

Fakultät für Physik und Astronomie
Koprecht-Karls-Universität Heidelberg

**Aufbau eines Experimentes
zur automatisierten Vermessung
charakteristischer Parameter
von Fine-Mesh Photomultipliern,
speziell der Untersuchung
der Inhomogenitäten
der Photokathode**

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

Die Diplomarbeit wurde ausgeführt am
Institut für Hochenergiephysik
unter der Betreuung von
Herrn Prof. Dr. K. Meier

1994

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1 Speicherringanlage HERA	3
1.2 H1 Detektor.....	4
1.3 BEMC --> SPACAL.....	6
1.4 Ziele der Arbeit	6
2. Photomultiplier.....	8
2.1 Allgemeines.....	8
2.1.1 Photokathode.....	8
2.1.2 Elektronenoptisches Eingangssystem.....	11
2.1.3 Vervielfachersystem	11
2.2 Verwendete Größen und Definitionen.....	13
2.3 Fine-Mesh-Photomultiplier.....	17
3. Experimentelle Durchführung.....	21
3.1 Aufbau des Meßstandes.....	21
3.1.1 Mechanischer Aufbau.....	21
3.1.2 Leuchtdiode und Pulsgenerator	22
3.1.3 Spannungsteiler (Base)	24
3.1.4 Ausleseelektronik.....	24
3.2 Steuer- und Meßsoftware	27
3.2.1 Kommunikation mit der Scaneinheit.....	27
3.2.2 Meß- und Ausleseprogramm.....	28
3.2.3 Auswerteprogramm	29
3.3 Meßablauf.....	29
4. Meßergebnisse.....	31
4.1 Serienmessung.....	31
4.1.1 Kalibration/Gainverhalten	31
4.1.2 Stabilität.....	33
4.1.3 Inhomogenität der Photokathode	35
4.2 Einzelmessungen.....	43
4.2.1 Reproduzierbarkeit der Messungen.....	43
4.2.2 Spannungsabhängigkeit der Inhomogenitäten.....	46
4.2.3 Farbabhängigkeit der Inhomogenitäten.....	48
4.3 Fehlerbetrachtung	53
Zusammenfassung	56
Abbildungsverzeichnis	57
Literaturverzeichnis	59

1. Einleitung

Seit Urzeiten versucht der Mensch, die ihm eigene Gabe des bewußten Denkens zu nutzen, um die ihn umgebende Natur zu verstehen.

Speziell die Physik, als die fundamentalste aller Naturwissenschaften, versucht Naturphänomene in einfache, logische und reproduzierbare Gesetzmäßigkeiten zu fassen.

Die Elementarteilchenphysik hat sich zur Aufgabe gesetzt, zu klären, was die Welt im Innersten zusammenhält, die Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie und ihren Wechselwirkungen.

Da es dem Menschen unmöglich ist, direkt in die Welt der atomaren und subatomaren Teilchen einzudringen, versucht er diesen Zugang indirekt, mit Hilfe von Streuexperimenten, zu erreichen.

Ernest Rutherford lieferte 1911 [Rut 11] mit seinem berühmten Streuexperiment den Grundstein, auf den alle nachfolgende Streuexperimente aufbauen, um zu immer kleineren Dimensionen vorzudringen.

1.1 Speicherringanlage HERA

Am Deutschen Elektronen Synchrotron in Hamburg (DESY) wurde im Jahr 1992 die 6.3 km lange **Hadron-Elektronen-Ring-Anlage** (HERA) fertiggestellt..

Bei HERA werden Elektronen auf eine Energie von 26.7 GeV und die gegenläufigen Protonen auf eine Energie von 820 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht, wodurch sich eine Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 313 \text{ GeV}$ ergibt.

Mit Hilfe des maximalen quadratischen Impulsübertrages $Q^2 = 10^5 \text{ GeV}^2 / c^2$, unter Berücksichtigung der Heisenbergschen Unschärferelation [Hei 27]

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar / 2$$

folgt eine räumliche Auflösung x von Strukturen bis hin zu 10 exp-17 m .

Weiterhin erlaubt die zu erwartende integrierte Luminosität von $L = 100\text{-}200 \text{ pb exp-1}$ pro Jahr die Messung physikalischer Prozesse mit kleinem Wirkungsquerschnitt σ .

Da die Anzahl der Ereignisse eines physikalischen Prozesses N gegeben ist durch

$$N = L \cdot \sigma$$

lassen sich bei HERA selbst Prozesse mit einem Wirkungsquerschnitt von $\sigma = 0.1 \text{ pb}$ in einer ausreichenden Anzahl feststellen.

Diese HERA-Bedingungen ermöglichen physikalische Experimente zur Überprüfung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik und zum Nachweis bisher unbekannter Teilchen.

Fig.1.1 zeigt den Ringspeicher HERA

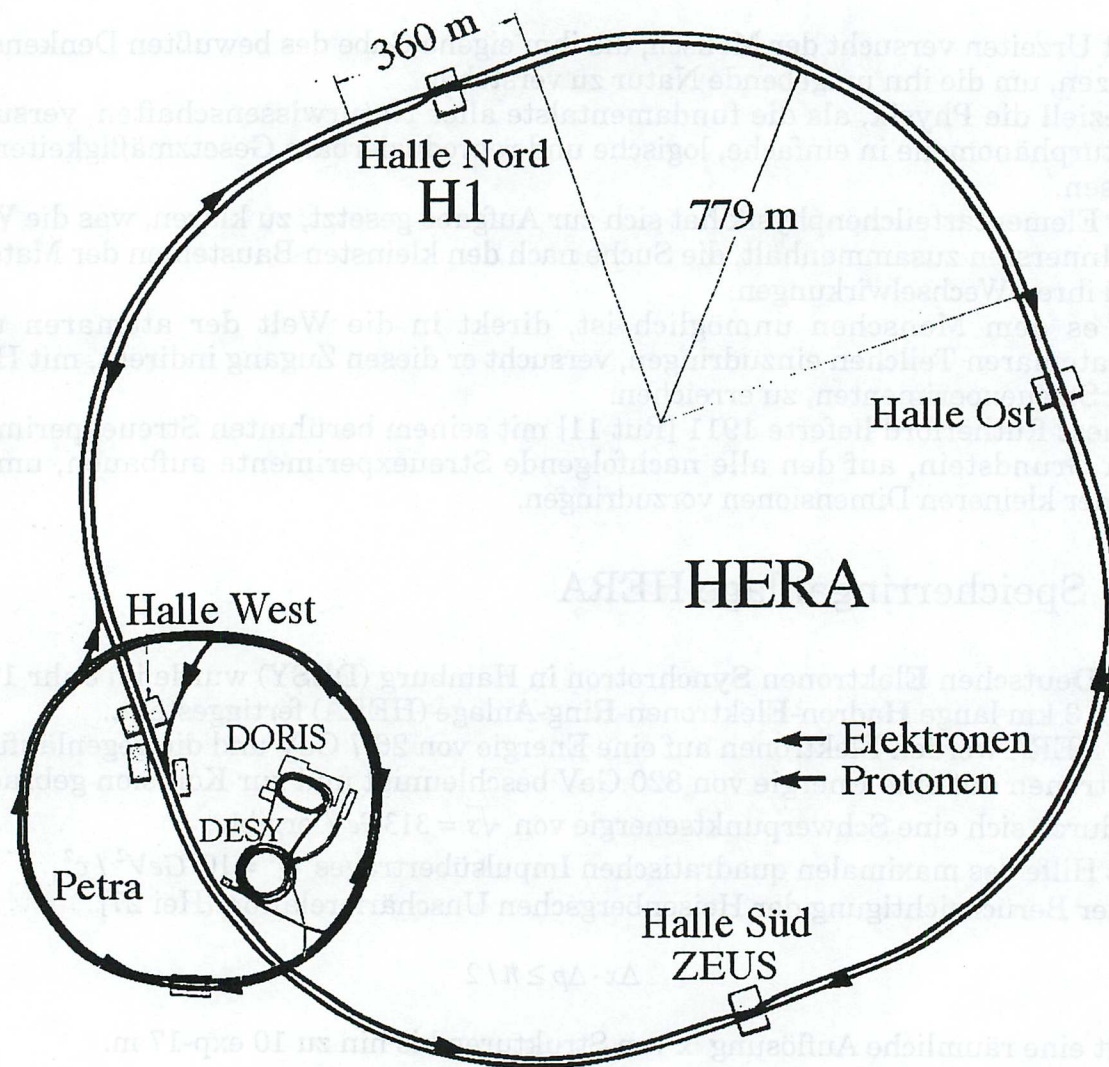


Fig.1.1 Speicherringanlage HERA

1.2 H1 Detektor

Zur Beobachtung und Rekonstruktion der physikalischen Prozesse ist an einer der Wechselwirkungsstellen bei HERA der H1 Detektor aufgebaut worden.

Der Detektor besteht aus mehreren Einzeldetektoren und deckt einen Großteil des gesamten Raumwinkels um den Wechselwirkungspunkt ab, um die bei der Kollision entstehenden Teilchen nachweisen zu können.

Aufgrund der höheren Protonenenergie, die entstehenden Teilchen somit vorwiegend in Protonrichtung fliegen, ist der Detektor asymmetrisch aufgebaut, wie es Fig. 1.2 veranschaulicht.

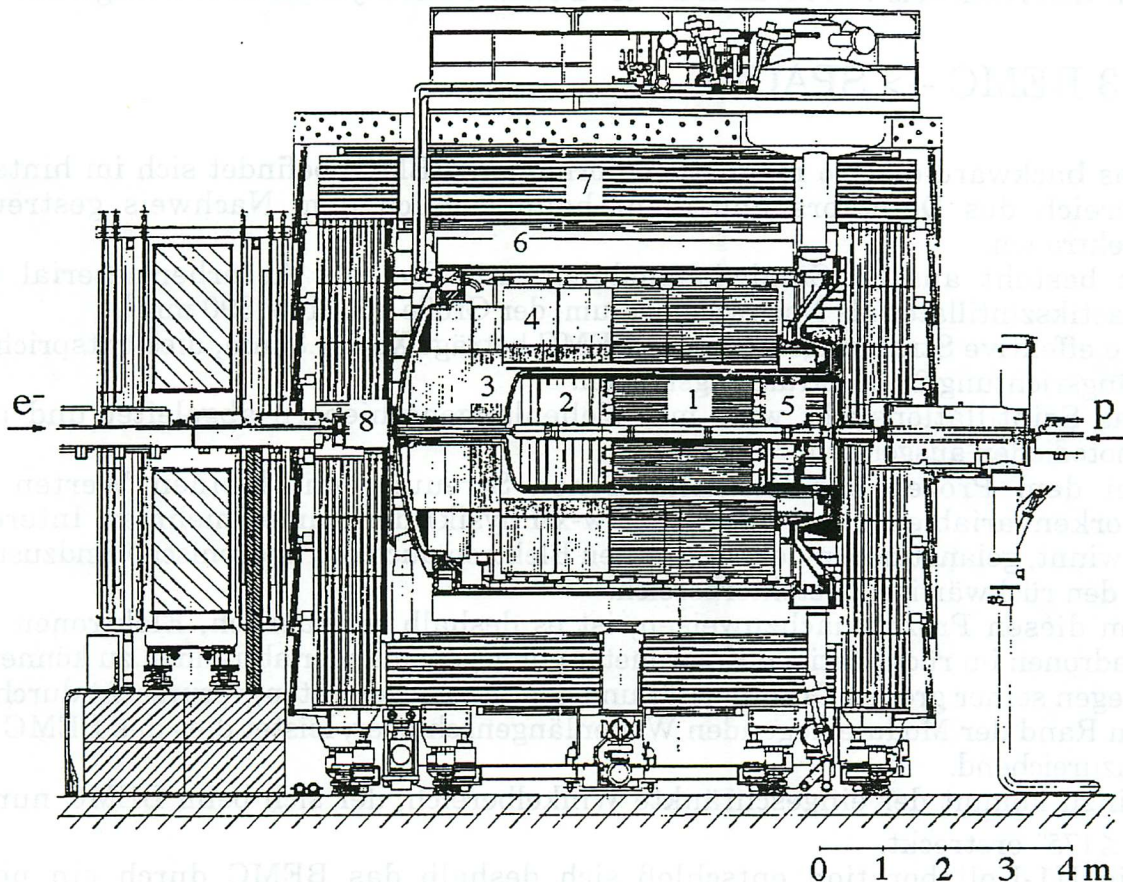


Fig.1.2 H1-Detektor

Im folgenden seien kurz die einzelnen Detektorelemente erläutert.

Am Wechselwirkungspunkt, nahe dem Strahlrohr befinden sich die zentralen Spurenkammern (1) und etwas weiter in Flugrichtung des Protons die Vorwärtsspurenkammern (2) mit Übergangsstrahlungsdetektoren.

Umgeben werden diese von einem Sandwichkalorimeter, bestehend aus acht Ringelementen, das in einem Kryostaten auf einer Temperatur von ca. 80 K gehalten wird und mit flüssigem Argon als Auslesemittel arbeitet. Das Kalorimeter ist unterteilt in den inneren elektromagnetischen Teil (3) und den äußeren hadronischen Teil (4). Das Kalorimeter deckt einen Raumwinkel, immer gemessen in Protonflugrichtung, von $4^\circ \leq \Theta \leq 152^\circ$ ab.

Das Silizium-Kalorimeter PLUG (8) befindet sich im vorderen Bereich für Winkel $\Theta \leq 4^\circ$ und im hinteren Bereich deckt das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter BEMC (5) den Raumwinkelbereich von $150^\circ \leq \Theta \leq 175^\circ$ ab.

Zur Impulsmessung geladener Teilchen sind die Spurenkammern und die Kalorimeter von einer supraleitenden Magnetfeldspule (6) der Stärke $B = 1.19 \text{ T}$ umgeben.

Umhüllt werden die Magnetfeldspulen von einem Eisenjoch (7), das der Rückführung des magnetischen Flusses dient, in das Streamerkammern integriert sind, welche der Detektion hochenergetischer hadronischer Schauer dienen, die nicht ihre gesamte Energie im hadronischen Kalorimeter deponiert haben.

Für den Nachweis von Myonen ist der Detektor mit Myonkammern umgeben.

1.3 BEMC --> SPACAL

Das **backward electro magnetic calorimeter** (BEMC) befindet sich im hinteren Bereich des Detektors und dient hauptsächlich dem Nachweis gestreuter Elektronen.

Es besteht aus 88 Sandwichmodulen, mit Blei als Absorbermaterial und Plastikszintillator als Nachweismedium, der Größe $160 \times 160 \times 390 \text{ mm}^3$.

Die effektive Strahlungslänge des BEMC beträgt $X_0 = 14.3 \text{ mm}$, dies entspricht in Längsrichtung 22.55 Strahlungslängen.

Das Szintillationslicht wird mit Wellenlängenschiebern abgeleitet und über Photodioden ausgelesen.

Bei dem Prozeß der tiefinelastischen Streuung mit kleinen Werten der Bjorkenvariablen $x = 10 \exp(-4)$, (low-x-Physik) der immer mehr an Interesse gewinnt, gelangt neben dem gestreuten Elektron auch der hadronische Endzustand in den rückwärtigen Detektorbereich.

Um diesen Prozeß nachzuweisen, ist es deshalb erforderlich, Elektronen und Hadronen im rückwärtigen Kalorimeter gut gegeneinander abtrennen zu können.

Wegen seiner groben Granularität und den Inhomogenitäten, verursacht durch die am Rand der Module liegenden Wellenlängenschieber, leistet dies das BEMC nur unzureichend.

Hinzu kommt der eingeschränkte Winkelbereich, der sich beim BEMC nur bis $\Theta \leq 175^\circ$ erstreckt.

Die H1-Kollaboration entschloß sich deshalb das BEMC durch ein neues Kalorimeter zu ersetzen, das die Forderungen nach der Abdeckung eines größeren Winkelbereichs $\Theta \leq 178^\circ$, einer feineren Granularität und der besseren Elektron-Hadron-Trennung erfüllt.

Dazu wird nun ein sog. Spaghetti-Kalorimeter aufgebaut und getestet.

Ein Spaghetti-Kalorimeter setzt sich aus mehreren Einzelzellen zusammen, von denen jede aus einem Absorbermaterial, meist Blei, besteht in das optische Fasern als Szintillator parallel eingelegt sind. Am Ende der Zelle werden die optischen Fasern gebündelt und über einen Lichtmischer von einem Photomultiplier ausgelesen.

Wegen der geringen Lichtausbeute dieses Kalorimetertyps und des hohen Magnetfeldes von $B = 1.2 \text{ T}$ am Einbauort werden spezielle fine mesh Photomultiplier benötigt, die in dieser Arbeit untersucht werden.

1.4 Ziele der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Inhomogenitäten der Photokathode der im Experiment eingesetzten Photomultiplier.

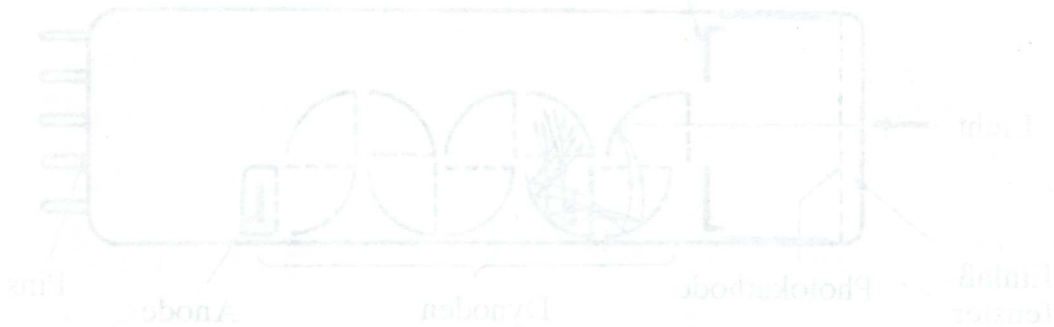
Für jeden Photomultiplier wird das Ausgangssignal in Abhängigkeit vom Auftreffort des Lichtpulses auf der Photokathode registriert (Scan).

Dazu wurde ein Meßstand aufgebaut, der alle Photomultiplier (ca. 1200 Stück) in einer Routinemessung automatisch durchmißt.

In Einzelmessungen wurde die Abhängigkeit der Inhomogenitäten von der angelegten Versorgungsspannung und der eingestrahlten Lichtwellenlänge untersucht.

In Kapitel 2 wird die prinzipielle Funktionsweise und der Aufbau von Photomultipliern, insbesondere auch der im Experiment eingesetzte Typ des fine mesh Photomultipliers, beschrieben.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Meßaufbau und im 4. Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt und diskutiert.



2. Photomultiplier

2.1 Allgemeines

Ein Photomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher) ist ein optoelektronisches Bauelement, das auftreffendes Licht in elektrische Signale umwandelt, diese gleichzeitig verstärkt, um sie der weiteren Auswertung zugänglich zu machen. Ein Photomultiplier ist aufgebaut als eine evakuierte Elektronenröhre mit einer Photokathode, einem Fokussierungssystem, einem Vervielfachungssystem (Dynoden) und einer Anode, wie es Fig. 2.1 schematisch zeigt [Ham 90].

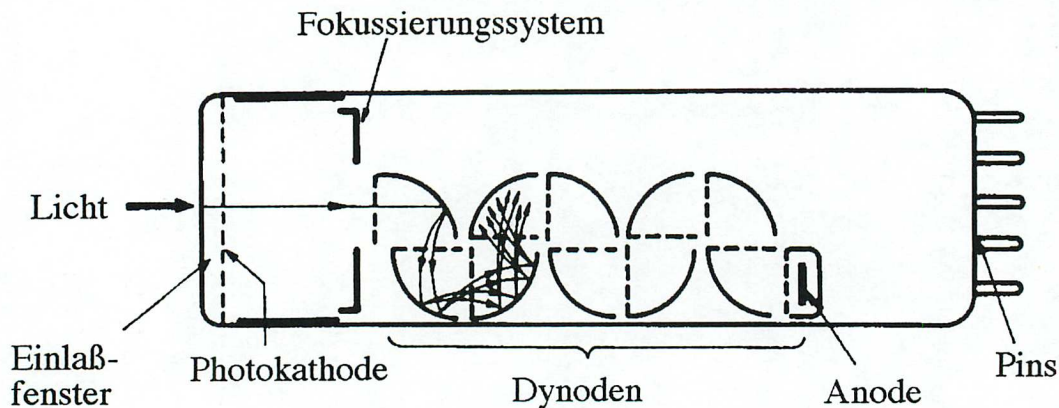


Fig.2.1 Photomultiplier, schematisch

Licht trifft durch ein Glasfenster auf die Photokathode und löst dort Elektronen aus. Diese werden fokussiert und mittels einer angelegten Spannung zur ersten Dynode hin beschleunigt, lösen dort ihrerseits wieder Elektronen aus, die auf die zweite Dynode treffen u.s.w. Die nach diesem Schneeballprinzip enorm angewachsene Zahl von Elektronen (typ. Verstärkungsfaktor 10^7) wird letztlich von der Anode abgesaugt und liefert somit ein verwertbares elektrisches Signal.

2.1.1 Photokathode

Daß Licht aus Metallen Elektronen herauszuschlagen vermag, war lange Zeit bekannt. A. Einstein stellte 1905 [Ein 05] hierzu die Energiebilanz auf.

$$E_{\text{kin}} = h \nu - I$$

Beim photoelektrischen Effekt werden die Photonen absorbiert und übertragen ihre Energie ($h\nu$) vollständig auf die Elektronen des Absorbermaterials. Abzüglich der Austrittsarbeit der Elektronen (I) verbleibt diesen eine kinetische Restenergie (E_{kin}).

Tab. 2.1 zeigt eine Auswahl von Elementen und Verbindungen mit ihren zugehörigen Austrittsarbeiten [Ard 62].

