

Riese

**Serienmessungen an  
Fine-Mesh-Photomultipliern  
in Magnetfeldern bis zu 1.2 T**

Die Diplomarbeit wurde von Andreas Heck ausgeführt am  
Institut für Hochenergiephysik Heidelberg  
unter der Betreuung von  
Herrn Prof. Dr. Karlheinz Meier



**Fakultät für Physik und Astronomie**  
**Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg**

Diplomarbeit  
im Studiengang Physik  
vorgelegt von  
Kandidat Andreas Heck  
aus Sinsheim  
1994



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Sekundärelektronenvervielfacher . . . . .	1
1.2	Die Geschichte der Photomultiplier . . . . .	2
1.3	Anwendung der Multiplier in der Physik . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Die Photomultiplier für H1</b>	<b>6</b>
2.1	H1 und der Kalorimeterraustausch . . . . .	6
2.2	Auswahlkriterien für Photomultiplier . . . . .	10
2.3	Die Photomultiplier für das SPACAL . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Aufbau der Serientestapparaturen</b>	<b>19</b>
3.1	Die Grundlagen der Testaufbauten . . . . .	19
3.2	Die Apparatur für Tests ohne Magnetfeld . . . . .	22
3.3	Die Apparatur für Tests mit Magnetfeld . . . . .	33
3.4	Die Apparatur für Dunkelstrommessungen . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Serientests</b>	<b>49</b>
4.1	Probleme mit den R 5505 . . . . .	49
4.2	Die Ergebnisse der Kalibrationsmessungen . . . . .	59
4.3	Die Ergebnisse der Homogenitätsmessungen . . . . .	79
4.4	Die Ergebnisse der Stabilitätsmessungen . . . . .	89
4.5	Die Ergebnisse der Dunkelstrommessungen . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>99</b>



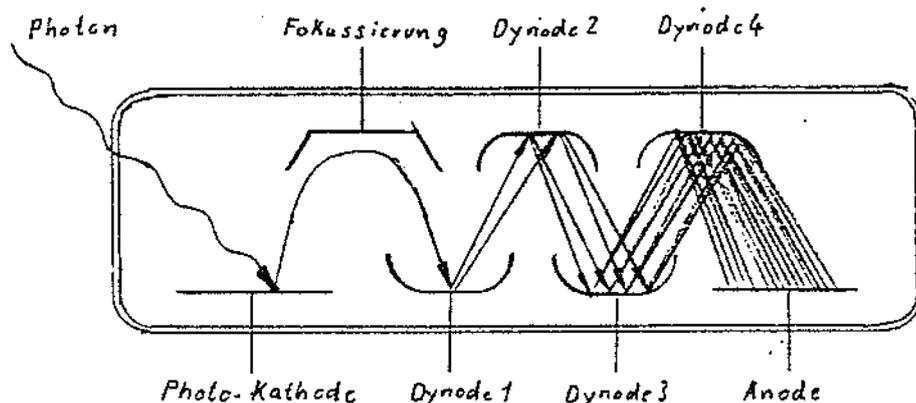
# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Sekundärelektronenvervielfacher

Instrumente, die Licht in ein elektrisches Signal umsetzen, sind aus der heutigen Technik und Forschung nicht mehr wegzudenken. Gerade in der Forschung ist oftmals der Nachweis kleinster Lichtmengen wichtig.

Dazu gibt es zwei unterschiedliche Arten von Geräten. Die eine wird von Elementen auf der Basis zweier zusammengesetzter, p- und n-leitender Halbleiter gebildet, den Photodioden. Bei Lichteinfall entstehen in ihnen Elektron-Loch-Paare, die einen meßbaren Signalstrom liefern. Die andere Richtung bilden die sogenannten Sekundärelektronenvervielfacher. Es handelt sich dabei evakuierte um Glasröhren mit Kathode, Fokussierung, einem Verstärkungssystem und einer Anode.



(Fig.1) Prinzipskizze eines Sekundärelektronenvervielfachers

Werden in einer speziellen Schicht auf der Kathode Elektronen durch Licht freigesetzt, so werden sie gebündelt und auf mehrere aufeinanderfolgende, geladene Bleche, die Dynoden, gelenkt, wo ihr Aufprall neue Elektronen erzeugt. Die lawinenartig vermehrten Elektronen werden anschließend als Signalstrom von der

Anode aufgefangen und als Signal abgeleitet.

