[4] engl.: big tower

240 BT in 14 θ-Bereichen gebildet. Die BT-Signale werden in **Schnellen 8-Bit-Analog-Digital-Wandlern (FADC)**[5] synchron zur Frequenz der Bündeldurchdringungen von 10,4 MHz digitalisiert. Abbildung 3.7 oben skizziert das Trigger-Signal und das Ergebnis der Digitalisierung. Die FADCs sind so kalibriert, daß eine Einheit (FADC-count) einer Energie von etwa 125 MeV auf der elektromagnetischen Energieskala entspricht. Die Abweichung von der nominellen Einstellung beträgt im Mittel 3 % bei einer Varianz von etwa 7 % [26].

Im anschließenden digitalen Teil der Triggerelektronik werden bei einer Taktfrequenz von 10,4 MHz aus den FADC-Einheiten die Flüssig-Argon-Triggerelemente (TE) gebildet. Dies sind meist gewichtete Summen über topologische Bereiche des Kalorimeters.

Als weiteres TE wird das sogenannte t0-Bit gebildet, welches das BC des Ereignisses markiert. Dazu werden die Gesamtsummen-Signale der TT um 500 ns verzögert. Der Schnittpunkt des verzögerten mit dem ursprünglichen Signal legt den Ereigniszeitpunkt fest. Dies ermöglicht eine amplitudenunabhängige Bestimmung des Ereigniszeitpunktes (constant fraction discriminator). Überschreitet der Puls eine für jeden TT einstellbare Schwelle (t0-Schwelle), wird das t0-Bit für das zugehörige BC gesetzt. Auch hierbei werden bis zu vier TT zu einem BT zusammengefaßt, wobei für das Setzen des t0-Bits eines BT das t0-Bit eines TT ausreicht.

3.5.3 Signalweg in der Kalorimeter-Auslese

Parallel zum Trigger wird das Kalorimetersignal auf der Analogkarte weiterverarbeitet. Der Signalweg auf der Analogkarte kann in Abbildung 3.8 nachvollzogen werden. Die im folgenden beschriebenen Glieder der elektronischen Auslesekette sind als Hybridschaltkreise auf der Analogkarte (motherboard) aufgebracht.

Das Ausgangssignal des Vorverstärkers (Preamp) wird im Signalformer (Shaper) filterverstärkt, allerdings mit einer längeren Zeitkonstante als die im SSM auf die Trigger-Signale angewandte. Der Vergleich der Signalformen von Trigger und Kalorimeter-Auslese wird in Abbildung 3.7 gezeigt. Während der Zeitdifferenz zwischen den Maxima wird die L1-Triggerentscheidung gefällt.

Soll das Ereignis gehalten werden, wird das Kalorimetersignal im Sammel- und Halteglied (S-H) analog gespeichert. Im wesentlichen besteht das S-H-Glied aus einem Kondensator, der vom Ausgangssignal des Signalformers aufgeladen wird. Bei Erreichen des Signalmaximums, dem Zeitpunkt des L1-keep-Signals, wird der Kondensator abgetrennt. Die im S-H-Glied gespeicherten Spannungen werden später über einen 16fach-Multiplexer ausgelesen.

Vorverstärker-, Signalformer-Hybrid und Analogkarte wurden am MPI entwickelt. Die Fertigung der Hybride wurde in den MPI-eigenen Werkstätten durchgeführt, die der Analogkarte in die Industrie ausgelagert [25].

---

[5] engl.: flash analog digital converter

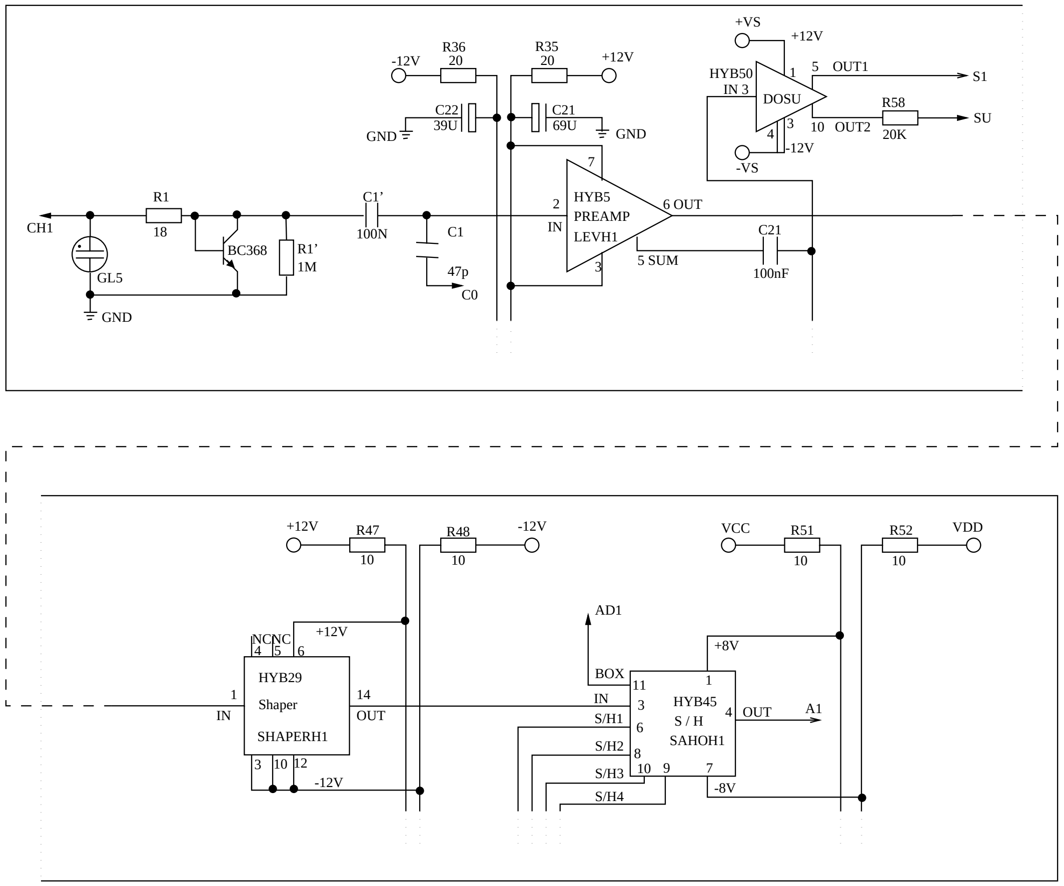


Abbildung 3.8: *Prinzipschaltbild eines Kalorimeterkanals auf der Analogkarte, bestehend aus Hochspannungsschutz, Vorverstärker-, Signalformer-, Sammel/Halte-Hybrid (von oben links nach unten rechts), darüber der Verstärker für die Triggersummen.*

Der weitere Signalweg wird in Abbildung 3.9 gezeigt. Acht Analogkarten sind mechanisch und elektrisch zu einer Einheit zusammengefaßt, Analogbox (ANBX) genannt. Zu jeder dieser Einheiten gehört eine Übersetzerkarte (translator board), die ein zweites 8fach-Multiplexing durchführt. Die Signale werden schließlich zweifach über zwei differentiell betriebene „twisted-pair"-Kabel etwa 25 m weit zur analogen Empfängereinheit (ANRU: analog recieving unit) übertragen. Die doppelte Übertragung mit zwei verschiedenen Verstärkungen wird angewandt, um den dynamischen Bereich auf 14 Bit auszudehnen.

Die ANRU führt eine analoge „Baseline"-Subtraktion durch. Sie bedient 512 Kanäle von vier Analogboxen und ist mit einer Analog-Digital-Wandler-Karte (ADC-Karte) verbunden. Jede ADC-Karte verarbeitet entweder 1024 Kanäle von zwei analogen Empfängereinheiten oder 512 Kanäle mit je zwei unterschiedlichen Verstärkungen einer analogen Empfängereinheit. Eine ADC-Karte besteht aus zwölf 8-Bit ADCs, die von einem digitalen Signalprozessor (DSP) gesteuert und ausgelesen werden. Die DSP Einheiten sind auf einer

Abbildung 3.9: *Schematischer Aufbau der elektronischen Auslesekette.*

eigenen Karte lokalisiert. Der ganze Satz von DSPs ist in einem VME-crate installiert, auf das vom Datenaquisitionssystem zugegriffen werden kann.

3.5.4 Kalibrationssysteme

Um die Kalibration der gesamten Elektronik durchzuführen und ihre Stabilität sicherzustellen, werden Kalibrationskondensatoren mit einer Kapazität von 47 pF und einer Fehlertoleranz von 1 % verwendet. Diese Kondensatoren werden durch Spannungspulse mit genau bekannter Amplitude, Fehlertoleranz 0,1 %, aufgeladen [27].

Es wurden zwei Kalibrationssysteme aufgebaut: Bei der Kalten Kalibration befinden sich die Kondensatoren im Flüssig-Argon so nahe wie möglich an den Auslesezellen (Abb. 3.5). Die Kalibrationskapazitäten für die Warme Kalibration sind vor der ersten Vorverstärkerstufe auf der Analogkarte angebracht (Abb. 3.8 und Abb. 3.9).

4 Verstärkung und Rauschen

Dieses Kapitel beschreibt zunächst die Funktionsweise eines Sperrschicht-Feldeffekt-Transistors[1], der die erste Verstärkungsstufe auf dem Vorverstärker-Hybriden der Analogkarte darstellt. Darauf wird das Modell des Weißen Rauschens motiviert, das beschreibt, wie im JFET elektronische Rauschen entsteht und wie dieses von der Detektorkapazität abhängt. Im Vergleich mit den Ergebnissen ausführlicherer Ableitungen wird dann auf die Näherungen eingegangen, die diesem Modell zugrundeliegen. Abschließend ist die von der H1-Gruppe des Max-Planck-Institut München vorgeschlagene Umrüstung der Elektronik vorzustellen.

4.1 Feldeffekt-Transistor

Ein Feldeffekt-Transistor ist ein Halbleiter-Bauelement mit Verstärkungseigenschaften. Zum Stromtransport tragen nur Ladungsträger einer Art bei (Elektronen oder Löcher), weshalb man auch von einem Unipolar-Transistor spricht. Das Wort Feldeffekt bezeichnet den für die Funktion maßgeblichen Vorgang, nämlich die Steuerung der Konzentration der in einer Zone vorhandenen Ladungsträger durch ein elektrisches Feld.
Abbildung 4.1 zeigt einen n-Kanal-JFET, anhand dessen die Wirkungsweise eines Feldeffekt-Transistors erklärt wird. Im hier gezeigten Beispiel werden in einem n-dotierten Silizium-Scheibchen zwei p-dotierte Streifen eingebracht, so daß man ein Bauteil erhält, das zwei pn-Übergänge besitzt.

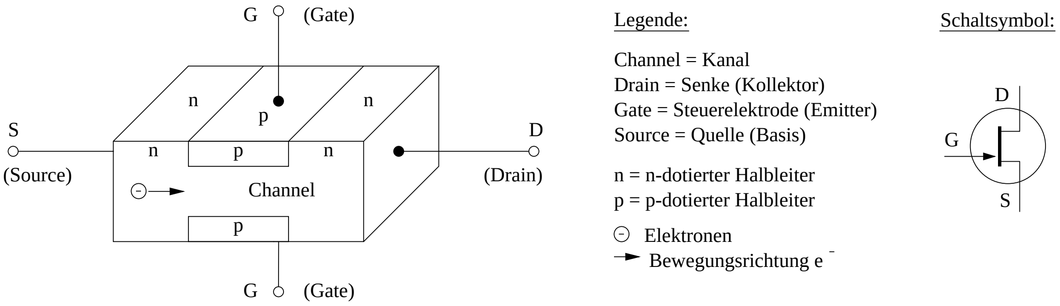


Abbildung 4.1: *Schematische Ansicht und Schaltsymbol eines JFET [28].*

Wird eine Spannung zwischen Quelle (S:Source) und Senke (D:Drain) angelegt, treten die Ladungsträger, im Beispiel Elektronen, an der Quelle in den Kanal ein, wandern durch diesen hindurch und treten an der Senke aus. Der im Kanal fließende Strom bewirkt einen Spannungsabfall am Kanalwiderstand

---

[1] engl. junction field effect transistor, JFET

des JFET, wodurch sich die Raumladungszonen der pn-Übergänge dem elektrischen Feld entsprechend in den Kanal hinein ausdehnen. Diese Verengung des leitenden Kanals verhindert, daß mit zunehmender Spannung U_{DS} der Drainstrom weiter ansteigt. Abbildung 4.3 zeigt die Sättigung des Drainstroms in der Ausgangskennlinie des JFET.

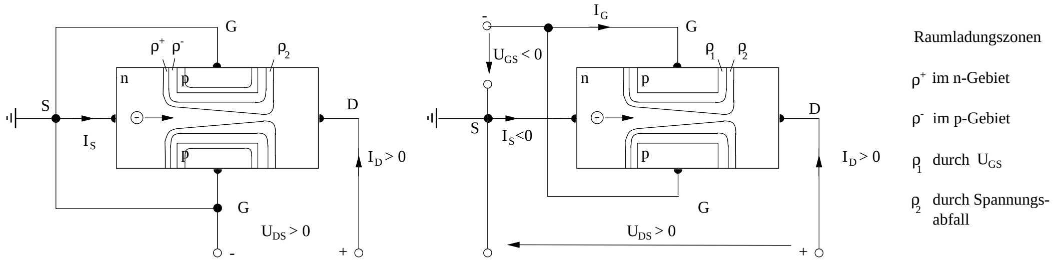


Abbildung 4.2: *Funktionsweise des JFET.*

Wird zwischen Basis (G:Gate) und Quelle eine Spannung U_{GS} angelegt, so bilden sich Raumladungszonen aus, die sich mit steigendem Drainstrom I_D noch weiter in den Kanal hinein ausdehnen. Je mehr sperrende Gate-Source-Spannung angelegt wird, desto größer sind die Raumladungszonen und desto weniger Drainstrom wird benötigt, um Sättigung zu erhalten. Die Spannung U_{GS} wird deshalb als Steuerspannung bezeichnet.

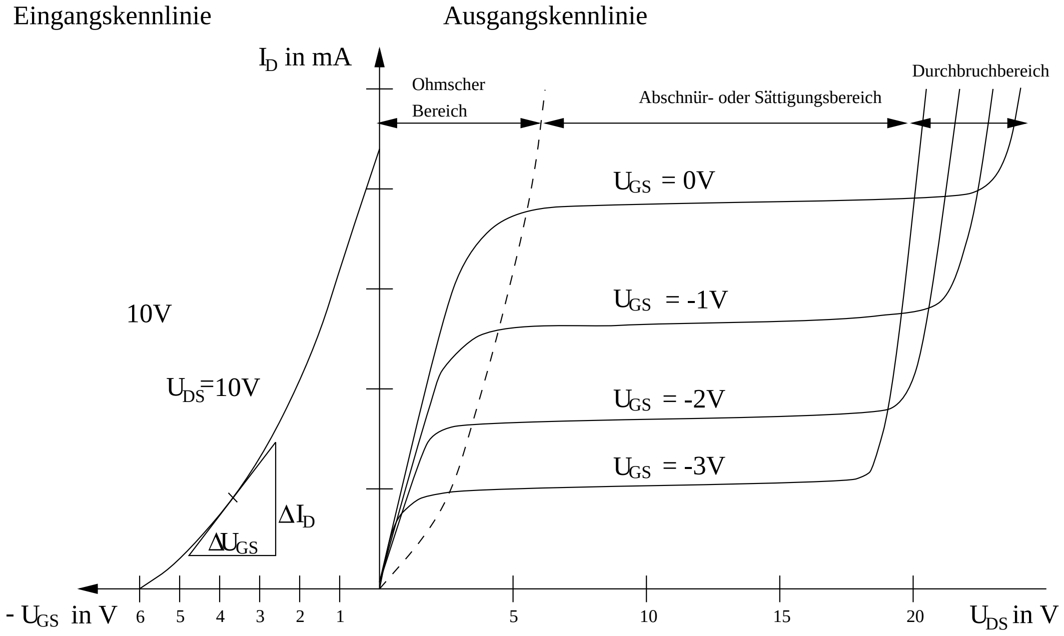


Abbildung 4.3: *Kennlinien eines Sperrschicht-Feldeffekt-Transistors mit N-Kanal (nach [29]).*

Die Steilheit des Transistors, definiert als $g = \Delta I_D / \Delta U_{GS}$, macht eine Aussage über die Steuerwirkung der Gatespannung auf den Drainstrom. Sie ist für jeden Arbeitspunkt verschieden und wird aus der Eingangskennlinie (Abb. 4.3) ermittelt.

Da im Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor der Stromfluß nur durch eine Art Ladungsträger vermittelt wird, zeigt der JFET ein gutes Schaltverhalten. Im Gegensatz zu bipolaren Transistoren entfallen die Rauschbeiträge des Minoritätsladungsträgerstroms. Der Hauptbeitrag des Rauschens im JFET entsteht als thermisches Rauschen am Kanalwiderstand. Eine Verringerung dieses Widerstandes reduziert das Rauschen. Bei gleicher Drain-Source-Spannung erhöht der vergrößerte Kanalstrom die Leistungsaufnahme des Transistors.

Der Transport der durch Ionisation in den Kalorimeterzellen freigesetzten Ladungsträger entzieht dem elektrischen Feld in den Zellen Energie. Dadurch verringert sich der Betrag der am Gate anliegenden Spannung und der Drainstrom erhöht sich. Um unabhängig von langsamen Variationen der Spannungsversorgung zu sein, wird das Signal kapazitiv auf die Analogkarte eingekoppelt.

4.2 Das Modell des Weißen Rauschens

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter, dessen Messung der Energiedeposition auf der Messung der Ionisation in den Auslesezellen beruht, stellt eine kapazitive Ladungsquelle für die Vorverstärkerelektronik dar. In dieser Elektronik wird das Rauschen zum Signal hinzuaddiert, wodurch es die Energieauflösung verschlechtert, die durch die Statistik des Energieverlusts der Teilchen bestimmt ist.

Grundsätzlich kann die Entstehung von Rauschen als eine Folge zufällig erzeugter Pulse betrachtet werden, die in der Zeit Poisson-verteilt sind. Eine solche zufällige Folge entsteht zum Beispiel durch Ladungsträger-Erzeugung im Stromkreis der Verstärkerelektronik, in dem die Ladungsträger beispielsweise eine Potentialbarriere überwinden müssen, was zu einer thermischen Boltzmann-Verteilung der Energien führt. Im JFET des Flüssig-Argon-Kalorimeters hängt der Drainstrom, der das verstärkte Signal darstellt, vom Potential der Basis V_g ab, das durch die von den Meßelektroden aufgesammelten Ladung Q_s, dem Signal, erzeugt wird. Der Verstärkungsfaktor g des Verstärkers ist gegeben durch:

$$g = \frac{g_m}{C_g} \tag{4.1}$$

wo g_m für die Steilheit des Transistors, definiert als

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_G} \tag{4.2}$$

und C_g für die Kapazität zwischen Basis und Emitter steht. Das intrinsische thermische Rauschen im leitenden Kanal des JFETs wird zum Drainstrom I_D

addiert. Seine Varianz ist proportional zur Steilheit [30] und ist gegeben durch

$$\sigma_{I_D}^2 = 4kTa_n g_m, \tag{4.3}$$

wobei T für die Temperatur steht und a_n ein Technologiefaktor ist (etwa 2/3 für JFETs). Diese Fluktuation des Drainstroms kann als eine äquivalente Fluktuation des Gatepotentials V_G angesehen werden:

$$\sigma_{V_G}^2 = \frac{\sigma_{I_D}^2}{g_m^2} = 4kT\frac{a_n}{g_m} \tag{4.4}$$

Da das Gatepotential durch die Signalladung erzeugt wird, kann die Varianz dieses Potentials ebenfalls in Einheiten der von den Elektroden induzierten Ladung ausgedrückt werden. Das führt zum Konzept der Rauschäquivalenten Ladung (ENC)[2]:

$$\sigma_{Q_G}^2 = 4kT\frac{C_G}{g_m} \tag{4.5}$$

Nun kann die Ladung Q_G am Gate in eine äquivalente Ladung an der Sensorelektrode Q_s übersetzt werden, unter Berücksichtigung von:

$$Q_s = Q_G\frac{C_G}{C_D + C_G}, \tag{4.6}$$

wo C_D die Kapazität der Sensorelektrode gegen Erde ist. Dies führt schließlich zur Fluktuation $\sigma_{Q_s}^2$, der Signalladung auf der Sensorelektrode:

$$\sigma_{Q_s}^2 = 4kTa_n\frac{(C_D + C_G)^2}{g_m}, \tag{4.7}$$

oder unter stärkerer Betonung des formalen Zusammenhangs

$$\sigma = a + bC_D \tag{4.8}$$

$$\text{mit } a = \sqrt{\tfrac{4kT}{g_m}}C_G \quad \text{und} \quad b = \sqrt{\tfrac{4kT}{g_m}}.$$

Obiger Ausdruck für das Rauschen ist in mehrfacher Hinsicht eine Vereinfachung: Erstens wurde nur serielles Rauschen in die Betrachtung einbezogen.

---

[2] engl. equivalent noise charge: ENC

Diese Näherung ist für den größten Bereich der Detektorkapazitäten in den Triggerkanälen gerechtfertigt. Nur bei sehr kleinen Kapazitäten sind bemerkbare Anteile von parallelem Rauschen zu erwarten. Zweitens ist der Rauschbeitrag σ_{Q_s} aufgrund des Filterprozesses der Verstärkerelektronik frequenzabhängig.

4.3 Diskussion der Rauschformel

Ladungsempfindliche Verstärker (CSA: charge sensitive amplifier) sind in Vorverstärkung der Auslese-Elektronik in der Hochenergiephysik ein gebräuchliches Bauteil. Diese integrieren die Ladung aus dem Detektor auf ihrem Rückkopplungskondensator und halten dieses konvertierte Signal als Ausgangsspannungssignal mit langer Relaxationszeit.

In Verbindung mit CSAs werden meist Differenzierfilter-Verstärker eingesetzt, da diese die Bandbreite einschränken und das Signal in eine günstige Form für die Weiterverarbeitung bringen.

Es ist bekannt, daß bei einem gutem Design der Elektronik der erste Transistor des Vorverstärkers das Rauschverhalten dominiert.

Da jedes Signal des Detektors ein Ladungssignal ist, ist es sinnvoll, Rauschen über eine rauschäquivalente Ladung (ENC) einzuführen. Diese ENC wird in einer vollständigen Form wie folgt beschrieben ([31], [32], [33]):

$$\begin{aligned} ENC^2 &= \frac{2kTA_1}{\tau_M}\left[\frac{\alpha C_{IN}}{g_m}\left(\sqrt{\frac{C_T}{C_{IN}}}+\sqrt{\frac{C_{IN}}{C_T}}\right)^2 C_T + (a+b)C_T^2\right] \\ &\quad + A_2\left[H_f\left(\sqrt{\frac{C_T}{C_{IN}}}+\sqrt{\frac{C_{IN}}{C_T}}\right)^2 C_T + \frac{b_f}{2\pi}\right] \\ &\quad + \tau_M A_3\left(qI_{IN}+\frac{2kT}{R_p}\right) \qquad [(As^2)] \end{aligned} \tag{4.9}$$

mit k ⇒ Boltzmannkonstante
T ⇒ Halbleitertemperatur in Kelvin
α ⇒ Transistorkonstante (2/3 für JFET)
g_m ⇒ Steilheit des Eingangstransistors
C_{IN} ⇒ Eingangskapazität
C_T ⇒ $C_{DET} + C_f + C_{Streu}$
a ⇒ 0 für JFETs
b ⇒ serieller Eingangswiderstand
H_f ⇒ $1/f$ Rauschkoeffizient des Transistors
b_f ⇒ $1/f$ Rauschkoeffizient der Dielektrika am Vorverstärkereingang

q $\Rightarrow$ Ladung eines Elektronenpaars
I_{IN} $\Rightarrow$ I_{GATE} für FET
R_p $\Rightarrow$ paralleler Rauschwiderstand $(R_f \| R_{Det} \| \ldots)$
τ_M $\Rightarrow$ Peakzeit des filterverstärkten Signals
$A_1 A_2 A_3$ $\Rightarrow$ Formfaktoren für serielles, dielektrisches und paralleles Rauschen

Beim Design der Auslesekette wurde darauf geachtet, frequenzabhängiges und paralleles Rauschen gering zu halten. Nach Vernachlässigung aller Terme, die nur wenig zum Gesamtrauschen beitragen, reduziert sich Formel 4.9 zu [34]:

$$ENC^2 = \frac{2kT\alpha C_{IN} A_1}{g_m \tau_M} C_T \left(\sqrt{\frac{C_T}{C_{IN}}} + \sqrt{\frac{C_{IN}}{C_T}} \right)^2 \qquad [(As)^2] \tag{4.10}$$

Dies entspricht der in Abschnitt 4.2 abgeleiteten linearen Abhängigkeit des Rauschens von der Kapazität der Auslesezelle (Formel 4.8). Nach obiger Formel kann das Rauschen im Trigger abgeschätzt werden. Aufgrund der kürzeren Signalformungszeit ist das Rauschen im Trigger unvermeidbar höher als in der Kalorimeterzelle:

$$ENC_{Trig} = ENC_{Calo} \sqrt{\frac{\tau_{Calo}}{\tau_{Trig}}} \tag{4.11}$$

Dieser Ausdruck beschreibt den Beitrag einer Kalorimeterzelle zum Rauschen im Trigger. Für eine vollständige Abschätzung ist das Rauschen der zu den Triggersummen beitragenden Kalorimeterzellen quadratisch zu addieren. Die explizite Rechnung wird in Anhang A durchgeführt.

4.4 Rauschverringerung am Vorverstärker

Nach Eliminierung aller äußeren Rauschquellen haben Untersuchungen zum Rauschen im Flüssig-Argon-Kalorimeter [35] gezeigt, daß der dominierende Anteil des Rauschens in der Flüssig-Argon-Signalkette am ersten Transistor des Vorverstärkerkreises erzeugt wird. Der tatsächlich gefundene lineare Zusammenhang zwischen Detektorkapazität und Rauschen bestätigt die in den beiden vorangegangenen Abschnitten (4.2 und 4.3) angestellten Überlegungen. Als der Vorverstärker-Hybrid 1984 entworfen wurde, war der geeignetste Transistor der JFET 2 SK 372 von Toshiba [36]. Der große Bereich der Kapazitäten, von 1 bis 18 nF, machte es schwierig, das optimale Design für den Schaltkreis zu finden. Zehn Jahre später ist nun ein neuer JFET, NJ3600 von InterFet [37], verfügbar, der speziell für große Kapazitäten entwickelt wurde. Die beiden Transistoren unterscheiden sich in ihrer Steilheit: InterFet NJ3600 $g_m = 200$ mSi, Toshiba 2 SK 372 $g_m = 60$ mSi. Aus diesem Gewinn resultiert jedoch ein wesentlich höherer Drainstrom, 20 mA bei 12V gegen 5 mA, und eine höhere Leistungsaufnahme des Chips. Mit dem JFET NJ 3600 ist es möglich, einen neuen Vorverstärker-Hybrid zu entwickeln, und diesen gegen den alten auf der Analogkarte auszutauschen. Dadurch läßt sich die Umrüstung der Elektronik zu niedrigen Kosten in einer für die Serienproduktion geeigneten Weise durchführen.

In der Elektronikabteilung des Max-Planck-Instituts in München wurde ein neuer Vorverstärker-Hybrid um den NJ3600 konzipiert und gefertigt. Der Schaltplan dieses Hybriden wird in Abbildung 4.4 gezeigt.