Element	Austrittsarbeit	Verbindung	Austrittsarbeit
Ag	4.70 eV	NiCs	1.36 eV
C	4.34 eV	BaO	1.57 eV
Cs	1.80 eV	SbCs	1.84 eV
Fe	4.60 eV		
K	2.24 eV		
Li	2.35 eV		
Mo	4.20 eV		
Na	2.28 eV		
Pt	6.30 eV		
Rb	2.10 eV		

Tab. 2.1 Austrittsarbeiten ausgewählter Elemente und Verbindungen
[Ard 62]

Aus dieser Auflistung wird ersichtlich, daß die Alkalimetalle die niedrigsten Austrittsarbeiten besitzen.

Eine weitere Bedingung, die an die Materialien gestellt wird, ist eine hohe Quanteneffizienz. Unter Quanteneffizienz versteht man den Quotienten aus der Anzahl der emittierten Photoelektronen und der Zahl der auftreffenden Lichtquanten.

Bei den in Tab. 2.1 aufgeführten Elementen liegt diese in einer Größenordnung von kleiner 0.1%.

Die meisten Photokathoden bestehen aus Halbleitermaterialien, denn diese Materialien liefern Quanteneffizienzen von 20 - 30 %.

Um das zu erklären, ein kleiner Exkurs in die Bändertheorie [Sch 70].

Die Elektronen eines Atomes im Kristallverbund besetzen feste Energiebänder. Diejenigen Bänder, die am weitesten vom Energieniveau des Kernes entfernt sind, tragen die höchsten Energielevels, d.h. die Elektronen, die sie besetzen sind am geringsten an den Kern gebunden. Ein Band repräsentiert einen Satz erlaubter, diskreter Energieniveaus, die nach dem Pauliprinzip von genau einem Elektron besetzt werden können. Die Bänder sind getrennt durch sog. Verbotene Zonen, um diese zu überwinden muß den Elektronen Energie zugeführt werden.

Die beiden äußersten Bänder sind das Valenz- und das Leitungsband, in dem sich Elektronen unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes frei bewegen können.

Der Hauptunterschied zwischen Leitern, Halbleitern und Isolatoren besteht nun in der Größe der Energielücke (Verbotene Zone) zwischen Valenz- und Leitungsband, wie es Fig. 2.2 verdeutlicht.

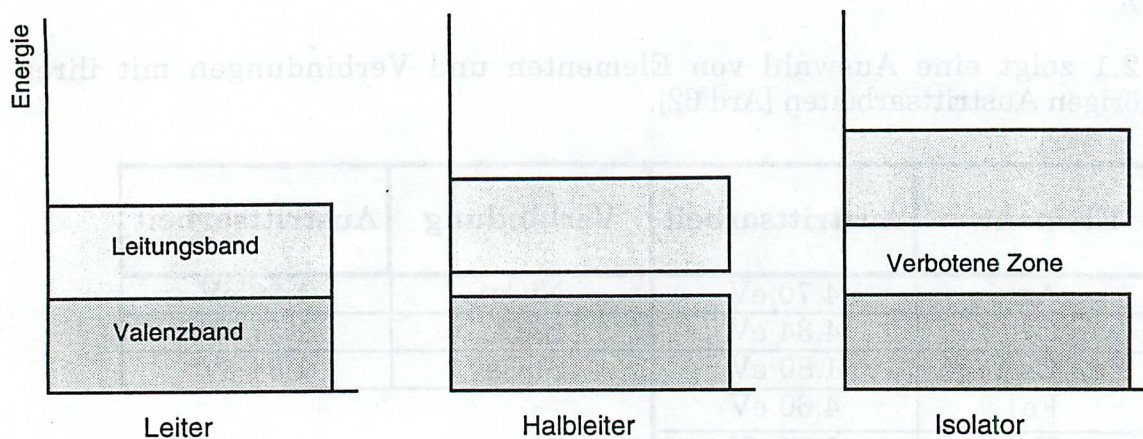


Fig.2.2 Bänderschema

In Leitern überlappen sich Valenz- und Leitungsband, bei Halbleitern sind diese durch eine Energielücke von ca. 1 eV getrennt und bei den Isolatoren beträgt sie ca. 2 eV und mehr.

Ganz allgemein gesprochen bedingt eine Energiezufuhr der entsprechenden Größenordnung ein Anheben der Elektronen vom Valenz ins Leitungsband.

Die Zufuhr von Energie kann über verschiedene Arten erfolgen:

- Beleuchtung (Photoelektrische Emission)
- Elektronenbeschuß (Sekundäremission)
- Anlegen eines elektrischen Feldes (Feldemission)
- Zufuhr von Wärmeenergie (Thermische Emission)

Bei der Bewegung der Elektronen im Leitungsband durch den Kristallverband können diese mit anderen freien Elektronen kollidieren, dadurch Energie verlieren und somit nicht mehr in der Lage sein, die Energieschranke beim Austritt aus der Oberfläche (Elektronenaffinität) zu überwinden.

Genau dieser Effekt tritt bei Metallen mit ihren vielen freien Elektronen im Leitungsband auf (geringe mittlere freie Weglänge).

Bei den Halbleitern, die eine viel geringere Leitungselektronendichte besitzen, ist die Austrittswahrscheinlichkeit somit wesentlich größer.

Es bleibt zu erwähnen, daß wegen der ungleichen Massenverhältnisse Stöße der Elektronen mit den Atomen des Kristallverbundes zu keinem nennenswerten Energieverlust führen.

Aus den oben angeführten Gründen nimmt man als Kathodenmaterial meist einen mit Alkalimetall bzw. mit einem Alkalimetallgemisch dotierten Halbleiter.

Die Photokathode ist entweder auf einen metallischen Träger (undurchlässige Photokathode) aufgebracht oder auf der Innenseite des Fensters (halbdurchlässige Photokathode) aufgedampft.

2.1.2 Elektronenoptisches Eingangssystem

Die Funktion des elektronenoptischen Eingangssystems besteht in einer optimalen Kopplung der Kathode an das Vervielfachersystem (genauer an die erste Dynode), d.h. es sollen möglichst viele Elektronen von der Photokathode, unabhängig von ihrem Austrittsort, auf die erste Dynode fokussiert werden.

Dazu wird in den meisten Fällen ein elektrisches Feld benutzt, für spezielle Anwendungen auch ein magnetisches.

Eine weitere Aufgabe des Fokussierungssystems besteht darin, besonders bei Photomultipliern, die zur Messung schneller Signale (Zeitmessung) eingesetzt werden, die Flugzeit der Elektronen zwischen Kathode und der ersten Dynode unabhängig von ihrem Austrittsort zu machen.

Fig.2.3 zeigt das Fokussierungssystem eines Photomultipliers mit eingezeichneten Äquipotentiallinien und den Elektronenpfaden für verschiedene Emissionsorte auf der Photokathode.

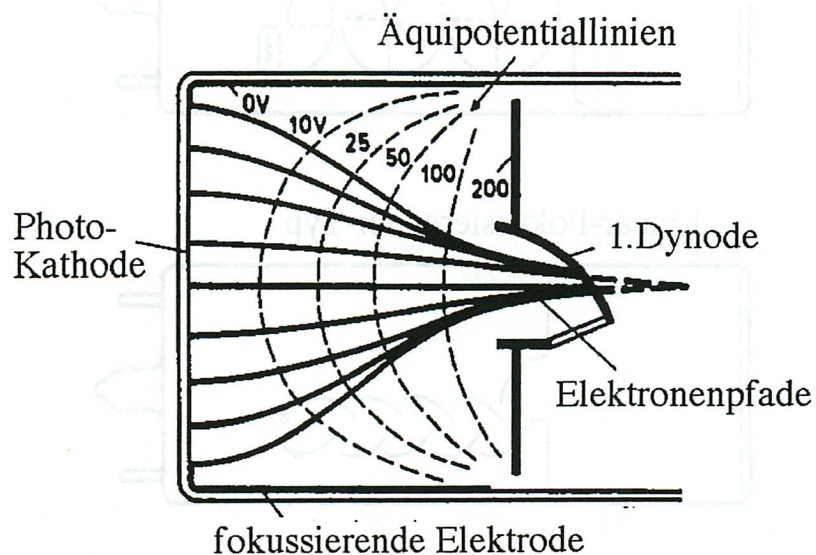


Fig. 2.3 Fokussierungssystem [Sch 70]

2.1.3 Vervielfachersystem

Das Vervielfachersystem besteht aus einer Anzahl von Dynoden (Sekundäremissionselektroden) und der Anode.

Zwischen den Dynoden liegt eine Potentialdifferenz, um die ausgetretenen Elektronen zur nächsten Dynode hin zu beschleunigen, die dort ihrerseits wieder Elektronen auslöst.

Die physikalischen Grundlagen dieses Prozesses sind die gleichen wie in Abschnitt 2.1.1 für den photoelektrischen Effekt beschrieben.

Der Begriff des Sekundärelektronenemissionsfaktors δ ist hierbei das Äquivalent zur Quanteneffizienz.

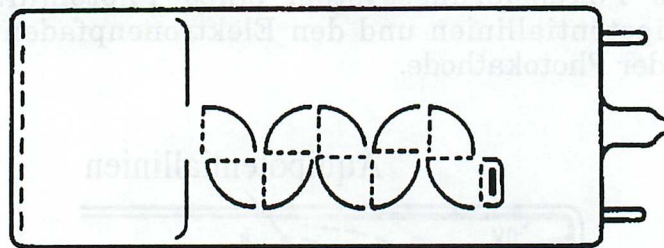
$$\delta = \frac{\text{Anzahl der ausgeschlagenen Elektronen}}{\text{Anzahl der auftreffenden Elektronen}}$$

Um einen hohen Sekundärelektronenemissionsfaktor zu erreichen, werden oft auch für die Dynoden Alkali-Halbleitermaterialien verwendet, die auf Metallen aufgebracht sind.

Die Anordnung der Dynoden und ihre Formgebung und damit auch des elektrischen Feldes zwischen ihnen, berücksichtigt die Forderung nach hoher Fokussierungseffizienz.

Fig.2.4 zeigt die meist gebräuchlichen Dynodenkonfigurationen [Ham 90].

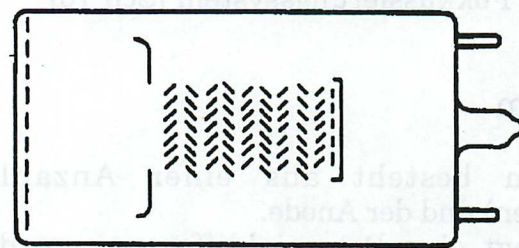
Box-and-Grid-Typ

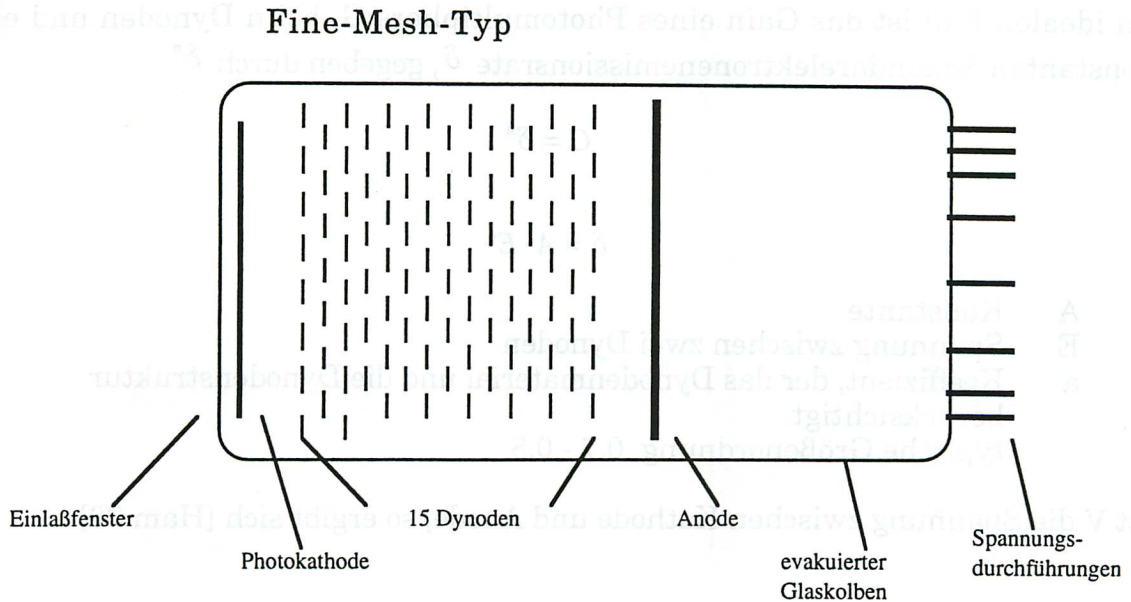


Linear-Fokussierender-Typ



Venetian-Blind-Typ





Box-and-Grid-Typ

Diese einfache und deshalb weit verbreitete Dynodenstruktur, bei der die einzelnen Dynoden aus geviertelten Zylindern bestehen, weist ein gutes Homogenitätsverhalten auf, jedoch ist das Zeitverhalten kritisch.

Linear-Fokussierender-Typ

Die Dynoden sind linear so angeordnet, daß sie die ausgelösten Elektronen zur nächsten Dynode hin fokussieren. Dieser Typ liefert eine gute zeitliche Signalauflösung.

Venetian-Blind-Typ

Dieser Typ mit seiner großen Dynodenfläche ermöglicht hohe Ausgangssignale und wird bei Röhren mit großen Kathodenflächen verwendet. Das zeitliche Verhalten ist hierbei von sekundärem Interesse.

Fine-Mesh-Typ

Aufgrund seiner Konstruktion ergibt sich für diesen Typ ein sehr gutes zeitliches Verhalten und darüberhinaus seine Magnetfeldtauglichkeit.

Dieser Photomultipliertyp ist Gegenstand der Untersuchung dieser Arbeit.

2.2 Verwendete Größen und Definitionen

Neben der bereits erwähnten Quanteneffizienz und dem Sekundärelektronenemissionsfaktor gibt es weitere charakteristische Größen für einen Photomultiplier, die im folgenden kurz aufgelistet sind.

Gain (G)

Das Gain oder der Verstärkungsfaktor ist das Verhältnis aus Anodenstrom und Photokathodenstrom.

Im idealen Fall ist das Gain eines Photomultipliers G , bei n Dynoden und einer konstanten Sekundärelektronenemissionsrate δ , gegeben durch δ^n

$$G = \delta^n$$

$$\delta = A \cdot E^a$$

- A Konstante
- E Spannung zwischen zwei Dynoden
- a Koeffizient, der das Dynodenmaterial und die Dynodenstruktur berücksichtigt.
typische Größenordnung 0.7 - 0.8

Ist V die Spannung zwischen Kathode und Anode, so ergibt sich [Ham 90]

$$G = \delta^n = (A \cdot E^a)^n$$

$$G = [A \{V / (n + 1)\}^a]^n$$

$$G = K \cdot V^{a \cdot n}$$

K=Konstante

Fig 2.5 zeigt das typische Gainverhalten eines Photomultipliers über der Spannung aufgetragen.
Zur Verdeutlichung der exponentiellen Abhängigkeit wurde eine Exponentialfunktion angepaßt.

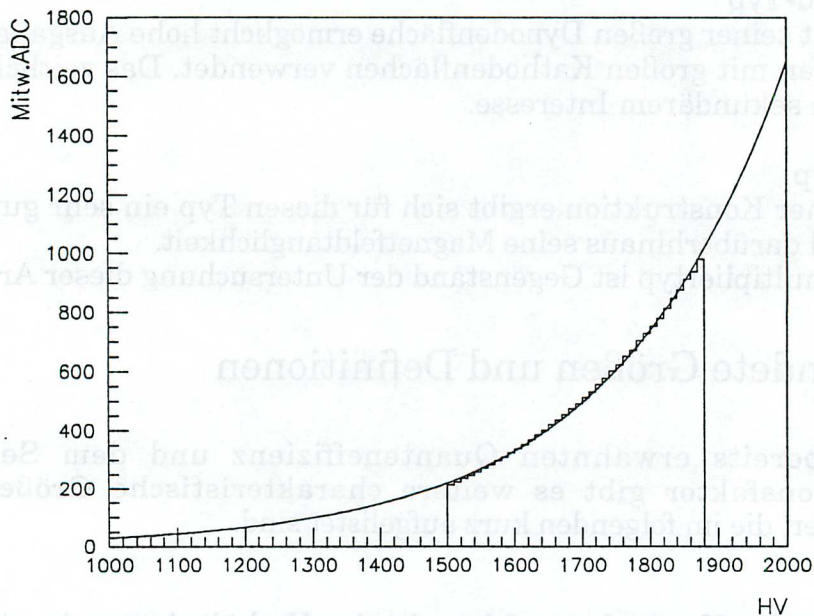


Fig. 2.5 Abhängigkeit des Gains von der Hochspannung

Da Photomultiplier durchschnittlich 9 bis 12 Dynoden besitzen, entnimmt man dieser Beziehung, daß bei einer Spannungsänderung der Anodenstrom direkt mit der sechsten bis zehnten Potenz variiert.

Das Gain eines Photomultipliers reagiert somit äußerst sensitiv auf Schwankungen der angelegten Hochspannung.

Die Spannungsversorgung eines Photomultipliers ist daher möglichst stabil zu halten.

Kathoden-Luminositäts-Sensitivität (N_k)

Sie ist das Verhältnis aus emittiertem Photostrom und einfallendem Lichtfluß, in Einheiten $\mu A / lm$.

Anoden-Sensitivität (N_a)

Sie ergibt sich aus dem Produkt aus Gain und Kathoden-Luminositäts-Sensitivität:

$$N_a = G * N_k$$

Dunkelstrom

Ein kleiner Strom fließt selbst bei Betrieb des Photomultipliers in absoluter Dunkelheit, der Dunkelstrom. Dieser Dunkelstrom, der hier als Rauschen auftritt, bestimmt maßgeblich die untere Grenze der Lichtdetektion.

Der Dunkelstrom setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, von denen die wichtigsten hier aufgeführt sind:

a) Thermische Emission

Wie in Kapitel 2.1.1 bereits erwähnt, können auch durch Zufuhr von Wärmeenergie Elektronen ausgelöst werden, insbesondere natürlich bei den verwendeten Materialien mit ihren niedrigen Austrittsarbeiten.

Da der Hauptanteil des Dunkelstromes aus thermischer Emission resultiert, ist für einen sehr empfindlichen Nachweis das Kühlen der Röhre unerlässlich.

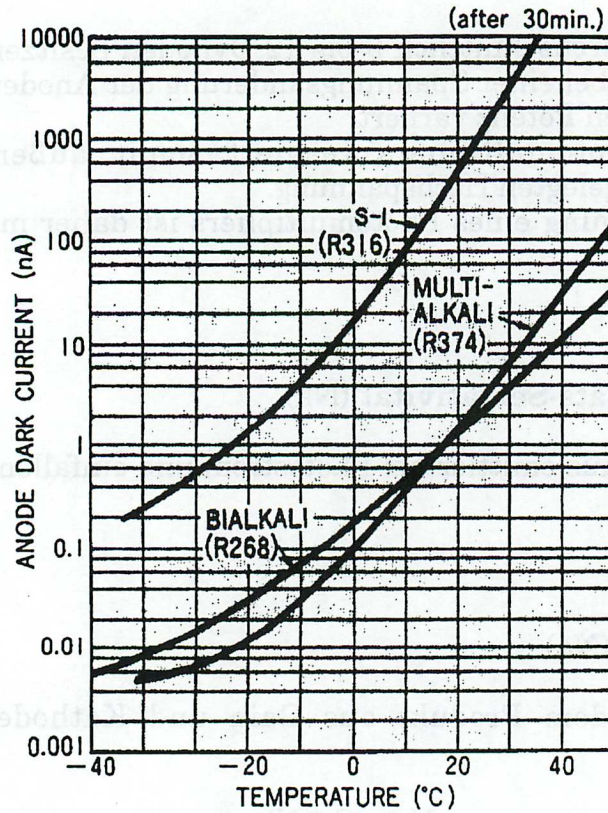


Fig. 2.6 Temperaturverhalten des Dunkelstroms [Ham 90]

b) Ionisation des Restgases

Restgas in der Photomultiplerröhre kann durch die Elektronen ionisiert werden und diese Gasionen verursachen eine relativ große Sekundäremission, die jedoch zum eigentlichen Signal zeitlich versetzt ist, man spricht von Nachpulsen.

c) Glasszintillation

Falls Elektronen von ihrer Trajektorie abweichen und das Röhrenglas treffen, kann dies zu einem Szintillationsblitz führen.

d) Feldemission

Wird ein Photomultiplier nahe der zulässigen Maximalspannung betrieben, kann das hohe elektrische Feld Elektronen aus den Elektroden lösen.

2.3 Fine-Mesh-Photomultiplier

Photomultiplier, besonders solche mit einem komplexen Fokussierungssystem und großen Abständen zwischen der Photokathode und der ersten Dynode, reagieren äußerst sensitiv auf die Anwesenheit eines magnetischen Feldes.

Auf die sich bewegenden Elektronen wirkt die Lorentzkraft

$$F = e \cdot (v \times B)$$

was zur Ablenkung von ihren Trajektorien führt.

Dies macht sich durch einen erheblichen Gainverlust bemerkbar, der abhängig von der Orientierung und Stärke des Magnetfeldes ist.

Man kann nun versuchen, die Röhre gegen das magnetische Feld abzuschirmen, aber es wurden auch Multiplier entwickelt, die selbst in sehr hohen Magnetfeldern über 1 Tesla ein verwertbares Gain liefern, die Fine-Mesh-Photomultiplier.

Die in diesem Kapitel genannten Angaben beziehen sich alle auf den Photomultipliertyp der Firma Hamamatsu Photonics (R 3432-01, UV, 40 mm), welcher im neuen rückwärtigen Kalorimeter, dem Spaghetti-Kalorimeter, zur Anwendung kommen wird und Gegenstand der Untersuchung dieser Arbeit ist.