Als selbstverstärkende Elemente benötigen Sekundärelektronenvervielfacher oder kürzer Photomultiplier hohe Spannungen zum Vervielfachen der Elektronen. Spannungsteiler oder Basen halten die Elektroden auf dem nötigen Potential. Im Gegensatz zu den Photodioden kommen die Multiplier allerdings auch beim Nachweis kleinerer Lichtmengen ohne zusätzlichen Signalverstärker aus, dessen Störpulse so vermieden werden können. Außerdem benötigt die Signalentstehung weniger Zeit als bei der Dioden-Verstärker-Kombination. Daher werden die Röhren in der Forschung meist den Photodioden vorgezogen.

## 1.2 Die Geschichte der Photomultiplier

Die Entwicklung der Röhren begann mit der Entdeckung des lichtelektrischen Effekts.

1887 beschrieb H.Hertz ([Her1]) diesen Effekt zum ersten Mal.

1888 stellte W.Hallwachs ([Hall]) fest, daß UV-Strahlung zur Entladung einer Elektrode führt.

1889 wiederholten J.Elster und H.Geitel ([Els1]) dieses Experiment mit einer Alkali-Metall-Elektrode und sichtbarem Licht. In weiteren Untersuchungen wurde die Emission von Elektronen durch hohe Temperaturen oder Felder einer Elektrode beobachtet.

1902 wurde die Sekundärelektronenemission entdeckt: schnelle Elektronen lösen beim Aufprall auf ein Metall neue aus, vervielfachen sich also.

1905 erklärte A.Einstein ([Ein1]) den Photoeffekt mit Hilfe von Lichtquanten theoretisch und legte damit zugleich einen Grundstein der Quantenmechanik:

$$W = \hbar\omega - \phi \quad (1.1)$$

$W$  : Kinetische Energie des emittierten Elektrons

$\hbar$  : Plancksches Wirkungsquantum

$\omega$  : Kreisfrequenz der Strahlung

$\phi$  : Elektronenaustrittsarbeit des Metalls

Auch die anderen gefundenen Elektronenemissionseffekte wurden mit der Quantenmechanik nach und nach erfaßbar. Ein Elektron wird emittiert, wenn seine kinetische Energie größer als die Austrittsarbeit aus seinem Metall ist. Eine nötige Energiesteigerung können diese Elektronen durch thermische Stöße (Thermoionische Emission), äußere elektrische Felder (Elektrische Emission), Photonen (Photoelektrische Emission) und Energieübertragung von schnellen Elektronen (Sekundäremission) erfahren. Man erhält folgende Stromdichten ([Gre1]) für die ersten drei Emissionsprozesse:

$$J_{th} = J_0 \exp \frac{-\phi}{kT} \quad (1.2)$$

$$J_{el} = J_0 \exp \frac{\sqrt{e} \sqrt{\frac{E}{\epsilon}} - \phi}{kT} \quad (1.3)$$

$$J_{ph} = J_0 \exp \frac{\hbar\omega - \phi}{kT} \quad (1.4)$$

$e$  : Elementarladung eines Elektrons

$m$  : Ruhemasse eines Elektrons

$kT$  : Wärmeenergie

$E$  : Elektrische Feldstärke

$\epsilon$  : Dielektrizitätskonstante

$J$  : Stromdichten für Thermo-, Elektro- oder Photoeffekt

$J_0$  :  $\frac{4\pi m}{3^2} (kT)^2$ , der Anfangsstrom

Für die Sekundäremission wird im Allgemeinen nur der Vervielfachungsfaktor für einfallende Elektronen von einer bestimmten Energie angegeben. Die beiden letztgenannten Effekte sind für Lichtnachweis- und anschließende Verstärkung erwünscht, die anderen nicht. Gerade die Thermoemission erzeugt einen störenden Untergrund- oder Dunkelstrom.

1935 bauten H.E.Jams und B.Salzberg ([Jam1]) einen Vorläufer des Photomultipliers. Als eine Art Triode besaß er Photokathode, Anode und dazwischen einen einstufigen Verstärker. Das Gerät wurde zur Verbesserung der Tonaufnahmetechnik bei Filmen benutzt.