Die Ziele des Designs waren es, den Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers beizubehalten und zugleich das Rauschen zu verringern. Die tatsächliche Verringerung hängt von der Detektorkapazität und den unvermeidbaren Rauschbeiträgen der anderen Vorverstärkerkomponenten auf dem Hybriden ab. Mit dem neuen Hybriden wurde eine Rauschreduktion von 1,6 bei 10 nF gemessen. Zur weiteren Verringerung des Rauschens wurde vorgeschlagen, den seriellen Widerstand R_S in der Signal-Einkoppelungs-Einheit auf der ANCD zu überbrücken. Dieser Widerstand war zum Schutz gegen Hochspannungsdurchbrüche vorgesehen. Tests im H1-Kalorimeter zeigten jedoch, daß für die elektromagnetischen Kanäle die hochohmige Beschichtung der Hochspannungselektroden und die passive Impedanz der Signalkabel vom Kalorimeter zur Analogbox ausreichend Schutz bieten.

Durch Entfernen dieser zusätzlichen Rauschquelle ist aus detaillierten Simulationen des Hybriden ein Rauschreduktionsfaktor 1,8 bei 10 bis 12 nF zu erwarten. Messungen mit umgerüsteten Karten, die im nächsten Kapitel vorgestellt werden, zeigen, daß der erwartete Gewinn im Labormeßstand tatsächlich erreicht wird.

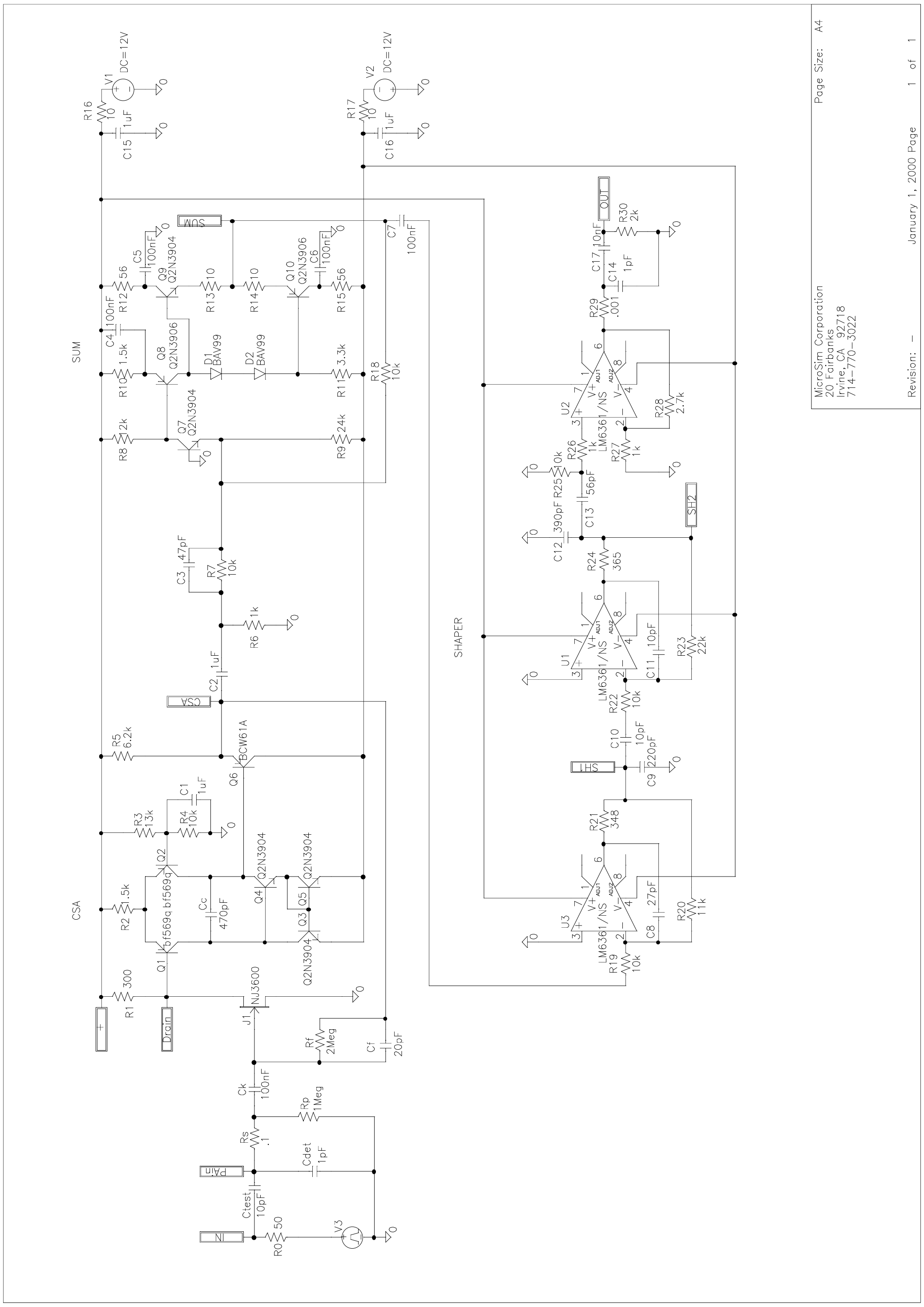


Abbildung 4.4: *Schaltplan des neuen Vorverstärker-Hybriden.*

5 Messungen im Labor

Der Test der umgerüsteten Analogkarten wird in einem Meßstand am MPI in München durchgeführt, dessen Hard- und Software die ersten beiden Abschnitte dieses Kapitels beschreiben. In den beiden folgenden werden Messungen zum besseren Verständnis des Rauschverhaltens des Meßstands und die Meßreihe zum Test der Analogkarten vorgestellt.

5.1 Der Aufbau des Meßstands

Für die Erprobung der Elektronik des Flüssig-Argon-Kalorimeters ist am Max-Planck-Institut in München die vollständige Kalorimeter-Auslese in einem Meßstand verfügbar. Dieser Meßstand wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit um den Triggerzweig bis zur Digitalisierung des Trigger-Signals in den FADCs erweitert.

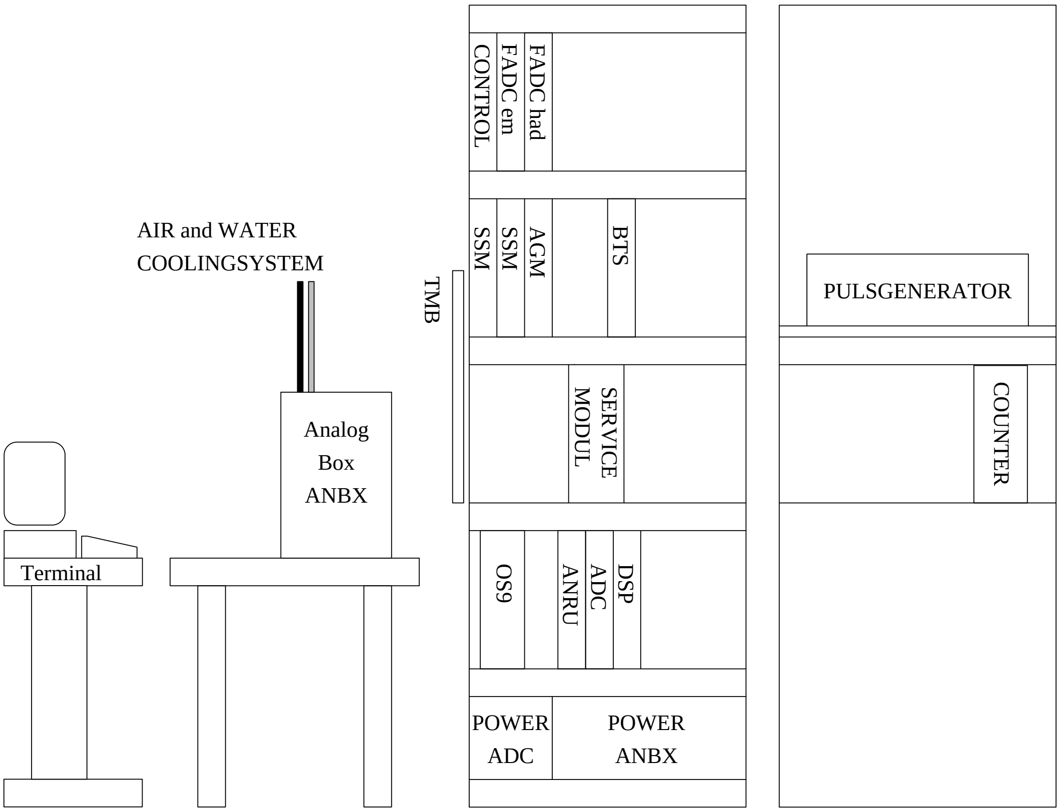


Abbildung 5.1: *Skizze des Meßstands im H1-Labor am MPI München. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden keine Kabel eingezeichnet.*

Der Meßstand, dessen Aufbau in Abbildung 5.1 skizziert ist, bildet so weit wie möglich die Elektronik im eigentlichen Experiment am Beschleuniger in Hamburg nach. Die prinzipielle Funktionsweise der Elektronikmodule wurde bereits in den Abschnitten 3.5.2 und 3.5.3 beschrieben.
Es können bis zu 128 Kanäle gleichzeitig getestet werden. Maximal acht Analogkarten zu je 16 Kanälen können in einer Original-Analogbox des H1-Detektors plaziert werden. Zur Kühlung der Elektronik wird wie in Hamburg ein konstanter Luftstrom über wassergekühlte Rohre auf die Analogkarten geleitet.
Im Meßstand entspricht eine Analogkarte einem Trigger-Turm (TT), der auf dem Trigger-Merging-Board (TMB) nach folgendem Schema gebildet wird: Die Summe über alle 16 Kanäle stellt eine elektromagnetische Trigger-Zelle dar, die vier Summen über je vier Kanäle repräsentieren vier hadronische Trigger-Zellen. Die hadronischen Signale liegen auf Switch 0 bis 3, das elektromagnetische Signal auf Switch 6.

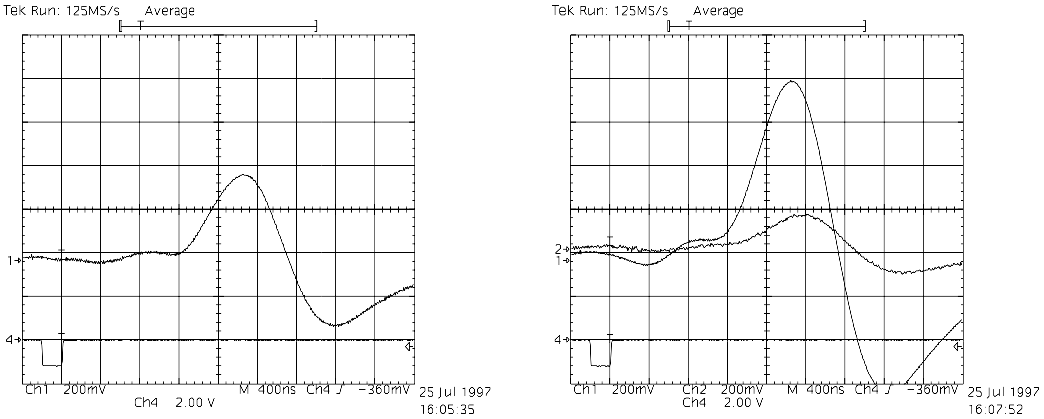


Abbildung 5.2: *Kennlienen der Triggersignale im SSM. Links das elektromagnetische Signal, rechts die hadronischen Signale als Summe über eine bzw. vier TCs.*

Im SSM werden die Zeitpunkte der Pulsmaxima aller zu summierenden Signale synchronisiert. Wie in Hamburg wird für die hadronischen Signale die verdoppelte Verstärkung der elektromagnetischen Signale verwendet. Abbildung 5.2 zeigt die Synchronität und unterschiedlichen Verstärkungen der Trigger-Zellensignale.
Im Meßstand wird bereits das neue Analog Gating Modul (AGM) eingesetzt, das so ebenfalls unter Bedingungen getestet werden konnte [38], die weitgehend den Hamburger Verhältnissen entsprechen. Abbildung 5.3 zeigt das Ausgangssignal des AGM bei verschiedenen AGM-Schwellen. Das Stellen der Schalter der SSMs und das Setzen der AGM-Schwellen wird mit der gleichen Software wie in Hamburg durchgeführt [39].
Die Verdrahtung auf der Rückwand (backplane) des Triggercrates wurde so abgeändert, daß ein Trigger-Turm (TT) einem Großturm (BT) entspricht. Die Summation der Big-Tower-Summing-Unit berücksichtigt nur einen TT.

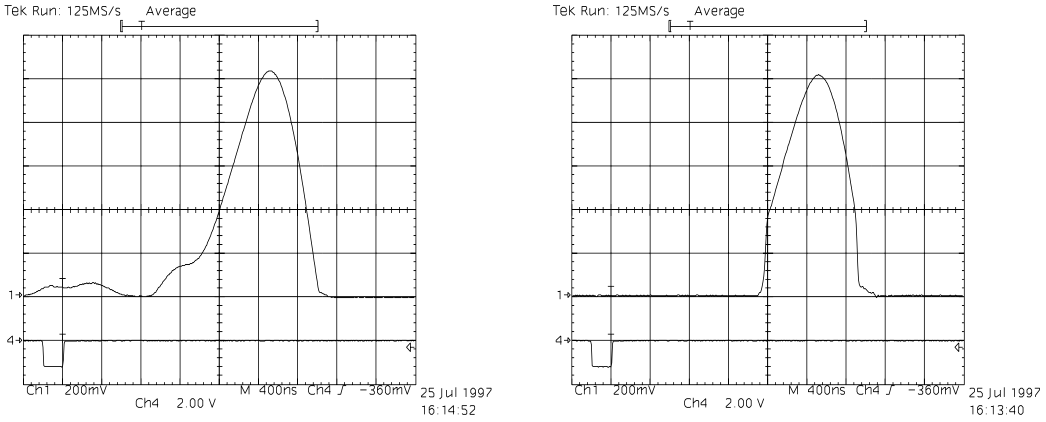
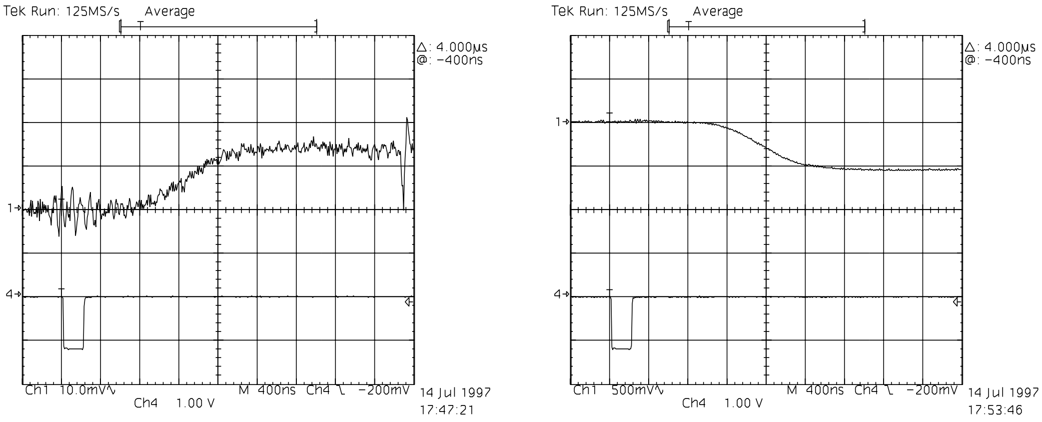


Abbildung 5.3: *Ausgangssignale des AGM, bei verschiedenen AGM-Schwellen: links 0 mV, rechts 100 mV. (vgl. auch Abb. 3.7).*

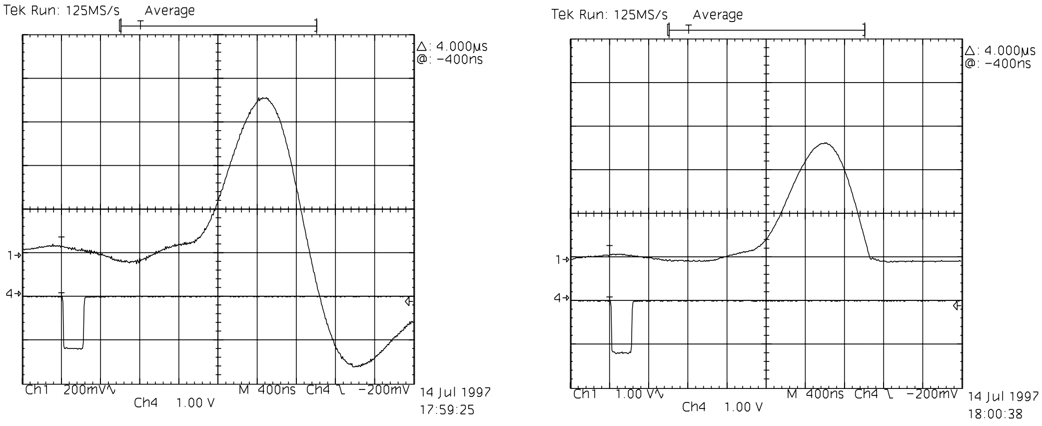
Die Signale der acht BTs, die jeder aus einem elektromagnetischen und einem hadronischen Teil bestehen, werden in 16 FADCs auf zwei FADC-Karten, einer elektromagnetischen und einer hadronischen Karte, digitalisiert.
Die Auslese der einzelnen Kanäle erfolgt analog zur Auslese der Kalorimeterkanäle (vgl. Abschnitt 3.5.3). Zur Simulation der Energie im Kalorimeter wird ein extern triggerbarer Pulsgenerator verwendet, dessen Pulse wie bei der Warmen Kalibration vor dem Eingang des Vorverstärker-Hybriden kapazitiv auf der Analogkarte eingekoppelt werden. Zur Überwachung des Meßablaufs ist an den Pulsgenerator ein Pulszähler angeschlossen. Pulser und Meßstand werden über das Controller-Board synchronisiert.
Anstelle des Signalkabels werden auf Stecker aufgelötete Kondensatoren auf die Analogkarte aufgesteckt. Diese simulieren die Kapazitäten der Auslesezellen des Kalorimeters. Es stehen vier Sätze von Kondensatoren mit 2,2 nF, 4,7 nF, 6,8 nF und 12,4 nF zur Verfügung.
Das korrekte Funktionieren aller wesentlichen Bestandteile der Triggerelektronik kann am Oszilloskop überprüft werden. Abbildung 5.4 zeigt die so gewonnenen Zeit-Spannungs-Kennlinien. In Abbildung 5.5 sind die Ausgangs-Kennlinien der Hybride auf der Analogkarte zu sehen. Abbildung B.2 in Anhang B.1 skizziert die Meßpunkte auf der Analogkarte. Die Kennlinien dienen als Referenz bei der Suche nach Fehlerquellen auf der Analogkarte.

5.2 Datenaquisition im Meßstand

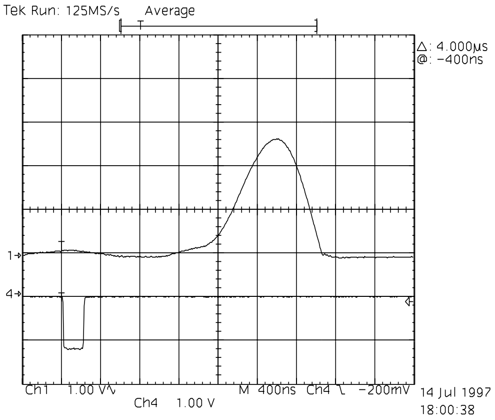
Ein in das VME-crate integriertes OS9-System steuert den Meßablauf. Die Software [40] besteht im wesentlichen aus Routinen zur Steuerung und Auslese des Flüssig-Argon-Kalorimeters, die an den kleineren Meßstand angepaßt wurden.



Pulsgenerator Trigger Merging Board

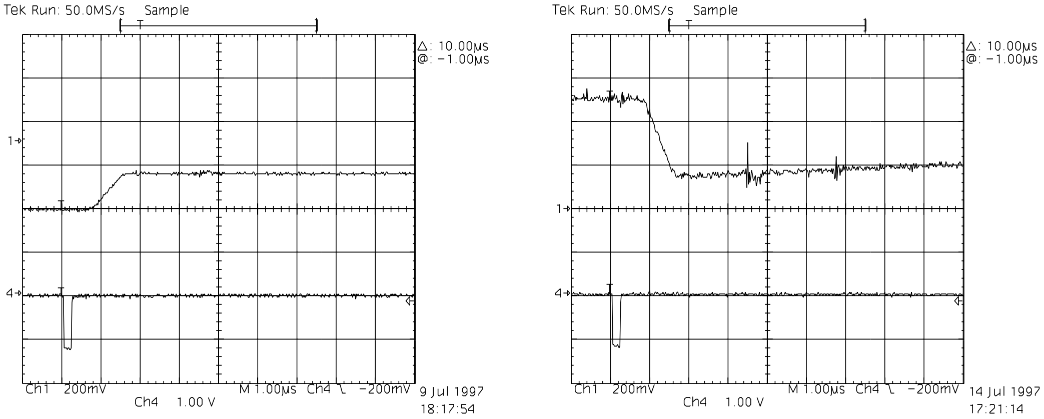


Shaping and Summing Modul Analog Gating Modul



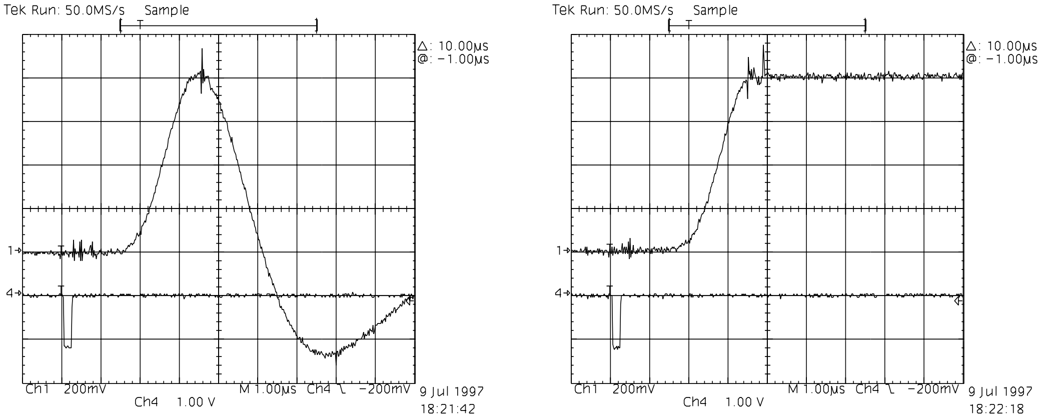
Big Tower Summing Unit

Abbildung 5.4: *Ausgangssignale der wesentlichen Stufen der Triggerelektronik. Signale an AGM und BTS sind identisch, da im Meßstand Großtürme aus je einem Trigger-Turm gebildet werden.*



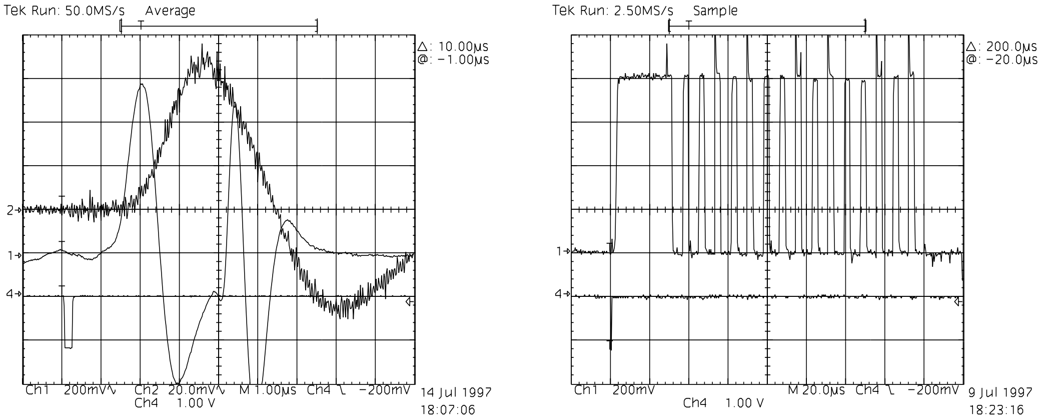
Pulsgenerator

Vorverstärker



Signalformer

Sammel- und Halteglied



Signalformer und Trigger

Multiplexer

Abbildung 5.5: *Kennlinien einiger ausgewählter Meßpunkte auf der Analogkarte (Skizze der Meßpunkte: Abb. B.2 in Anhang B.1).*

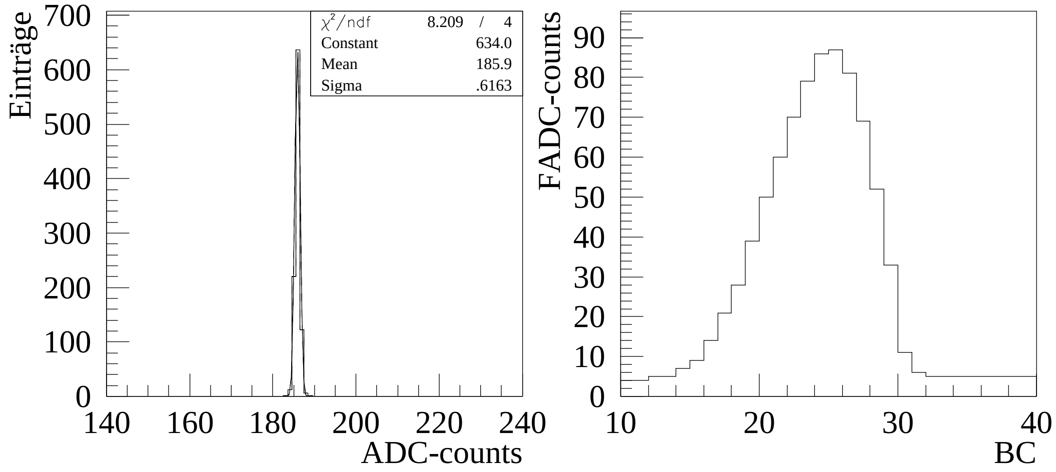
Eine Messung im Meßstand besteht aus einer wählbaren Anzahl von Meßstand-Ereignissen, die jeweils folgenden Ablauf haben, der sich in Abbildung 5.1 nachvollziehen läßt:
Der Controller triggert den Pulser. Dieser sendet ein Startsignal an das Servicemodul. Das Pulsersignal kann außerdem als Kalibrationspuls verwendet werden, der wie bei der Warmen Kalibration in Hamburg auf der Analogkarte eingekoppelt wird.
Die FADCs digitalisieren das Signal alle 96 ns, so daß ein Spektrum des Triggerpulses registriert wird. Zur Verringerung der Datenmenge wird ein Zeitfenster um das Pulsmaximum ausgewählt, das 30 BC umfaßt.
Nach einer einstellbaren Verzögerungszeit (engl.: delay) wird ein L1-keep-Signal an das S/H-Glied auf der Analogkarte geschickt. Die in Abschnitt 3.5.3 beschriebene Auslesekette überträgt die gespeicherten Spannungen zur Digitalisierung an die ADCs. Dabei wird auch ohne Puls wegen einer positiven Vorspannung ein digitales Signal von etwa 200 ADC-counts erzeugt, das sogenannte ADC-Pedestal.
Zu jedem Meßstand-Ereignis werden die Spektren der 16 FADCs und die digitalisierten Kalibrationspulse der 128 Kanäle ausgelesen. Die ADC-counts der Kalibrationspulse werden histogrammiert (Abb. 5.6 links), Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Verteilungen werden als gesonderter Datensatz gespeichert. Die FADC-Spektren jedes Meßstand-Ereignisses werden einer schnellen Analyse unterzogen, die für jedes FADC-Spektrum $F(BC)^i$ dessen Maximum $F_{MAX}{}^i$, das Quadrat des Maximums $F_{MAX}{}^{i2}$ und den Zeitpunkt des Maximums $BC_{MAX}{}^i$ ermittelt. Daraus werden zum Abschluß der Messung, die N Meßstand-Ereignisse umfaßt, folgende Kenngrößen errechnet, die eine eigenen Datensatz bilden:

$$\begin{array}{lll}
\text{mittleres Maximum des Spektrums:} & \overline{F_{MAX}} & = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} F_{MAX}{}^i \\
\text{Standardabweichung des Maximums:} & \sigma_{F_{MAX}} & = \sqrt{\overline{F_{MAX}{}^2} - \overline{F_{MAX}}^2} \\
\text{mittleres BC des Maximums:} & \overline{BC_{MAX}} & = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} BC_{MAX}{}^i
\end{array}$$

Zusätzlich werden gemittelte FADC-Spektren (Abb. 5.6 rechts) errechnet, die zusammen mit den ADC-Histogrammen gespeichert werden:

$$\text{mittleres FADC-Spektrums:} \quad \overline{F(BC)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} F(BC)^i$$

Weitere Informationen zu Meßprogrammen, Datennahme und Datensätzen finden sich in Anhang B.2.