Die Dynoden dieser Photomultiplier bestehen aus einer dünnen Metallschicht, in die Löcher geätzt sind, sodaß sich eine siebartige Struktur ergibt, und sie liegen im Glaskolben parallel übereinander. Die Dicke der Gitterstreben beträgt $5.5 \mu\text{m}$, die der Löcher $12 \mu\text{m}$ [Mor 89].

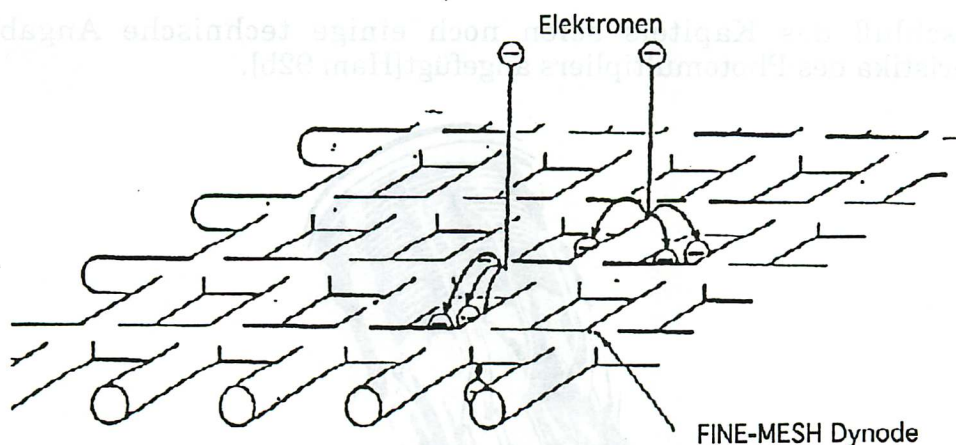


Fig. 2.7 Modellzeichnung einer fine-mesh-Dynode [Ham 92a]

Da hierbei, ohne Magnetfeld, die Elektronentrajektorien parallel zur Dynodennormalen laufen und die Bauweise sehr kompakt ist, ergibt sich die Magnetfeldtauglichkeit [Jan 93].

Fig. 2.8 illustriert die Magnetfeldtauglichkeit anschaulich.

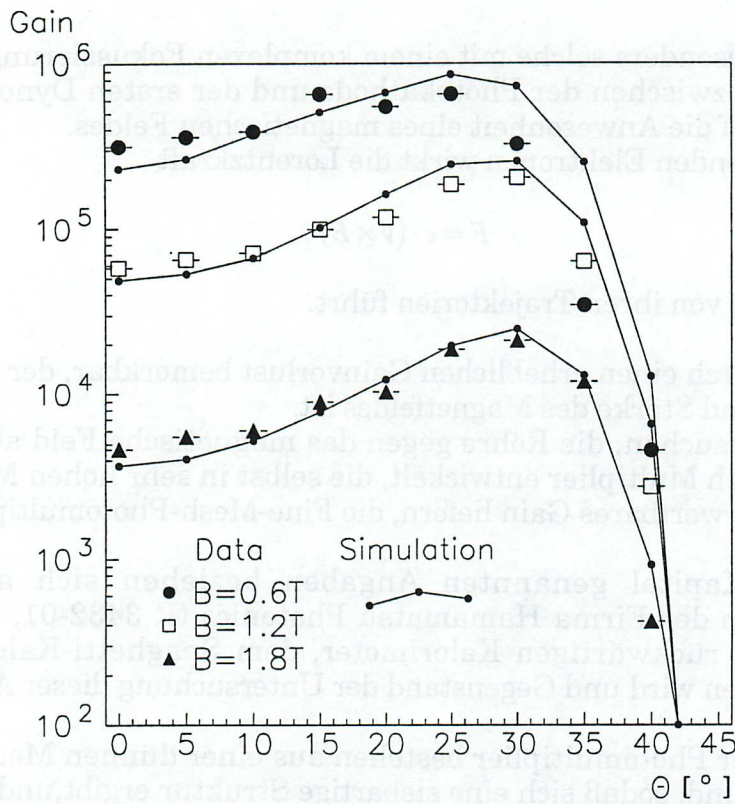


Fig.2.8 Abhängigkeit des Gains vom Magnetfeld [Jan 93]

Zum Abschluß des Kapitels seien noch einige technische Angaben und Charakteristika des Photomultipliers angefügt[Ham 92b].



Fig. 2.9 Fotografie des Photomultipliers R 3432-01

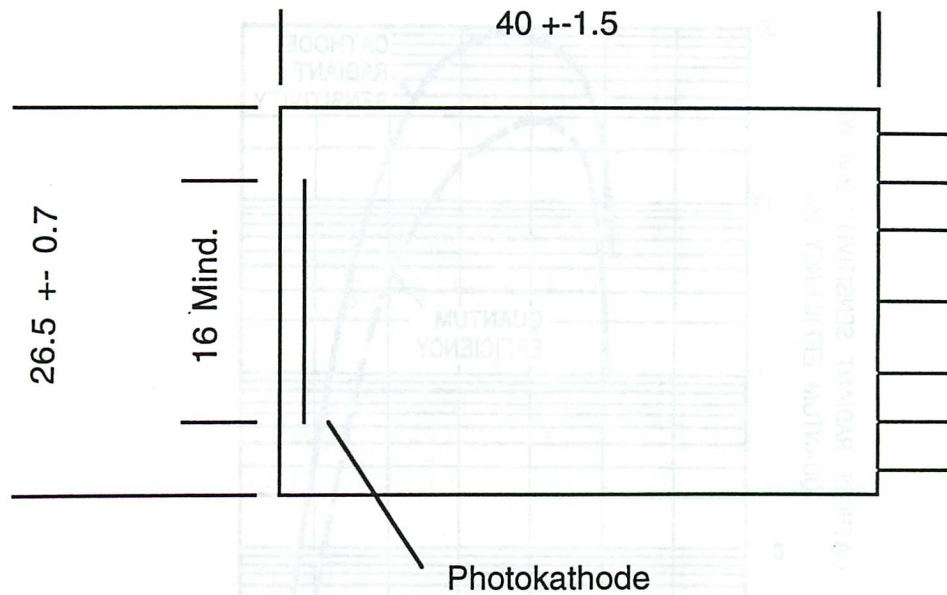


Fig. 2.10 Maße des Photomultipliers R 3432-01
Angaben in mm [Ham 92b]

Photokathode

Material	Bialkali (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)
Durchmesser	16 mm (min)
Sensitivität	60 $\mu\text{A} / \text{lm}(\text{typ})$
Quanteneffizienz	20 % (bei 390 nm)

Dynoden

Material	Bialkali
Struktur	Fine-Mesh
Anzahl	15

Fenster

Material	Borsilikat
----------	------------

Verstärkung (Gain) bei 0 Tesla $5 \cdot 10^5$ (typ.)

Dunkelstrom 10 nA (typ.)

Fig. 2.11 zeigt den typischen Verlauf der Quanteneffizienz und der Kathodensensitivität über der Wellenlänge aufgetragen.

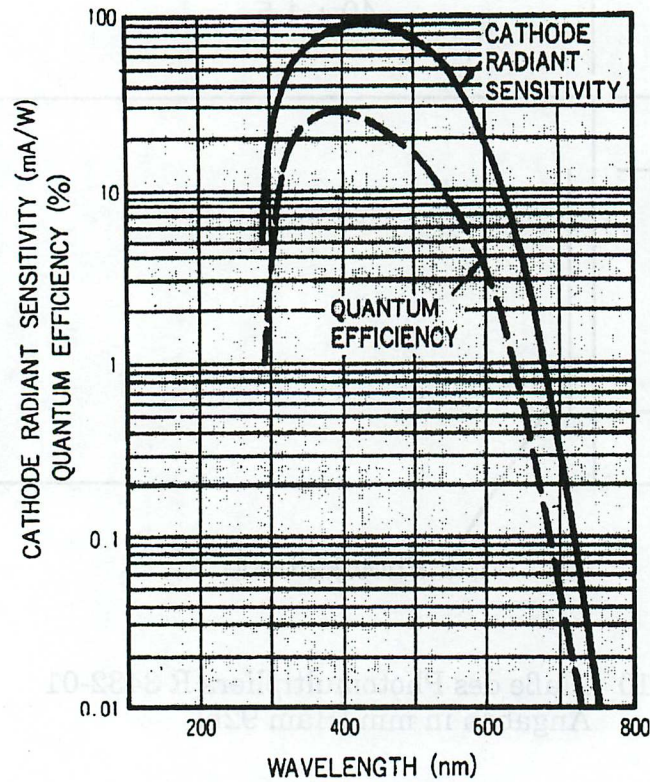


Fig. 2.11 Kathodensensitivität und Quanteneffizienz als Funktion der Wellenlänge [Ham 90]

Es ergibt sich hieraus, daß dieser Röhrentyp, mit seiner hohen Effizienz im blauen Spektralbereich und zusammen mit seiner Magnetfeldtauglichkeit, optimal geeignet für den Einsatz im neuen Spaghettikalorimeter ist.

3. Experimentelle Durchführung

3.1 Aufbau des Meßstandes

Fig. 3.1 zeigt schematisch die Komponenten des aufgebauten Meßstandes.

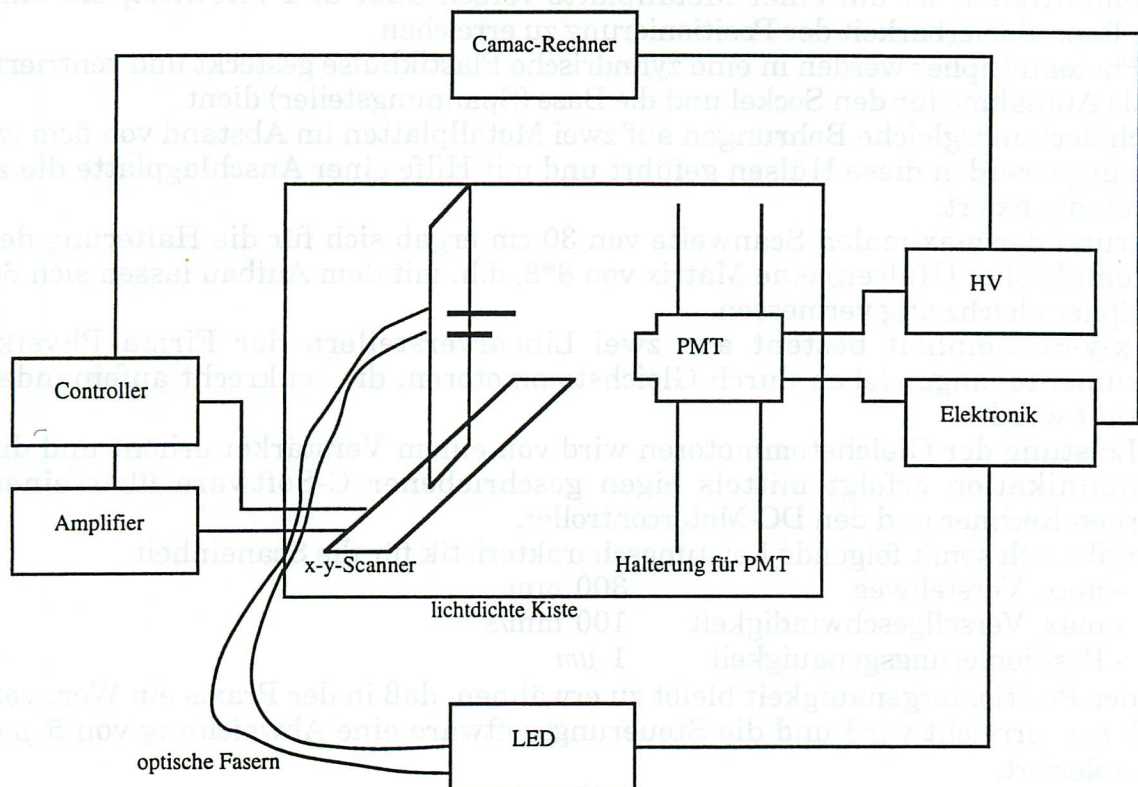


Fig.3.1 Meßbau, schematisch

Im folgenden seien die einzelnen Komponenten näher erläutert.

3.1.1 Mechanischer Aufbau

Da, wie bereits erwähnt, Photomultiplier sehr empfindliche Meßgeräte sind, d.h. Tages- und Streulicht die Meßergebnisse verfälschen würden, sind die Photomultiplier und die gesamte Mechanik in einer lichtdichten Kiste untergebracht.

Die Kiste mit den Maßen $1000 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$, die aus 15 mm Holz gefertigt wurde, ist innen mit schwarzem Filz ausgekleidet und besitzt Durchführungen für die Lichtleiter (optische Fasern), den Temperaturfühler und die Steuer- und Versorgungsleitungen der Scantische, sowie für die Signal- und Hochspannungskabel der Photomultiplier.

Der Zugriff auf die Photomultiplier und die Mechanik ist durch eine abnehmbare Frontplatte gewährleistet, die auf einem Rahmen aufliegt und mit vier Flügelschrauben befestigt ist.

Die Lichtdichtigkeit der Kiste wurde überprüft indem mit einer Glühlampe die gesamte Außenseite, speziell die Durchführungspaneel, Kanten und Ecken, beleuchtet wurde und der Dunkelstrom mehrerer Photomultiplier gemessen wurde. Dabei zeigte sich kein Anstieg des Dunkelstroms.

Die gesamte Mechanik, die x-y-Scaneinheit und die Halterung für die Photomultiplier, ist auf einer Metallplatte verschraubt und verstiftet, um eine hohe Reproduzierbarkeit der Positionierung zu erreichen.

Die Photomultiplier werden in eine zylindrische Plastikhülse gesteckt und zentriert, die als Aufnahme für den Sockel und die Base (Spannungsteiler) dient.

Durch deckungsgleiche Bohrungen auf zwei Metallplatten im Abstand von 5cm (z-Richtung) werden diese Hülsen geführt und mit Hilfe einer Anschlagplatte die z-Koordinate fixiert.

Aufgrund der maximalen Scanweite von 30 cm ergab sich für die Halterung der Photomultiplier (Hülsen) eine Matrix von 8×8 , d.h. mit dem Aufbau lassen sich 64 Multiplier gleichzeitig vermessen.

Die x-y-Scaneinheit besteht aus zwei Linearverstellern der Firma Physik-Instrumente, angetrieben durch Gleichstrommotoren, die senkrecht aufeinander montiert wurden.

Die Leistung der Gleichstrommotoren wird von einem Verstärker erhöht und die Kommunikation erfolgt mittels eigen geschriebener C-Software über einen externen Rechner und den DC-Motorcontroller.

Es ergibt sich somit folgende Leistungscharakteristik für die Scaneinheit

- max. Verstellweg 300 mm
- max. Versellgeschwindigkeit 100 mm/s
- Positionierungsgenauigkeit $1 \mu\text{m}$

Zur der Positioniergenauigkeit bleibt zu erwähnen, daß in der Praxis ein Wert von ca. $3 \mu\text{m}$ erreicht wird und die Steuerungssoftware eine Abweichung von $5 \mu\text{m}$ noch toleriert.

Zusätzlich befinden sich in der Kiste noch zwei Photomultiplier (Philips 150 AVP, SRC 75B01), die als Referenzen dienen, um Schwankungen der Leuchtdiode zu kompensieren und der Temperaturfühler.

3.1.2 Leuchtdiode und Pulsgenerator

Als Lichtquelle dienen zwei grüne ($\lambda_{\text{max}} = 560 \text{ nm}$) und eine blaue ($\lambda_{\text{max}} = 470 \text{ nm}$) Leuchtdiode, die von Pulsgeneratoren angesteuert werden.

Der Pulsgenerator erhält ein TTL-Signal (Spannungspuls genormter positiver Amplitude) vom Outputregister, konvertiert das intern in ein Rechtecksignal von 8 ns Breite und einer Höhe von 30 V (einstellbar), das auf die Leuchtdiode gegeben wird. Nach diesen 8 ns Öffnungszeit schließt der Pulsgenerator einen zweiten Schaltkreis, was zu einer schnellen Entladung der Leuchtdiode führt.

Skizzen der Signalformen von Pulsgenerator und Photomultiplier (\cong LED) sind in Fig. 3.2 aufgeföhrt.

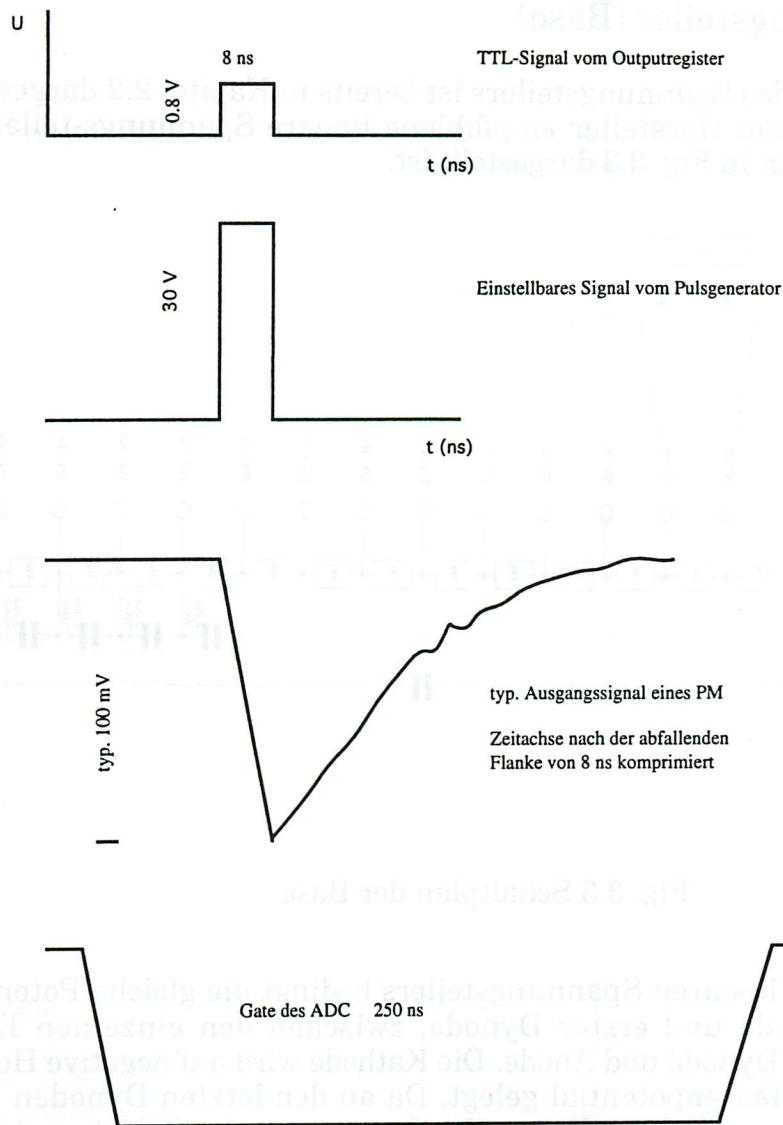


Fig.3.2 Skizze der Pulsformen

Die Pulsfrequenz kann sich, da Software getaktet, etwas verschieben, beträgt im Mittel aber etwa 1 kHz.

Diese Verschiebung kommt dadurch zustande, daß die Ansteuerung der LED-Pulser durch die Software des OS-9 Camac-Controllers erfolgt.

Das Betriebssystem OS-9 ist jedoch kein Echtzeitsbetriebssystem, d.h. nutzen mehrere Anwender den Rechner so wird CPU (Central Processing Unit) - Zeit nacheinander auf diese verteilt, was zu einer Verschiebung der Pulsfrequenz führt.

An die grünen Leuchtdioden sind jeweils drei optische Fasern (Durchmesser 1 mm) lichtdicht angekoppelt. Zwei dieser Fasern beleuchten die beiden Referenzen, die Dritte den zu vermessenden Photomultiplier. An die blaue Leuchtdiode ist eine

Faser gekoppelt. Kopplungsstücke dienen der Variation der Lichtmenge und des Austausches Grün gegen Blau.

3.1.3 Spannungsteiler (Base)

Die Bedeutung des Spannungsteilers ist bereits in Kapitel 2.2 dargestellt worden. Es wurde der vom Hersteller empfohlene lineare Spannungsteiler verwendet, dessen Schaltplan in Fig. 3.3 dargestellt ist.

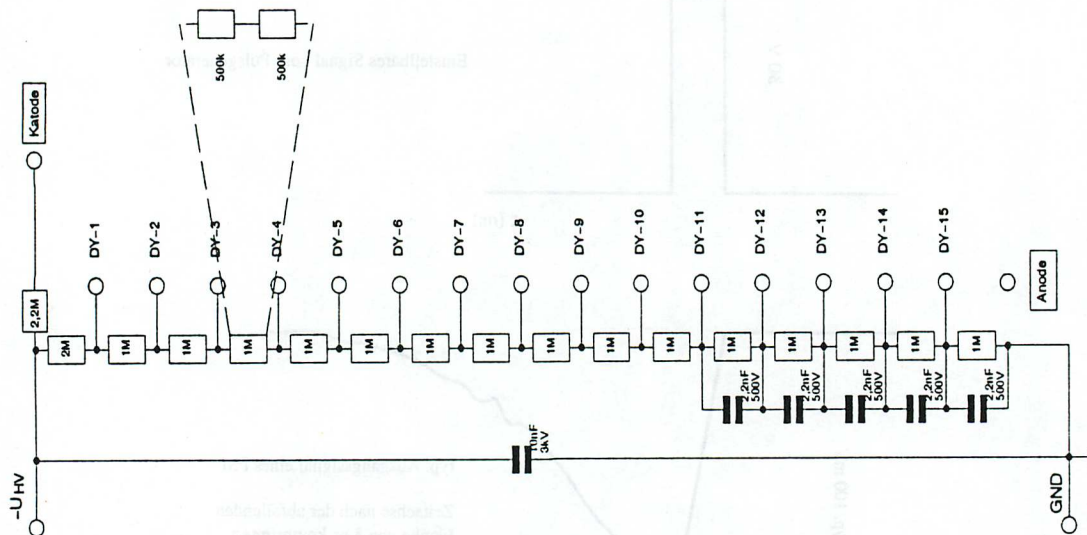


Fig. 3.3 Schaltplan der Base

Diese Form des linearen Spannungsteilers bedingt die gleiche Potentialdifferenz zwischen Kathode und erster Dynode, zwischen den einzelnen Dynoden und zwischen letzter Dynode und Anode. Die Kathode wird auf negative Hochspannung, die Anode auf Massenpotential gelegt. Da an den letzten Dynoden hohe Ströme fließen werden parallel zu diesen Kondensatoren geschaltet, welche die kurzfristigen Ladungsverluste ausgleichen.

3.1.4 Ausleseelektronik

Fig. 3.4 zeigt die Komponenten der Ausleseelektronik. Die einzelnen Elemente, der OS-9 Camac-Controller, der ADC (Analog to Digital Converter), das Outputregister, die Timing-Unit und das HV-Interface, sind Camac-Einschubmodule. Unter Camac versteht man das genormte System eines Datenbusses, d.h. den Datenübertragungsweg zwischen Computer (Controller) und den peripheren Ein- und Ausgabeeinheiten.

Um die Kommunikation zwischen mehreren Komponenten möglichst effektiv zu gestalten, gliedert sich der Bus in verschiedene Wege unterschiedlicher Funktion.

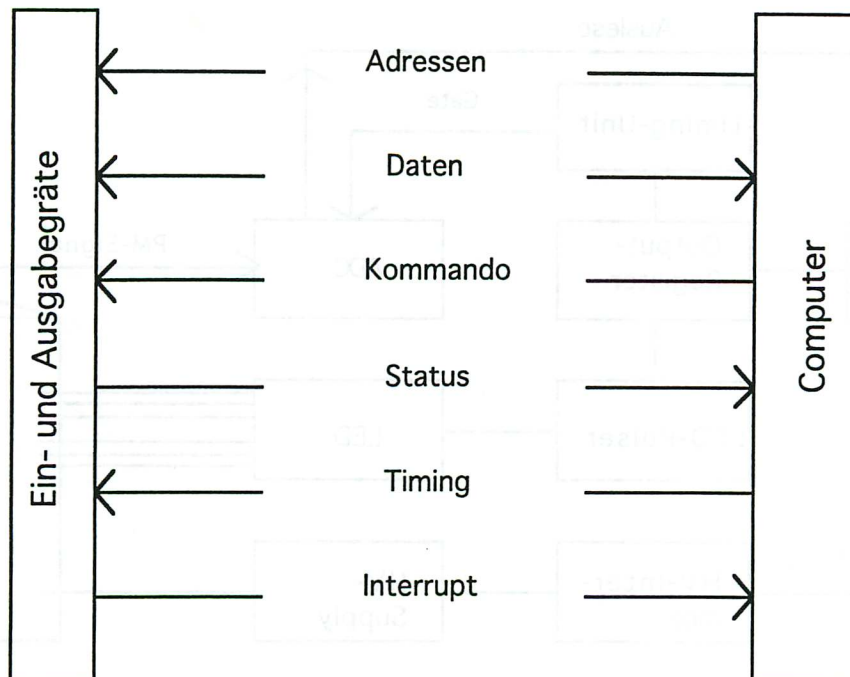


Fig. 3.4 Einzelleitungen eines Datenbusses

Die Adreßleitung wird vom Rechner dazu benutzt ein bestimmtes Modul anzusprechen. Die Datenleitung überträgt die Daten vom Rechner zum Modul und umgekehrt. Sie kann auch aus zwei Leitungen in jeweils eine Richtung bestehen. Die Kommandoleitung benutzt der Computer zur Übermittlung eines Befehls (z.B. das Lesen eines Registers) an die peripheren Einheiten. Über die Statusleitung liefert die Peripherie Meldungen ihres Zustandes (z.B. Bereit für mehr Daten, Fehler) an den Rechner. Auf der Timing-Leitung wird der Informationstransfer synchronisiert. Die Interruptleitung wird von den Modulen dazu benutzt, die Aufmerksamkeit des Rechners auf sich zu ziehen, er unterbricht seine aktuelle Tätigkeit und wendet sich diesem Modul zu.

Im Folgenden sei kurz auf die einzelnen Komponenten der Ausleseelektronik und ihr Zusammenwirken eingegangen.

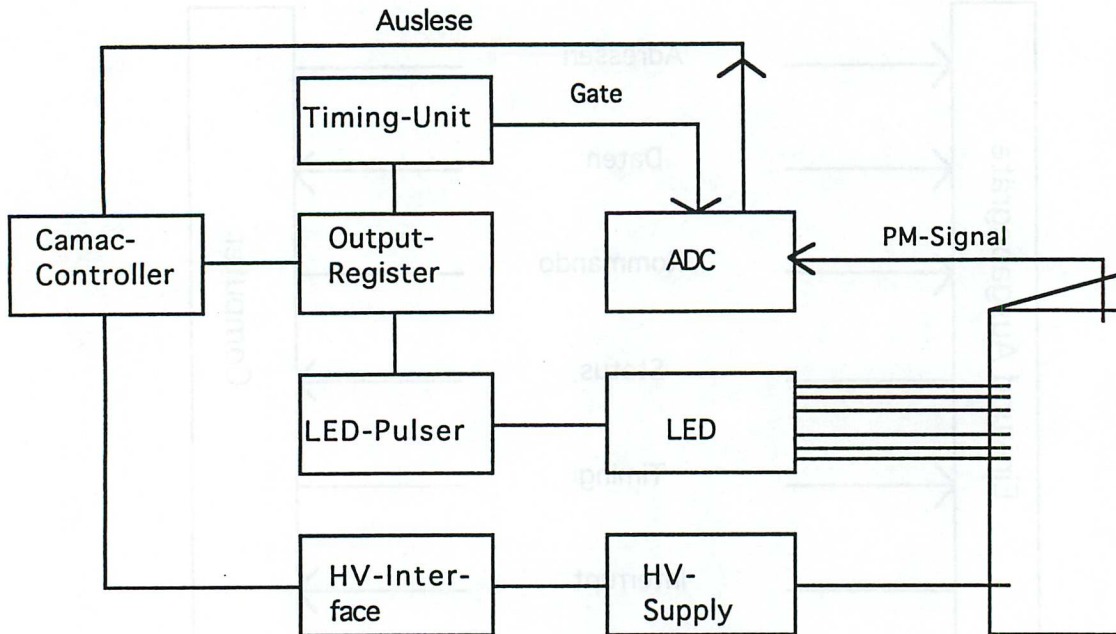


Fig.3.5 Ausleseelektronik

Die gesamte Kommunikation mit dem System erfolgt über den OS 9 Camac-Controller.

Der Camac Rechner übernimmt somit mehrere Aufgaben:

Steuerung der Scantische über den DC-Motorcontroller der Firma Physik-Instrumente

Ansteuern des Outputregisters, welches

- über eine Timing-Unit das Gate (250 ns) für den ADC liefert
- über die LED-Pulser die Leuchtdioden pulst

Einstellung der Hochspannung

Der Meßablauf kann, von der Hardwareseite aus gesehen, folgendermaßen beschrieben werden:

Über das Outputregister werden, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, die Leuchtdioden gepulst und deren Licht über optische Fasern (Plastik-Szintillationsfasern mit 1 mm Durchmesser) auf die Photomultiplier gebracht. Gleichzeitig steuert das Outputregister die Timingunit an, die ein in der zeitlichen Länge einstellbares Signal, das Gate, für den ADC liefert. Der ADC integriert während dieses Zeitraumes alle ihm zugeführten Ladungspulse, hier die Ausgangssignale der Photomultiplier, auf und ordnet sie einem bestimmten Kanal zu.

Der verwendete 10 bit ADC (Le Croy 2249A) besitzt einen Meßbereich von 250 pC und eine Auflösung von 0.25 pC pro Kanal. Die Kanalnummer des ADC ist ein direktes Maß für die Größe des Photomultipliersignals. Der ADC wird danach über die Camac Datenleitung vom Controller ausgelesen und erhält über die

Kommandoleitung den Befehl die aufgelassene Ladung zu löschen (Software-Clear).

Danach wird von der Scaneinheit die nächste Position angefahren, die eben beschriebenen Meßprozedur kann erneut ablaufen.

3.2 Steuer- und Meßsoftware

Um den Meßablauf zu gewährleisten und die gewonnenen Daten einer weiteren Auswertung zugänglich zu machen, war eine umfangreiche Softwareentwicklung notwendig.

Sie wurde auf drei an dem Projekt beteiligte Personen aufgeteilt.

3.2.1 Kommunikation mit der Scaneinheit

Zu Anfang war ein Programm nötig, das es ermöglicht, Positionierungsbefehle für den DC-Motorcontroller verständlich zu übermitteln und die Positionsmeldungen des Controllers zu lesen.

Es wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.Ing. M. Keller, ein C-Programm geschrieben, das neben der Kommunikation mit dem Controller die Initialisierung der Scaneinheit und die Anpassung der Positionierung an die verwendete 8 x 8 Matrix beinhaltet. Zur Vereinfachung des Zugriffes anderer Programme auf die verwendeten Funktionen, wurde das Programm abschließend als Library gegliedert. Die Positionsbefehle und die Positionsmeldung erfolgt in Einheiten von μm . Alle Positionen in späteren Abbildungen beziehen sich auf diese Einheit.

Interne Funktionsroutinen:

Der DC-Motorcontroller der Scaneinheit akzeptiert einen formatierten Befehlsatz, in dem alle ausführbaren Funktionen festgelegt sind.

Als Beispiel sei folgender Befehl genannt: 2ma-1000

Dies bedeutet, daß Linearversteller Nr.2 sich von der als Null definierten Position auf die absolute Position -1mm bewegt.

a) Send-Routine

Diese Funktion überträgt Befehle verständlich an den Controller und schließt sie mit einer 0 ab, sodaß sie zur Ausführung kommen.

b) Get-Pos-Routine

Hier wird in einen vorher definierten Speicherbuffer die Positionsmeldung des Controllers geschrieben und ausgelesen.

Tritt bei der Übermittlung der Daten ein Fehler auf (z.B. unvollständige Daten) so erfolgt eine Fehlermeldung.

c) Move-Routine

Sie überträgt die eigen-definierten Begriffe x-Pos (x-Position) und y-Pos (y-Position) mit den entsprechenden Zahlenangaben an den Controller, läßt diese ausführen und vergleicht die erreichte Position mit der anzufahrenden.

Ist die gewünschte Position innerhalb von einer festgelegten Toleranz ($5\mu\text{m}$) nicht erreicht, so wird erneut der Positionsbefehl gegeben (deshalb erfolgt die Positionierung auch in Absolutkoordinaten), bis ein Abbruchparameter wirksam und der Positionsfehler gemeldet wird.

Library-Funktionen:

Diese Funktionen liefern dem aufrufenden Programm einen Pointer (Zeiger) auf eine fest definierte Struktur, die beide Positionswerte, die Positionsnummer des Photomultipliers auf der Matrix und ein Errorflag für die Fehlermeldung beinhaltet. Sie greifen auf die internen Funktionsroutinen zu.

a) Initialisierungsroutine PI-INIT

Diese Funktion, die beim Programmstart aufgerufen wird, übernimmt mehrere Aufgaben:

- Sie setzt und initialisiert den Pfad, den Datenübertragungsweg, zwischen Motorcontroller und Rechner.
- Die Parameter der Scaneinheit, die Motorgeschwindigkeit, die Verstärkung (Gain), die Beschleunigungs- und Verzögerungswerte, werden so angepaßt, daß eine optimale Positionierung unter der Schrittweite von 0.5 mm erreicht wird.

Mit einer Testreihe wurden diese Parameterwerte empirisch bestimmt.

- Die beiden Linearversteller fahren sanft in ihre Endanschlüge um danach den absoluten Nullpunkt der Scankoordinaten zu definieren.

Beim Mißlingen einer dieser Tätigkeiten liefert sie eine Fehlermeldung.

b) Initialisierungsroutinen der Homogenität und der Kalibration

PI-PM (p), PI-CAL (p)

Sie positionieren die entsprechenden Fasern an die Matrixposition p des Photomultipliers.

Bei der Homogenitätsmessung ist dies der Eckpunkt des 24mm*24mm Rasters. Dort wird ein lokaler Nullpunkt definiert, auf den sich die Positionsmeldungen eines Kathodenscans beziehen.

Die Kalibrationsroutine fährt die entsprechende optische Faser in die Mitte der Photokathode.

Beide liefern sie die Positionen (x-pos, y-pos), die Matrixposition p und eventuell auftretende Fehler an das aufrufende Programm.

c) X- und Y- Step -Routinen

Sie positionieren den angesprochenen Linearversteller (X -und Y-Achse) um die vom Benutzer zu definierende Schrittweite vorwärts.

Durch Aneinanderkettung mit entsprechendem Vorzeichenwechsel (Softwareschleifen) wird ein treppenförmiges Abscannen der Photokathode erreicht.

Es werden die Positionen und ein Fehler gemeldet, falls die Position nicht innerhalb der Toleranzgrenze erreicht wird.

3.2.2 Meß- und Ausleseprogramm

Alle übrigen Softwarefunktionen, wie z.B. das Pulsen der LED und das Auslesen des ADC, sind in einem weiteren Programm zusammengefaßt [Hec 93b].

Die gewonnenen Daten, der bei der Kalibration gewonnene Referenzspannungswert, x-Position, y-Position, der ADC-Mittelwert des zu vermessenden Photomultipliers, die Varianz dieses Mittelwertes, die ADC-Mittelwerte der beiden Referenzen und ihre Varianzen, sowie der Temperaturmittelwert und seine Varianz werden formatiert in Datenfiles geschrieben.

3.2.3 Auswerteprogramm

Ein Fortran-Programm [Zub 93] greift auf diese Datenfiles zu und kreiert N-Tuple, speziell formatierte Datenobjekte des Analyseprogramms PAW [Paw 92], und Histogramme, um die Daten der weiteren Analyse zugänglich zu machen.

3.3 Meßablauf

Beim Starten des Meßprogrammes wird der Benutzer zuerst gefragt, welches Parameterfile eingelesen werden soll. In das Parameterfile werden zuvor die Seriennummer der zu vermessenden Photomultiplier (PM.NR.) und ihre Position auf der Matrix eingetragen.

Danach wird die gewünschte Schrittweite und das Einhalten einer bestimmten Anwärmzeit für die Photomultiplier abgefragt.

Zu Beginn jeder Messung werden die Pedestals für jeden ADC-Eingangskanal gemessen und diese vom ADC-Inhalt subtrahiert. Wird im folgenden vom ADC-Meßwert oder ADC-Kanal gesprochen, so sind diese bereits auf die Pedestals korrigiert. Unter Pedestals versteht man die Ladungsmenge (best.ADC-Kanal), die sich auch ohne die Zuführung eines externen Signals ergibt, man kann sie als Integrationskonstanten verstehen. Bei der Pedestal-Messung wird 100 mal nur das Gate auf den ADC gegeben und über die 100 Meßwerte des ADC (Pedestals) gemittelt. Sie liegen bei dem verwendeten Gate von 250 ns typischerweise bei 5 - 30 ADC-Kanälen.

Nun vermißt das Programm alle im Parameterfile eingetragenen Photomultiplier durch und öffnet dabei für jeden Photomultiplier ein eigenes Datenfile, das unter ein Directory geordnet wird, welches den gleichen Namen wie das Parameterfile erhält. Für jeden Punkt auf der Kathode wird eine einstellbare (default = 100) Anzahl von LED-Pulsen genommen und daraus der Mittelwert und die Varianz gebildet.

Das Programm ist in drei Unterroutinen gegliedert:

1. Kalibration
2. Homogenität
3. Stabilität

Bei der Kalibration wird die LED gepulst, deren optische Faser auf dem Schlitten der x-y-Scaneinheit in einem Abstand von 1.5 cm zum Photomultiplier befestigt ist. Sie wird in die Mitte der Kathode gefahren, um beim Messen das Zentrum der Kathode möglichst homogen zu beleuchten. Die Verteilung des Austrittswinkels von Licht aus der optischen Faser zeigt ein fast gauss'sches Verhalten und besitzt

ein Maximum bei 10° [Hat 94]. Daraus errechnet sich der Radius, der auf der Photokathode beleuchteten Kreisfläche, zu 2.65 mm.

Es läuft nun eine Softwareschleife, welche die Versorgungsspannung des Photomultipliers in 10 V Schritten erhöht und die gemessenen ADC-Mittelwerte mit denen eines Referenzmultipliers vergleicht. Liegen die beiden ADC-Mittelwerte auf gleichem Niveau, wird der zugehörige Spannungswert mit in das Datenfile geschrieben, denn er dient als Parameter für das Gain eines Photomultipliers, und desweiteren werden bei dieser Spannung die Messungen der Homogenität und der Stabilität durchgeführt.

Bei der Homogenität wird die zweite LED gepulst, deren optische Faser auf dem Scanschlitten im Abstand von ca. 1mm zum Photomultiplier angeordnet ist. Sie wird in der vom Benutzer definierten Schrittweite (default = 0.5 mm) über ein Raster von 24 mm x 24 mm über die Photokathode gefahren. Für jeden Punkt erfolgt die Datennahme.

Im abschließenden Stabilitätsmodus wird für jeden Photomultiplier in einem Zeitraum von 72 Stunden pro Stunde mit der Kalibrationsfaser der ADC-Mittelwert gemessen.

Abschließend bleibt zu sagen, daß das Programm automatisch die drei Unterrountinen nacheinander abarbeitet.

Für die Kalibration sind pro Photomultiplier ca. 3 min und für die Homogenität ca. 45 min, bei Default-Einstellung (100 Pulse, 0.5 mm Scanweite), einzuplanen.

Somit ergibt sich für eine Serienmessung mit voller Bestückung (64 Photomultiplier) eine Zeitdauer von ca. fünf Tagen.

4. Meßergebnisse

Die Diskussion der Messungen in diesem Kapitel ist unterteilt in die Ergebnisse der Serienmessung und die der Einzelmessungen.

4.1 Serienmessung

Die Serienmessung durchlaufen alle im Experiment einzusetzenden Photomultiplier. Sie werden dem im Kapitel 3 beschriebenen Meßprogramm unterzogen, und das Ziel ist es, eine Datenbank zu erstellen und jedem Photomultiplier ein charakteristisches Datenblatt beizufügen.

Auf die beiden Unterroutinen des Meßprogramms, die Kalibration und die Stabilität, wird nur kurz eingegangen und der Schwerpunkt auf die Untersuchung der Inhomogenitäten der Photokathode gelegt.

Es wurden 50 Photomultiplier (1. Liefercharge der Firma Hamamatsu) vermessen und deren Daten im weiteren analysiert.

4.1.1 Kalibration/Gainverhalten

Bei der Kalibrationsmessung wird das Zentrum der Photokathode beleuchtet, die Versorgungsspannung in Schritten von 10 V erhöht und das Ausgangssignal des Photomultipliers (Anodenstrom) über einen ladungsempfindlichen ADC ausgelesen.

Fig. 4.1 zeigt den typischen Verlauf des Ausgangssignals eines Photomultipliers in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung. Bei der Anpassung der Exponentialfunktion wurde auf die Betrachtung des Fehlers verzichtet, da die Messfehler wegen ihrer geringen Größe (siehe Kapitel 4.3) vernachlässigt wurden und das Analyseprogramm PAW eine interne Fehlerberechnung durchführt, die mit den wahren Fehlern der Messung nichts gemein hat.

Die Anpassung der Exponentialfunktion dient nur der qualitativen Bestätigung der theoretischen Beziehung.

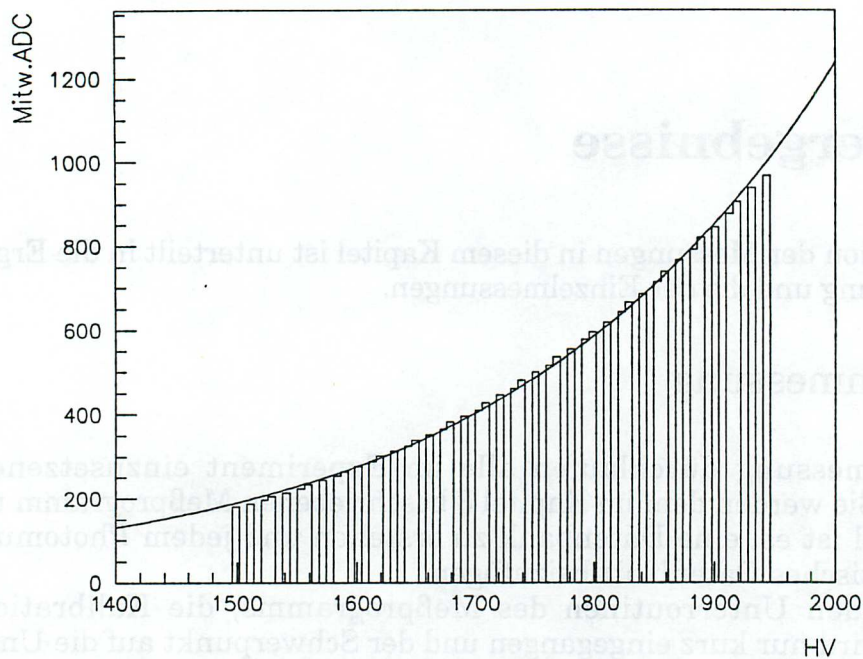


Fig.4.1 Gainverlauf als Funktion der Hochspannung

Die Meßkurve zeigt den von der Theorie, in Kapitel 2.2 bereits dargestellt, geforderten Verlauf.

$$G = K \cdot V^{a-n}$$

$$G = \frac{\text{Ladung.an.der.Anode}}{\text{Ladung.an.der.Kathode}}$$

$$\rightarrow \text{Ladung.an.der.Anode} = K' \cdot V^{a-n}$$

Bei der Kalibration wird das Ausgangssignal des Photomultipliers auf einen Referenzphotomultiplier abgeglichen und der zugehörige Spannungswert festgehalten.