ADC Histogramm

FADC Spektrum

Abbildung 5.6: *Histogramm der ADC-counts (links) und gemitteltes FADC-Spektrum (rechts) einer Messung mit 1000 Meßstand-Ereignissen.*

5.3 Rauschverhalten des Meßstands

Ziel ist es nun, durch eine geeignete Meßreihe Datensätze zu gewinnen, welche die volle Funktionsfähigkeit der Analogkarten bestätigen beziehungsweise Defekte aufzeigen und gegebenenfalls Rückschlüsse auf Defekt-Ursachen ermöglichen. Als Vorstudien wurden das Verhalten des Meßstands und der Einfluß verschiedener Parameter untersucht.

Einschaltverhalten

Nach der Inbetriebnahme der Spannungsversorgung der Analogbox erwärmt sich die Elektronik der Analogkarten. Das Kühlsystem wirkt dieser Erwärmung entgegen, so daß sich ein Gleichgewicht einstellt. Zur Untersuchung des Einschaltverhaltens wurden im 30-Sekunden-Takt Messungen mit jeweils 100 Meßstand-Ereignissen durchgeführt. Die ADC-counts jedes Kanals wurden histogrammiert, die sich ergebenden Verteilungen durch Gauß'sche Glockenkurven approximiert. Die Breite der Gaußkurve ist ein Maß für das Rauschen des Kanals. Die geringe Statistik von 100 Meßstand-Ereignissen wird durch die gewünschte Wiederholrate erzwungen, eine Mittelung über alle 128 Kanäle führt dennoch zu zuverlässigen Werten. Um das Rauschen gering zu halten, wurden keine Kapazitäten aufgesteckt.

Aus Abbildung 5.7 ist keine zeitabhängige Veränderung des Rauschens abzulesen, es herrschen bereits direkt nach dem Einschalten stabile Bedingungen.

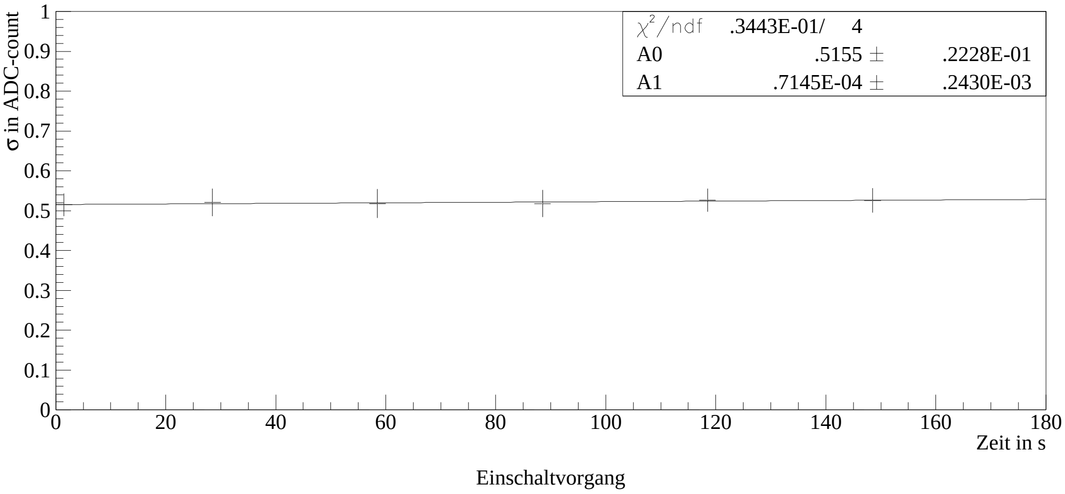


Abbildung 5.7: *Rauschen der Elektronik in 30-Sekunden-Intervallen nach dem Einschalten: zwei Histogramme der Rauschwerte aller Kanäle (oben), Mittelwerte und Standardabweichung der Rauschverteilungen in ihrer zeitlichen Entwicklung (unten).*

Langzeitverhalten

Eine Langzeitmeßreihe zeigt die Stabilität des Meßsystems. Über einen Zeitraum von fünf Stunden wurden in 30-Minuten-Abständen Messungen durchgeführt. Jede dieser Messungen bestand aus 1000 Meßstand-Ereignissen, wobei keine Kapazitäten aufgesteckt wurden. Wie bei der Untersuchung des Einschaltverhaltens wird für jeden Kanal das Rauschen bestimmt und anschließend über alle Kanäle gemittelt. Abbildung 5.8 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen aus dieser Mittelung. Die Stabilität des Rauschniveaus in der Analogbox konnte erst durch arbeitsintensive Verbesserung der Abschirmung und Erdung der Analogbox erreicht werden.

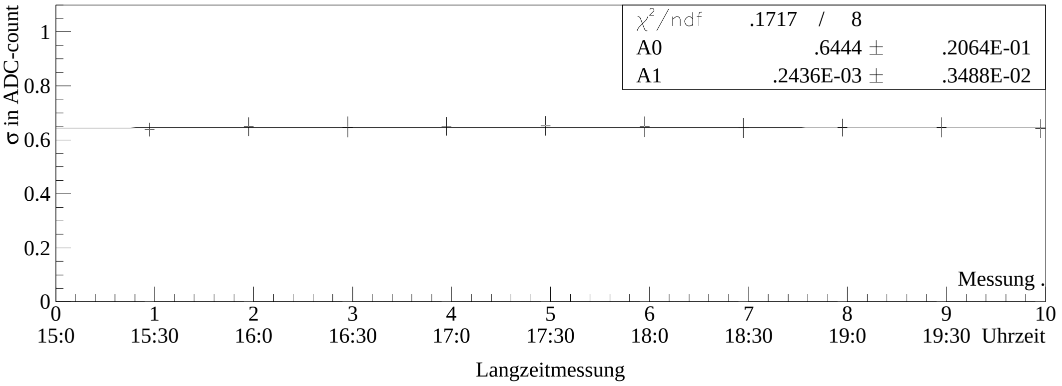


Abbildung 5.8: *Stabilität des Rauschniveaus an einem Nachmittag.*

Einfluß der Meßdauer

Bei der Festlegung der Anzahl der Meßstand-Ereignisse einer Messung muß ein Kompromiß gefunden werden zwischen einer guten Statistik, die eine große Zahl von Ereignissen fordert, und einer kurzen Meßzeit, die die Zahl nach oben begrenzt. Unter Beibehaltung aller anderen Parameter wurde die Anzahl der Meßstand-Ereignisse variiert, wobei jeweils 10 Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden (Abb. 5.9). Für die weiteren Messungen wurden 1000 Meßstand-Ereignisse gewählt, da eine höhere Anzahl kaum eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit bewirkt. Der Zeitbedarf für Datennahme und -sicherung bleibt dabei unter einer Minute pro Messung.

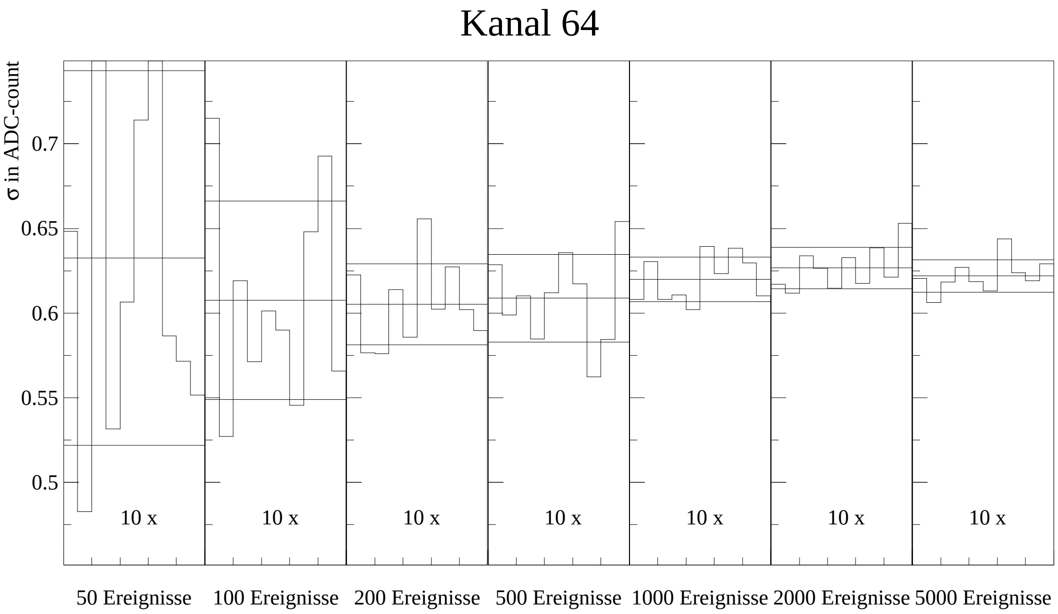


Abbildung 5.9: *Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Rauschmessung bei zunehmender Anzahl der Meßstand-Ereignisse.*

Testkapazitäten

Im Meßstand simulieren Kondensatorstecker die Kapazität der Kalorimeterzellen. Aus den ADC-Histogrammen über 1000 Meßstand-Ereignissen wurde durch Gaußfit das Rauschen bei vier verschiedenen Testkapazitäten bestimmt. Über die 128 Kanäle einer Boxladung wurde anschließend gemittelt.

Nach dem Modell des Weißen Rauschens (Abschnitt 4.2) steigt das Rauschen linear mit der Detektorkapazität an (Gleichung 4.8). Eine lineare Approximation durch die Rauschmittelwerte bei den vier Testkapazitäten stimmt sehr gut mit dieser Vorhersage überein ($\chi^2/ndf = 7.432/3$).

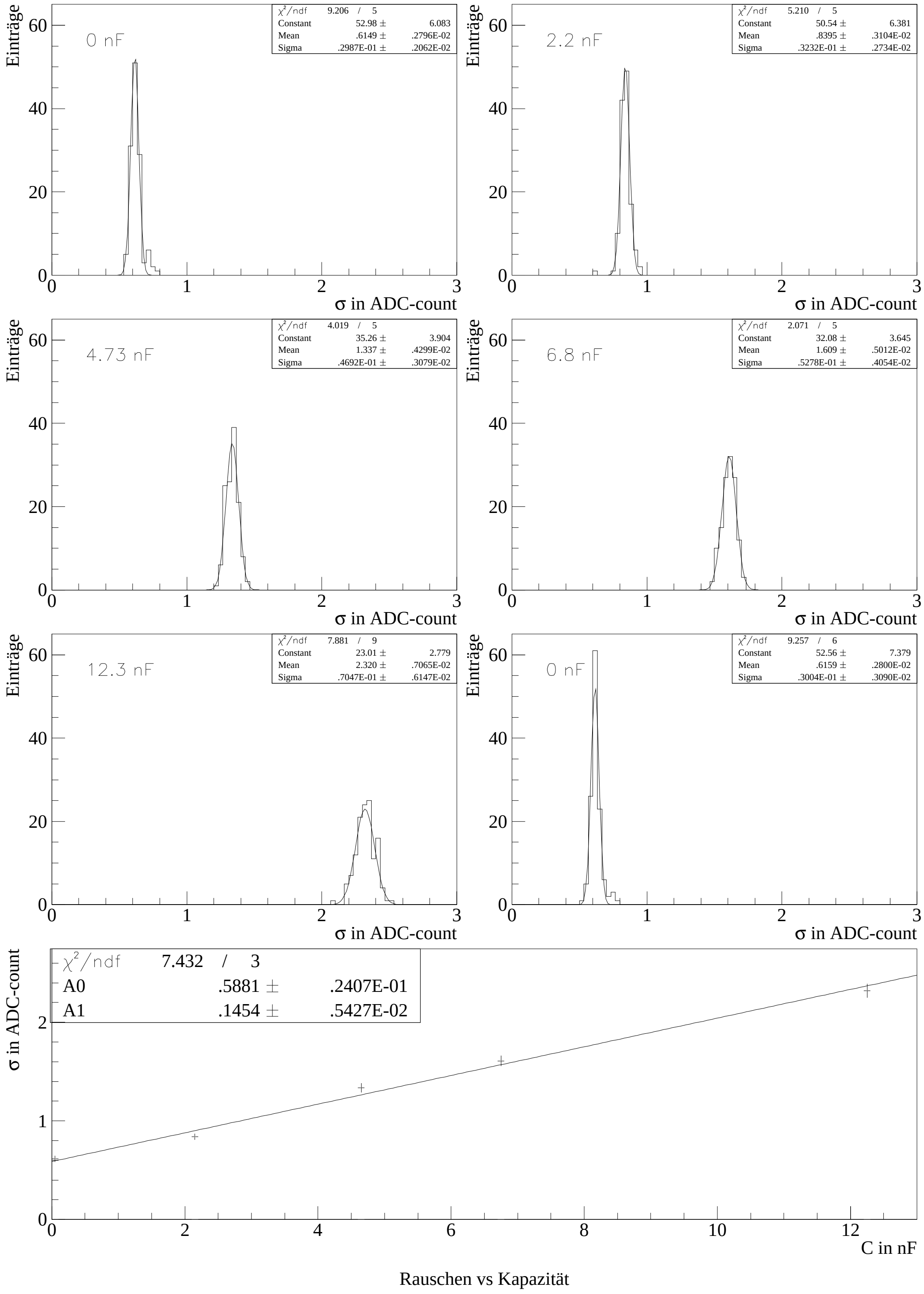


Abbildung 5.10: *Rauschen der Elektronik mit alten Vorverstärkern bei verschiedenen Testkapazitäten.*

Identische Messungen bestätigen auch für die umgerüsteten Karten das Modell des Weißen Rauschens. Abbildung 5.12 zeigt den kapazitätsabhängigen Rauschreduktionsfaktor, der gegeben ist durch:

$$\frac{\sigma_{alt}}{\sigma_{neu}} = \frac{a_{alt} + b_{alt} C_D}{a_{neu} + b_{neu} C_D} \tag{5.1}$$

C_D bezeichnet die Testkapazität im Meßstand bzw. die Kapazität der Kalorimeterzelle im Detektor. Zahlenwerten für die Modell-Parameter a und b für alte bzw. neue Vorverstärker sind Abbildung 5.12 zu entnehmen (wobei a = P1, b = P2).

In gegenwärtig laufenden Untersuchungen des Rauschens im Flüssig-Argon-Kalorimeter [41] wird die kapazitätsabhängige Rauschreduktion durch die neuen Vorverstärker im Detektor bestimmt (Abb. 5.11). Diese stimmt sehr gut mit den Erwartungen aus den Labormessungen in München überein (Abb. 5.12 unten).

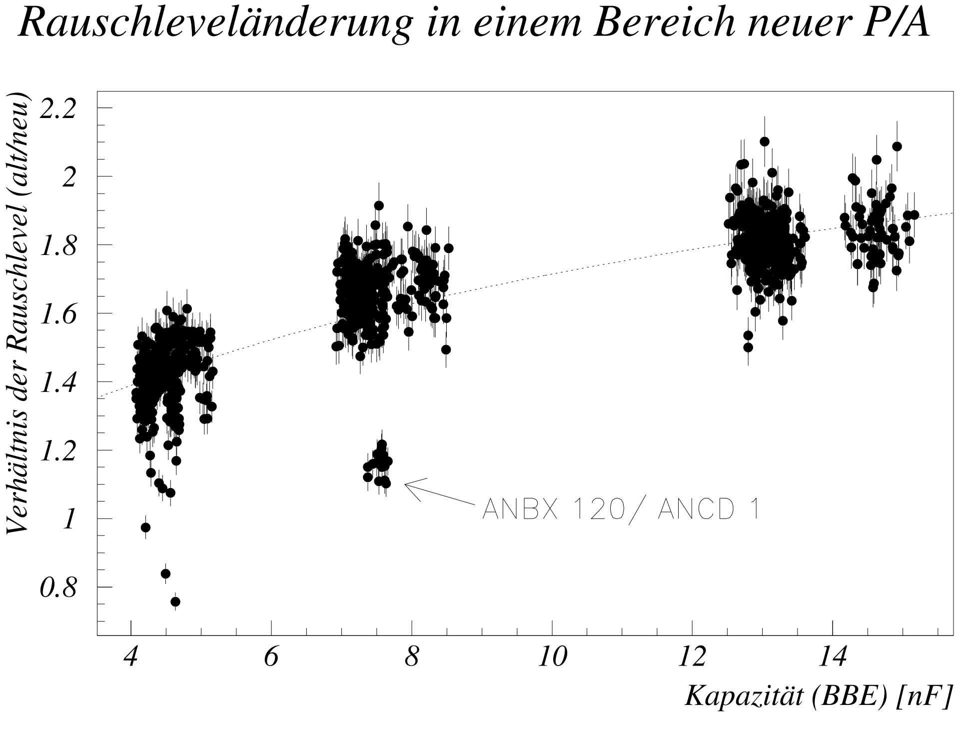
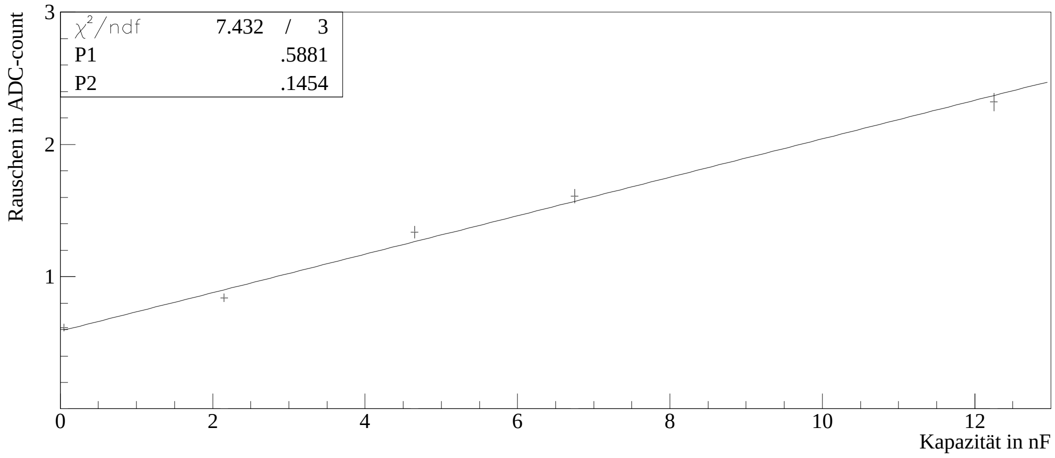
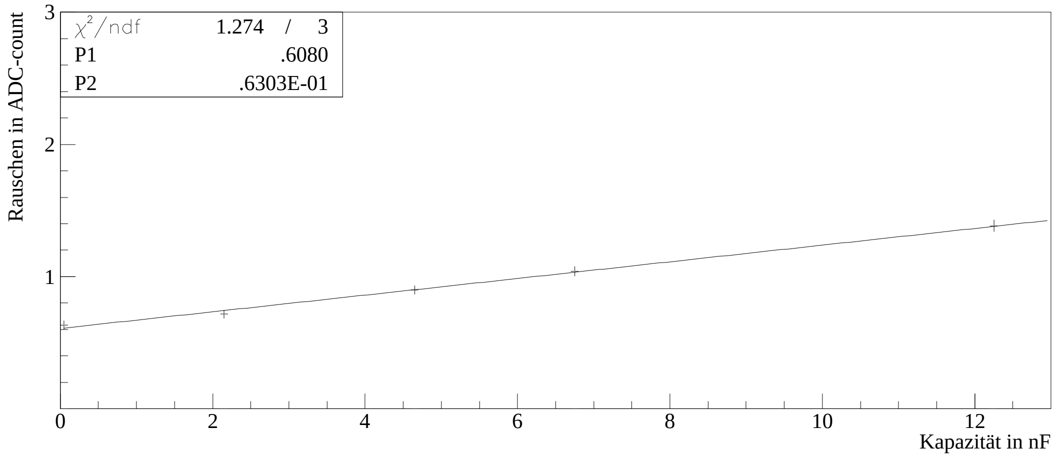


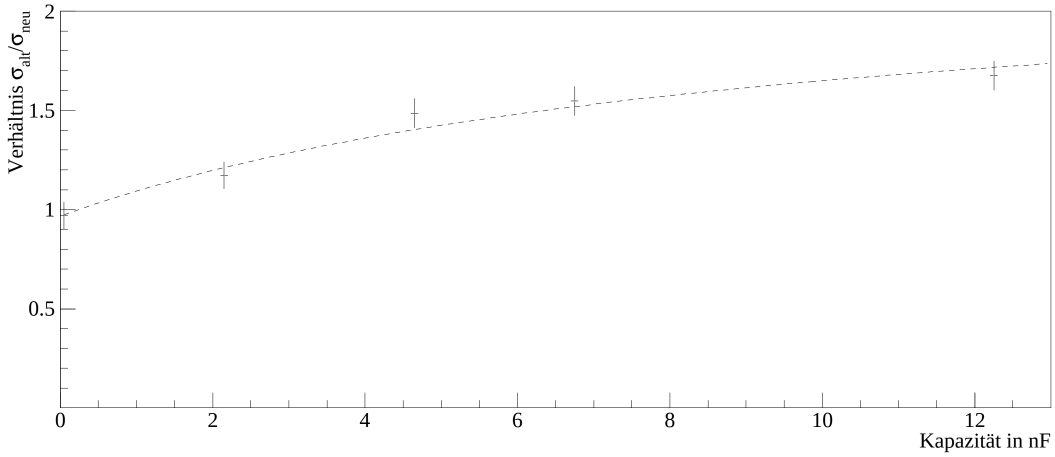
Abbildung 5.11: *Rauschreduktion im rückwärtigen elektromagnetischen Kalorimeter (BBE) durch den Einsatz neuer Vorverstärker (Unabhängige Analyse [41]).*



alte Vorverstärker



neue Vorverstärker



Gewinnfaktor

Abbildung 5.12: *Rauschen der Elektronik bei verschiedenen Testkapazitäten für alte (oben) und neue (Mitte) Vorverstärker. Rauschreduktionsfaktor in Abhängigkeit von der Kapazität (unten).*

Verzögerungsparameter

Alle bisher besprochenen Messungen sind reine Rauschmessungen und können für alte und umgerüstete Analogkarten in gleicher Weise durchgeführt werden. Für Messungen, bei denen der Pulser als Quelle von Kalibrationspulsen eingesetzt wird, muß der Zeitpunkt des L1-keep-Signals für alte und neue Vorverstärker gesondert gesetzt werden, da die Pulse in der neuen Elektronik etwas verzögert werden. Der Zeitpunkt des L1-keep-Signals kann durch die Wahl eines Verzögerungsparameters in Einheiten von 96 ns eingestellt werden. Die Variation dieses Parameters erlaubt es, das Ausgangssignal des Signalformers auch digital abzubilden. In Abbildung 5.13 sind die ADC-Mittelwerte gegen den Verzögerungsparameter (Delay2) aufgetragen. Trifft L1-keep auf die Signalflanke, erhöht sich das Rauschen, da bereits eine kleine Variation des L1-keep Zeitpunktes eine große Variation der Signalhöhe zum Zeitpunkt des hold-Signals des Sammel- und Halteglieds nach sich zieht.

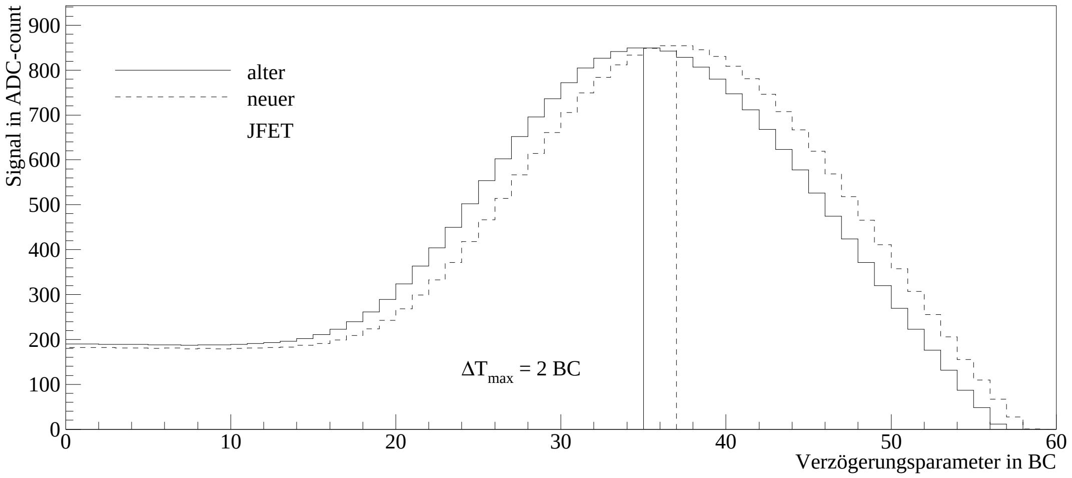


Abbildung 5.13: *Der Verzögerungsparameter für alte und neue JFETs.*

Pulshöhe

Ist der Verzögerungsparameter für alte bzw. umgerüstete Karten eingestellt, so kann der Puls für die Warme Kalibration variiert werden. Dadurch läßt sich der lineare Zusammenhang zwischen Pulshöhe und ADC- bzw. FADC-counts für alte und neue Karten bestätigen. Für den Meßstand am Max-Planck-Institut steht kein programmierbarer Pulsgenerator zur Verfügung, wie sie in H1 eingesetzt werden. Es ist zu aufwendig, für jede Boxladung den Pulser von Hand für eine Pulserrampe einzustellen, wie sie in Abbildung 5.14 gezeigt ist. Für die Standardmeßreihen wurde eine fest eingestellte Pulsamplitude von 6 mV am Pulserausgang gewählt. Dies entspricht einem Kalibrationspuls von etwa 50 μV auf der Analogkarte.

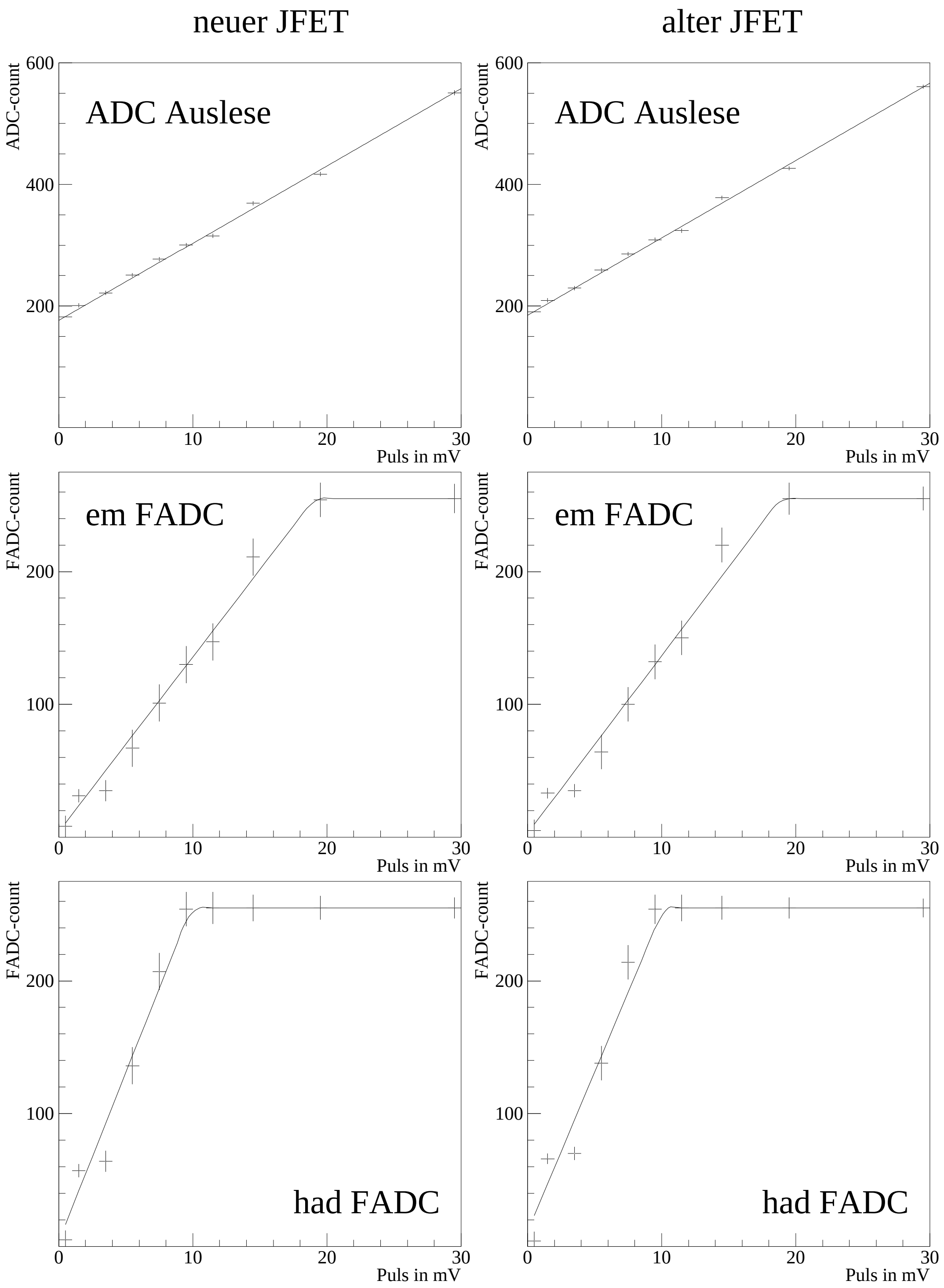


Abbildung 5.14: *Pulserrampen für alte und neue Vorverstärker; Kalorimeter und Trigger-Signale.*

5.4 Test der Analogkarten

Jede Analogkarte wird einer Meßreihe aus zehn Messungen unterzogen, die im Einzelnen in Tabelle 5.1 aufgeführt sind. Jede Messung umfaßt 1000 Meßstand-Ereignisse.

Nr.	C in nF	Puls in mV	geöffnete Switchs
0	0	0	alle
1	4,7	0	alle
2	12,3	0	alle
3	0	0	alle
4	0	6	alle
5	0	6	em
6	0	6	had 0
7	0	6	had 1
8	0	6	had 2
9	0	6	had 3

Tabelle 5.1: Standardmeßreihe.

Messung 0 und 3 stellen die Stabilität des Rauschniveaus während einer Meßreihe sicher. Eine Erhöhung des Rauschens durch statische Aufladungen, die beim Wechsel der Testkapazitäten in den Meßstand eingebracht werden können, ist so frühzeitig zu erkennen. Zwei Messungen (Nr. 1 und 2) mit verschieden Testkapazitäten reichen aus, um für jeden Kalorimeterkanal die Geradenparameter des Modells des Weißen Rauschens (Gleichung 4.8) zu bestimmen. Bei einer fest eingestellten Pulshöhe von 6 mV (Messungen 4 bis 9) wird die Analogkarte auf Fehlkontakte und korrekte Verstärkung der Trigger- und Kalorimetersignale überprüft. Weitere Informationen über Meßstand, Meß- und Analyseprogramme sind Anhang B zu entnehmen.

Bis Ende Januar 1997 wurden insgesamt 104 Analogkarten umgebaut und im Meßstand getestet. Es bestätigte sich, daß ein die Karte schonender Umbau möglich ist. Bei der letzten Serie von 32 Karten wurde keiner der Hybrid-Schaltkreise beschädigt. Bei 7% der neueingesetzten Vorverstärker-Hybride traten zunächst Fehlkontakte auf. Diese konnten durch die Standardmeßreihe zuverlässig nachgewiesen und durch manuelle Nacharbeiten behoben werden. Nach einem Verfahren, das kalte Lötstellen weitgehend vermeidet und so den Umfang zeitintensiver Nacharbeiten gering hält, wird derzeit noch gesucht [42].

6 Messungen im Detektor

Während der Luminositätsperiode 1997 sind 1472 Kalorimeterkanäle im rückwärtigen elektromagnetischen Zentralbereich (Backward Barrel Elektromagnetic calorimeter: BBE) mit neuer Elektronik ausgerüstet. Im Trigger bilden diese Kanäle 96 Trigger-Zellen in 24 Trigger-Türmen ohne hadronischen Teil. Deren Signale, zusammengefaßt zu acht BTs, werden in acht elektromagnetischen FADCs digitalisiert.
Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, konnte im Meßstand am Max-Planck-Institut in München die erwartete Senkung des Rauschens bis zu einem Faktor 1.8 erreicht werden. Um nun die Elektronik optimal zum Einsatz zu bringen, ist zunächst eine Rauschmessung im H1-Detektor vor Ort notwendig. Das verringerte Rauschen erlaubt es, die AGM-Schwellen, die der Rauschunterdrückung dienen, in angepaßter Weise zu senken. Dies erfordert ein schnelles Verfahren zur Bestimmung der AGM-Schwellen. Wie bereits erwähnt, wird durch die neuen Vorverstärker das Signal geringfügig verzögert. Daher erscheint es angezeigt, für das t0-Signal des Triggers den Zeitpunkt, das dem t0-Bit zugeordnete BC, und die Signalhöhe, ab der das Bit gesetzt wird, zu vermessen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde das bereits bestehende Trigger-Kalibrations-Programm TriCal [43] um wesentliche Meßmöglichkeiten erweitert.
Im den folgenden Abschnitten werden zunächst der prinzipielle Aufbau des Programms dargestellt, dann die Messungen mit ihren Ergebnissen beschrieben. Dies sind im einzelnen Rauschmessungen verschiedener Granularität, Messung der AGM-Schwelle und der t0-Schwelle.

6.1 Trigger-Kalibrations-Programm TriCal

TriCal erfüllt drei Aufgaben: Datenaquisition, Analyse der genommenen Spektren und Vergleich mit Referenzdatensätzen. Der schematische Ablauf des Kalibrationsprogramms wird in Abbildung 6.1 gezeigt.
Die Datennahme erfolgt in einer dreifach gestaffelten Schleife. In der äußersten Schleife werden die elektronischen Schalter (switchs) gesetzt, welche die Signale einzelner Trigger-Zellen zu- bzw. abschalten. Das Konzept von TriCal sieht vor, zusammen mit den Switchs auch t0- und AGM-Schwellen zu setzen, so daß der Trigger vollständig von TriCal konfiguriert werden kann. Die nächstinnere Schleife steuert das Pulsersystem. Unabhängig von der Konfiguration des Triggers können hier Pulshöhen variiert werden. Dies erlaubt, testspezifisch Pulserrampen unterschiedlicher Schrittzahl und Schrittweiten zu durchlaufen. Zur eigentlichen Datennahme dient die innerste Schleife. In jedem Durchlauf wird ein Request an das Kalorimeter-OS9-System gestartet [44], der das Pulser- und Datenaquisitions-System (DAQ) des Flüssig-Argon-

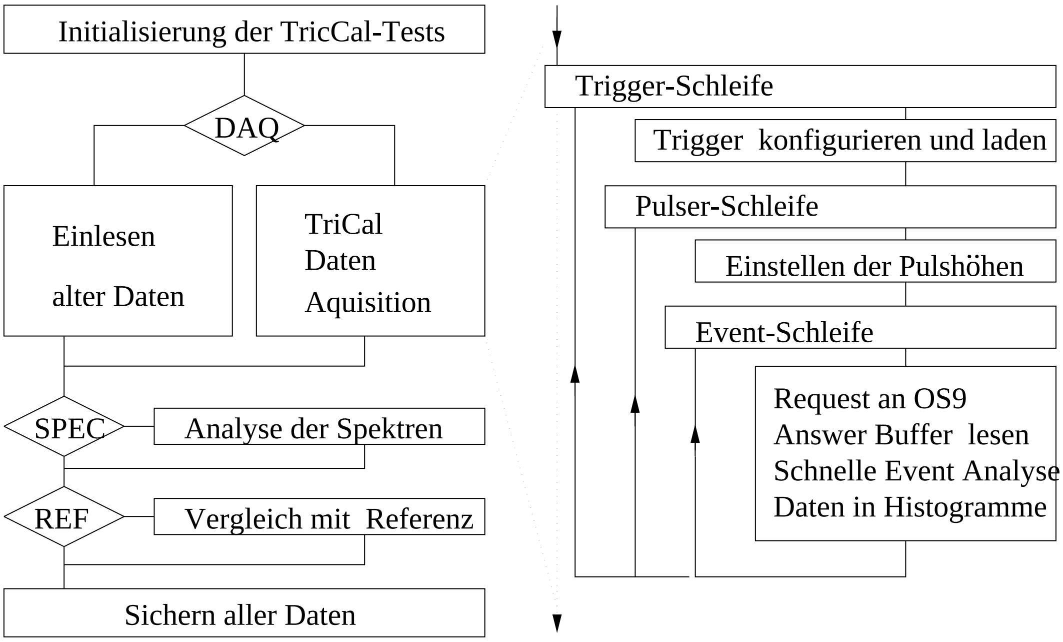


Abbildung 6.1: *Trigger-Kalibrations-Programm TriCal: Schematischer Ablauf.*

Kalorimeters und -Triggers in Gang gesetzt. Der Antwort-Buffer, der die ganze L1-Triggerinformation des Flüssig-Argon enthält, wird in das bei H1 übliche BOS-Bank-Format [45] übersetzt. Mit TTool [46], einem Routinen-Paket zur Triggeranalyse, werden aus der Gesamtheit der Flüssig-Argon-Informationen die für den jeweiligen Test benötigten Daten ausgewählt und in sogenannten TriCal-Spektren abgelegt. Die darauffolgenden testspezifischen Routinen analysieren diese Spektren. Die Ergebnisse der Analyse werden zusammen mit geometrischen Informationen in einem Datensatz gespeichert.

Die Datenanalyse kann für früher genommene Spektren unabhängig von der Datennahme durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Datenanalyse können mit Referenzdatensätzen verglichen werden. TriCal meldet Abweichungen, die über festzulegenden Schwellen liegen.

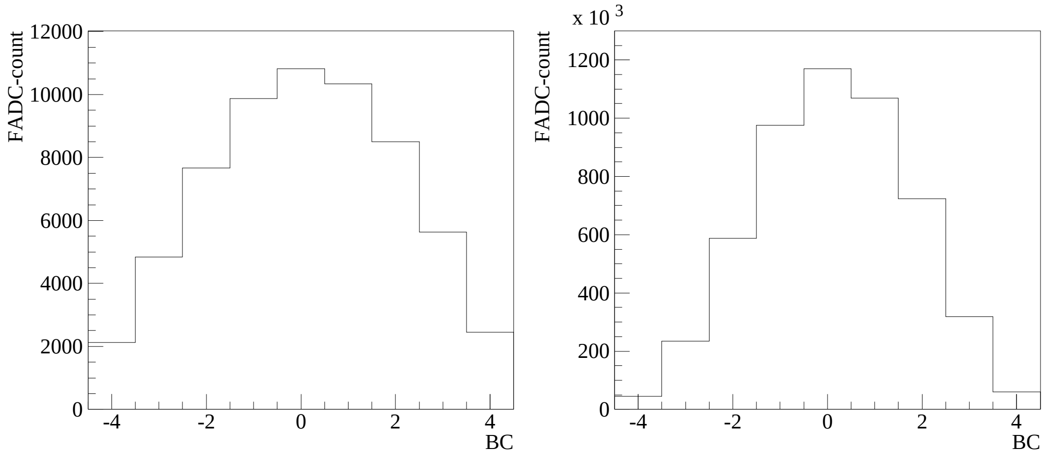
Eine Anleitung zur Durchführung der Messungen befindet sich im Anhang C.

6.2 Rauschmessungen

Spannungspulse der Pulsgeneratoren für die Kalte Kalibration induzieren Ladungen auf den Kalibrationskapazitäten der Kalorimeterzellen. Diesem Ladungssignal ist als Störsignal elektronisches Rauschen überlagert. Dies führt zu einer Gauß'schen Verteilung der digitalisierten Pulse um einen Mittelwert, der proportional zum Kalibrationspuls ist. Das Rauschen entspricht der Breite dieser Verteilung, also ihrer mittleren quadratischen Abweichung:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} A_{max}^2}{N}\right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} A_{max}}{N}\right)^2} \tag{6.1}$$

N ist die Anzahl der Kalibrationspulse, $\sum_{i=1}^{N} A_{max}$ bzw. $\sum_{i=1}^{N} A_{max}^2$ ist die lineare bzw. quadratische Summe der digitalen FADC-Signale des BCs, in dem sie ihr Maximum erreichen (Abb. 6.2).

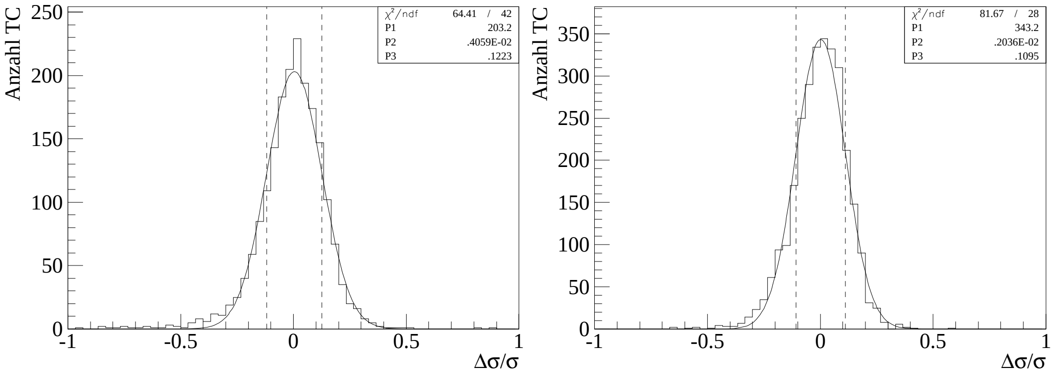


lineare Summe von 100 Ereignissen

quadratische Summe von 100 Ereignissen

Abbildung 6.2: *Während des TriCal-Tests TCNOISE genommene Spektren*

Im TriCal-Test TCNOISE wird Rauschen einzelner Trigger-Zellen ermittelt. Aus wiederholten Messungen wurde der relative Fehler $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ auf etwa 12% für elektromagnetische bzw. 11% für hadronische Trigger-Zellen abgeschätzt (Abb. 6.3).



em. Triggerzellen

had. Triggerzellen

Abbildung 6.3: *Abschätzung des relativen Fehlers der Rauschmessung.*

Zwischen Rauschen der Trigger-Zelle σ_{TC}, der Anzahl der Kalorimeterzellen, die zur Trigger-Zelle beitragen, N_{GP} und den mittleren Kapazitäten der Kalorimeterzellen einer Trigger-Zelle $\overline{C_D}$ besteht näherungsweise folgender Zusammenhang:

$$\frac{\sigma_{TC}}{\sqrt{N_{GP}}} = a + b\overline{C_D} \tag{6.2}$$

Die Ableitung kann in Anhang A nachvollzogen werden. Wegen ihrer unterschiedlichen Signalverstärkung sind elektromagnetische und hadronische Zellen getrennt zu betrachten (Abb. 6.4).

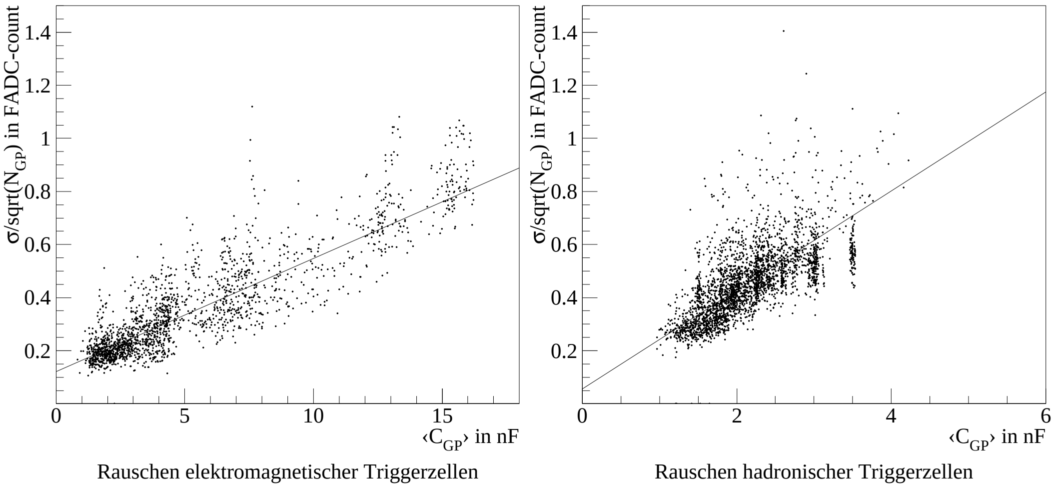


Abbildung 6.4: *Kapazitätsabhängigkeit des Rauschen der alten Elektronik in hadronischen und elektromagnetischen Trigger-Zellen.*

Wie für die Kalorimeterzellen kann auch für die Trigger-Zellen aus dem Modell des Weißen Rauschens ein kapazitätsabhängiger Rauschreduktionsfaktor abgeleitet werden:

$$\frac{\sigma_{alt}}{\sigma_{neu}} = \frac{a_{alt} + b_{alt}\overline{C_D}}{a_{neu} + b_{neu}\overline{C_D}} \tag{6.3}$$

Abbildung 6.5 zeigt die Rauschreduktion, die durch den Einsatz neuer Vorverstärker im BBE erzielt wurde. Näherungen 6.2 und 6.3 setzen voraus, daß nur Kalorimeterzellen mit annähernd gleichen Kapazitäten zu Trigger-Zellen zusammengefaßt werden. Für 16 TCs im BBE trifft dies nicht zu. Diese TCs enthalten 12 GPs mit Kapazitäten von 5 nF, 8 nF und 15 nF (jeweils viermal) [47]. Das Rauschen dieser Zellen wird nach dem Modell des Weißen Rauschens von den Beiträgen der größten Einzelkapazitäten dominiert. Mit den Modell-Parametern, die im Meßstand gewonnen wurden (Abschnitt 5.3 Abb. 5.12) kann die zu erwartende Rauschreduktion für alle Trigger-Zellen abgeschätzt und mit der im Kalorimeter gemessenen verglichen werden (Abb. 6.6).

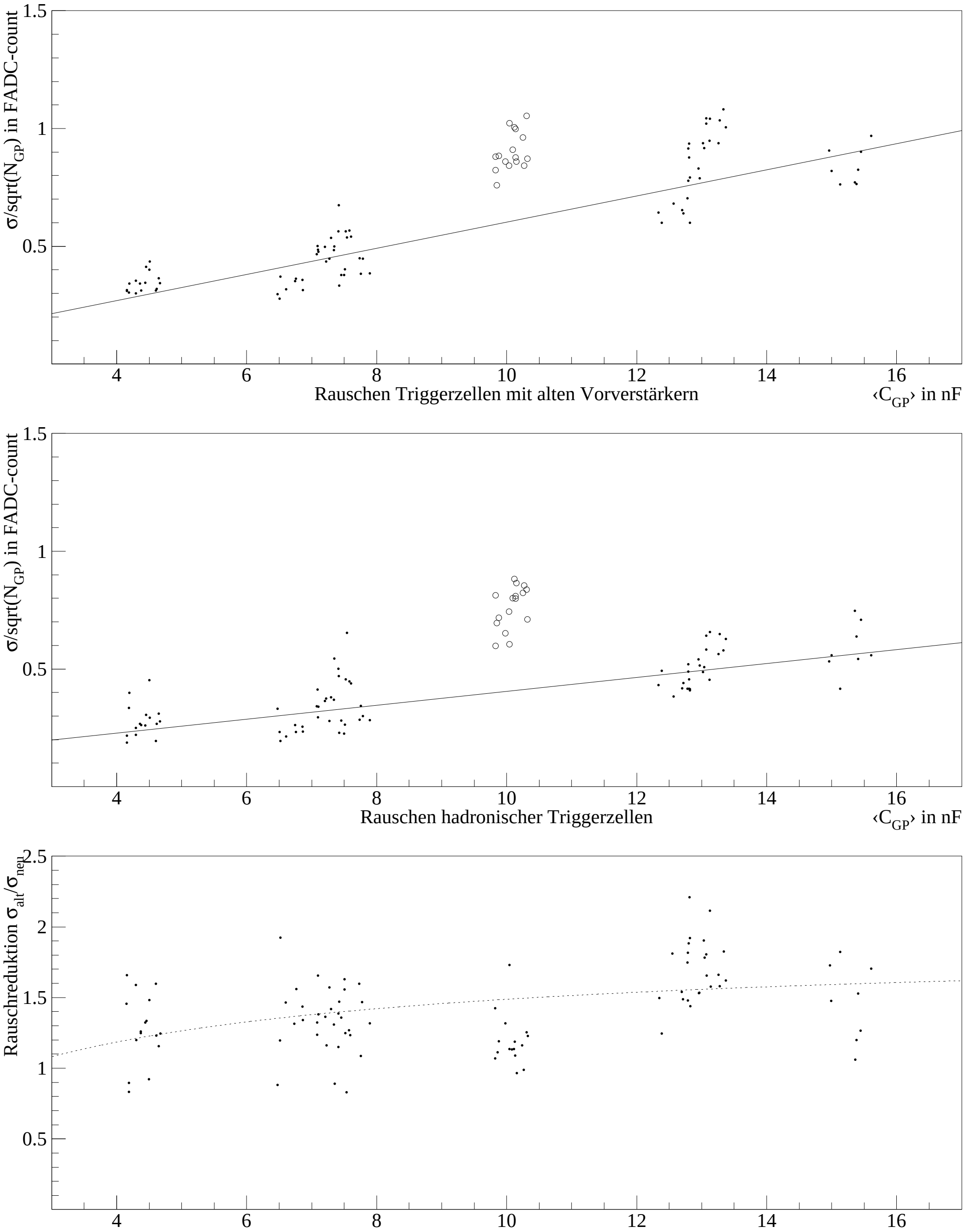


Abbildung 6.5: *Vergleich des Rauschens im BBE vor (oben) und nach (Mitte) dem Einsatz neuer JFETs. Gewinn durch die neuen JFETs (unten). (○ bezeichnet Trigger-Zellen, für die Näherung 6.2 nicht zutrifft).*

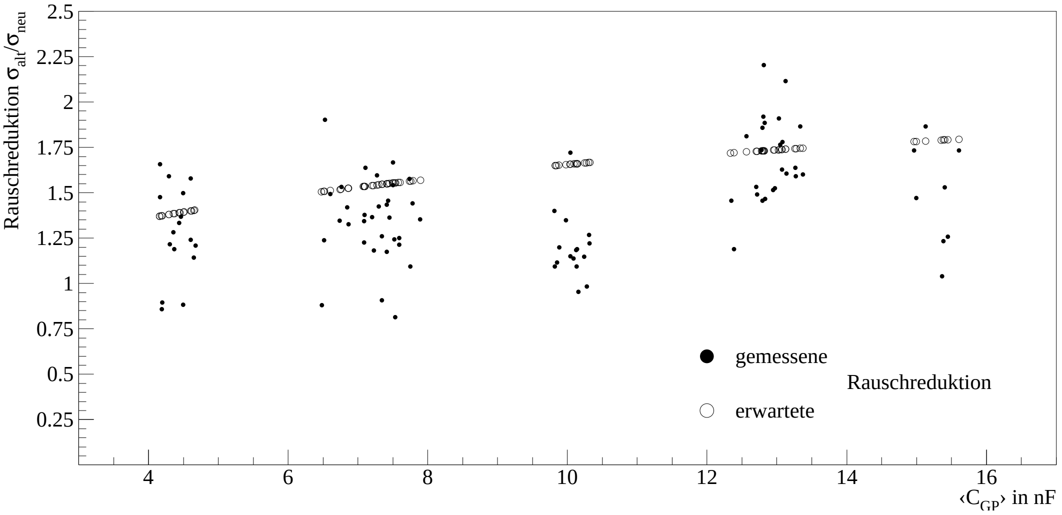


Abbildung 6.6: *Vergleich der im Kalorimeter gemessenen Rauschreduktion mit der aus den Messungen im Labor abgeleiteten Erwartung.*

Die Rauschreduktion bleibt für Trigger-Zellen, die im Flüssig-Argon-Kalorimeter weit außen liegen, deutlich unter der Erwartung. Wegen ihrer extremen Randlage ist gerade bei diesen Zellen mit zusätzlichem Rauschen von externen Störquellen zu rechnen.

Während TriCal-Test TCNOISE das Rauschen einzelner TC ermittelt, tragen beim TriCal-Test FCNOISE Rauschbeiträge aller Trigger-Zellen zum Gesamtrauschen der elektromagnetischen bzw. hadronischen BT-Signal, der FADC-Eingangssignale, bei. TriCal-Test TTNOISE berücksichtigt bei der Summierung zu den BT-Signalen nur die Trigger-Zellen eines Trigger-Turms. Das Rauschen der BT und TT kann direkt gemessen oder durch quadratische Summierung aus den Rauschbeiträgen der Trigger-Zellen konstruiert werden:

$$\sigma_{XT} = \sqrt{\sum_i \sigma_{TC_i}^2} \tag{6.4}$$

XT steht für den hadronischen oder elektromagnetischen Bereich eines BTs bzw. TTs. Trigger-Zellen dieser Bereiche sind durch i indiziert. Abbildung 6.7 zeigt die Korrelation von gemessenen σ_{mes} und konstruierten Rauschen σ_{rec} aller Trigger-Türmen des Flüssig-Argon-Kalorimeters, Abbildung 6.8 einen Vergleich von σ_{mes} und Rauschen σ_{rec} für Trigger-Türme aus dem BBE (θ-Index 22).

Bei der Summation des Rauschens der BTs bzw. TTs können detailliert die Rauschbeiträge einzelner TC untersucht werden. Gravierende Abweichungen des direkt gemessenen Rauschens vom rekonstruierten Rauschen sind auf kohärentes Rauschen durch externe Störquellen oder auf „Crosstalk“ während der Rauschmessung mit dem Pulser zurückzuführen.