Dieser Spannungswert dient somit als Parameter für das Gain eines Photomultipliers.

Fig.4.2 zeigt die Verteilung der gemessenen Referenzspannungen.

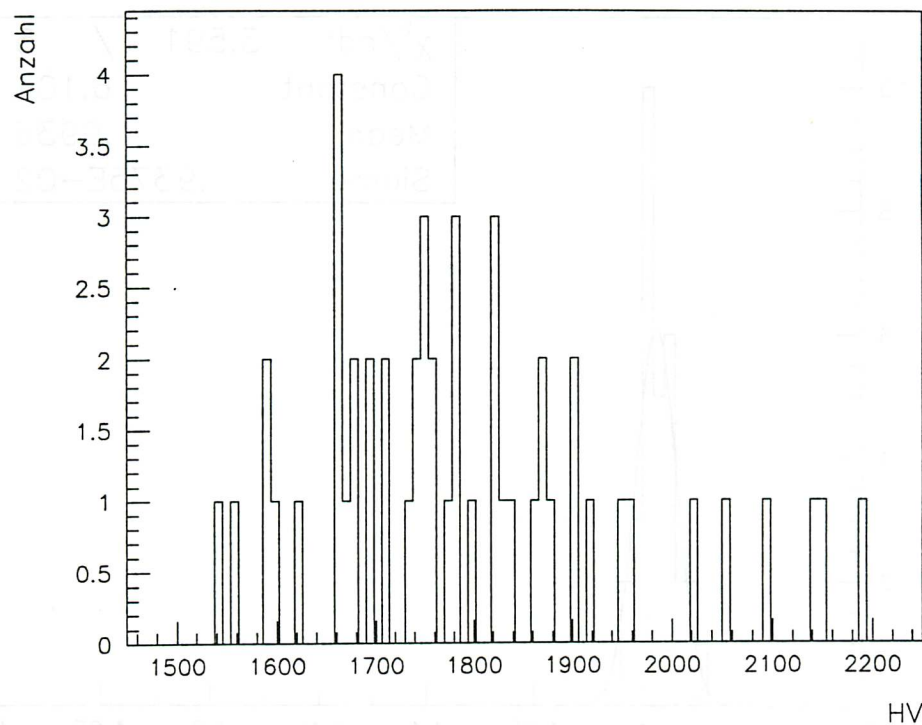


Fig.4.2 Verteilung der gemessenen Referenzspannungen

Der Abbildung ist zu entnehmen, daß die Referenzspannungswerte (und damit das Gain) eine große Streuung aufweisen. Für die Kalibration des Kalorimeters bedeutet dies, daß zum Abgleich der Photomultiplier auf den gleichen Kalibrationswert, die Spannungsversorgung in einem weitläufigen Bereich zu variieren ist.

Auf eine nähere Betrachtung des Gainverhaltens sei hier verzichtet und auf [Jan 93] verwiesen.

4.1.2 Stabilität

Die zeitliche Stabilität wird bestimmt, indem über einen Zeitraum von drei Tagen jeder Photomultiplier einmal pro Stunde beleuchtet und der gemessene ADC-Mittelwert mit der zugehörigen Zeit in das Datenfile geschrieben wird.

Fig.4.3 verdeutlicht am Beispiel eines Photomultipliers die zeitliche Stabilität. Hierbei wurde das Ausgangssignal des Photomultipliers für jeden Zeitpunkt der Stabilitätsmessung mit demjenigen der Referenz dividiert, um Schwankungen der Leuchtdiode zu kompensieren, und die Quotienten als Häufigkeitsverteilung dargestellt.

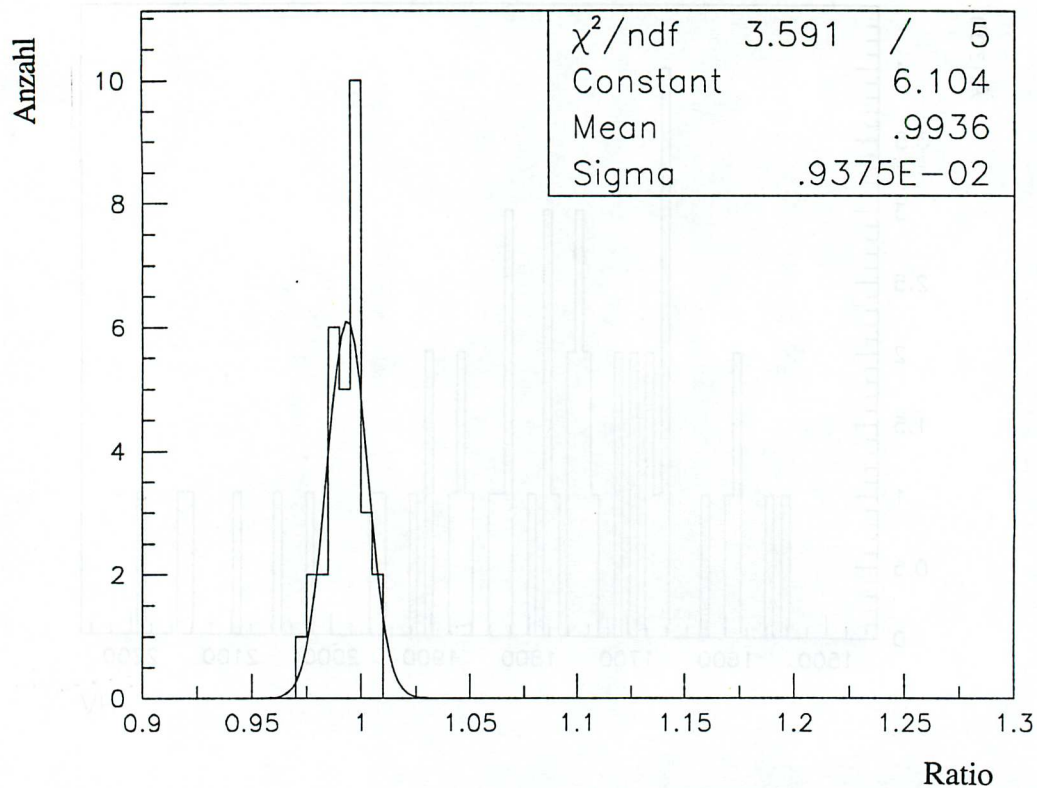


Fig.4.3 Stabilität auf Referenz normiert

Aus der Darstellung läßt sich entnehmen, daß der untersuchte Photomultiplier ein gutes zeitliches Stabilitätsverhalten aufweist. Die Schwankungen der zeitlichen Stabilität liegen bei 0.94% innerhalb von drei Tagen.

Zu dieser Methode der Quantifizierung bleibt kritisch anzumerken, daß sich Trends, d.h. ob ein Anstieg oder Abfall der Meßwerte über die Zeit vorliegt, zwar in der Breite der Verteilung bemerkbar machen, jedoch ihr Vorzeichen nicht erkannt wird.

Da u.a. auch bei der Kalibration auf einen Referenzphotomultiplier Bezug genommen wird, ist es wichtig dessen zeitliche Stabilität zu fordern, die in Fig. 4.4 dargestellt ist.

Für diese Darstellung wurden die 2401 ADC Mittelwerte der Referenz verwendet, die im Homogenitätsmodus genommen werden.

Das fast gaussische Verhalten und die geringe Breite der Verteilung sprechen für die sehr gute Stabilität der Referenz. Die Schwankungen der ADC-Mittelwerte der Referenz belaufen sich auf weniger als 0.1% über den Zeitraum von 45 Minuten.

Eine detaillierte Betrachtung der Stabilität von Photomultipliern findet sich bei [Kno 94].

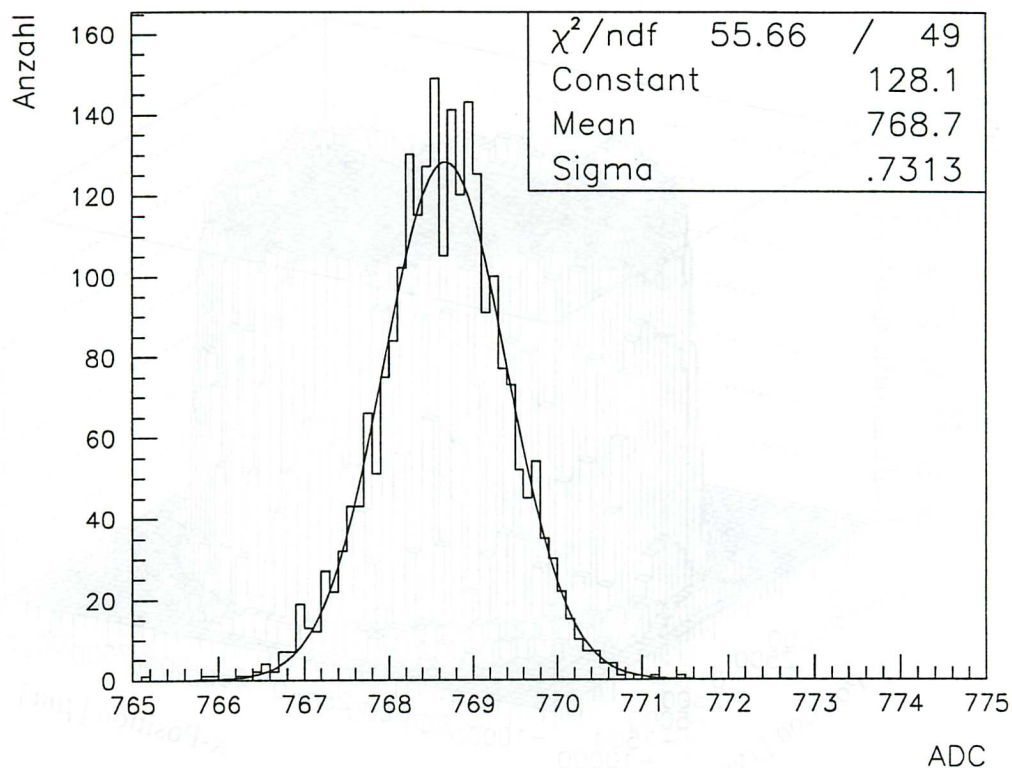


Fig.4.4 Stabilität der Referenz

4.1.3 Inhomogenität der Photokathode

Bei der Messung der Inhomogenität wird über die Photokathode ein Raster von 24mm*24mm gelegt und im Abstand von 0.5mm Meßwerte genommen, sodaß sich eine Gesamtanzahl von 2401 (49x49) Meßpunkten pro Photokathode ergibt.

Mit Hilfe des Analyseprogramms PAW wird für jeden dieser Punkte der gemessene ADC-Mittelwert aufgetragen und die Gesamtheit als dreidimensionale Graphik (Manhattan-Plot oder Lego-Plot) dargestellt.

Fig.4.5 zeigt solch einen Plot, gewonnen aus den Meßdaten eines Photomultipliers.

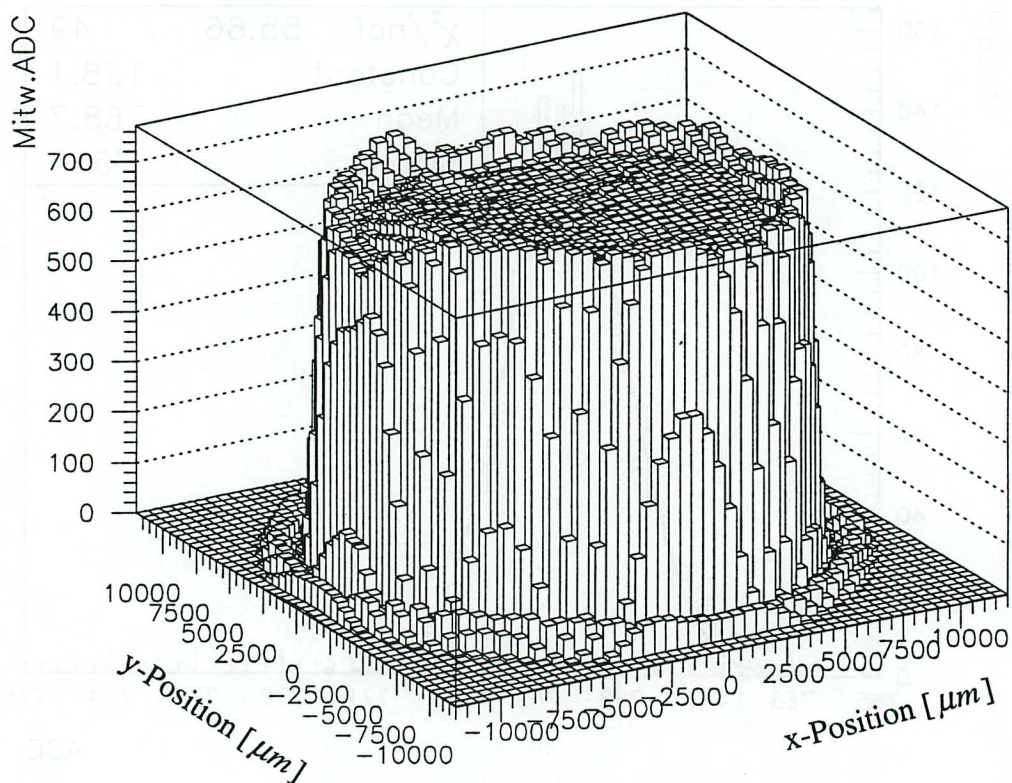


Fig.4.5 Inhomogenität einer Photokathode

Beim Betrachten von Fig.4.5 fallen die beiden Ringwälle am äußeren Rand auf, die charakteristisch für jeden Photomultiplier sind.

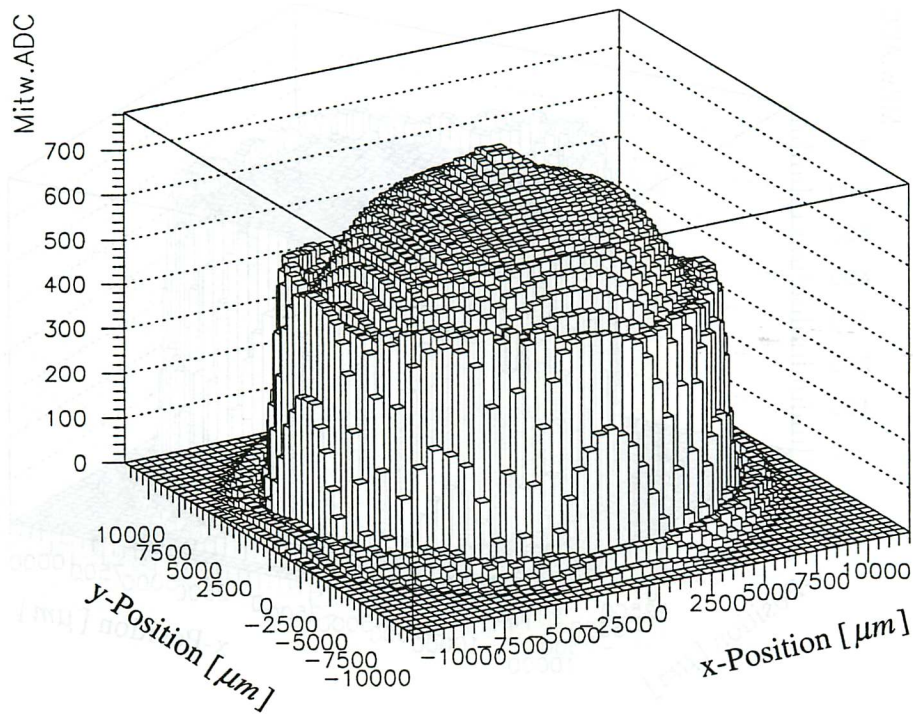
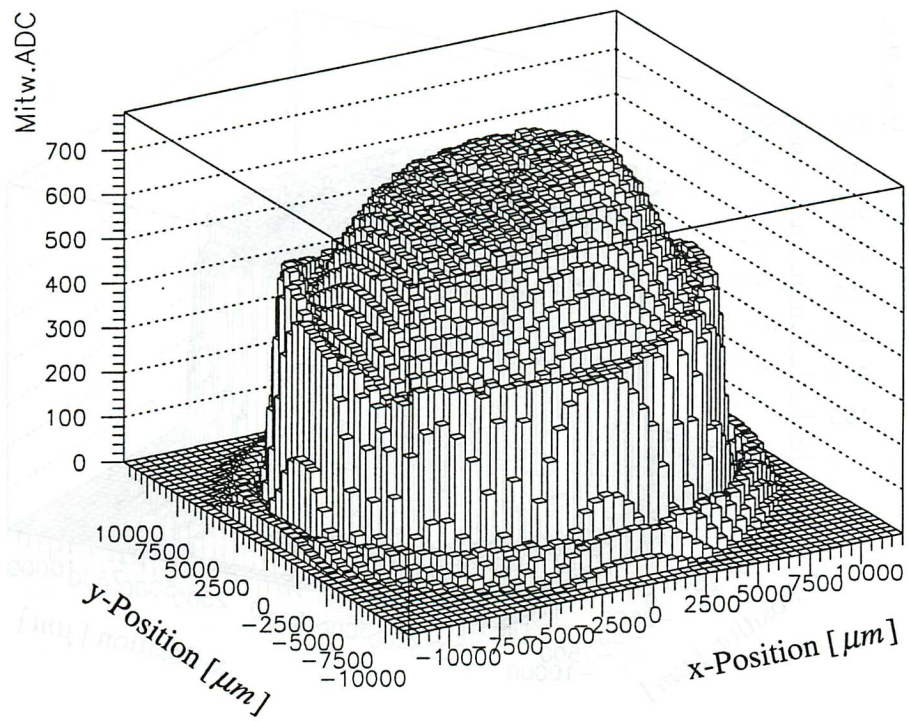
Das Zustandekommen dieser Wälle läßt sich folgendermaßen erklären [Hec 93]:

Von der Photokathode reflektiertes Licht wird von dem metallischen Kontaktierungsring der Photokathode auf diese zurückreflektiert und führt somit zu der Überhöhung am Rand der Photokathode.

Der äußere niedrigere Ringwall erklärt sich ähnlich, nur daß hierbei anstelle des Kontakttrings das Röhrenglas als Reflexionsmedium tritt. Für diese Deutung spricht, daß die Durchmesser der beobachteten Ringwälle eng korreliert sind mit denjenigen von Kontakttring und Röhrenglas (ca.18mm und 21mm).

Beim Einbau der Photomultiplier wurde stets auf die gleiche Orientierung geachtet, sodaß sich x- und y-Position immer wie in Fig.4.5 darstellen.

Fig.4.6 zeigt eine Auswahl weiterer Homogenitätsplots.



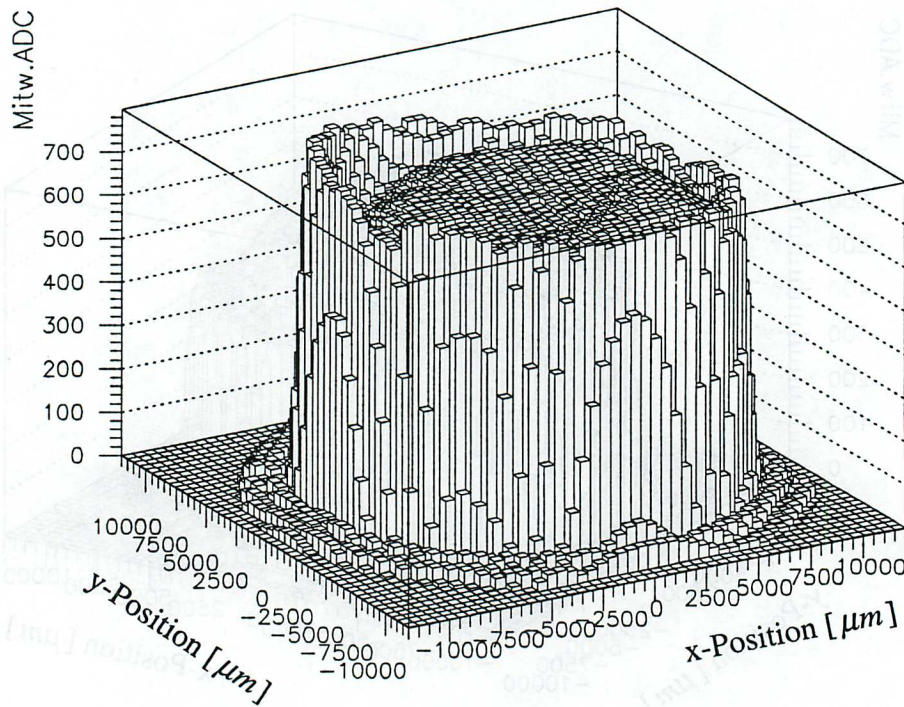
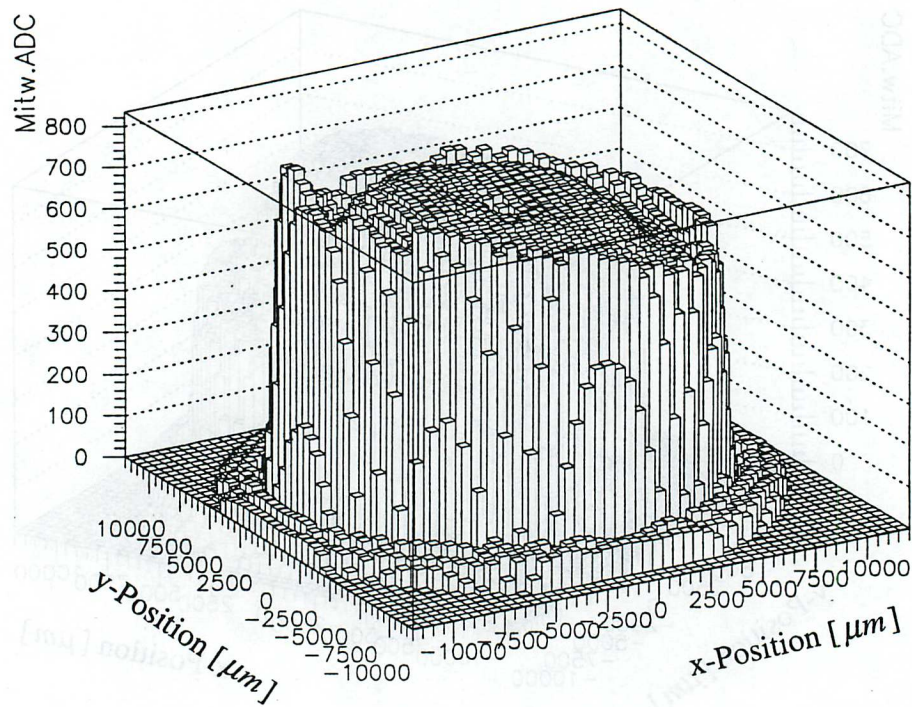


Fig.4.6 Homogenitätsplots

Auf allen sind wiederum die typischen Ringwälle zu erkennen, und darüberhinaus, daß keine einheitliche Kathodenform für alle Photomultiplier festzustellen ist.

Um eine Qualitätskontrolle durchzuführen und damit auch zu entscheiden, welche Photomultiplier für den Detektor geeignet sind, ist es deshalb notwendig die Kathodenform zu parametrisieren.

Der Vertrag mit der Herstellerfirma Hamamatsu setzt, die Homogenität betreffend, die folgenden beiden Bedingungen fest:

1. Die effektive Kathodengröße beträgt mindestens 16 mm.
2. Das Verhältnis des maximalen zu dem minimalen Anodensignal auf der Kathodenfläche darf nicht größer als zwei sein.

Ausgehend von diesen vertraglichen Bedingungen wird nun ein Kreisschnitt von $r \leq 8.2\text{mm}$ um den Kathodenmittelpunkt gemacht, das Verhältnis Maximum zu Minimum darin festgehalten und darüberhinaus die Versätze von Maximum und Minimum zum Mittelpunkt.

In Fig.4.7 sind die Verteilungen dieser Parameter und weiterer Kenngrößen für die vermessenen 50 Photomultiplier zu sehen.

Die Werte der Anoden- und Kathodensensitivität und daraus berechnet die Gainwerte sind den mitgelieferten Datenblättern der Herstellerfirma entnommen [Ham 93a].

Der Dunkelstrom wurde mit einem Multimeter (Philips PM 2525) im unteren Meßbereich für Ströme von 0.1 nA gemessen, indem zuerst jeweils ein Nullabgleich bei unterbrochener Spannungsversorgung zur Kompensation von Kontaktströmen vollzogen und danach eine Minute bis zur Ablesung gewartet wurde.

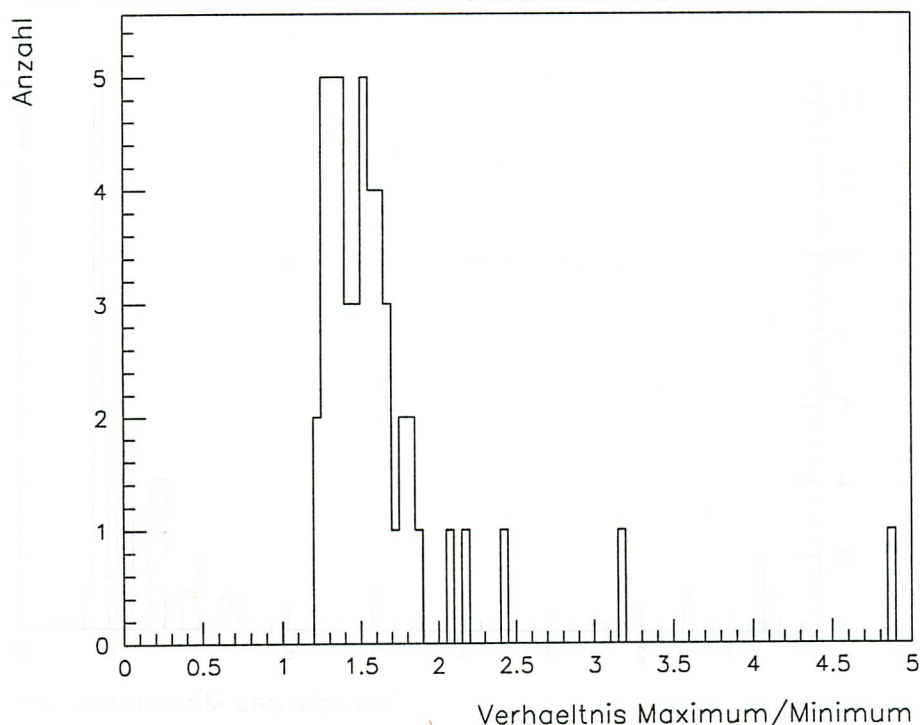


Fig.4.7.a Verteilung des Verhältnisses Maximums / Minimum

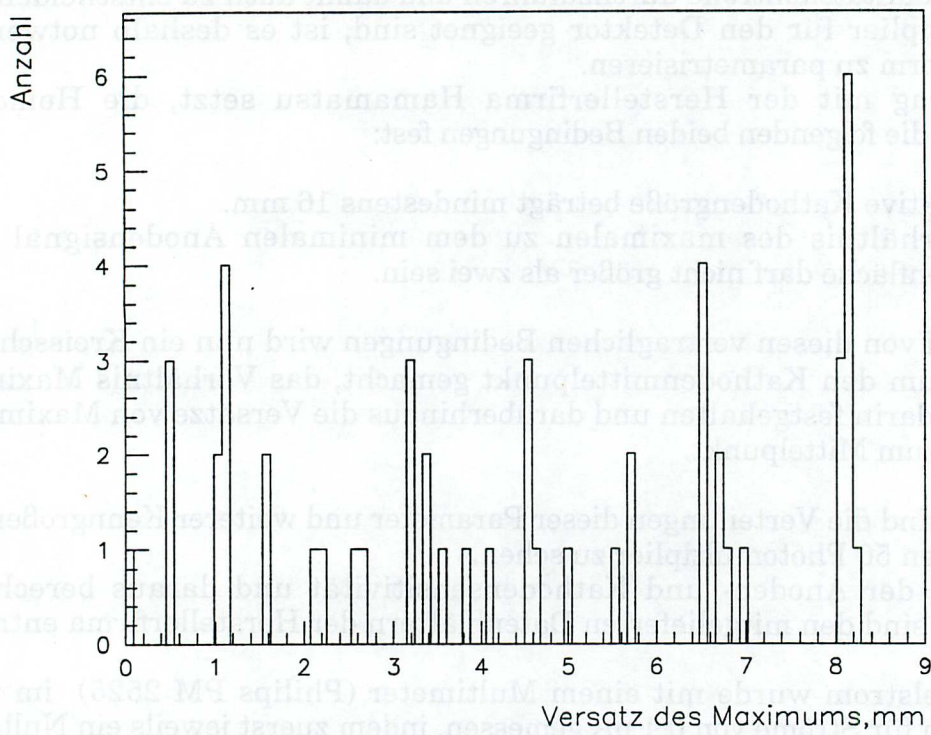


Fig.4.7.b Verteilung vom Versatz des Maximums

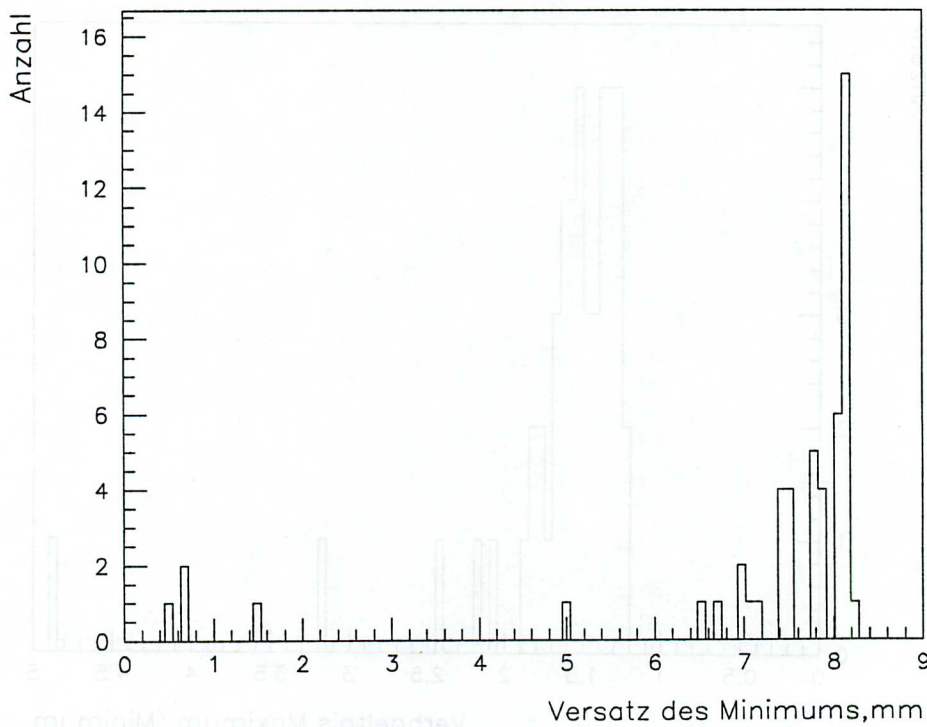


Fig.4.7.c Verteilung vom Versatz des Minimums

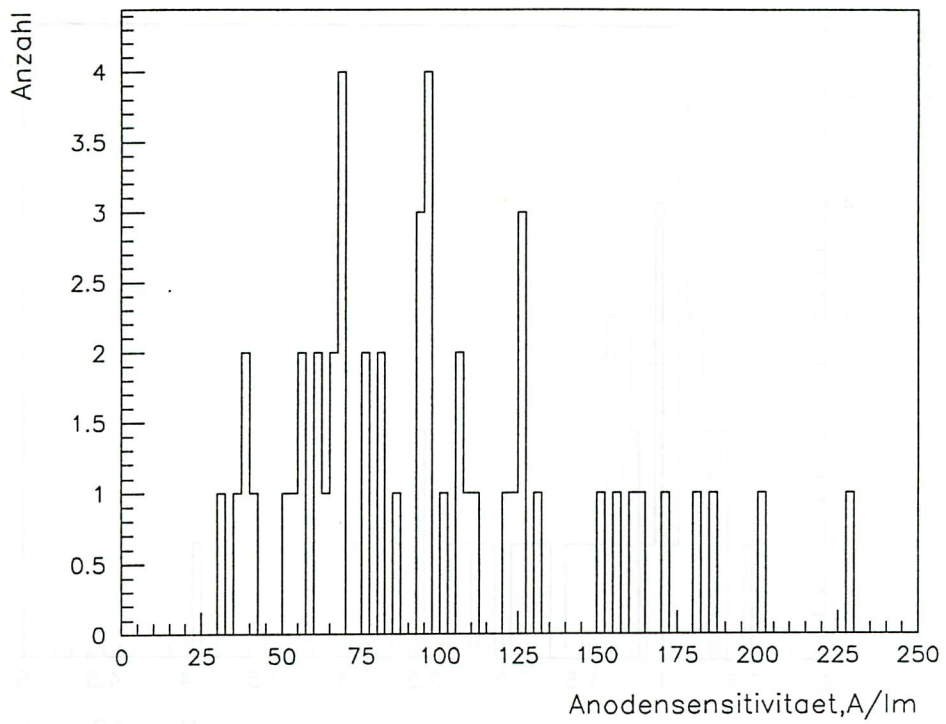


Fig.4.7.d Verteilung der Anodensensitivität

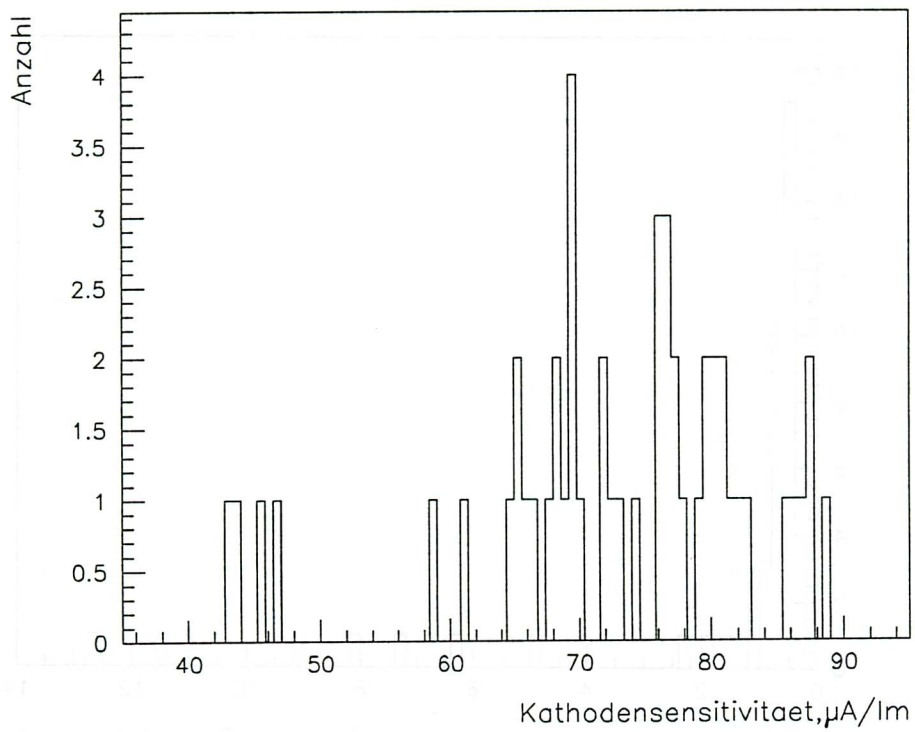


Fig.4.7.e Verteilung der Kathodensensitivität

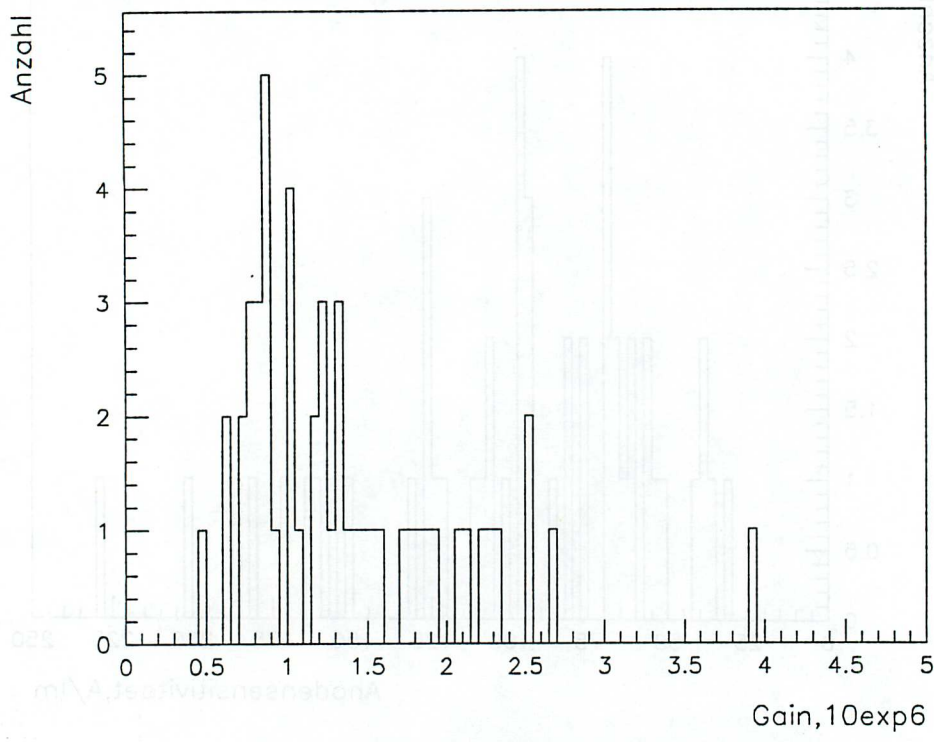


Fig.4.7.f Verteilung des Gains

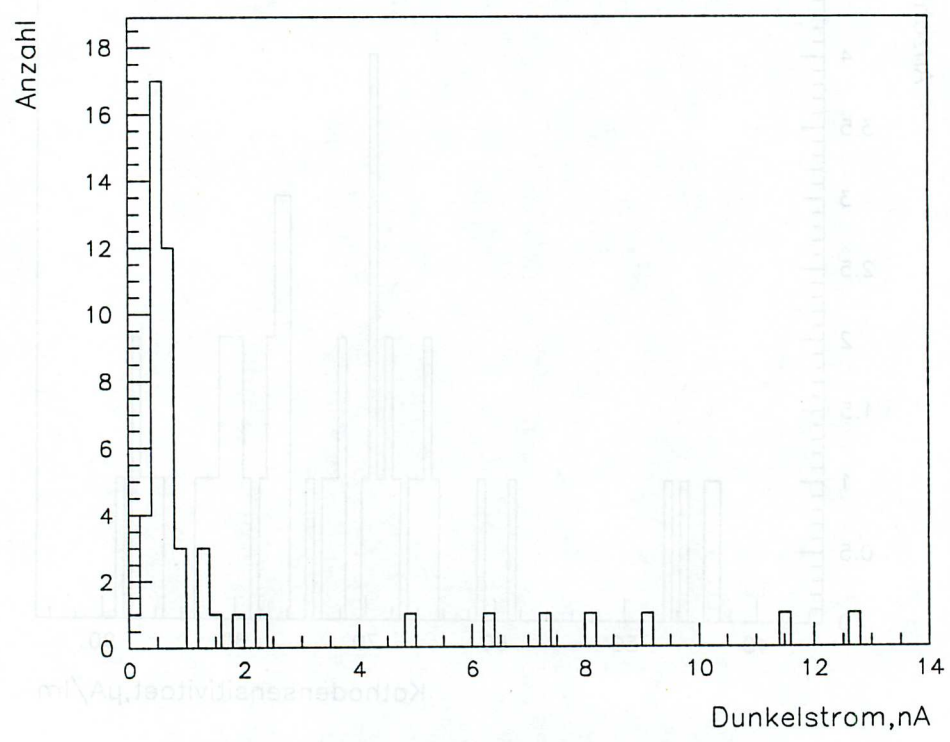


Fig.4.7.g Verteilung des Dunkelstroms

Aus diesen Verteilungen läßt sich folgendes erkennen:

1. Das Verhältnis Maximum zu Minimum beläuft sich typischerweise auf drei zu zwei.
10% (5 Stück) überschreiten das vertraglich zugesicherte Verhältnis von zwei.
2. Eine Häufung der Maxima an einer bestimmten Stelle läßt sich nicht feststellen.
3. Die Minima befinden sich überwiegend am Kathodenrand.
4. Das Gain, den Hamamatsu Datenblättern entnommen, liegt in der Größenordnung von 10^6 .
5. Typische Dunkelströme sind kleiner als 1nA

Zum Abschluß dieses Kapitels bleibt noch zu erwähnen, was die beobachteten Inhomogenitäten verursacht.

Das Kathodenmaterial wird auf die Innenseite des Glaskolbens aufgedampft. Dazu wird das Einlaßfenster von außen stark abgekühlt, sodaß durch den hohen Temperaturgradienten der Materialdampf bevorzugt dort kondensiert. Dieses Herstellungsverfahren [Ham 93b] bedingt die ungleiche Dicke des Kathodenlayers, die als verantwortlich für das Auftreten der Inhomogenitäten angesehen wird (siehe Kapitel 4.2.4).

Weitere Faktoren, wie eine ungleiche Glasstärke des Einlaßfensters, Verunreinigungen und Gitterfehler in Glas und Layer, sind demgegenüber vernachlässigt worden.

4.2 Einzelmessungen

4.2.1 Reproduzierbarkeit der Messungen

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit wurden zwei Photomultiplier (PM 0036 und PM 0090) unter identischen Versuchsbedingungen im Abstand von einem Tag zweimal vermessen.

In Fig. 4.8 ist die graphische Auswertung dieser Messung für PM 0090 dargestellt.