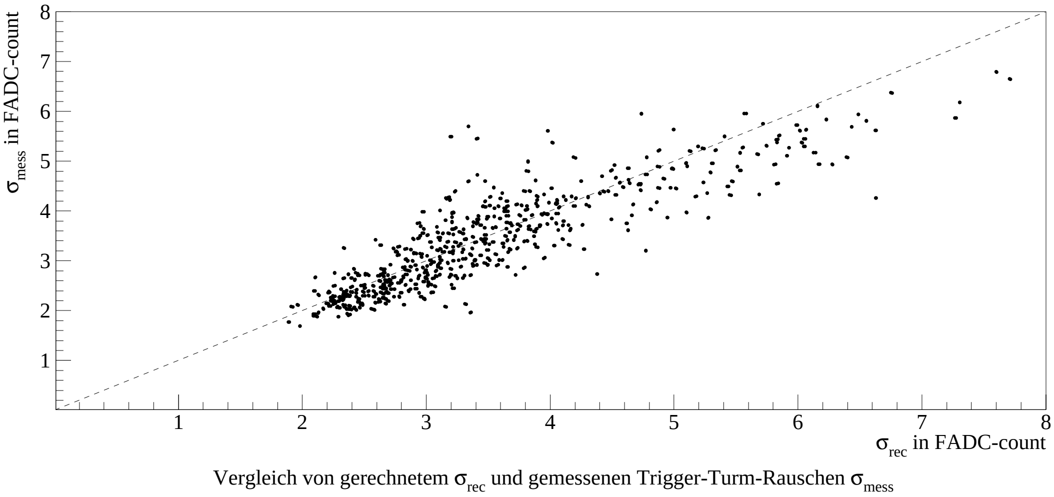


Abbildung 6.7: *Vergleich des im Trigger-Türmen gemessenen Rauschens mit dem aus Rauschbeiträgen der Trigger-Zellen errechneten.*

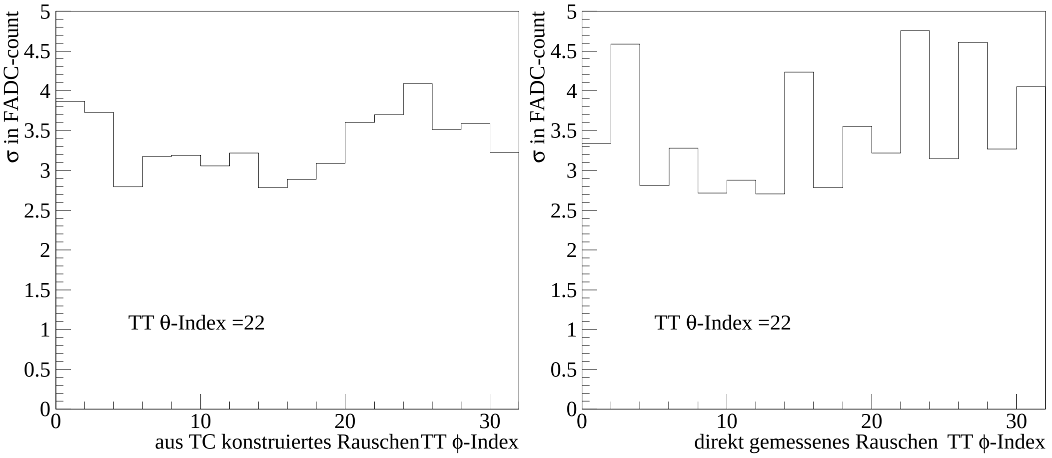
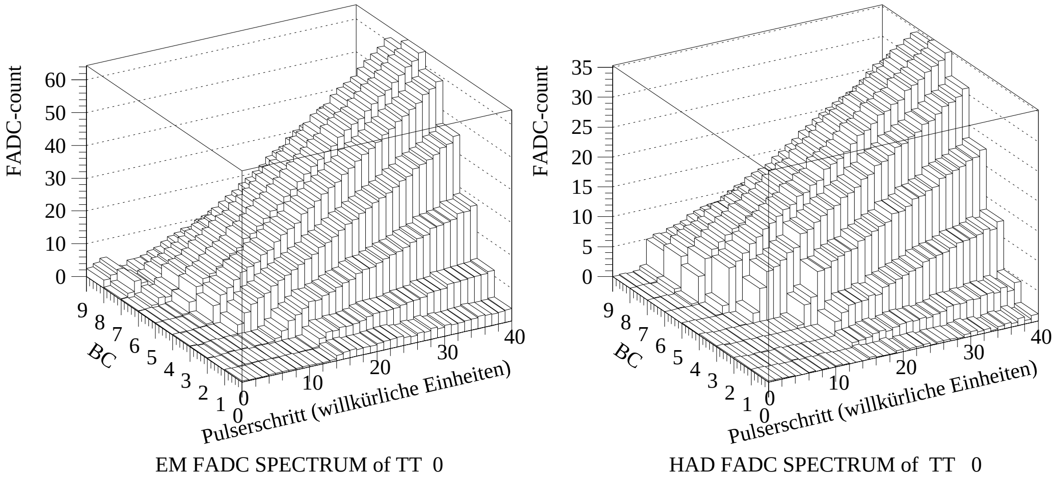


Abbildung 6.8: *Vergleich von gemessenem (links) und aus Trigger-Zell-Beiträgen summierten Rauschen (rechts) für Trigger-Türme des BBE.*

6.3 AGM-Schwellenmessung

TriCal-Test NEWAGM erhöht schrittweise die Pulsamplituden der Pulsgeneratoren. In aufeinanderfolgenden Trigger-Konfiguration-Schritten schalten die SSMs für jeden Trigger-Turm je eine elektromagnetische bzw. hadronische Trigger-Zelle ein. Abbildung 6.9 zeigt die FADC-Spektren in Abhängigkeit von Pulserschritt und BC.



EM FADC SPECTRUM of TT 0

HAD FADC SPECTRUM of TT 0

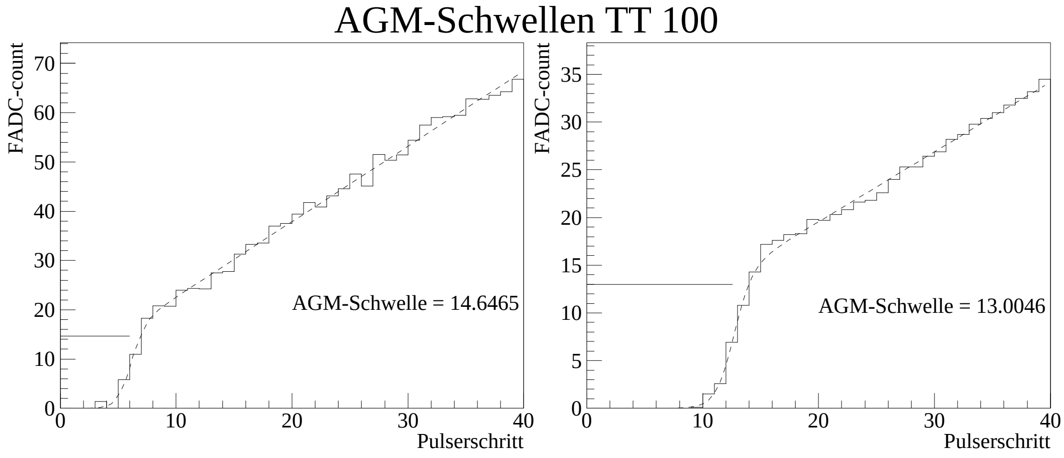
Abbildung 6.9: *Beispiel eines elektromagnetische (links) und hadronischen (rechts) Spektrums zur Bestimmung der AGM-Schwelle.*

Kleine Pulse werden von der AGM-Schwelle vollständig unterdrückt. Erst wenn die Pulshöhe die AGM-Schwelle überschreitet, erreicht das Signal den FADC. Die digitalisierten Signale sind proportional zur Pulshöhe. Pulse knapp unter der AGM-Schwelle können durch Rauschen über die Schwelle gehoben, Pulse darüber unter sie abgesenkt werden. Um dies zu berücksichtigen, werden zu jeder Pulshöhe über zehn Pulse gemittelte FADC-Spektren gebildet. Zur Schwellenbestimmung wird das Spektrum S_{FADC} im Band des BC des Pulsmaximums verwendet. Das Produkt aus einer Sigmoidfunktion und einer Geraden beschreibt das Schwellenverhalten gut:

$$S_{FADC} = \left(1 + exp\left(\frac{-(x - x_0)}{T}\right)\right)^{-1} \cdot (a + bx) \tag{6.5}$$

Dabei bezeichnet x den Pulserschritt, x_0 den Pulserschritt, bei dem die AGM-Schwelle überschritten wird. Der Temperaturparameter T der Sigmoidfunktion berücksichtigt das Verrauschen der Schwelle. Die AGM-Schwelle in FADC-count, T_{AGM}, ist gegeben durch:

$$T_{AGM} = a + b \cdot x_0 \tag{6.6}$$

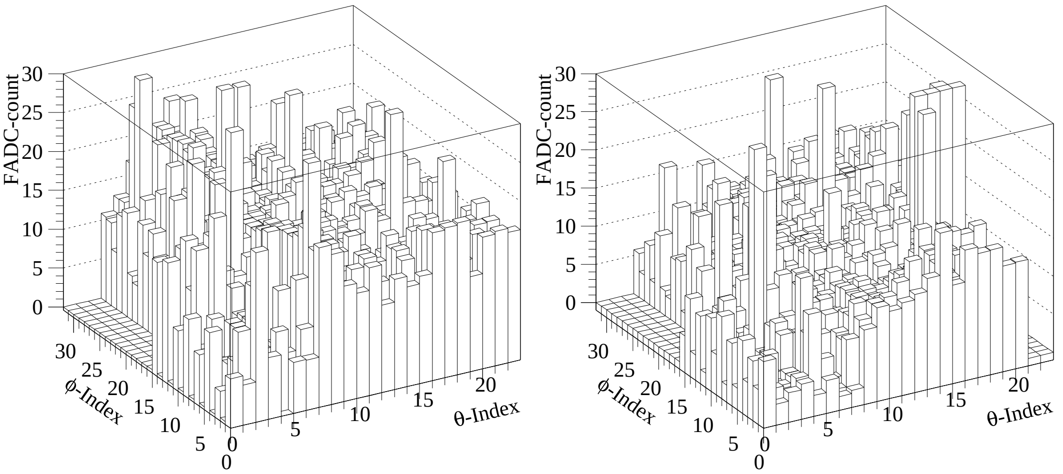


EM FADC SPECTRUM of TT100

HAD FADC SPECTRUM of TT 100

Abbildung 6.10: *Approximation der FADC-Spektren eines Trigger-Turms durch die Schwellenfunktion 6.5.*

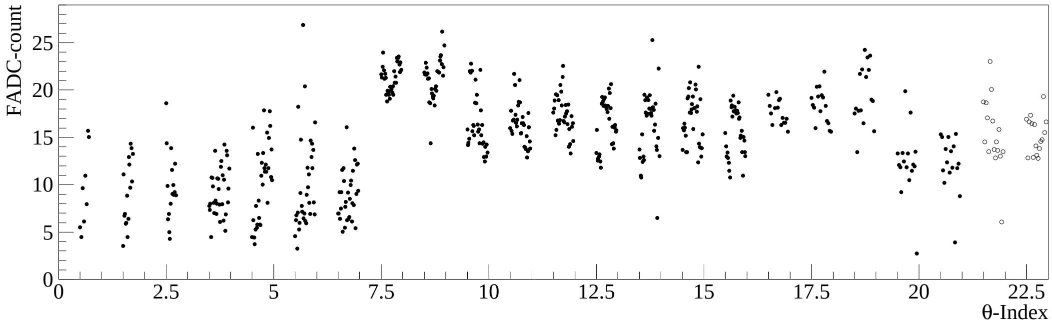
In den derzeit eingesetzten AGMs wird die Summe aus hadronischen und elektromagnetischen Trigger-Türmen mit einer Schwellenspannung verglichen. Die AGM-Schwelle eines Trigger-Turms kann sowohl durch Pulsen einer einzelnen elektromagnetischen TC (elektromagnetische Methode) als auch durch Pulsen einer einzelnen hadronischen TC (hadronische Methode) bestimmt werden. Abbildung 6.11 zeigt die Ergebnisse beider Methoden als Projektionen in die θ-ϕ-Ebene. Abbildung 6.12 verdeutlicht das während der Luminositätsperiode 1997 verwendete θ-Profil der AGM-Schwellen. Tabellarische Übersichten der Zahlenwerte aller AGM-Schwellen sind in Anhang C.4 zu finden.



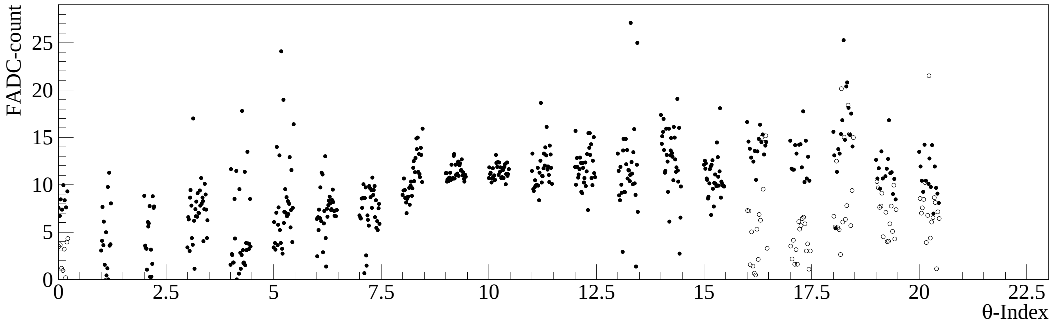
elektromagnetische AGM-Schwellen

hadronische AGM-Schwellen

Abbildung 6.11: *Elektromagnetische und hadronische AGM-Schwellen als dreidimensionale Projektion in die θ-ϕ Ebene.*

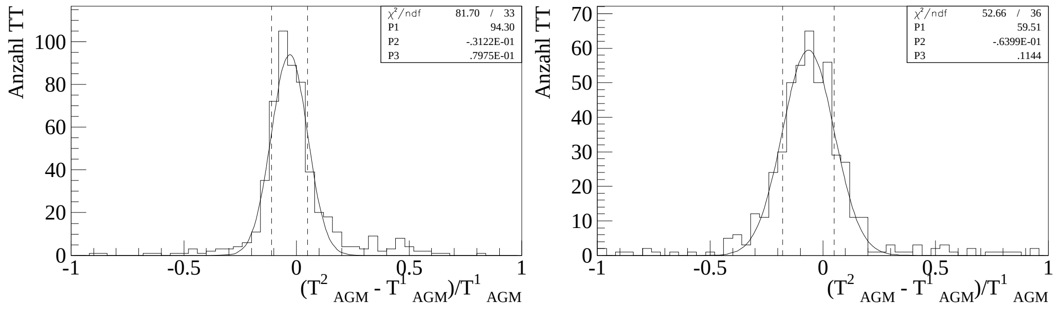


elektromagnetische AGM-Schwellen



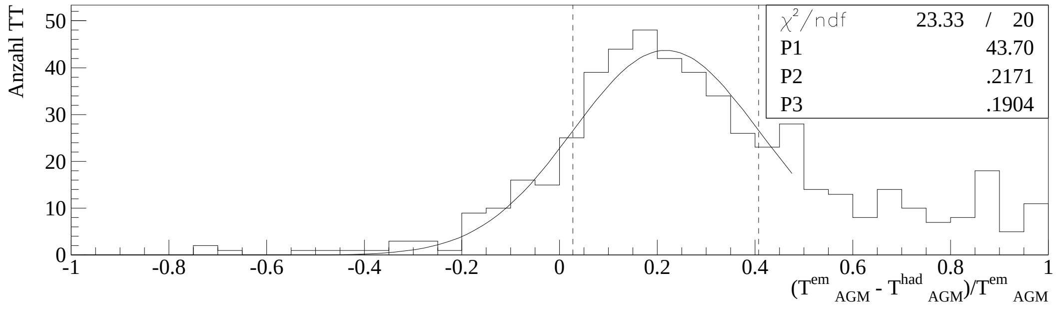
hadronische AGM-Schwellen

Abbildung 6.12: *Mit TriCal-Test NEWAGM ermittelten AGM-Schwellen für alle Trigger-Türme. ● TT mit em. und had. Teil, ○ TT, nur aus em. bzw. had. TC*



em. Trigger-Türme

had. Trigger-Türme



Konsistenz zwischen em. und had. Trigger-Türmen

Abbildung 6.13: *Abschätzung des relativen Fehlers der von TriCal gemessenen AGM-Schwellen.*

Die Bestimmung der Schwellen aus elektromagnetischen Spektren liefert systematisch um 1 bis 2 FADC-count höhere Schwellen, etwa 0,12 bis 0,25 GeV auf der elektromagnetischen Skala. Die Differenz zwischen elektromagnetisch und hadronisch bestimmten Wert der AGM-Schwelle entspricht ca. 20% des Schwellenwertes auf der elektromagnetischen Skala (Abb.6.13 unten).

Wiederholte Messungen der AGM-Schwelle zeigen, daß die Meßergebnisse innerhalb eines relativen Fehlers von 8% beim Pulsen elektromagnetischer TC bzw. 11% beim Pulsen hadronischer TC reproduzierbar sind. (Abb. 6.13 oben).

Um das Rauschen im gesamten Flüssig-Argon-Kalorimeter gleichmäßig zu unterdrücken, sind die AGM-Schwellen in Abhängigkeit von der Höhe des Rauschens der Trigger-Türme $\sigma(TT)$ gesetzt [48]:

$$T_{AGM}(TT) = n_{AGM} \cdot \sigma(TT) \tag{6.7}$$

Um auch Ereignisse mit geringer Energiedeposition im Kalorimeter noch effizient zu triggern und gleichzeitig Rauschen effizient zu unterdrücken, ist derzeit ein Multiplikationsfaktor von $n_{AGM} = 3$ gewählt. Für Trigger-Türme, die nur aus hadronischen TC mit typisch kleinen Kapazitäten gebildet werden und die daher nur geringes Rauschen aufweisen, können sehr niedrige Schwellen gewählt werden. Im rückwärtigen Zentralbereich des Kalorimeters (BBE) führen die großen Kapazitäten zu hohen Rauschniveaus. Diese erfordert besonders hohe AGM-Schwellen.

Abbildung 6.14 zeigt links die AGM-Schwellen für das BBE, die an das 3σ-Rauschniveau der alten Elektronik angepaßt wurden. Der Einsatz von Analogkarten mit neuen Vorverstärkern senkt das Rauschen im BBE (Abb. 6.14 rechts). Die Absenkung der AGM-Schwellen ist möglich, ohne daß die rauschbedingte Triggerrate ansteigt.

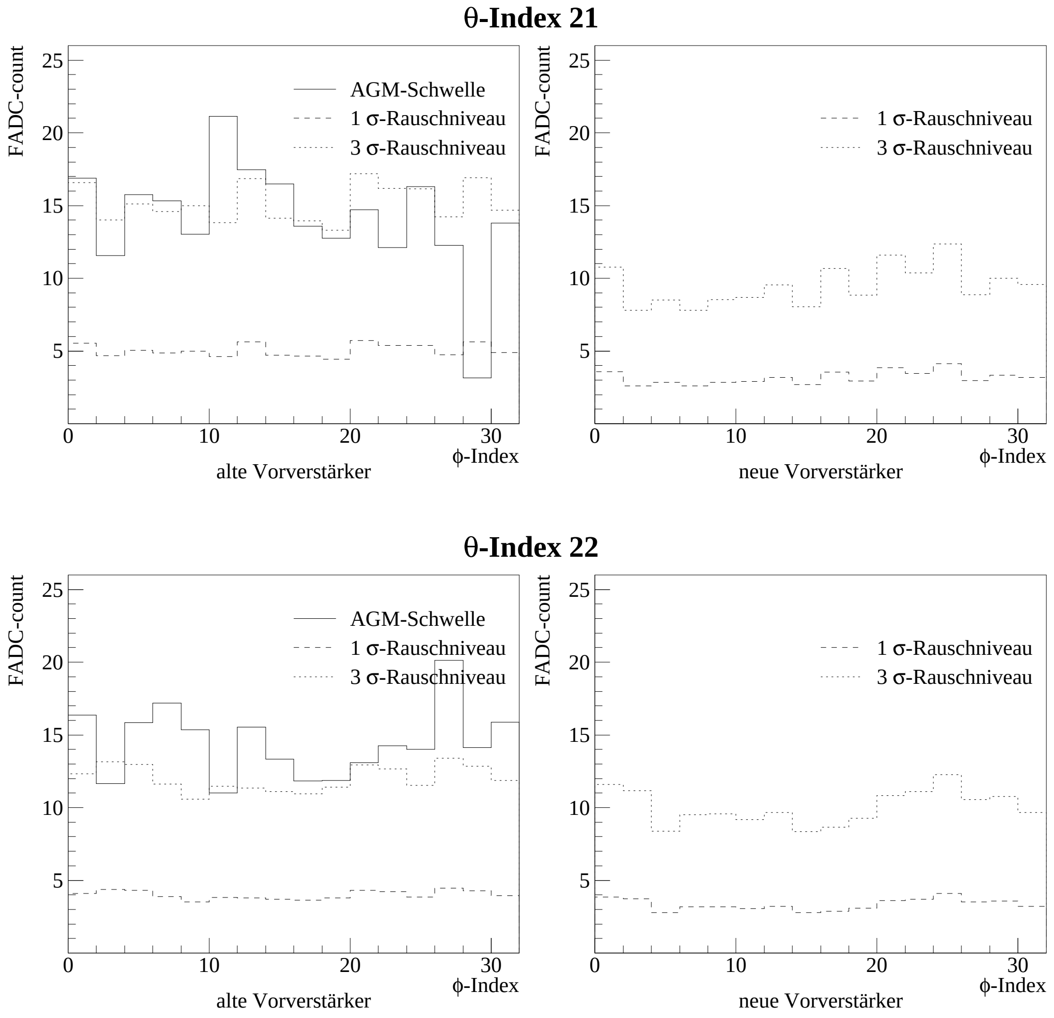


Abbildung 6.14: *Abstimmung der AGM-Schwellen im BBE. Links derzeit gesetzte AGM-Schwellen abgestimmt auf Rauschen durch alte Vorverstärker. Rechts Rauschen nach dem Einsatz neuer Vorverstärker.*

6.4 t0-Schwellenmessung

Zur t0-Schwellenmessung durchfährt TriCal-Test T0THRESH eine Pulserrampe mit einer im Vergleich zur AGM-Schwellenmessung größeren Schrittweite. Zu jedem Schritt der Pulserrampe wird für jeden Trigger-Turm das FADC-Spektrum einer Trigger-Zelle dieses Turms und zusätzlich das BC registriert, in dem das t0-Bit gesetzt wird, falls der Kalibrationspuls die t0-Schwelle überschreitet (Abb. 6.15).

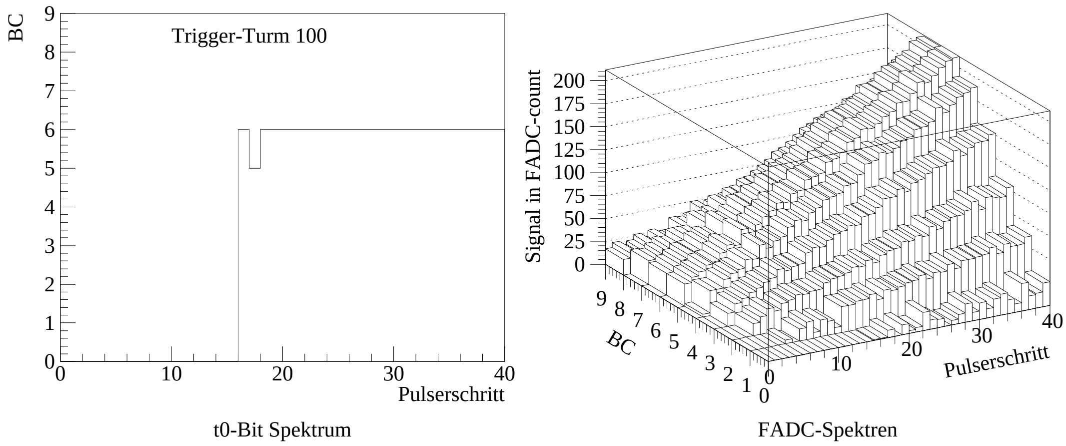


Abbildung 6.15: *Beispiel für während des TriCal-Tests T0THRESH genommene Spektren.*

Eine Approximation des FADC-Spektrum eines Pulserschritts, bei der nur die zentralen BCs 4 bis 8 berücksichtigt werden, durch eine Parabel ($Signal = a \cdot BC^2 + b \cdot BC + c$) liefert den genaue Zeitpunkt des Pulsmaximums, t_{MAX}, in Abhängigkeit von der Pulshöhe: $t_{MAX} = -\frac{b}{2a}$

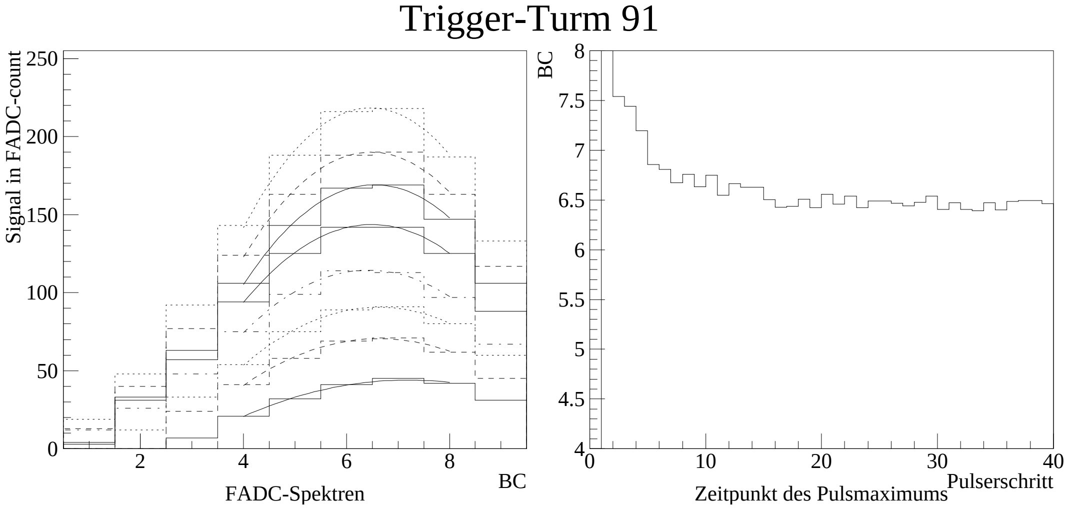


Abbildung 6.16: *Verschiebung des Zeitpunkts des Pulsmaximums.*

Bei die Mehrheit der Pulsgeneratoren, vor allem bei denen die elektromagnetische Zellen pulsen, erreicht der Puls sein Maximum erst nach dem nominellen

BC 5. Zudem erleidet das Pulsmaximum bei niedrigen Pulshöhen häufig eine zusätzliche Verschiebung, wie dies Abbildung 6.16 exemplarisch für den Trigger-Turm 91 zeigt.
Das t0-Bit folgt der Verschiebung des Pulsmaximums. Für eine schnelle Analyse der Spektren innerhalb des Kalibrationsprogramms genügt es daher, für jeden Pulserschritt das Maximum des Pulses aufzufinden. Das Spektrum der Maxima wird wie in Abbildung 6.17 gezeigt durch eine Gerade approximiert. Der Pulserschritt, bei dem zum erstenmal das t0-Bit gesetzt ist, legt die Schwelle fest. Der Fehler der t0-Schwelle, im Mittel ± 2,5 FADC (± 0,3 GeV), ergibt sich aus der Schrittweite der Pulserrampe.