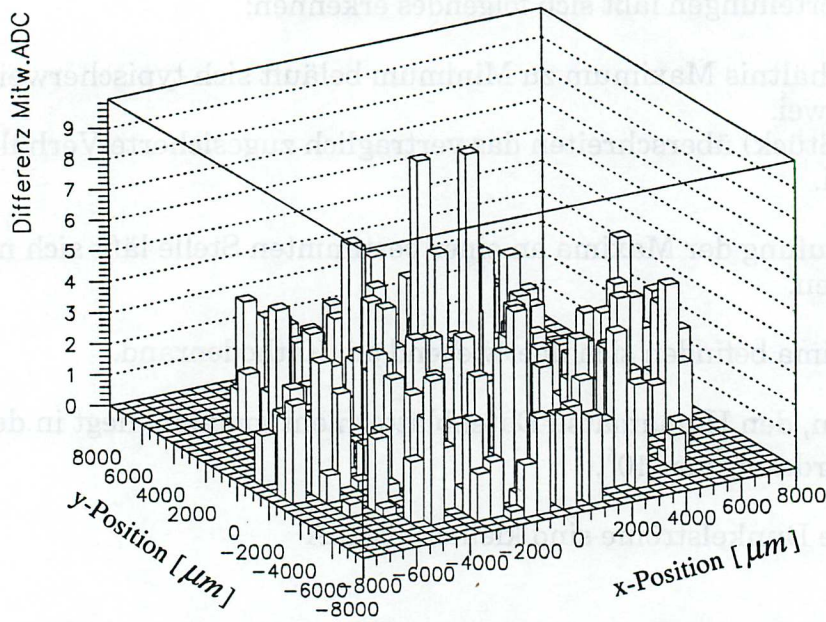


Fig.4.8.a Lego-Plot aus der Differenz (1.Messung-2.Messung)

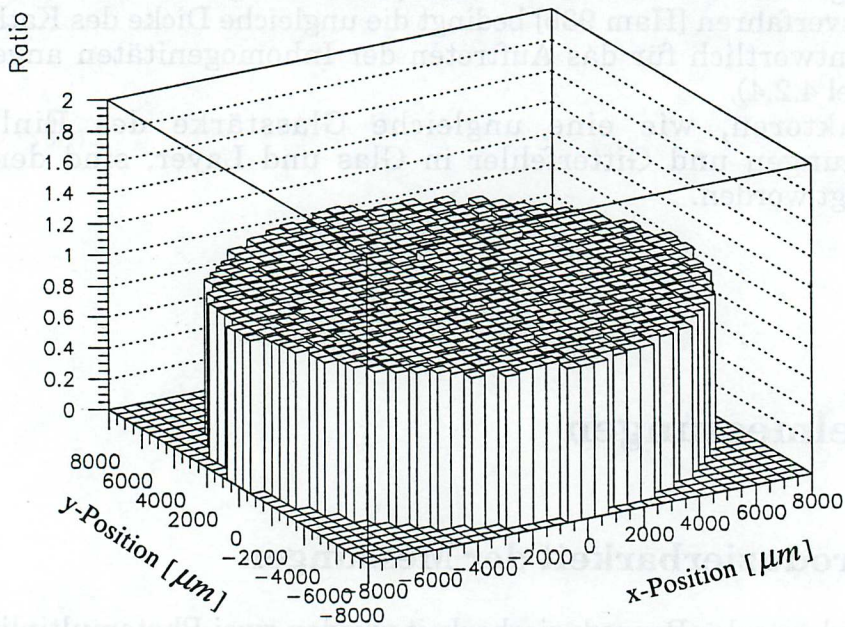


Fig.4.8.b Lego-Plot aus dem Verhältnis (1.Messung/2.Messung)

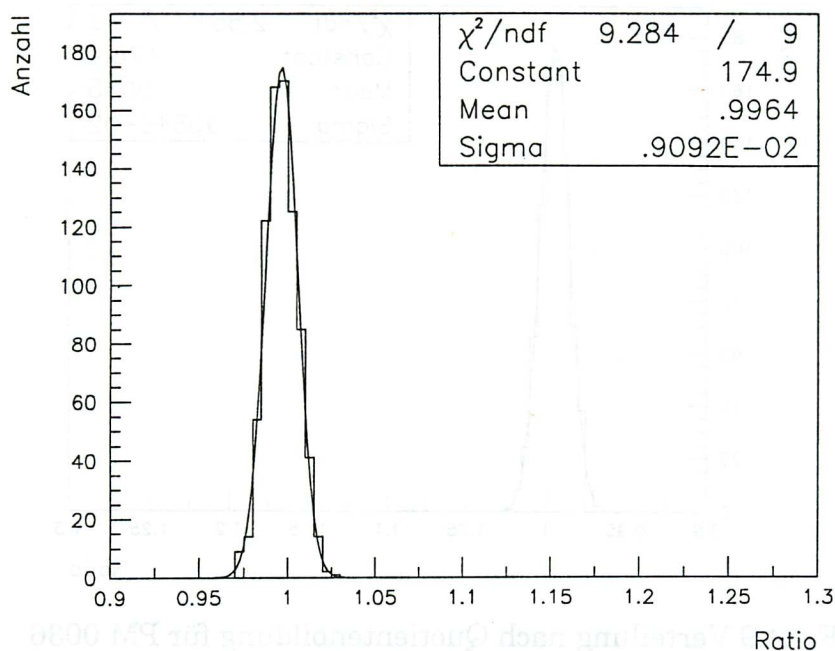


Fig.4.8.c Verteilung nach Quotientenbildung

Aus den Abbildungen, speziell aus der Darstellung der Verteilung unter Quotientenbildung, ergibt sich unter Berücksichtigung des statistischen Fehlers der Verteilung die Übereinstimmung der beiden Messungen. Der Quotient beträgt 0.9964 ± 0.0091 , die Abweichung des gemessenen Quotienten vom Wert Eins beträgt 0.36%.

Der einzige Parameter, der beim Vergleich mehrerer Messungen in diesem Aufbau nicht konstant gehalten werden kann, ist die Temperatur, die zu einer systematischen Abweichung zwischen den einzelnen Scans führen kann.

In Fig. 4.9 ist das Ergebnis für den Photomultiplier PM 0036 dargestellt.

Der Quotient liegt bei 0.9945 ± 0.0091 , die Breite der Verteilung beträgt 0.92%, damit läßt sich auch hier die Übereinstimmung der beiden Messungen folgern.

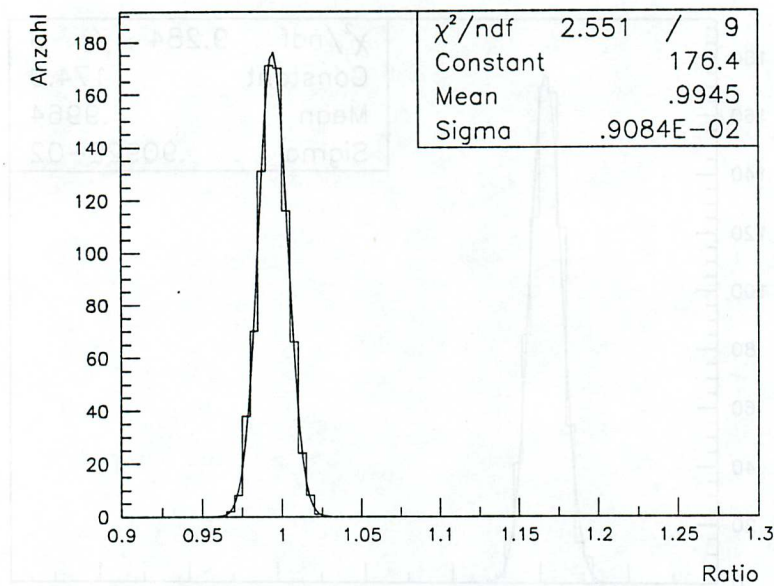


Fig.4.9 Verteilung nach Quotientenbildung für PM 0036

4.2.2 Spannungsabhängigkeit der Inhomogenitäten

Für die Untersuchung der Spannungsabhängigkeit der Inhomogenitäten wurden die beiden Photomultiplier PM 0036 und PM 0090 bei verschiedenen Spannungswerten (1600V, 1800V, 2000 V) vermessen.

Fig. 4.10 zeigt am Beispiel des Photomultipliers PM 0036 das Ergebnis der Analyse der gewonnenen Daten in verschiedenen Darstellungen.

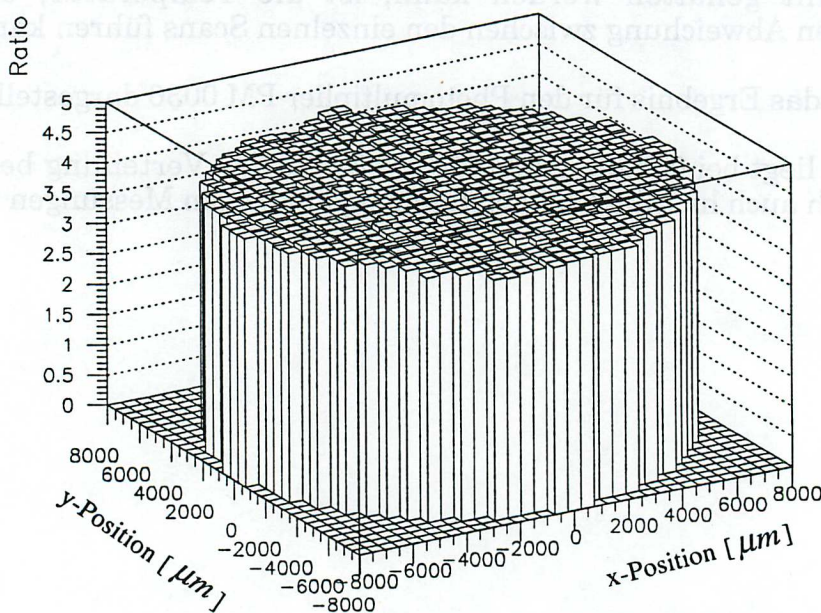


Fig.4.10.a Quotient aus den Messungen bei 1600 V und 2000 V für PM 0036

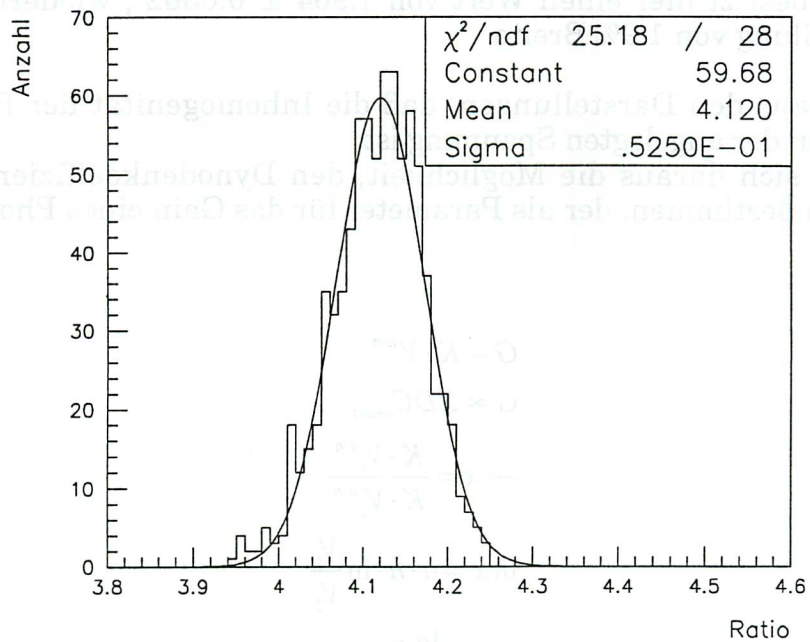


Fig.4.10.b Verteilung des Quotienten aus den Messungen bei 1600V und 2000V für PM 0036

Man entnimmt diesen Darstellungen, daß der Quotient 4.12 ± 0.053 beträgt, die Verteilung somit die schmale Breite von 1.29% besitzt.

In Fig.4.11 ist die Verteilung des Quotienten aus den Messungen bei 1800V und 2000V für PM 0090 dargestellt.

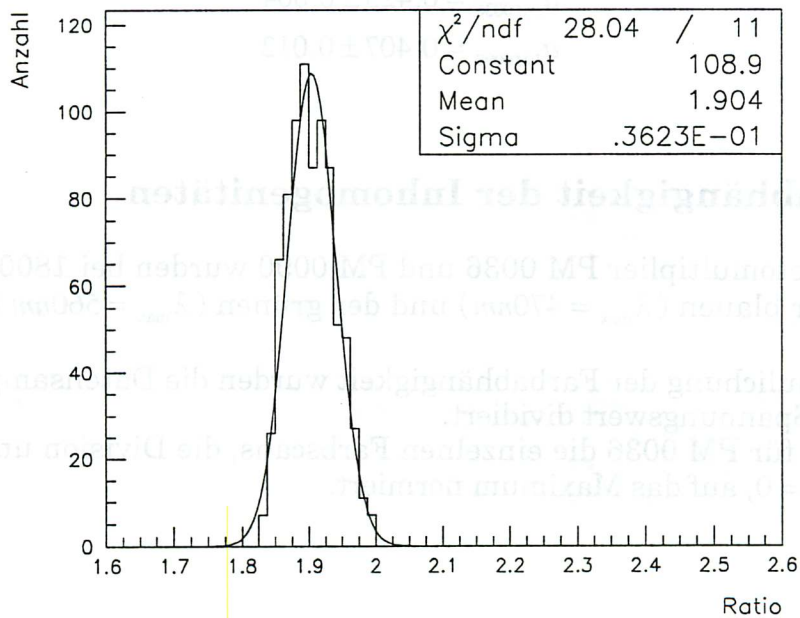


Fig.4.11 Verteilung nach Quotientenbildung aus den Messungen bei 1800V und 2000V für PM 0090

Der Quotient besitzt hier einen Wert von 1.904 ± 0.0362 , wiederum eine sehr schmale Verteilung von 1.9% Breite.

Man erkennt aus den Darstellungen, daß die Inhomogenität der Photokathode unabhängig von der angelegten Spannung ist.

Ferner ergibt sich daraus die Möglichkeit, den Dynodenkoeffizienten a (siehe Kapitel 2.2) zu bestimmen, der als Parameter für das Gain eines Photomultipliers dienen kann.

$$G = K \cdot V^{a \cdot n}$$

$$G \propto ADC_{count}$$

$$\rightarrow x = \frac{K \cdot V_1^{a \cdot n}}{K \cdot V_2^{a \cdot n}}$$

$$\ln x = a \cdot n \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$$

$$a = \frac{\ln x}{n \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}}$$

- x konstanter Faktor aus der Division bei den beiden Spannungswerten
- n Anzahl der Dynoden

Nach Einsetzen der bekannten Größen ergeben sich für die beiden Photomultiplier die Werte der Dynodenkoeffizienten a zu:

$$a_{PM0036} = 0.423 \pm 0.004$$

$$a_{PM0090} = 0.407 \pm 0.012$$

4.2.3 Farbabhängigkeit der Inhomogenitäten

Die beiden Photomultiplier PM 0036 und PM 0090 wurden bei 1800V und 2000V jeweils mit der blauen ($\lambda_{max} = 470nm$) und der grünen ($\lambda_{max} = 560nm$) Leuchtdiode gescannt.

Zur Veranschaulichung der Farbabhängigkeit wurden die Datensamples für einen jeweils festen Spannungswert dividiert.

Fig. 4.11 zeigt für PM 0036 die einzelnen Farbscans, die Division und ein Schnitt bei y -Position = 0, auf das Maximum normiert.

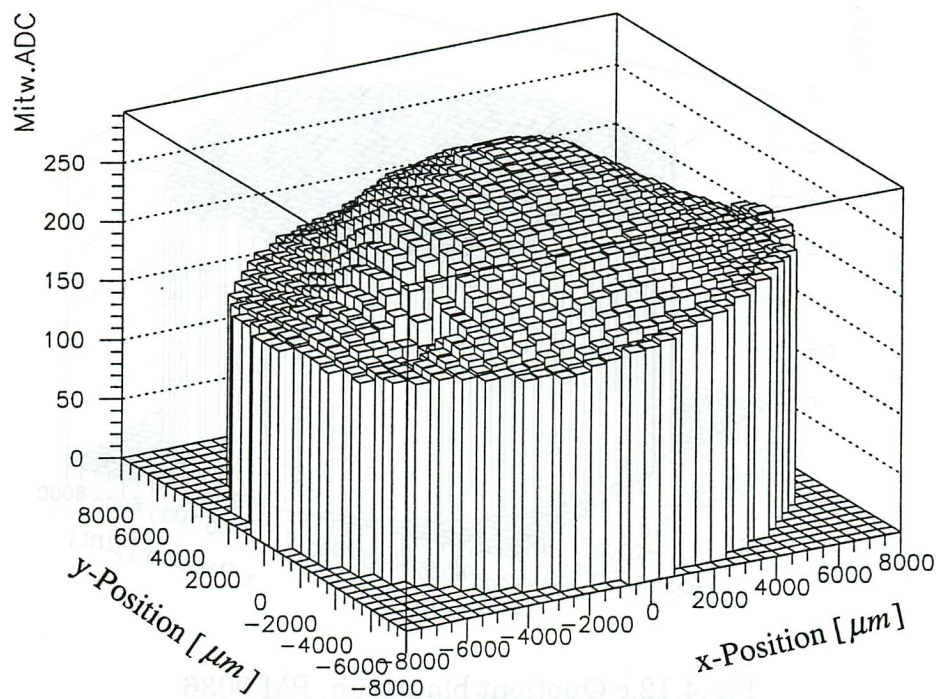


Fig.4.12.a Scan mit blauem Licht, PM 0036

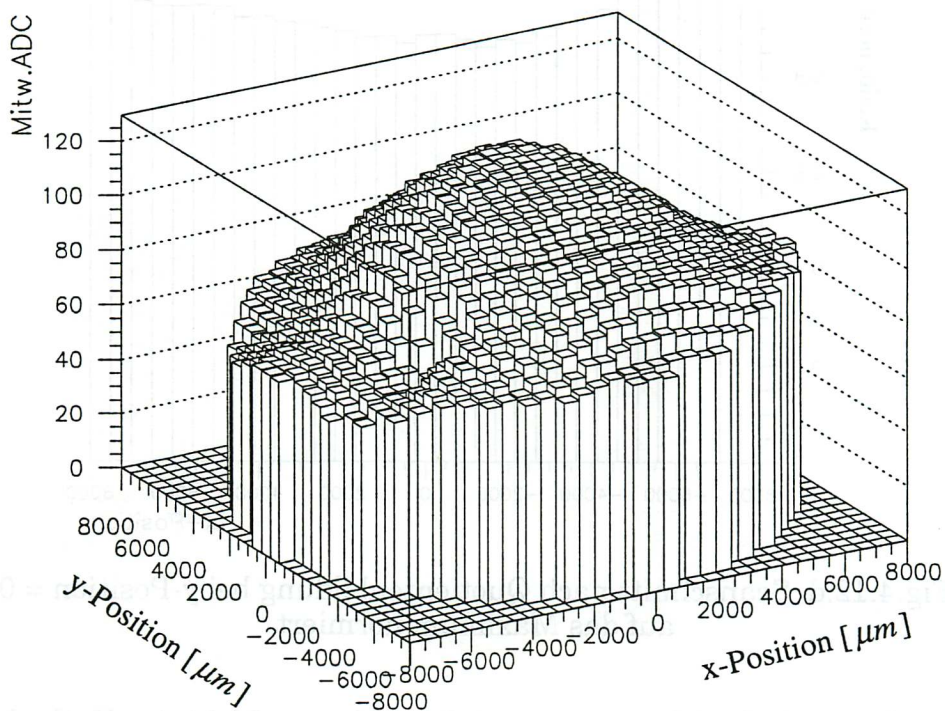


Fig.4.12.b Scan mit grünem Licht, PM 0036

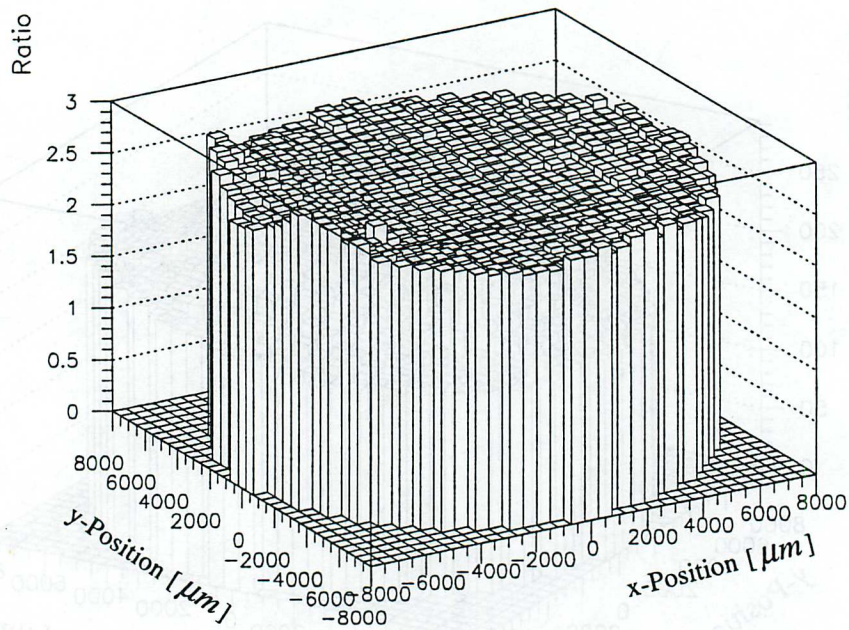


Fig.4.12.c Quotient blau/grün, PM 0036

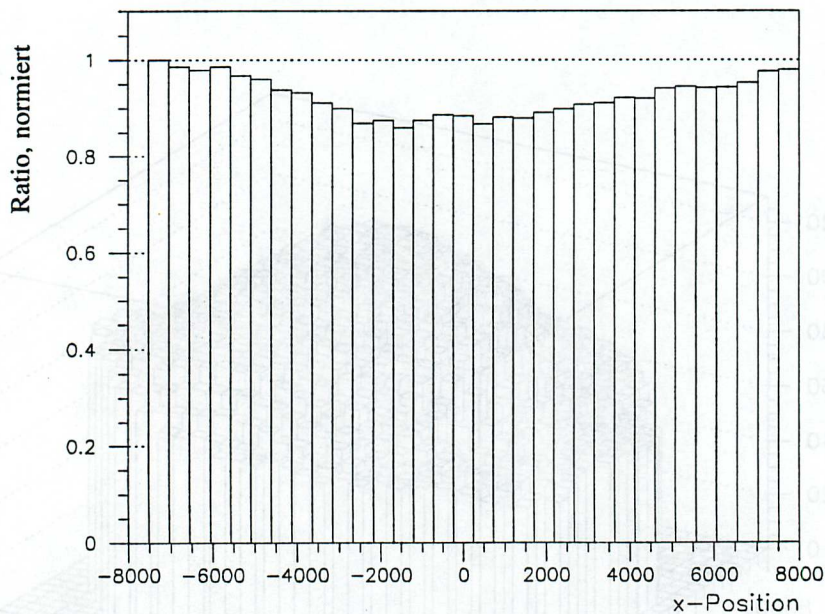


Fig.4.12.d Scanschnitt nach Quotientenbildung bei y-Position = 0 auf das Maximum normiert

Aus den Farbscans läßt sich erkennen, daß bei blauem Licht der Kathodenverlauf flacher (homogener) ist und bei grünem Licht die Inhomogenität, speziell der Hügel in der Mitte, ausgeprägter ist.

Das Verhältnis Maximum zu Minimum, als Parameter der Inhomogenität, quantifiziert diesen beobachteten Effekt, in Tabelle 4.1 dargestellt.

PM 0036	1800 V	blau	Max/Min = 1.86
		grün	Max/Min = 2.33
	2000 V	blau	Max/Min = 1.84
		grün	Max/Min = 2.35
PM 0090	1800 V	blau	Max/Min = 2.18
		grün	Max/Min = 2.52
	2000 V	blau	Max/Min = 2.20
		grün	Max/Min = 2.49

Tab. 4.1 Inhomogenitätsparameter Max/Min

Es ergibt sich daraus, daß die Inhomogenität einer Photokathode abhängig von der eingestrahlten Lichtwellenlänge ist, und zwar in der Weise, daß die Ausprägung der Inhomogenität zu größeren Wellenlängen hin zunimmt.

Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erwähnt, ist die Hauptursache für das Auftreten von Inhomogenitäten die Variation in der Schichtdicke des Kathodenmaterials. Um nun des weiteren die Wellenlängenabhängigkeit zu erklären, ist es notwendig den Verlauf der Quanteneffizienz als Funktion der Wellenlänge zu betrachten, die in Fig. 4.13 nochmals dargestellt ist.

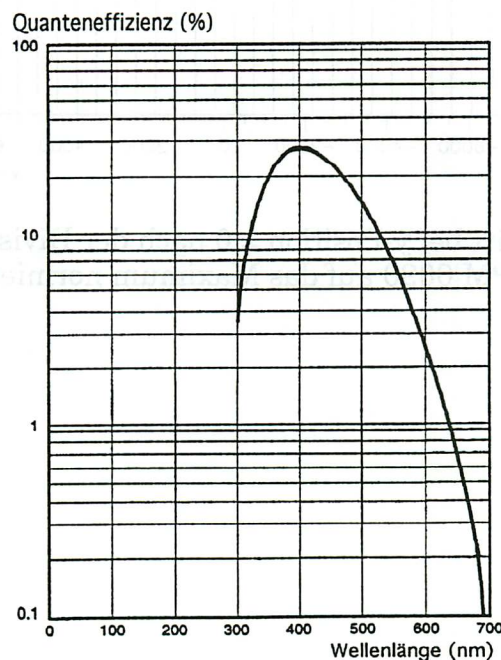


Fig.4.13 Quanteneffizienz als Funktion der Wellenlänge

Man entnimmt dieser Abbildung, daß die Quanteneffizienz für das verwendete blaue Licht bei ca. 15% im Gegensatz zu ca. 5% bei grünem Licht liegt.

Wegen der geringeren Auslösewahrscheinlichkeit muß ein Photon größerer Wellenlänge eine höhere Anzahl von Atomschichten passieren, um über den

Photoeffekt ein Elektron auszulösen. Blaues Licht mit seiner höheren Quanteneffizienz ist somit weniger stark abhängig von der Schichtdicke, langwelligeres Licht dagegen sensitiver auf die Schichtdicke.

Diese qualitative Erklärung ist dadurch gerechtfertigt, daß der Prozeß der Photoemission, über den Energietransfer durch Gitterstreuung, sich in Tiefen bis 300 Å abspielt [Spi 63]. Die Herstellerfirma Hamamatsu gibt für die Dicke der Photokathode einen Bereich von 100 Å - 1000 Å an [Ham 93 b].

In Fig. 4.14 sind ein Schnittbild für PM 0090 nach der Division blau/grün und zusätzlich ein Scanschnitt unter Verwendung verschiedener Lichtwellenlängen der Firma Hamamatsu für einen weiteren Photomultiplier aufgeführt.

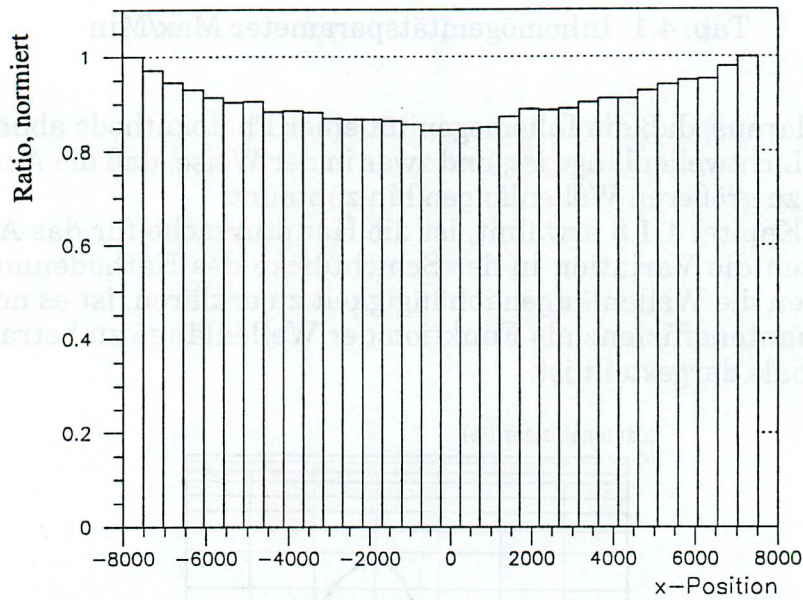


Fig.4.14.a Schnitt bei y-Position = 0 nach der Division blau/grün für PM 0090 auf das Maximum normiert

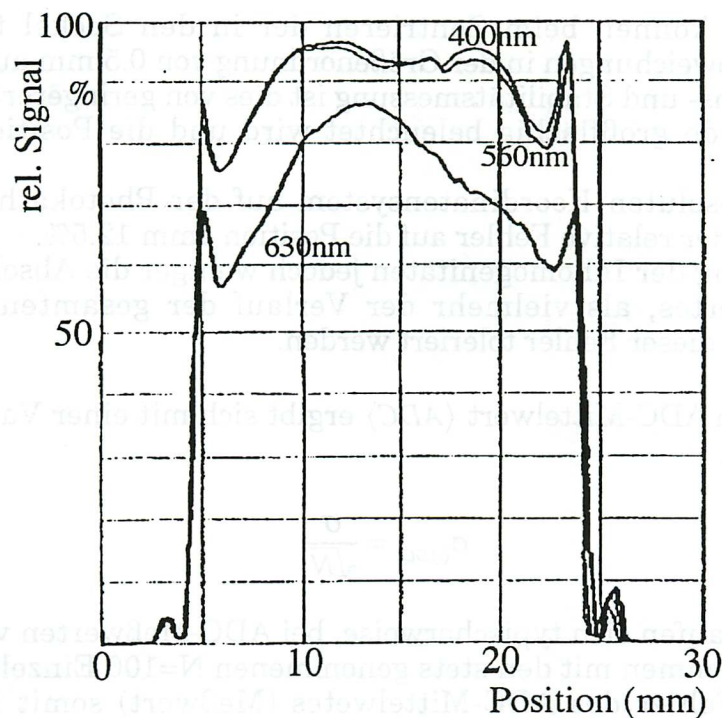


Fig.4.14.b Scanschnitt eines Photomultipliers für verschiedene Wellenlängen [Ham 93c]

Man kann hieraus, zusammen mit Fig. 4.12, ablesen, daß für die drei Photomultiplier bei Verwendung von langwelligerem Licht eine Überhöhung zur Mitte der Photokathode hin stattfindet. Nach oben angeführter Erklärung würde dies bedeuten, daß die Dicke der Photokathode zur Mitte hin zunimmt.

Für die Belegung dieser These wäre die Untersuchung vieler Photomultiplier, vor allem auch die Beleuchtung mit längerwelligem Licht (rote Leuchtdiode), notwendig.

4.3 Fehlerbetrachtung

Zum Abschluß dieses Kapitels, eine kurze Betrachtung der Fehler, die bei der Messung auftreten.

Zwei Fehlerquellen dominieren die Meßungenauigkeit, das ist zum einen der Fehler in der Positionierung und zum zweiten der statistische Fehler auf die Mittelwertbildung des ADC-Meßwertes.

Der Positionsfehler der Linearverstärker ist vernachlässigbar, da die Scaneinheit einen definierten Punkt mit einer Toleranz von kleiner $5\mu m$, von der Software überprüft, anzusteuern vermag.

Der Fehler auf die Position ergibt sich damit durch die Einbauungenauigkeit. Die mechanische Führung der Photomultiplierhülsen besitzt zwar sehr geringe

Toleranzen, doch können beim Zentrieren der in den Sockel freihängenden Photomultiplier Abweichungen in der Größenordnung von 0.5 mm auftreten.

Für die Kalibrations- und Stabilitätsmessung ist dies von geringerer Bedeutung, da hierbei die Kathode großflächig beleuchtet wird und die Position damit eher nebensächlich ist.

Der Fehler im absoluten Koordinatensystem auf der Photokathode ist jedoch enorm, so beträgt der relative Fehler auf die Position 4mm 12.5%.

Da bei der Messung der Inhomogenitäten jedoch weniger die Absolutposition des einzelnen Meßwertes, als vielmehr der Verlauf der gesamten Kathode von Interesse ist, kann dieser Fehler toleriert werden.

Der Fehler auf den ADC-Mittelwert $\langle ADC \rangle$ ergibt sich mit einer Varianz σ und N Einzeleinträgen zu

$$\sigma_{\langle ADC \rangle} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Die Varianzen belaufen sich typischerweise, bei ADC-Meßwerten von 500, auf 30 ADC-Kanäle. Zusammen mit den stets genommenen $N=100$ Einzelschüssen, liegt der statistische Fehler des ADC-Mittelwertes (Meßwert) somit bei drei ADC-Kanälen.

In Fig. 4.15 ist dieser Fehler bei einem Schnitt durch die Kathode eines Photomultipliers angefügt.

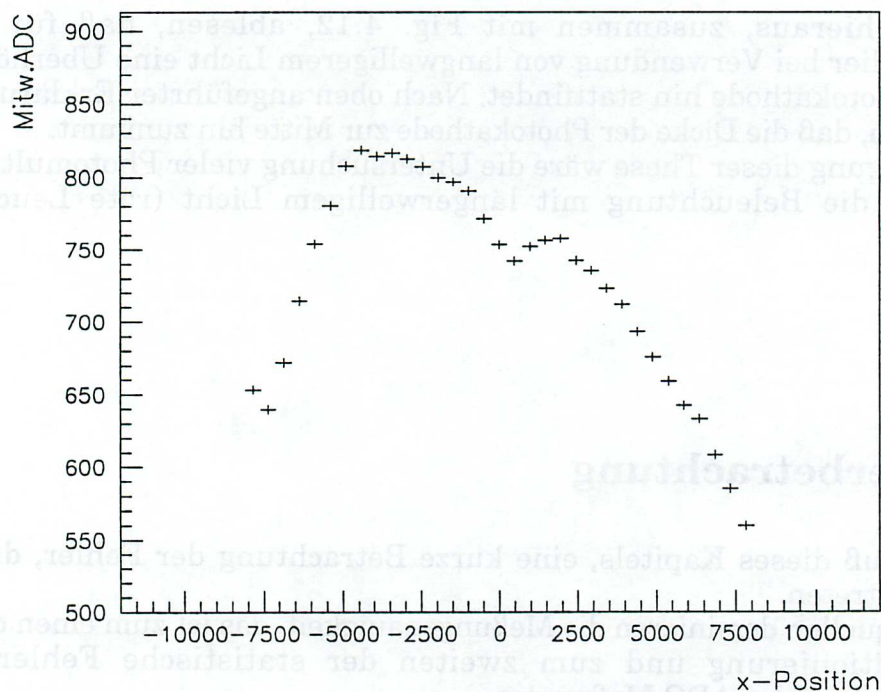


Fig.4.15 Statistischer Fehler bei einem Kathodenschnitt

Man entnimmt dieser Darstellung, daß der gemessene charakteristische Verlauf der Kathode, verursacht durch die Inhomogenitäten der Photokathode, signifikant ist und nicht durch den statistischen Fehler auf die Mittelwertbildung geprägt ist. Dies war ausschlaggebend dafür, nur 100 Einzelschüsse pro Meßpunkt zu nehmen. Eine höhere Anzahl hätte natürlich die Verkleinerung des statistischen Fehlers zur Folge, würde aber andererseits die Meßzeit verlängern.

Zusammenfassung

Im Rahmen des H1-Projektes für den Bau des neuen rückwärtigen elektromagnetischen Kalorimeters BEMC beschäftigt sich diese Arbeit mit der Untersuchung der fine-mesh-Photomultiplier, speziell der Inhomogenitäten der Photokathode.

Dazu wurde ein Meßstand aufgebaut und die dazugehörige Software entwickelt, damit die drei charakteristischen Kenngrößen eines Photomultipliers, das Gain, die Inhomogenität der Photokathode und die zeitliche Stabilität in einem automatisierten Prozeß vermessen werden können.

Es steht damit ein effektives und benutzerfreundliches Instrument zur Vermessung der rund 1200 im Experiment einzusetzenden Photomultiplier zur Verfügung.

Bei der Messung der ersten 50 Photomultiplier wurde vor allem die breite Streuung der Referenzspannungswerte, der Parameter des Gains, festgestellt. Dies bedeutet für den Abgleich aller Photomultiplier auf die gleiche Verstärkung, die Kalibration des Kalorimeters, daß die Spannungsversorgung über einen weiten Bereich (400V) variabel gestaltet werden muß.

Die Dunkelströme liegen typischerweise in einer Größenordnung von kleiner als 1 nA.

Ferner zeigte sich, daß die Photomultiplier keinen einheitlichen Verlauf der Inhomogenitäten der Photokathode aufweisen.

Die Verwendung von kurzwelligem Licht (blau) verringert die Ausprägung der Inhomogenitäten, was auf die unterschiedliche Schichtdicke des Kathodenlayers zurückgeführt wird.

Eine Variation der Versorgungsspannung hat keinen Einfluß auf die Ausprägung der Inhomogenitäten, im Rahmen der Meßgenauigkeit zeigt sich die Unabhängigkeit.

Beim Vergleich zweier Messungen unter identischen Bedingungen folgte deren hohe Reproduzierbarkeit.

Abbildungsverzeichnis

- Fig.1.1. Speicherringanlage HERA
Fig.1.2. H1-Detektor
- Fig.2.1. Photomultiplier, schematisch
Tab.2.1. Austrittsarbeiten ausgewählter Elemente und Verbindungen
Fig.2.2. Bänderschema
Fig.2.3. Fokussierungssystem
Fig.2.4. Verschiedene Dynodenkonfigurationen
Fig.2.5. Abhängigkeit des Gains von der Hochspannung
Fig.2.6. Temperaturverhalten des Dunkelstroms
Fig.2.7. Modellzeichnung einer fine mesh Dynode
Fig.2.8. Abhängigkeit des Gains vom Magnetfeld
Fig.2.9. Fotografie des Photomultipliers R 3432-01
Fig.2.10. Maße des Photomultipliers R 3432-01
Fig.2.11. Kathodensensitivität und Quanteneffizienz als Funktion der Wellenlänge
- Fig.3.1. Meßaufbau, schematisch
Fig.3.2. Skizze der Pulsformen
Fig.3.3. Schaltplan der Base
Fig.3.4. Einzelleitungen eines Datenbusses
Fig.3.5. Ausleseelektronik
- Fig.4.1. Gainverlauf als Funktion der Hochspannung
Fig.4.2. Verteilung der gemessenen Referenzspannungen
Fig.4.3. Stabilität auf Referenz normiert
Fig.4.4. Stabilität der Referenz
Fig.4.5. Inhomogenität einer Photokathode
Fig.4.6. Homogenitätsplots
Fig.4.7.a. Verteilung des Verhältnisses Maximum/Minimum
Fig.4.7.b. Verteilung vom Versatz des Maximums

- Fig.4.7.c Verteilung vom Versatz des Minimums
- Fig.4.7.d Verteilung der Anodensensitivität
- Fig.4.7.e Verteilung der Kathodensensitivität
- Fig.4.7.f Verteilung des Gains
- Fig.4.7.g Verteilung des Dunkelstroms
- Fig.4.8.a Lego-Plot aus der Differenz (1.Messung-2.Messung)
- Fig.4.8.b Lego-Plot aus dem Verhältnis (1.Messung/2.Messung)
- Fig.4.8.c Verteilung nach Quotientenbildung
- Fig.4.9. Verteilung nach Quotientenbildung für PM 0036
- Fig.4.10.a Quotient aus den Messungen bei 1600V und 2000V für PM 0036
- Fig.4.10.b Verteilung des Quotienten aus den Messungen bei 1600V und 2000V für PM 0036
- Fig.4.11. Verteilung nach Quotientenbildung aus den Messungen bei 1800V und 2000V für PM 0090
- Fig.4.12.a Scan mit blauem Licht, PM 0036
- Fig.4.12.b Scan mit grünem Licht, PM 0036
- Fig.4.12.c Quotient blau/grün, PM 0036
- Fig.4.12.d Scanschnitt nach Quotientenbildung bei y-Position = 0 auf das Maximum normiert
- Tab.4.1 Inhomogenitätsparameter Max/Min
- Fig.4.13 Quanteneffizienz als Funktion der Wellenlänge
- Fig.4.14.a Schnitt bei y-Position = 0 nach der Division blau/grün für PM 0090; auf das Maximum normiert
- Fig.4.14.b Scanschnitt eines Photomultipliers für verschiedene Wellenlängen
- Fig.4.15 Statistischer Fehler bei einem Kathodenschnitt

Literaturverzeichnis

- [Ard 62] Ardenne, Manfred von
Tabellen zur angewandten Physik
VEB, Deutscher Verlag der Wissenschaften
Berlin 1962
- [Ein 05] Einstein, Albert
Über einen die Erzeugung und Vernichtung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt
Annalen der Physik 17 (1905) 132
1905
- [Hei 27] Heisenberg, Werner
Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen
Kinematik und Mechanik
Zeitschrift für Physik 43 (1927) 172
1927
- [Ham 90] Hamamatsu
Photomultiplier Tubes Catalog
Japan 1990
- [Ham 92a] Hamamatsu
Modellzeichnung einer fine-mesh-Dynode
1992
- [Ham 92b] Hamamatsu
Technisches Datenblatt zum Photomultiplier R3432-01
1992
- [Ham 93a] Hamamatsu
Datenblätter zur 1.Liefercharge (50Stück)
1993
- [Ham 93b] Hamamatsu
Private Mitteilung
1993
- [Ham 93c] Hamamatsu
Datenblatt
1993
- [Hec 93a] Heck, Andreas
Private Mitteilung

- 1993
- [Hec 93 b] Heck, Andreas und Scmitt, Klaus
Meß- und Ausleseprogramm pmkleinex.c
1993
- [Hat 94] Hatzenbühler, Andreas
Private Mitteilung
1994
- [Jan 93] Janoth, Joachim
Untersuchungen zum Verhalten von Photomultipliern
in Magnetfeldern bei Feldstärken bis zu 2 Tesla
Diplomarbeit
1993
- [Kno 94] Knoblich, Holger
Untersuchungen zur Stabilität von fine mesh
Photomultipliern
Diplomarbeit
1994
- [Mor 89] Mordhorst, Silke
Untersuchungen von Photomultipliern im Magnetfeld
Diplomarbeit
1989
- [PAW 92] Physics Analysis Workstation
The complete Reference
CERN Program Library Office, Geneva
1992
- [Rut 11] Rutherford, Ernest
The scattering of α and β particles by matter and structure
of the atom
Phil. Mag. 21 (1911) 669
1911
- [Sch 70] Schonkeren, J. M.
Photomultipliers, Philips Application Book
N. V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven
1970
- [Spi 63] Spicer, W. E. and Wooten, F.
Photoemission and Photomultipliers
Proc. I. E. E. E.
Aug. 1963 1119-1126
1963

[Zub 93] Zuber, Kai
Analyseprogramme scakon.f und scan.kumac
1993

Danksagung

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Karlheinz Meier für die Aufgabenstellung und die Betreuung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Klaus Tittel danke ich für seine Bereitschaft zum Korreferenten.

Bei Herrn Dr. Jürgen Stiewe bedanke ich mich für die Durchsicht und die kritische Diskussion der Inhalte dieser Arbeit.

Den Mitarbeitern der Elektronischen Werkstatt, besonders Herrn Klaus Schmitt und Herrn Dipl.Ing. Michael Keller, danke ich für ihre Kooperation und stete Hilfsbereitschaft.

Herrn Andreas Heck und Herrn Dr. Kai Zuber danke ich für ihre Unterstützung in allen technischen Belangen dieses Projektes.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Dipl. Phys. Christoph Brune für seine Beratung in Fragen der Analyse und tatkräftige Unterstützung beim formalen Erstellen dieser Arbeit.

Gedankt sei allen Mitarbeitern der H1-Gruppe und sonstigen Institutsangehörigen für geleistete Hilfe und die harmonische Zusammenarbeit.

Ein ganz persönliches Dankeschön möchte ich meiner Freundin Kathrin widmen, deren Liebe und Unterstützung in allen Lebensbereichen, den Alltag immer wieder zu etwas Besonderem werden läßt.

Zuletzt danke ich ganz herzlich meiner Mutter und meinem bereits verstorbenen Vater für den Rückhalt und die finanzielle Unterstützung, die mir ermöglichten mein Studium zu beenden.

Erklärung:

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den ...02.05.54

.....
(Unterschrift)