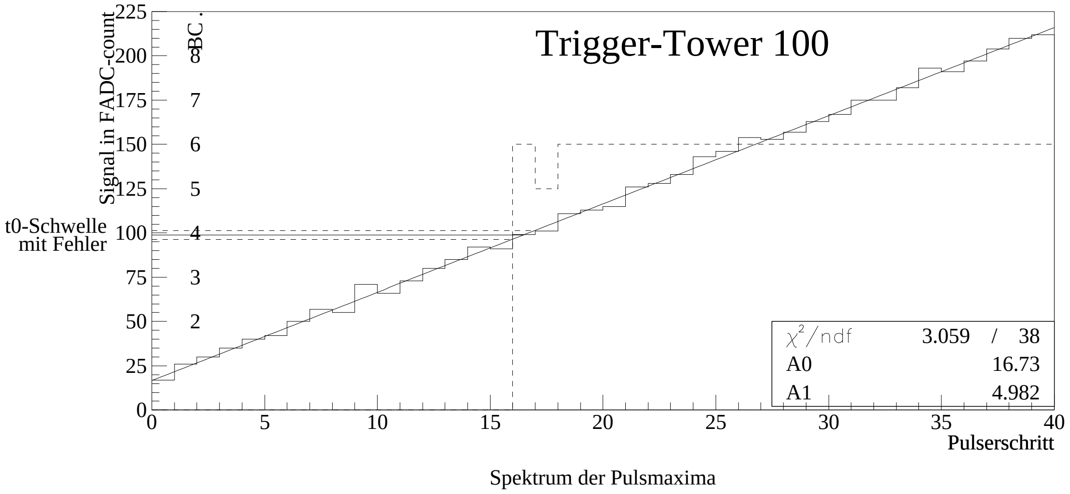


Abbildung 6.17: *Bestimmung der t0-Schwelle und ihres Fehlers aus den Spektren von Abbildung 6.15.*

Abbildungen 6.18 und 6.19 zeigen die t0-Schwellen als vom θ-Index abhängiges Profil bzw. als Projektion in die θ-ϕ-Ebene. Zahlenwerte für die t0-Schwellen sind Abbildung C.6 in Anhang C.4 zu entnehmen. Trigger-Türme, die kein t0-Bit liefern, in Abbildung 6.19 als Lücken zu erkennen, sind dort gesondert gekennzeichnet. Während der Luminositätsperiode 1997 sind die t0-Schwellen auf Werte zwischen 60 und 180 FADC-count, entsprechend 7.5 bis 22.5 GeV auf der elektromagnetischen Skala, eingestellt. Im Vorwärts- und Rückwärtsbereich sind die t0-Schwellen erhöht, um t0-Signale aus Strahl-Gas- und Strahl-Wand-Untergrund-Reaktionen zu unterdrücken. Aus dem gleichen Grund ist die Übertragung der t0-Bits aus dem extremen Vorwärtsbereich, TT θ-Index 0 bis 4, unterbunden.

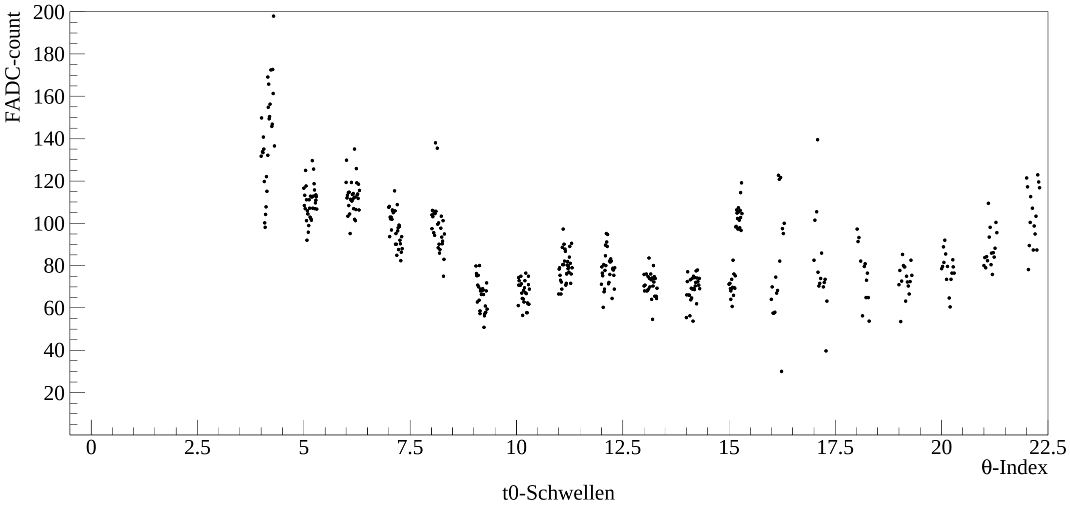


Abbildung 6.18: *Die mit TriCal gemessenen t0-Schwellen.*

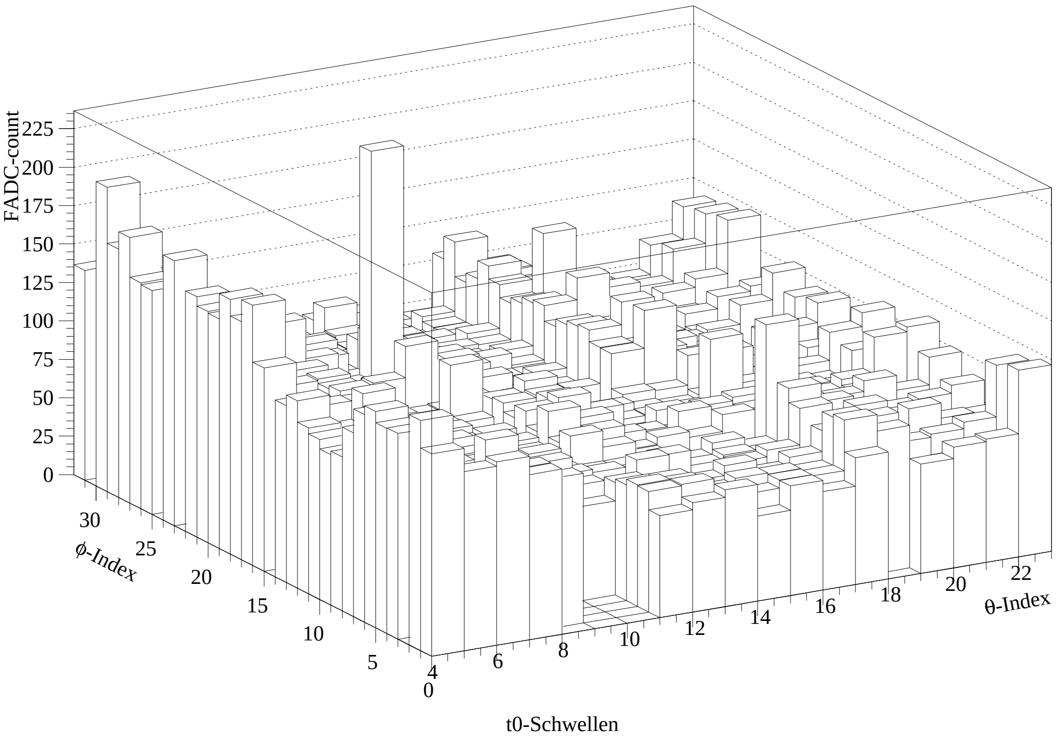


Abbildung 6.19: *Mit TriCal-Test T0THRESH ermittelte t0-Schwellen.*

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden wichtige Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz neuer rauscharmer Elektronik im Flüssig-Argon-Kalorimeter des H1-Detektor geschaffen.
Das Modell des Weißen Rauschens wurde im Labormeßstand durch Messungen bei verschiedenen Kapazitäten bestätigt. Die aus diesem Modell abgeleitete Rauschreduktion durch die neue Elektronik wurde im Meßstand verifiziert. Ein Rauschreduktionsfaktor von 1,8 bei einer Kapazität von 10 nF entspricht den Erwartungen aus Simulationsrechnungen. Eine entsprechende Rauschreduktion in der Kalorimeter-Auslese wurde in unabhängigen Untersuchungen gefunden. Die vorgeschlagenen Meß- und Kontrollverfahren stellen das zuverlässige Funktionieren der Analogkarte nach dem Umbau sicher.
Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit wurde das existierende Trigger-Kalibrations-Programm TriCal in seiner Funktionalität erheblich erweitert. Zum einen vermißt TriCal-Test NEWAGM nun die AGM-Schwellen aller 656 Flüssig-Argon-Trigger-Türme; die getrennte Behandlung von Signalen aus dem elektromagnetischen bzw. hadronischen Bereich des Kalorimeters in den neuen AGMs ist vorweggenommen. Zum anderen ermittelt TriCal-Test T0THRESH erstmals die t0-Schwellen des Flüssig-Argon-Triggers in einer schnellen Pulserkalibrationsmessung. Beide Messungen liefern die wesentlichen Daten zum besseren Verständnis des Flüssig-Argon-Triggers und zur Anpassung des Triggers an die neue Elektronik. In bestehenden TriCal-Rauschmessungen wurde das Modell des Weißen Rauschens für den Trigger bestätigt und der Gewinn durch die neue Elektronik nachgewiesen.

Die H1-Kollaboration hat die Fortsetzung des Umbauprogramms beschlossen. Weitere 10000 JFETs wurden produziert. Nach der Eingangsqualitätskontrolle, bei der die Transistoren auf Funktion und Steilheit getestet werden, werden die Vorverstärker-Hybride bestückt und diese Funktion- und Rauschtests unterzogen. Der Einbau in die Analogkarte erfolgt während des Winter-Shutdowns. Die in dieser Arbeit entwickelten Standardmeßverfahren stellen die volle Einsatztauglichkeit der umgerüsteten Analogkarten sicher.
Während des Winter-Shutdowns 1997/98 sind umfangreiche Meßreihen zur Kalibration der AGM- und t0-Schwellen vorgesehen. Die so gewonnenen Daten bilden die Grundlage zur optimalen Anpassung des Flüssig-Argon-Triggers an das erniedrigte Rauschniveau durch die neue Elektronik.

Anhang A Rauschen einer Trigger-Zelle

Nach dem Modell des Weißen Rauschens ist der Beitrag einer Kalorimeterzelle zum Rauschen einer Trigger-Zelle gegeben durch (vgl. Formeln 4.8 und 4.11):

$$\begin{gathered} \sigma^i = a + bC_i \\ \text{mit } a = a_{Calo}\sqrt{\tfrac{\tau_{Calo}}{\tau_{Trig}}} \text{ und } \quad b = b_{Calo}\sqrt{\tfrac{\tau_{Calo}}{\tau_{Trig}}} \end{gathered} \tag{A.1}$$

Das Rauschen der Kalorimeterzellen, die zu einer Trigger-Zelle beitragen, ist quadratisch zu addieren:

$$\begin{aligned} \sigma_{TC}^2 &= \textstyle\sum_i^{N_{GP}} (a + bC_i)^2 \\ &= N_{GP}a^2 + 2ab \textstyle\sum_i^{N_{GP}} C_i + b^2 \textstyle\sum_i^{N_{GP}} C_i^2 \\ &= N_{GP}a^2 + N_{GP}2ab\overline{C_i} + N_{GP}b^2\overline{C_i^2} \end{aligned} \tag{A.2}$$

Dabei ist N_{GP} die Anzahl der Kalorimeterzellen in einer Trigger-Zelle, C_i sind deren Kapazitäten. Da innerhalb einer TC alle Kalorimeterzellen annähernd die gleiche Kapazität haben, gilt:

$$\overline{C^2} = \overline{C}^2 \tag{A.3}$$

Das Rauschen der Trigger-Zelle ergibt sich in dieser Näherung zu:

$$\sigma_{TC} = \sqrt{N_{GP}}\left(a + b\overline{C}\right) \tag{A.4}$$

Der Gewinnfaktor ist dann folgendermaßen zu berechnen:

$$\frac{\sigma_{TC}^{alt}}{\sigma_{TC}^{neu}} = \frac{a_{Calo}^{alt} + b_{Calo}^{alt}\overline{C}}{a_{Calo}^{neu} + b_{Calo}^{neu}\overline{C}} \tag{A.5}$$

Unter der Vorausetzung, daß das Verhältnis τ_{Calo}/τ_{Trig} für alte und neue Vorverstärker gleich ist, kann mit den Modell-Parametern des Weißen Rauschens die Rauschreduktion in den Trigger-Zellen abgeschätzt werden.

Anhang B Durchführung der Labormessung

B.1 Inbetriebnahme des Meßstands

Checkliste:

- Wasser- und Luftkühlung einschalten
- Crates in Reck von unten nach oben einschalten
- Pulsgenerator und ADC-Spannungsversorgung einschalten
- Reboot der OS9 h1os9b
- Analogbox mit Analogkarten bestücken
- Spannungsversorgung der Analogbox einschalten
  (Wechsel der Testkapazitäten unter Spannung möglich)
- Starten des Meßprogramms tcdaq

Einstellung des Pulsgenerators

Die Standardeinstellungen des Pulsgenerators werden in Abbildung B.1 gezeigt.

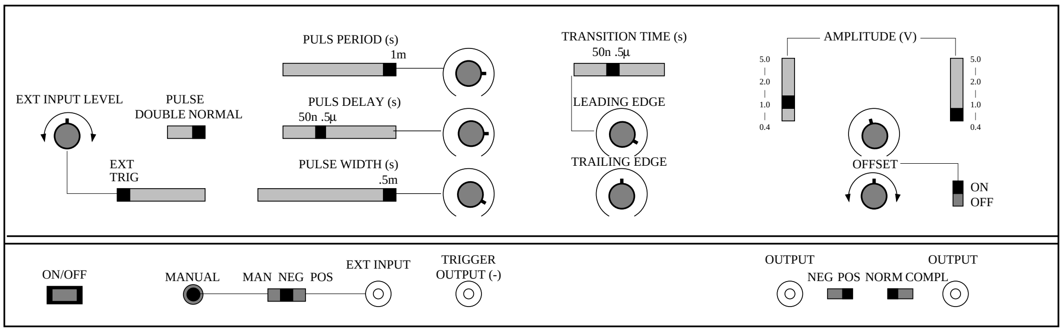


Abbildung B.1: *Einstellungen des Pulsgenerators.*

Meßpunkte auf der Analogkarte

Einzelne Analogkarten können zu Messungen mit dem Oszilloskop aus der Analogbox herausgenommen werden. Abbildung B.2 zeigt die wichtigsten Meßpunkte auf der Analogkarte.

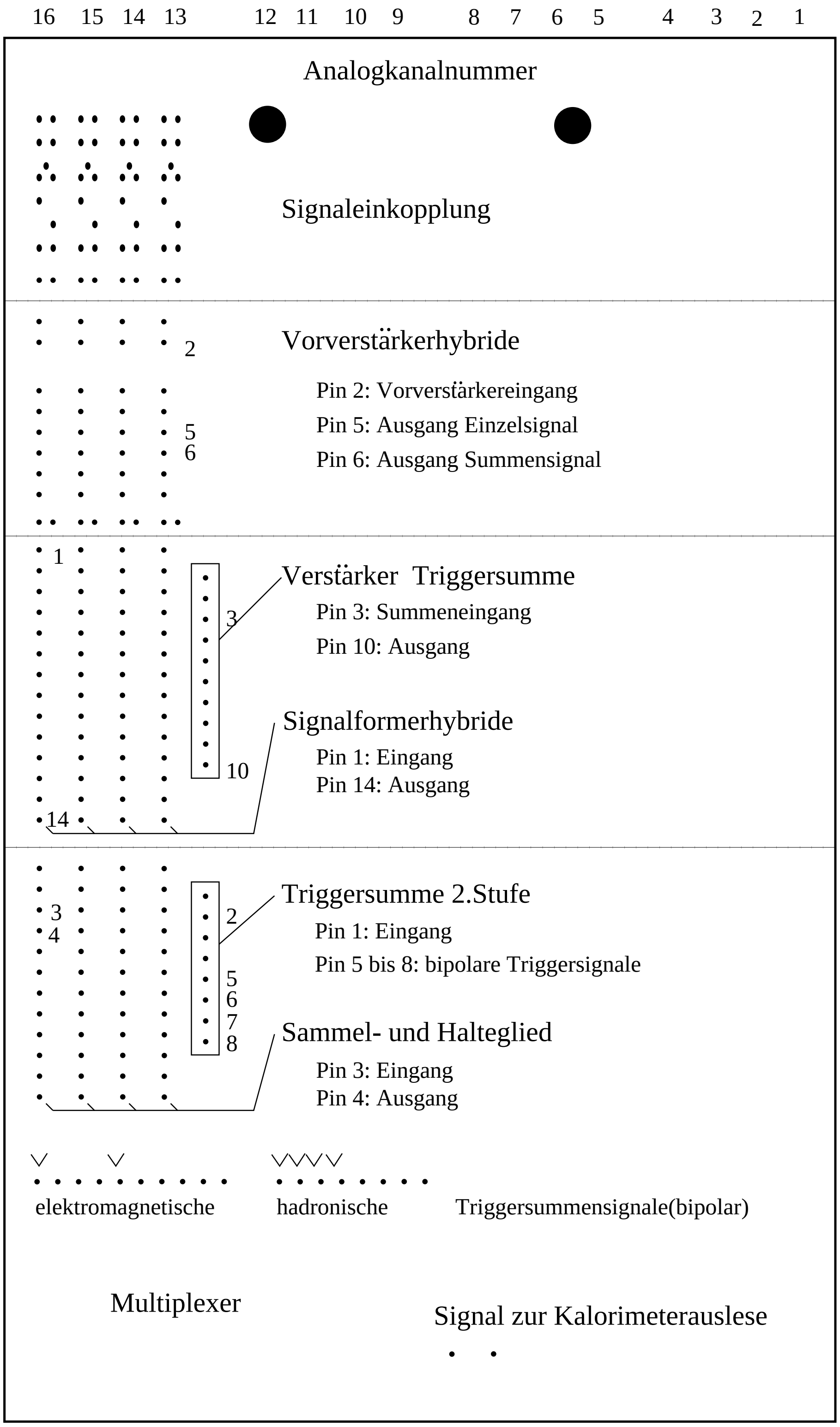


Abbildung B.2: *Meßpunkte auf der Analogkarte.*

B.2 Anleitung zur Datennahme

Die Datennahme mit dem in den Meßstand integrierten OS9-System erfolgt durch das interaktive Meßprogramm tcdaq. Für die Messung wichtige Parameter wie Anzahl der Meßstand-Ereignisse und Verzögerungsparameter können in Menus gesetzt werden. Das Meßprogramm tcdaq wird durch verschieden scriptfiles aufgerufen:

- tch1 Standardeinstellungen
- tch1p Messung ohne Triggerauslese
- tch1t Messung mit Triggerauslese
  (beim Start werden SSM-Switchs und AGM-Schwellen geladen)

Zu jeder Messung wird ein Histogrammfile, *histos.runnumber*, geschrieben, das die Einträge in die ADC-Histogramme und FADC-Spektren enthält. Die aus den Histogrammen gewonnen Daten (Mittelwerte und Standardabweichung für ADCs; Maxima, BCs der Maxima und Standardabweichungen der Maxima für FADCs) werden an zwei Protokollfiles, *h1preamp.dat* bzw. *h1trigger.dat*, angehängt. Die Datensätze werden in das Verzeichnis OUTPUT geschrieben.

B.3 Datenaufbereitung und Analyse

Die weitere Datenaufbereitung und Datenanalyse wird auf IBM-Workstations mit PAW-kumacs [49] vorgenommen.

unpack.kumac kopiert die Daten der einzelnen Messungen aus den Protokollfiles in die Dateien *trigger.runnumber* und *preamp.runnumber.*

process.kumac erfragt als zusätzliche Informationen zur Meßreihe Datum der Messung und Identifikationsnummern der Karten in der Analogbox. Anschließend werden aus der Standardmeßreihen ntuples erzeugt, auf denen die Analyse der Analogkarten aufbaut (*preamprunnumber.ntp* und *triggerrunnumber.ntp*).

analyse.kumac erzeugt Kontrollplots zur Fehlersuche. Als Beispiele siehe Abb. B.3 bis B.7.

Kontrollplots

Auf den Kontrollplots werden für Kanäle und Triggersummen ausgewählte Meßwerte aus der Standardmeßreihe bzw. aus diesen Meßwerten abgeleiteten Größen in Histogramme eingetragen. Die Kenngrößen der Analogkanäle sind Gauß-verteilt. Die Breiten(σ) dieser Verteilungen werden durch einen Gauß-Fit gewonnen. Weichen einzelne Analogkanäle um mehr als 3 σ von den Mittelwerten ab, werden in den Kontrollplots Kanalnummer und Platznummer der Karte in der Analogbox markiert, bei Überschreiten der 3σ-Toleranzgrenze durch ein ausgefülltes Symbol, bei Unterschreitung durch ein offenes.

Die aufgetragenen Größen sind:

- Kontrollplot B.3:
  Rauschsignale in ADC-count $\sigma(X)$
  bei verschiedenen Kapazitäten (X nF)
- Kontrollplot B.4:
  Drift des Rauschniveaus zwischen Messung 0 und 3
- Kontrollplot B.5:
  Modell-Parameter des Weißen Rauschens
  a = offset, b = slope
- Kontrollplot B.6:
  Pulshöhe über dem ADC-Pedestal in ADC-count
- Kontrollplot B.7:
  FADC-Signale einer hadronischen Trigger-Zelle

Im gezeigten Beispiel wurden auf Karte 2382 für Kanäle 11 und 12 zwei kalte Lötstellen am Vorverstärker-Hybrid erkannt:
Das Rauschen zweier Kanäle ist unabhängig von der Kapazität Im ADC wird für diese Kanäle kein Puls digitalisiert In der hadronischen Triggersumme 3 fehlt der Beitrag von zwei Kanälen.

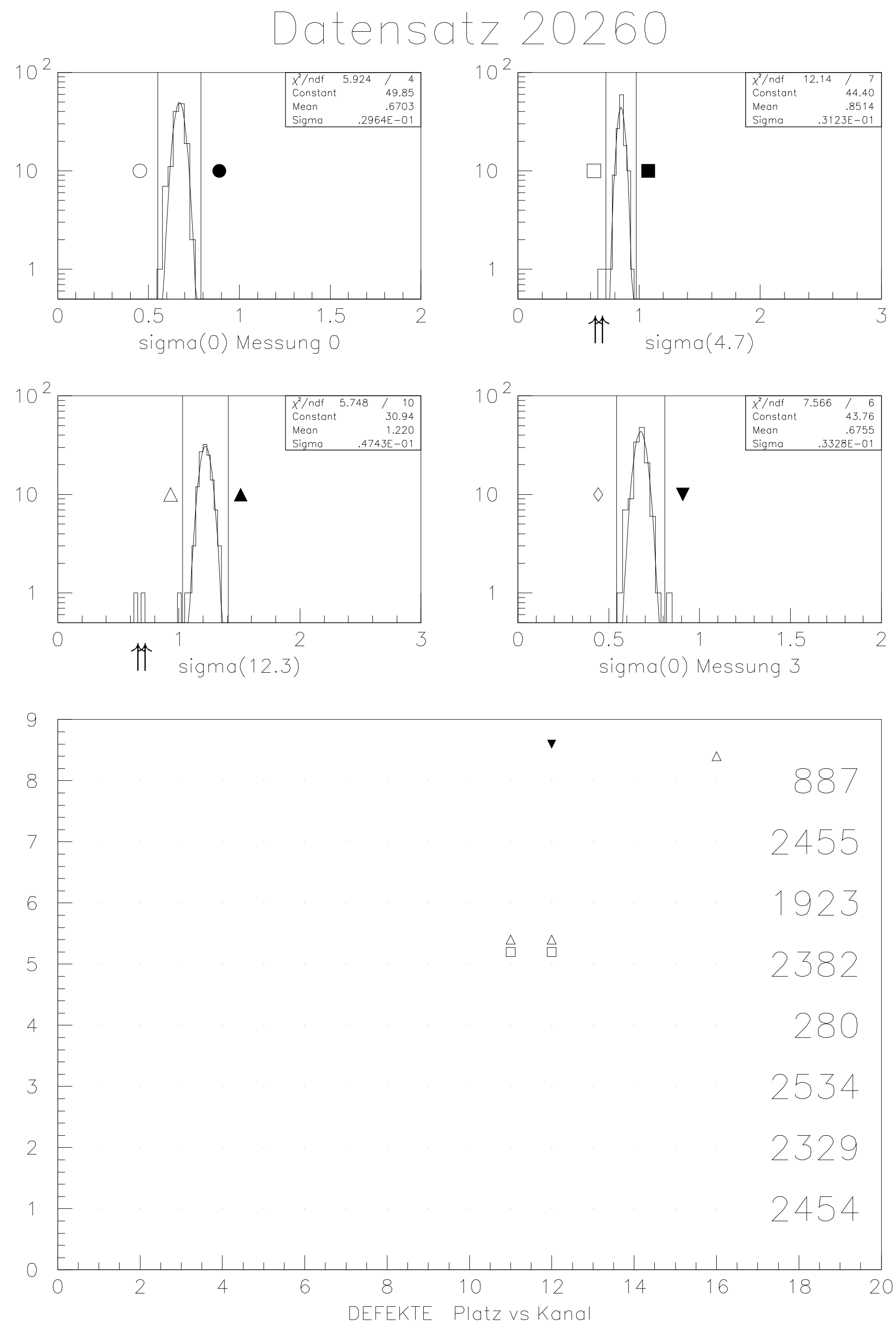


Abbildung B.3: *Messungen bei zwei Testkapazitäten (C=4,7nF und C=12,3nF) und zwei Referenzmessungen (C=0).*

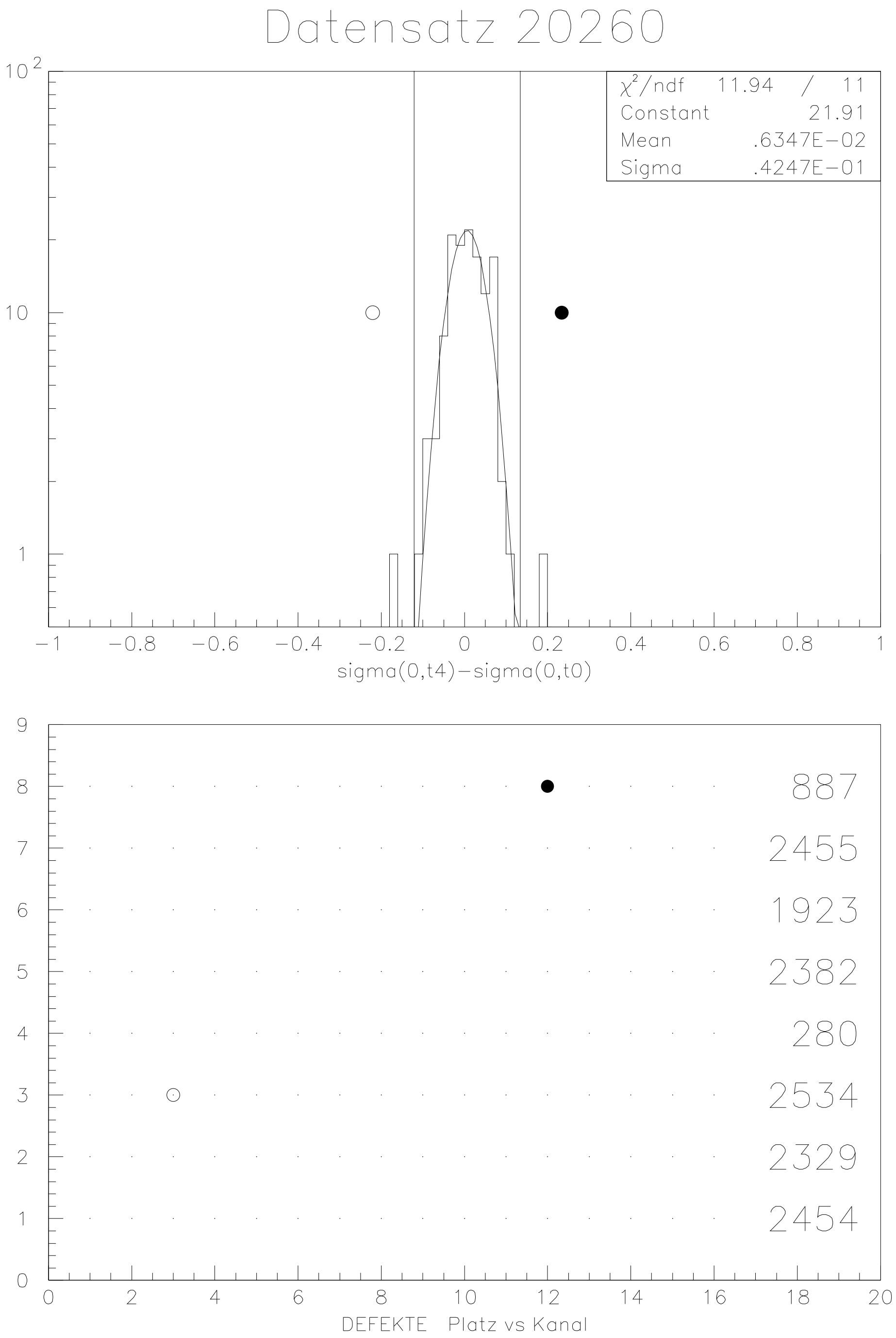


Abbildung B.4: *Stabilität des Rauschniveaus während der Meßreihe.*

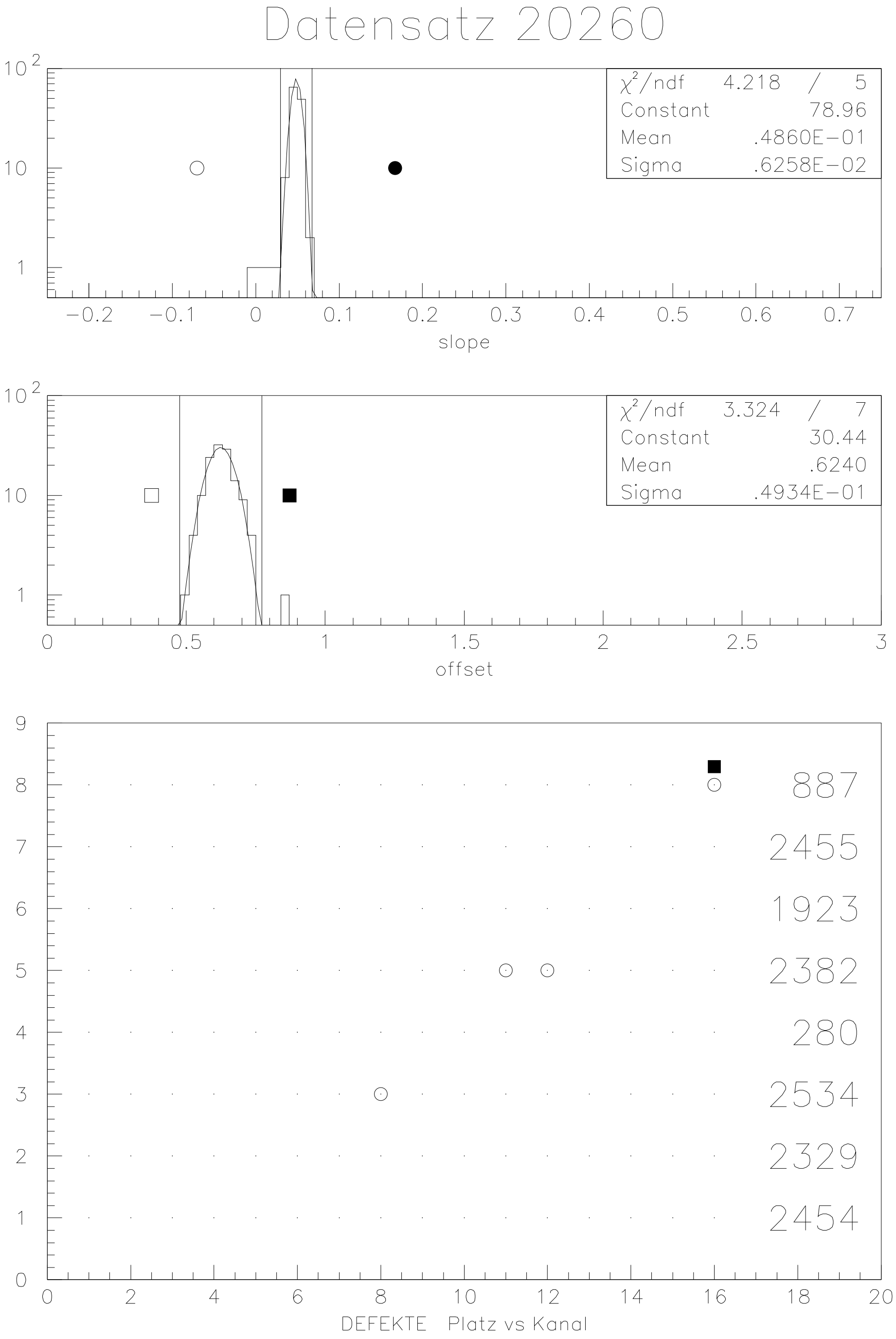


Abbildung B.5: *Bestimmung der Geradenparameter aus dem Modell des Weißen Rauschens.*

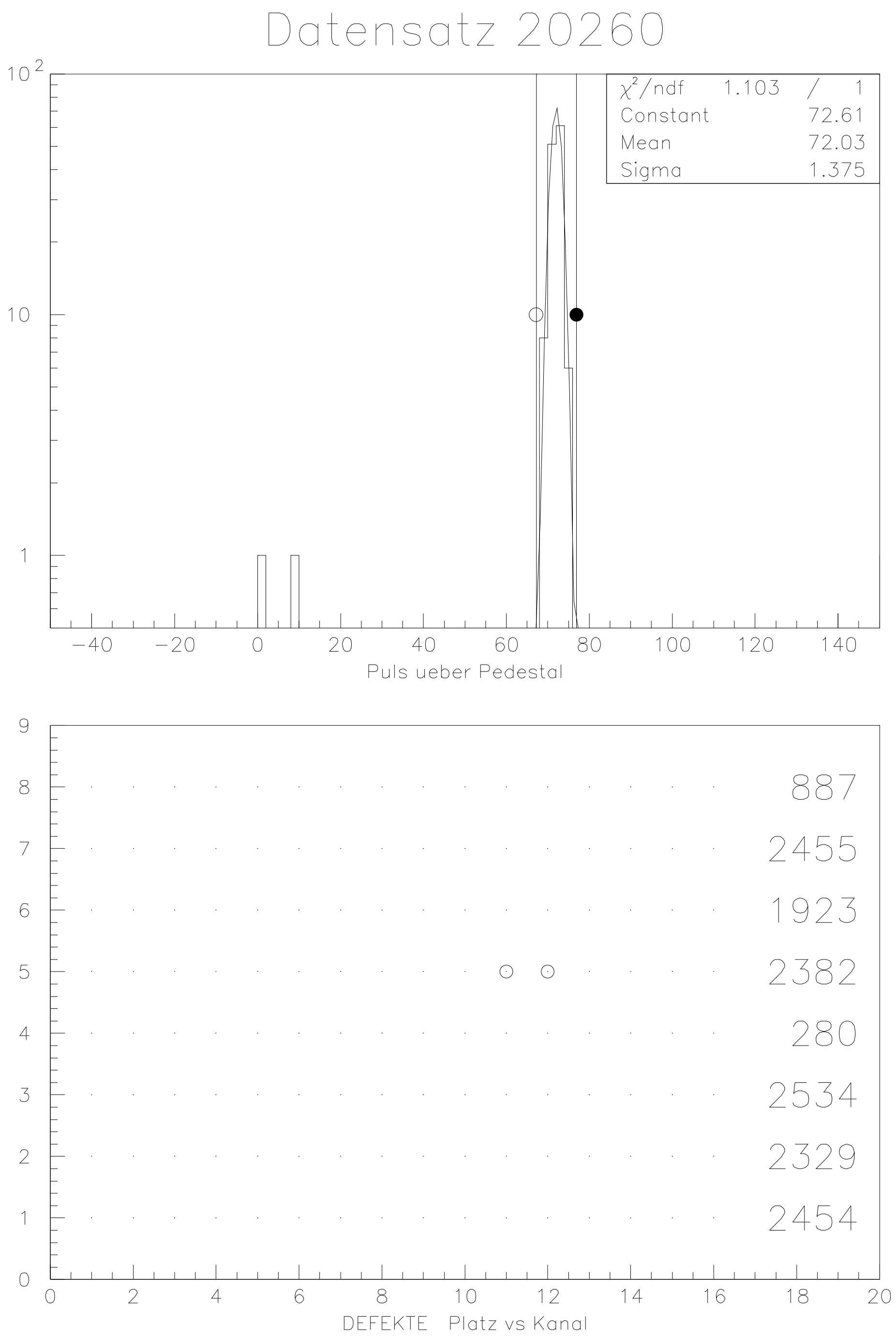


Abbildung B.6: *Messung der Verstärkung aller 128 Kanäle einer Boxladung.*

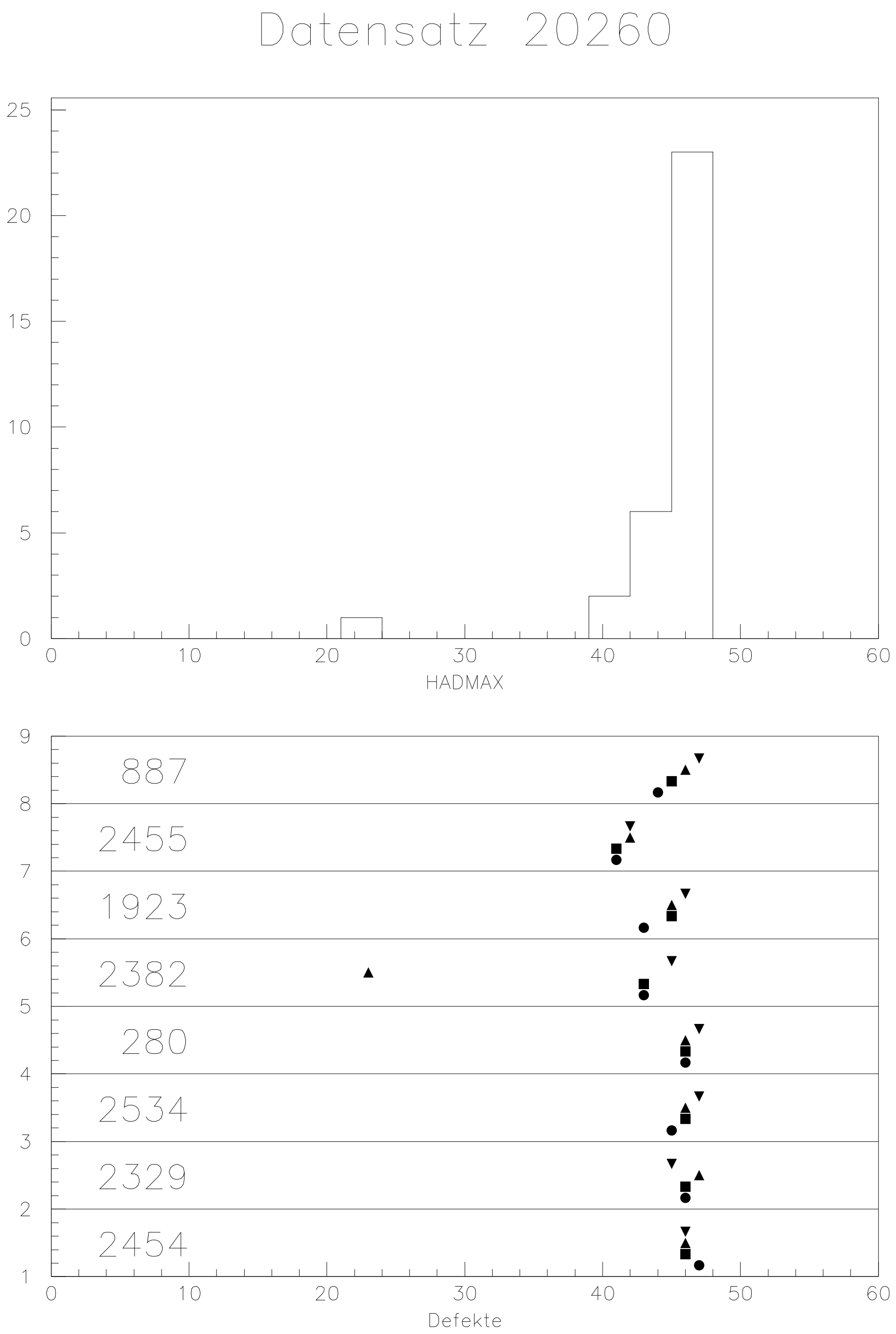


Abbildung B.7: *Kontrollmessung für die Triggersummen.*

Anhang C Ergänzungen zu TriCal

Die Datennahme zur Triggerkalibration erfolgt mit dem in Kapitel 6 beschrieben Programm TriCal. Bei der Durchführung sind folgende Punkte einzuhalten: TriCal-runs müssen H1 bekannt gemacht werden. Zur Auswahl des Tests ist das TriCal-Steering-File zu editieren und die Computersysteme (VAX-Cluster und H1CAL6) sind in einen stabilen Zustand zu bringen.

C.1 TriCal-Request

Der folgende Text ist ein Beispiel für einen Request, wie er an den Run-Koordinator und Schichtführer geschickt werden sollte.

```
                   TRICAL REQUEST


Requested Time:  number of tests and time needed
                 time when the test should take place
                 date when the test should take place
Beam conditions: no beams or injection of Protons
Systems needed:  Lar-Calorimeter and Lar-Trigger taken out of DAQ
                 no one should touch H1cal6 and LAr-Pulser Systems

What is to do by Shift-Crews:
  - Take LAr Calo and Tigger out of DAQ
  - Reboot of H1CAL6 (OS9)
  - Wait for WARMSTART NEEDED
  - Press Ctrl C  instead
TriCal Expert takes over:
  - Inform TriCal Expert when Injection of positrons is starting
  - Expert will stop TriCal in a controlled way (max time 15 min)
  - TriCal Expert reloads trigger and informs shift crew
Shift Crew final action:
  - Reboot h1cal6 (OS9)
  - Include Calo and Trigger in DAQ
  - Do WARMSTART on Central DAQ

TriCal Expert :
name and phone
```

C.2 TriCal-Steeringfile

In der Steering-Bank TCHD erfolgt die Auswahl der Messung. Welche der Aufgaben Datenaquisition, Analyse der Spektren und Vergleich mit Referenzmessungen TriCal ausführt, wird ebenfalls hier festgelegt. Die Datensätze, für die eine Wiederholung der Analyse durchgeführt werden soll, werden in der Steering-Bank TCOL angegeben. Der Referenzdatensatz ist in die Steering-Bank TCRF einzutragen.

```
PON
*
TCHD 0  /  ! head steering bank
     1     ! 1 data acquisition flag 0=no new data taking
     5     ! 2 ITEST
           !     2 = FCNOISE
           !     4 = TTNOISE
           !     5 = TCNOISE
           !     7 = TOTHRESH
           !    11 = NEWAGM
     1     ! 3 spectrum analysis flag 0=no new spectrum analysis
     0     ! 4 DIAGNOSTICSFLAG (0=no comparison with reference)
*
TCOL 0  /  ! old spectra read in instead of data acquisition
   'AV:[trig_data.trical]TCNOISE_970422_AT_1448.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]TOTHRESH_NEWGEN_CELL.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]NEWAGM_970403_AT_1905.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]FCNOISE_950606_AT_1046.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]TTNOISE_950528_AT_1947.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]TCNOISE_950918_AT_1454.HBOOK'
*
TCRF 0  /  ! old spectra read in as reference file
   'AV:[trig_data.trical]TCNOISE_950915_AT_1213.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]NEWAGM_TEST.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]TOTHRESH_NEWGEN_CELL.HBOOK'
*   'AV:[trig_data.trical]FCNOISE_950905_AT_1149.HBOOK'
*
POFF
*
```

C.3 Überwachung eines TriCal-runs

Der Ablauf der TriCal-Messung kann am Flüssig-Argon-Raten-Monitor verfolgt werden. Verfälschen Untergrundereignisse, die durch Injektion von Protonen oder Positronen induziert werden, die Messungen, ist das frühzeitig auf dem Ratenmonitor zu erkennen.

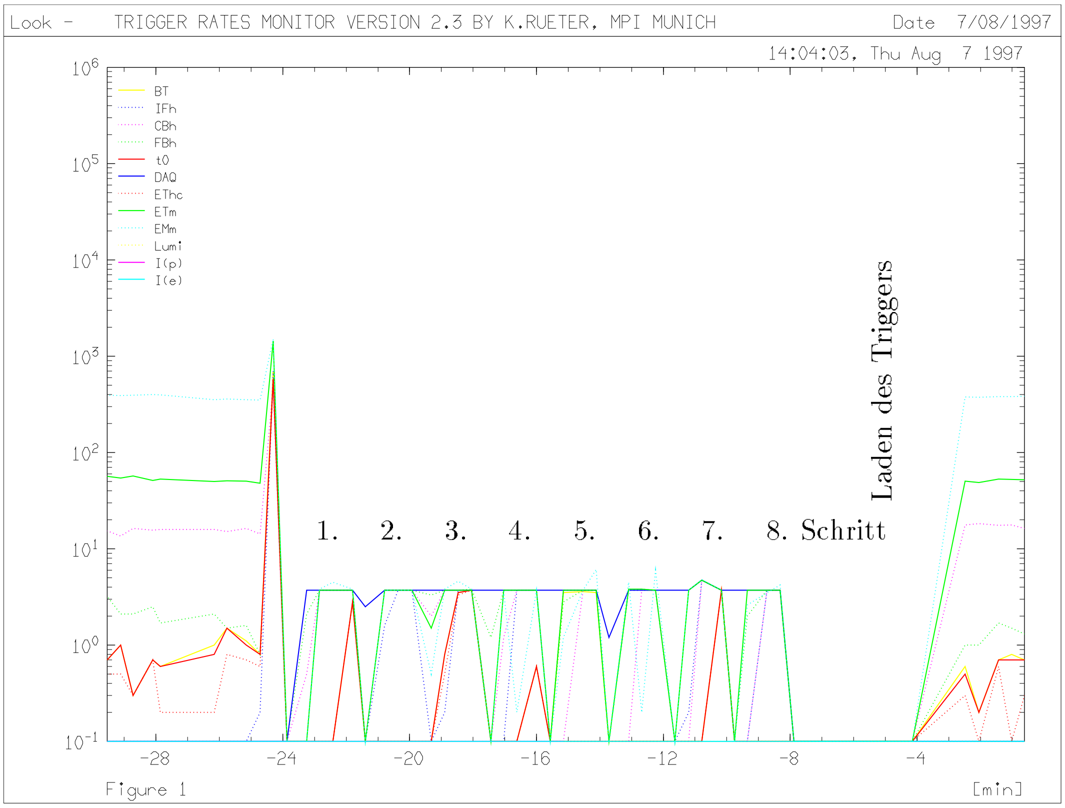


Abbildung C.1: *Raten während des TriCal-runs NEWAGM.*

C.4 θ-ϕ-Karten der AGM- und t0-Schwellen

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der AGM- und t0-Schwellenmessung im Flüssig-Argon-Kalorimeter vorgestellt (AGM: Abb. C.4 und C.5. t0: Abb. C.6 . Die Zuordnung Meßwerte zu den Trigger-Türmen ist Abbildung C.2 und C.3 zu entnehmen.

φ-Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
31				559	159	445	447	61	63	333	335	621	623	221	223	509							
30				558	158	444	446	60	62	332	334	620	622	220	222	508	510	252	254	540	542	685	687
29				557	157	441	443	57	59	329	331	617	619	217	219	505							
28				556	156	440	442	56	58	328	330	616	618	216	218	504	506	248	250	536	538	684	686
27				555	155	437	439	53	55	325	327	613	615	213	215	501							
26				554	154	436	438	52	54	324	326	612	614	212	214	500	502	244	246	532	534	681	683
25				553	153	433	435	49	51	321	323	609	611	209	211	497							
24				552	152	432	434	48	50	320	322	608	610	208	210	496	498	240	242	528	530	680	682
23				551	151	429	431	45	47	317	319	605	607	205	207	493							
22				550	150	428	430	44	46	316	318	604	606	204	206	492	494	236	238	524	526	677	679
21				549	149	425	427	41	43	313	315	601	603	201	203	489							
20				548	148	424	426	40	42	312	314	600	602	200	202	488	490	232	234	520	522	676	678
19				547	147	421	423	37	39	309	311	597	599	197	199	485							
18				546	146	420	422	36	38	308	310	596	598	196	198	484	486	228	230	516	518	673	675
17				545	145	417	419	33	35	305	307	593	595	193	195	481							
16				544	144	416	418	32	34	304	306	592	594	192	194	480	482	224	226	512	514	672	674
15		143	271	415	31	301	303	589	591	189	191	477	479	93	95	365							
14	14	142	270	414	30	300	302	588	590	188	190	476	478	92	94	364	366	124	126	396	398	669	671
13		141	269	413	29	297	299	585	587	185	187	473	475	89	91	361							
12	12	140	268	412	28	296	298	584	586	184	186	472	474	88	90	360	362	120	122	392	394	668	670
11		139	267	411	27	293	295	581	583	181	183	469	471	85	87	357							
10	10	138	266	410	26	292	294	580	582	180	182	468	470	84	86	356	358	116	118	388	390	665	667
9		137	265	409	25	289	291	577	579	177	179	465	467	81	83	353							
8	8	136	264	408	24	288	290	576	578	176	178	464	466	80	82	352	354	112	114	384	386	664	666
7		135	263	407	23	285	287	573	575	173	175	461	463	77	79	349							
6	6	134	262	406	22	284	286	572	574	172	174	460	462	76	78	348	350	108	110	380	382	661	663
5		133	261	405	21	281	283	569	571	169	171	457	459	73	75	345							
4	4	132	260	404	20	280	282	568	570	168	170	456	458	72	74	344	346	104	106	376	378	660	662
3		131	259	403	19	277	279	565	567	165	167	453	455	69	71	341							
2	2	130	258	402	18	276	278	564	566	164	166	452	454	68	70	340	342	100	102	372	374	657	659
1		129	257	401	17	273	275	561	563	161	163	449	451	65	67	337							
0	0	128	256	400	16	272	274	560	562	160	162	448	450	64	66	336	338	96	98	368	370	656	658

θ-Index

Karte elektromagnetischer Trigger-Türme

Abbildung C.2: *θ-ϕ-Karte der Trigger-Tower-Indices elektromagnetischer Trigger-Türme.*

φ-Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
31				559	159	445	447	61	63	333	335	621	623	221	223	509	511	253	255	541	543		
30				558	158	444	446	60	62	332	334	620	622	220	222	508	510	252	254	540	542		
29				557	157	441	443	57	59	329	331	617	619	217	219	505	507	249	251	537	539		
28				556	156	440	442	56	58	328	330	616	618	216	218	504	506	248	250	536	538		
27				555	155	437	439	53	55	325	327	613	615	213	215	501	503	245	247	533	535		
26				554	154	436	438	52	54	324	326	612	614	212	214	500	502	244	246	532	534		
25				553	153	433	435	49	51	321	323	609	611	209	211	497	499	241	243	529	531		
24				552	152	432	434	48	50	320	322	608	610	208	210	496	498	240	242	528	530		
23				551	151	429	431	45	47	317	319	605	607	205	207	493	495	237	239	525	527		
22				550	150	428	430	44	46	316	318	604	606	204	206	492	494	236	238	524	526		
21				549	149	425	427	41	43	313	315	601	603	201	203	489	491	233	235	521	523		
20				548	148	424	426	40	42	312	314	600	602	200	202	488	490	232	234	520	522		
19				547	147	421	423	37	39	309	311	597	599	197	199	485	487	229	231	517	519		
18				546	146	420	422	36	38	308	310	596	598	196	198	484	486	228	230	516	518		
17				545	145	417	419	33	35	305	307	593	595	193	195	481	483	225	227	513	515		
16				544	144	416	418	32	34	304	306	592	594	192	194	480	482	224	226	512	514		
15	15	143	271	415	31	301	303	589	591	189	191	477	479	93	95	365	367	125	127	397	399		
14	14	142	270	414	30	300	302	588	590	188	190	476	478	92	94	364	366	124	126	396	398		
13	13	141	269	413	29	297	299	585	587	185	187	473	475	89	91	361	363	121	123	393	395		
12	12	140	268	412	28	296	298	584	586	184	186	472	474	88	90	360	362	120	122	392	394		
11	11	139	267	411	27	293	295	581	583	181	183	469	471	85	87	357	359	117	119	389	391		
10	10	138	266	410	26	292	294	580	582	180	182	468	470	84	86	356	358	116	118	388	390		
9	9	137	265	409	25	289	291	577	579	177	179	465	467	81	83	353	355	113	115	385	387		
8	8	136	264	408	24	288	290	576	578	176	178	464	466	80	82	352	354	112	114	384	386		
7	7	135	263	407	23	285	287	573	575	173	175	461	463	77	79	349	351	109	111	381	383		
6	6	134	262	406	22	284	286	572	574	172	174	460	462	76	78	348	350	108	110	380	382		
5	5	133	261	405	21	281	283	569	571	169	171	457	459	73	75	345	347	105	107	377	379		
4	4	132	260	404	20	280	282	568	570	168	170	456	458	72	74	344	346	104	106	376	378		
3	3	131	259	403	19	277	279	565	567	165	167	453	455	69	71	341	343	101	103	373	375		
2	2	130	258	402	18	276	278	564	566	164	166	452	454	68	70	340	342	100	102	372	374		
1	1	129	257	401	17	273	275	561	563	161	163	449	451	65	67	337	339	97	99	369	371		
0	0	128	256	400	16	272	274	560	562	160	162	448	450	64	66	336	338	96	98	368	370		

θ-Index

Karte hadronischer Trigger-Türme

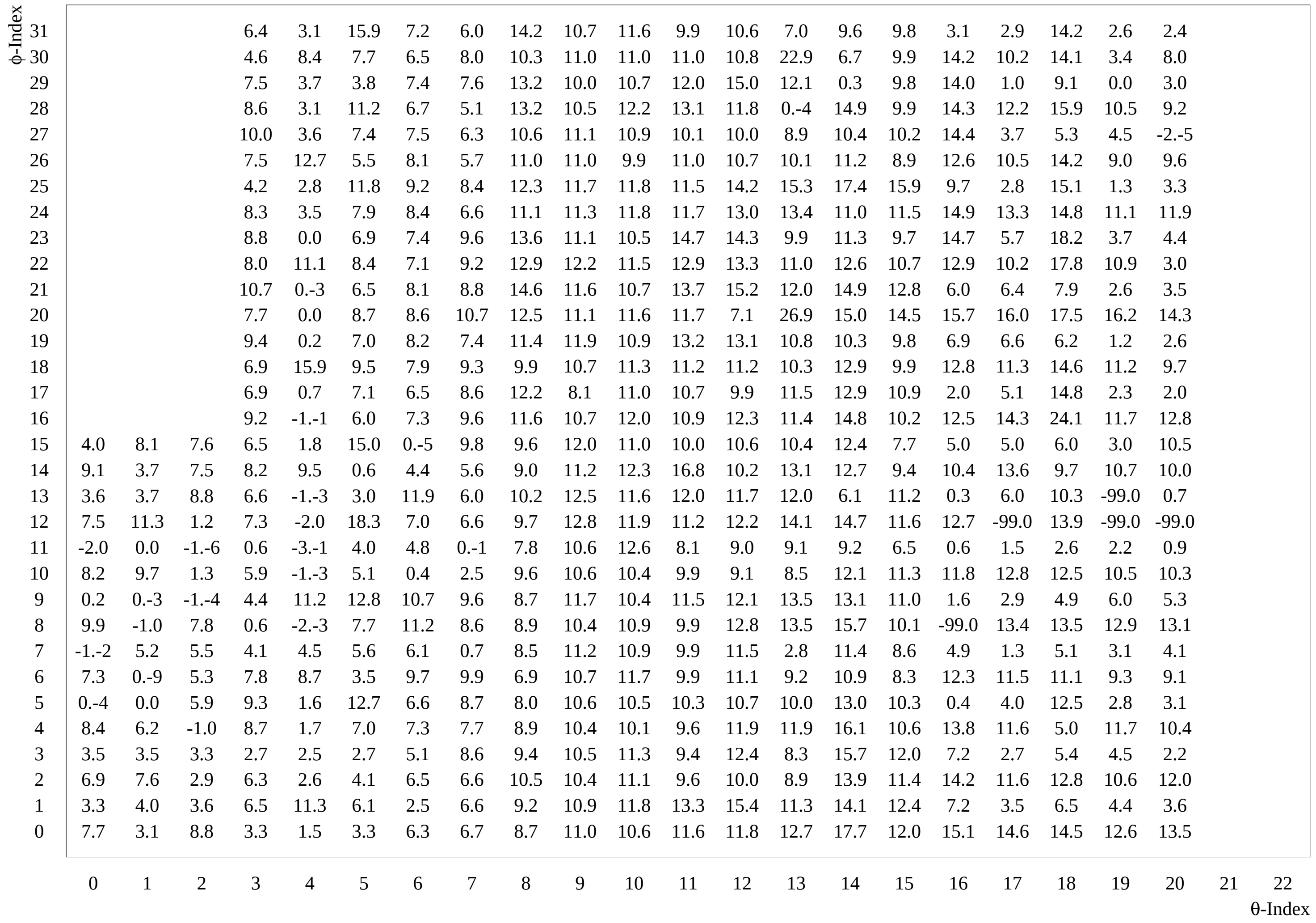
Abbildung C.3: *θ-ϕ-Karte der Trigger-Tower-Indices hadronischer Trigger-Türme.*

ϕ-Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
31				11.2	4.6	15.0	4.0	17.6	24.0	13.0	13.5	13.0	15.1	11.7	14.9	12.2							
30				3.8	13.3	6.6	11.1	18.5	18.0	13.1	14.3	15.9	14.7	20.8	12.6	13.0	14.0	14.4	14.7	0.-1	8.8	13.3	15.9
29				7.9	9.6	3.2	11.7	17.5	19.6	12.2	15.2	15.1	14.8	14.5	11.2	13.4							
28				12.8	8.0	13.3	5.5	17.8	25.2	13.4	15.9	15.8	14.6	6.2	17.2	13.8	16.2	14.7	14.4	12.4	12.0	5.5	15.2
27				13.0	8.7	11.4	5.2	18.2	20.6	11.6	13.2	12.6	12.6	12.9	13.2	10.4							
26				6.7	14.6	6.7	12.0	18.4	22.0	12.0	12.1	13.2	13.7	13.1	12.8	12.6	15.7	14.7	18.7	11.7	11.1	12.9	19.4
25				4.9	10.0	12.7	12.5	18.6	21.2	13.0	14.5	14.1	14.7	16.8	17.7	14.7							
24				12.8	2.8	13.6	7.7	18.6	21.1	13.8	13.4	13.5	13.8	15.6	11.2	14.2	15.3	16.1	19.7	11.6	15.1	14.8	14.3
23				9.9	6.7	6.3	5.1	17.4	20.1	14.1	12.8	14.8	18.1	13.7	16.9	13.1							
22				6.1	10.1	7.8	7.8	17.6	20.1	13.3	12.7	14.4	16.1	16.5	16.2	15.6	15.7	15.8	21.9	11.4	3.5	13.5	14.3
21				10.5	5.9	6.1	5.7	17.1	-99.0	16.4	15.5	15.6	17.9	16.4	19.1	16.0							
20				7.6	5.1	9.1	6.5	17.4	19.9	17.1	14.8	15.0	12.3	23.2	19.2	16.7	15.9	18.1	23.0	16.6	13.0	13.9	13.6
19				11.8	5.3	5.2	9.7	16.2	18.4	12.6	13.6	15.7	18.7	15.2	16.0	15.4							
18				5.9	16.6	8.6	8.2	17.2	18.7	13.6	13.3	14.4	16.2	16.0	15.9	16.4	17.3	18.3	21.0	10.4	11.7	12.3	12.7
17				5.6	6.6	5.6	6.1	18.1	18.8	13.3	13.6	13.3	15.3	17.2	15.2	15.9							
16				7.8	3.7	5.9	2.1	16.5	16.2	13.6	13.7	14.5	17.0	16.3	17.8	16.1	18.1	16.4	18.8	12.0	12.5	12.7	12.4
15		12.9	7.3	9.2	11.7	18.0	8.7	17.8	17.8	18.6	16.5	17.4	14.7	16.8	16.9	15.2							
14	14.6	8.0	11.8	10.4	10.6	6.3	4.6	16.0	17.5	16.4	20.3	20.7	15.7	16.3	16.6	15.7	17.5	15.5	14.5	11.4	10.7	15.5	13.8
13		13.6	8.3	10.5	4.1	4.9	14.3	15.4	17.6	18.4	15.9	16.1	17.4	16.7	14.4	15.6							
12	14.7	15.1	7.3	7.6	3.4	21.3	8.2	15.6	17.8	16.5	15.8	17.2	15.9	17.0	18.1	18.1	15.9	16.5	20.3	19.0	13.9	17.8	15.4
11		5.2	5.8	6.4	4.1	5.0	7.3	15.7	17.7	13.8	14.9	16.4	15.5	15.1	15.6	15.0							
10	7.6	12.0	4.4	8.0	5.9	7.5	4.7	15.8	13.7	14.8	14.5	14.9	15.6	15.8	18.9	16.8	15.7	16.8	16.2	11.8	12.1	22.0	12.2
9		6.3	6.7	12.8	12.8	14.2	10.0	15.6	16.7	14.7	14.7	14.9	17.9	17.5	17.7	16.3							
8	10.5	6.0	7.0	4.7	4.0	8.7	11.6	15.7	16.7	13.8	15.8	15.3	17.2	17.6	16.3	16.7	37.4	19.5	17.6	12.6	13.5	13.1	15.8
7		4.0	2.3	3.2	5.4	6.0	3.2	16.2	17.9	18.8	18.0	15.6	11.4	12.5	13.0	10.6							
6	5.9	2.9	3.7	9.8	7.5	5.1	10.7	18.4	16.5	21.2	20.7	17.6	11.5	12.1	12.5	10.9	15.9	15.7	16.2	9.2	10.2	15.4	16.6
5		5.5	4.6	10.4	1.6	15.7	4.8	18.1	18.3	19.5	15.4	16.1	12.1	11.7	14.8	11.7							
4	9.4	5.7	1.6	10.5	1.4	7.1	7.5	17.2	19.0	19.3	16.0	18.4	11.7	15.2	13.9	11.9	15.7	14.9	12.3	11.2	11.1	17.4	16.0
3		0.8	0.5	0.9	1.8	2.4	6.2	18.1	17.1	13.7	14.4	13.9	12.5	10.3	16.1	13.1							
2	4.5	6.8	2.6	7.9	2.6	6.7	5.0	19.5	20.0	13.8	14.2	17.5	11.5	10.6	15.4	12.1	15.9	16.8	16.9	11.7	15.1	12.9	12.2
1		3.4	5.6	7.1	13.7	6.4	3.7	16.8	17.2	12.7	16.5	17.3	15.0	12.4	15.8	12.2							
0	5.5	3.2	8.0	3.8	2.4	2.4	6.8	17.0	17.3	14.8	14.9	17.0	12.7	13.4	13.0	13.8	18.4	15.4	14.7	13.0	14.4	17.7	16.8

θ-Index

Karte elektromagnetischer AGM-Schwellen in FADC-count

Abbildung C.4: *θ-ϕ-Karte elektromagnetischer AGM-Schwellen in FADC-count.*



ϕ-Index																							
31				6.4	3.1	15.9	7.2	6.0	14.2	10.7	11.6	9.9	10.6	7.0	9.6	9.8	3.1	2.9	14.2	2.6	2.4		
30				4.6	8.4	7.7	6.5	8.0	10.3	11.0	11.0	11.0	10.8	22.9	6.7	9.9	14.2	10.2	14.1	3.4	8.0		
29				7.5	3.7	3.8	7.4	7.6	13.2	10.0	10.7	12.0	15.0	12.1	0.3	9.8	14.0	1.0	9.1	0.0	3.0		
28				8.6	3.1	11.2	6.7	5.1	13.2	10.5	12.2	13.1	11.8	0.-4	14.9	9.9	14.3	12.2	15.9	10.5	9.2		
27				10.0	3.6	7.4	7.5	6.3	10.6	11.1	10.9	10.1	10.0	8.9	10.4	10.2	14.4	3.7	5.3	4.5	-2.-5		
26				7.5	12.7	5.5	8.1	5.7	11.0	11.0	9.9	11.0	10.7	10.1	11.2	8.9	12.6	10.5	14.2	9.0	9.6		
25				4.2	2.8	11.8	9.2	8.4	12.3	11.7	11.8	11.5	14.2	15.3	17.4	15.9	9.7	2.8	15.1	1.3	3.3		
24				8.3	3.5	7.9	8.4	6.6	11.1	11.3	11.8	11.7	13.0	13.4	11.0	11.5	14.9	13.3	14.8	11.1	11.9		
23				8.8	0.0	6.9	7.4	9.6	13.6	11.1	10.5	14.7	14.3	9.9	11.3	9.7	14.7	5.7	18.2	3.7	4.4		
22				8.0	11.1	8.4	7.1	9.2	12.9	12.2	11.5	12.9	13.3	11.0	12.6	10.7	12.9	10.2	17.8	10.9	3.0		
21				10.7	0.-3	6.5	8.1	8.8	14.6	11.6	10.7	13.7	15.2	12.0	14.9	12.8	6.0	6.4	7.9	2.6	3.5		
20				7.7	0.0	8.7	8.6	10.7	12.5	11.1	11.6	11.7	7.1	26.9	15.0	14.5	15.7	16.0	17.5	16.2	14.3		
19				9.4	0.2	7.0	8.2	7.4	11.4	11.9	10.9	13.2	13.1	10.8	10.3	9.8	6.9	6.6	6.2	1.2	2.6		
18				6.9	15.9	9.5	7.9	9.3	9.9	10.7	11.3	11.2	11.2	10.3	12.9	9.9	12.8	11.3	14.6	11.2	9.7		
17				6.9	0.7	7.1	6.5	8.6	12.2	8.1	11.0	10.7	9.9	11.5	12.9	10.9	2.0	5.1	14.8	2.3	2.0		
16				9.2	-1.-1	6.0	7.3	9.6	11.6	10.7	12.0	10.9	12.3	11.4	14.8	10.2	12.5	14.3	24.1	11.7	12.8		
15	4.0	8.1	7.6	6.5	1.8	15.0	0.-5	9.8	9.6	12.0	11.0	10.0	10.6	10.4	12.4	7.7	5.0	5.0	6.0	3.0	10.5		
14	9.1	3.7	7.5	8.2	9.5	0.6	4.4	5.6	9.0	11.2	12.3	16.8	10.2	13.1	12.7	9.4	10.4	13.6	9.7	10.7	10.0		
13	3.6	3.7	8.8	6.6	-1.-3	3.0	11.9	6.0	10.2	12.5	11.6	12.0	11.7	12.0	6.1	11.2	0.3	6.0	10.3	-99.0	0.7		
12	7.5	11.3	1.2	7.3	-2.0	18.3	7.0	6.6	9.7	12.8	11.9	11.2	12.2	14.1	14.7	11.6	12.7	-99.0	13.9	-99.0	-99.0		
11	-2.0	0.0	-1.-6	0.6	-3.-1	4.0	4.8	0.-1	7.8	10.6	12.6	8.1	9.0	9.1	9.2	6.5	0.6	1.5	2.6	2.2	0.9		
10	8.2	9.7	1.3	5.9	-1.-3	5.1	0.4	2.5	9.6	10.6	10.4	9.9	9.1	8.5	12.1	11.3	11.8	12.8	12.5	10.5	10.3		
9	0.2	0.-3	-1.-4	4.4	11.2	12.8	10.7	9.6	8.7	11.7	10.4	11.5	12.1	13.5	13.1	11.0	1.6	2.9	4.9	6.0	5.3		
8	9.9	-1.0	7.8	0.6	-2.-3	7.7	11.2	8.6	8.9	10.4	10.9	9.9	12.8	13.5	15.7	10.1	-99.0	13.4	13.5	12.9	13.1		
7	-1.-2	5.2	5.5	4.1	4.5	5.6	6.1	0.7	8.5	11.2	10.9	9.9	11.5	2.8	11.4	8.6	4.9	1.3	5.1	3.1	4.1		
6	7.3	0.-9	5.3	7.8	8.7	3.5	9.7	9.9	6.9	10.7	11.7	9.9	11.1	9.2	10.9	8.3	12.3	11.5	11.1	9.3	9.1		
5	0.-4	0.0	5.9	9.3	1.6	12.7	6.6	8.7	8.0	10.6	10.5	10.3	10.7	10.0	13.0	10.3	0.4	4.0	12.5	2.8	3.1		
4	8.4	6.2	-1.0	8.7	1.7	7.0	7.3	7.7	8.9	10.4	10.1	9.6	11.9	11.9	16.1	10.6	13.8	11.6	5.0	11.7	10.4		
3	3.5	3.5	3.3	2.7	2.5	2.7	5.1	8.6	9.4	10.5	11.3	9.4	12.4	8.3	15.7	12.0	7.2	2.7	5.4	4.5	2.2		
2	6.9	7.6	2.9	6.3	2.6	4.1	6.5	6.6	10.5	10.4	11.1	9.6	10.0	8.9	13.9	11.4	14.2	11.6	12.8	10.6	12.0		
1	3.3	4.0	3.6	6.5	11.3	6.1	2.5	6.6	9.2	10.9	11.8	13.3	15.4	11.3	14.1	12.4	7.2	3.5	6.5	4.4	3.6		
0	7.7	3.1	8.8	3.3	1.5	3.3	6.3	6.7	8.7	11.0	10.6	11.6	11.8	12.7	17.7	12.0	15.1	14.6	14.5	12.6	13.5		
θ-Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Karte hadronischer AGM-Schwellen in FADC-count

Abbildung C.5: *θ-ϕ-Karte hadronischer AGM-Schwellen in FADC-count.*

φ-Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
31				XXX	136	106	115	88	95	59	68	78	79	69	69	104	92	65	72	63	68		
30				XXX	XXX	112	106	93	82	71	61	90	68	64	74	119	100	63	53	75	76	95	116
29				XXX	197	110	118	86	75	68	75	76	75	65	70	96	100	76	64	71	69		
28				XXX	161	113	111	82	101	57	71	71	77	XXX	70	102	95	39	64	82	79	100	119
27				XXX	172	109	113	90	91	60	61	81	78	73	72	114	104	66	64	67	61		
26				XXX	146	106	113	91	90	57	62	89	78	65	77	106	97	73	76	72	82	88	122
25				XXX	145	115	119	98	93	56	57	83	64	74	74	97	139	66	61	61	72		
24				XXX	XXX	118	125	99	XXX	50	57	76	XXX	72	61	101	29	72	73	66	76	84	87
23				XXX	172	125	106	87	103	66	66	79	82	73	77	105	96	74	69	59	68		
22				XXX	XXX	112	101	97	97	68	76	78	83	80	72	107	121	69	64	70	73	86	103
21				XXX	156	107	112	96	XXX	69	67	81	81	70	70	97	93	79	71	65	62		
20				XXX	150	129	135	108	87	236	72	80	75	54	74	102	82	XXX	80	72	60	75	94
19				XXX	149	112	101	84	85	68	69	76	82	74	68	104	96	86	64	62	62		
18				XXX	165	101	112	90	90	66	62	76	71	64	69	106	120	86	79	74	64	85	98
17				XXX	154	102	106	95	100	68	68	71	71	73	75	98	96	71	73	66	61		
16				XXX	169	112	114	90	88	67	64	70	XXX	75	53	98	122	74	XXX	63	XXX	80	87
15	XXX	XXX	XXX	XXX	132	103	111	105	99	58	56	86	94	73	68	75	74	93	92	86	62		
14	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	107	113	115	135	57	64	87	89	70	73	69	68	71	56	79	79	98	107
13	XXX	XXX	XXX	XXX	115	111	110	XXX	XXX	80	66	82	91	73	69	69	70	111	79	74	73		
12	XXX	XXX	XXX	XXX	121	98	119	XXX	XXX	63	71	90	95	83	64	75	66	70	XXX	79	73	93	XXX
11	XXX	XXX	XXX	XXX	107	95	111	104	105	69	75	80	79	68	69	65	78	81	56	80	73		
10	XXX	XXX	XXX	XXX	104	104	111	105	138	75	70	97	89	74	63	82	74	76	82	79	85	109	112
9	XXX	XXX	XXX	XXX	98	105	95	105	104	70	70	80	84	68	73	69	80	72	57	73	81		
8	XXX	XXX	XXX	XXX	100	92	104	106	94	62	XXX	88	77	68	56	60	57	139	XXX	85	92	82	100
7	XXX	XXX	XXX	XXX	119	111	114	101	104	75	72	68	68	68	65	73	67	XXX	XXX	69	60		
6	XXX	XXX	XXX	XXX	135	101	108	96	95	76	74	72	67	76	66	69	57	105	93	72	81	84	89
5	XXX	XXX	XXX	XXX	140	117	114	102	105	79	70	66	80	XXX	XXX	68	72	96	XXX	66	XXX		
4	XXX	XXX	XXX	XXX	133	125	103	102	103	XXX	61	73	60	XXX	XXX	63	57	XXX	91	53	88	79	78
3	XXX	XXX	XXX	XXX	133	107	113	102	106	XXX	XXX	75	75	70	77	69	75	88	101	66	63		
2	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	113	111	93	103	XXX	XXX	79	76	68	72	71	69	101	97	77	79	83	117
1	XXX	XXX	XXX	XXX	149	108	129	107	97	XXX	XXX	78	79	70	66	71	70	103	92	62	66		
0	XXX	XXX	XXX	XXX	131	116	119	107	XXX	XXX	XXX	66	71	75	55	71	64	82	XXX	71	78	80	121

θ-Index

t0-Schwellen

Abbildung C.6: *θ-φ-Karte der t0-Schwellen in FADC-count. XXX kein t0-Bit gesetzt.*

Literaturverzeichnis

[1] C. Gerthsen et al. Physik. Springer-Verlag, Berlin, 1988.

[2] E. Rutherford. The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. Phil. Mag. 21, 1911.

[3] J. Chadwick. Possible Existence of a Neutron. *Nature*, **129**, page 312, 1932.

[4] R. Hofstadter. Electron Scatering and nuclear structure. *Rev. Mod. Phys.*, **28**, page 214, 1956.

[5] C. Rubbia. Discovery of W^+, W^- and Z^0 Bosons. *Old and New Problems in Fundamental Physics*, , pages 55–107, 1984.

[6] W. Buchmüller and G. Ingelman (editors). Physics at HERA. In *Proceedings of the HERA Workshop*, volume 1 and 2. DESY, 1992.

[7] D. Perkins. Introduction to High Energy Physics. Addison Wesley Publishing Company, 1987.

[8] D.R.C. Kelly et al. The Electron Beam Lifetime Problem in HERA. In *Reports at the 1995 Particle Accelerator Conference PAC95*, number DESY M-95-08. DESY, 1995.

[9] B. H. Wiik. HERA Status. In W. Buchmüller and G. Ingelmann, *Proceedings of the Workshop: Physics at HERA*, volume 1, pages 1–22. DESY, october 1991.

[10] H1 Collaboration, I. Abt et al. The H1 Detector at HERA. DESY Report DESY-93-103, DESY, 1993.

[11] H1 Calorimeter Group, B. Andrieu et al. The H1 Liquid Argon Calorimeter System. *Nucl. Instrum. Meth.*, **A 336**, pages 460–498, 1993.

[12] H.-P. Wellisch et al. Hadronic Calibration of the H1 LAr Calorimeter using Software Weighting Techniques. Technical Report MPI-PhE/94-03, MPI für Physik, 1994.

[13] R. Eichler. higher lumi and energy of HERA. summary of a discussion with F. Willeke on 21. July 1997.

[14] D. Handschuh. Studien zum Protoneninduzierten Untergrund am H1 Detektor und Entwicklung von Filteralgorithmen zu dessen Unterdrückung. Dissertation, Universität Hamburg, 1993.

[15] L. Goerlich et al. Strategy Studies for the H1 Topological L2-Trigger (L2TT). H1–Note H1-01/97-508, DESY, 1997.

[16] S. Udluft. Untersuchungen zu Neuronalen Netzen als Vertextrigger im H1-Experiment bei HERA. Diplomarbeit, LMU München, 1996.

[17] Adaptive Solutions Inc., Beaverton, OR 97006. CNAPS/VME Board Reference Manual, 1994.

[18] D. Westner. Ein neuronaler Netzwerktrigger für die Produktion von J/Ψ-Teilchen in ep-Streuung ($J/\Psi \rightarrow e^+e^-$). Diplomarbeit, LMU München, 1996.

[19] T. Zobel. Neuronale Netzwerke als Trigger für die J/Ψ-Produktion in ep-Kollisionen am Beispiel des Zerfalls $J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$. Diplomarbeit, LMU München, 1996.

[20] E. Barrelet et al. The hardware implementation of L3 triggers in H1. H1–Note H1-12/88-100, DESY, 1988.

[21] A. Campbell. A RISC multiprocessor event trigger for the data aquisition system of the H1 experiment at HERA. International Conference Real Time '91, Jülich 1991.

[22] K. Rüter. How to use the LAr trigger rates monitor system. Persönliche Notizen, 1997.

[23] M. Enzenberger et al. Status des L2 Ratenmonitors. Beiträge zu Dienstagsmeetings am MPI, 1996/97.

[24] H. Brettel et al. The First Level Liquid Argon Calorimeter Trigger Technical Realisation. Internal Report H1-TR-301, DESY, 1987.

[25] A. Babaev et al. Proposal to Upgrade the LAr Calorimeter and Trigger Electronics. H1–Note H1-01/96-470, DESY, 1996.

[26] T. Carli. FADC gain. Persönliche Mitteilung.

[27] H1 Collaboration, I. Abt et al. The H1 Detector at HERA. Internal Report DESY H1-96-01, DESY, 1996.

[28] H. Häberle et al. Tabellenbuch Elektrotechnik. *Europa Fachbuchreihe Elektrotechnik*. Europa-Lehrmittel, Wuppertal, 11 edition, 1984.

[29] Müller et al. Elektrotechnik. *Fachstufe 1 und 2 Energietechnik*. Westermann, Braunschweig, 5 edition, 1986.

[30] V. Radeka. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **38**, page 217, 1988.

[31] P. Manfredi et al. High Density Monolithic Front-End Systems for Detectors without Charge Multiplication. *NIM*, **A 279**, pages 152–168, 1989.

[32] V. Radeka et al. Speed and Noise Limits in Ionisation Chamber Calorimeter. *NIM*, **A 265**, pages 228–242, 1988.

[33] G. Lutz et al. Limitations in the Accuracy of Detector Charge Measurements set by the 1/f-Noise in the Front-End Amplifier. *NIM*, **A 277**, pages 194–203, 1989.

[34] J. Fent et al. Study to noisereduction in H1-Triggerchannels with large towercapacities. Internal Report MPI-TR-007, MPI für Physik in München, 1995.

[35] T. Carli et al. Performance of the H1 LAr Trigger in 1994. H1–Note H1-07/95-445, DESY, 1995.

[36] Toshiba Corporation, Japan. JFET 2 SK 372. Datasheet.

[37] InterFet Corporation, USA. JFET NJ3600. Databook.

[38] R. Sütterlin. Test der neuen Analog Gating Module. private Dokumentation, 1997.

[39] C. Kiesling. ssmtest.c. kommentierter Quellcode, 1997.

[40] J. Huber. tcdaq.c. kommentierter Quellcode, 1996.

[41] M. Borowski. Untersuchungen zum Verhalten der Ausleseelektronik des H1-LAr-Kalorimeters (vorläufiger Titel). Diplomarbeit, Universität Dortmund, voraussichtlich Ende 1997.

[42] W. Pimpel. Möglichkeiten zur schonenden Umrüstung der Analogkarten. mündliche Diskussion, 1997.

[43] J. Köhne et al. TriCal: User Guide and Referance Manual. Technical Report in Vorbereitung, DESY Hamburg, 1997.

[44] E. Banas. VAX Interfacee to the CALO OS9 DAQ (User's Manual). Technical Report Last update 1993, DESY Hamburg, 1991.

[45] V. Blobel. The BOS-System Dynamic memory management. Technical Report third updated printing, Universität Hamburg, 1994.

[46] T. Carli et al. TTool 1.00 The Toolkit for H1 LAr Trigger Analysis. Technical Report H1-11/94-405, MPI München, 1994.

[47] B. Reisert. Flüssig-Argon-Geometrie gpmap.hbook. in Vorbereitung.

[48] K. Rüter. Untersuchungen des schwachen geladenen Stroms in tiefinelastischen Positron-Proton Kollisionen mit dem H1-Detektor am HERA-Speicherring. Dissertation, TU München, 1995.

[49] Application Software Group. PAW, Physics Analysis Workstation, An Introductory Tutorial. *CERN Program Library Long Writeup Q121*, 1995.

Danksagung

Diese Arbeit wurde innerhalb der H1-Gruppe des Max-Planck-Institus für Physik in München angefertigt. Allen Mitgliedern dieser Gruppe danke ich für viele interessante und anregende Diskussionen, nicht nur zu physikalischen Fragestellungen, die stets in einer freundlichen und harmonischen Atmosphäre stattfanden und so eine angenehme und fruchtbare Zusammenarbeit ermöglichten.

An erster Stelle namentlich zu nennen ist Prof. Dr. Christian Kiesling. Er vertraute mir eine herausfordernde Aufgabe an und erwies sich in vielen Fachgesprächen als wertvoller Ansprechpartner und Motivator. Er verhalf mir zum besseren Verständnis der Flüssig-Argon-Kalorimeter und seiner Trigger-Elektronik.

Der Max-Planck-Gesellschaft, insbesondere Prof. Dr. Gerd Buschhorn, verdanke ich die Bereitstellung der erforderlichen Arbeitsmittel und die Finanzierung meiner Dienstreisen zu DESY Hamburg.

Beim Aufbau des Meßstands und der Umrüstung der Analogkarten erbrachten die Mitarbeitern der Elektronik- und Hybrid-Werkstatt des MPI München eine dankenswert fruchtbare Zusammenarbeit.

Während meiner Aufenthalte am DESY betreuten mich intensiv und kooperativ Dr. Tancredi Carli und Dr. Jobst H. Köhne.

Nicht unerwähnt bleiben sollen alle H1-Shiftcrews und Runcoordinators, deren bereitwillige Mitarbeit eine reibungslose Durchführung der TriCal-Messungen während der Betriebspausen der HERA-Beschleuniger ermöglichte.

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit unter Angabe aller wesentlichen Quellen und Hilfsmittel selbständig verfaßt zu haben.

München, August 1997

(Burkard Reisert)