1936 führte Zworykin ([Zwo1]) den mehrstufigen Verstärker und das elektronenoptische System ein. Damit gab es den ersten Photomultiplier, den man als solchen bezeichnen kann. Das elektronenoptische System bestand allerdings noch aus elektrischen und magnetischen Feldern, was den Betrieb der Röhre etwas umständlich machte.

1939 hatten Zworykin und Rajchman ([Zwo2]) nicht nur einen Photomultiplier mit elektrostatischer Fokussierung, sondern auch mit einer besseren Kathode — zuerst Ag-O-Cs, dann Sb-Cs — entwickelt.

1940 und später führte der Joint Electron Devices Engineering Council JEDEC die S-Nummern ein, um die sich entwickelnden Kathodenbeschichtungen zu klassifizieren. Es gibt inzwischen S-Nummern von 1 bis 20, allerdings wurde nicht durchgehend numeriert.

1953, aber auch schon früher setzte die industrielle Produktion von Photomultipliern ein. Das nunmehr angebotene Spektrum reicht von Miniatur-Modellen bis zu sogenannten Smart-Photomultiplier-Systemen mit über 400 mm Durchmesser. Für nahezu alle denkbaren Anwendungen ist ein Photomultiplier-Typ verfügbar. So finden sich die Röhren in medizinischen  $\gamma$ -Strahlen-Kameras, in Erdöl-Lagerstätten-Detektoren der Geologie oder in der chemischen Spektroskopie.

Ihr klassisches Haupteinsatzgebiet liegt aber immer noch in der Forschung, vor allem in der Kern- und Elementarteilchenphysik. So ist der H1-Detektor am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg eines der neueren Anwendungsgebiete der Multiplier.

### 1.3 Anwendung der Multiplier in der Physik

In der Kern- und Elementarteilchenphysik werden Reaktionen von Teilchen untereinander hervorgerufen und beobachtet. Mit Kenntnis der kinematischen Variablen von Anfangs- und Endzuständen einer Reaktion lassen sich Rückschlüsse auf Wechselwirkungen und eventuell vorhandene Substrukturen der beteiligten Partikel ziehen. Da, wie etwa in Streuexperimenten an Beschleunigern, die Anfangswerte von Teilchenenergien und -bahnwinkeln vorgebar sind, ist zur Erforschung elementarer Wechselwirkungen die Messung von Energien und Winkeln der Reaktionsprodukte entscheidend.

Um die Endzustands-Partikel nachzuweisen, gibt es zwei Möglichkeiten. Geladene schnelle Teilchen wechselwirken mit einem Medium, indem sie es entsprechend ihrer Geschwindigkeit ionisieren oder proportional ihres Energieverlusts zur Lichtemission anregen. Den ersten Effekt macht man sich in Draht- und Driftkammern zunutze, deren ionisierte Füllgase elektrische Signale in Drahtrastern auslösen und so eine Rekonstruktion der Bahn eines eingedrungenen Teilchens erlauben. Mit äußeren magnetischen Feldern ermöglichen diese Spurkammern auch die Ermittlung von Ladung und Impuls des nachzuweisenden Teilchens. Den zweiten Effekt nutzt man bei Tscherenkov- und Szintillationszählern aus. Von einem einfallenden Teilchen abgegebene Energie wird in gut nachweisbare Lichtsignale umgesetzt.

Zum Nachweis hochenergetischer Elektronen und Photonen ist eine andere Methode vorzuziehen. In Kalorimetern wird die Energie solcher Partikel absorbiert und dabei auf viele langsamere Teilchen übertragen. In einem elektromagnetischen Kalorimeter wird ein eindringendes Elektron in einem sogenannten "toten" Material wie z.B. Blei durch abwechselnd aufeinanderfolgende Bremsstrahlungs- und Paarerezeugungsprozesse vervielfacht, bis seine Energie aufgebraucht ist. In hadronischen Kalorimetern wird diese Vervielfachung durch Kerntreffer erreicht. In das tote Material eingelagerte Szintillatoren oder Spurkammern können die Kaskaden langsamer Teilchen dann gut messen. Eine Unterteilung des Kalorimeters ermöglicht auch die grobe Messung von Teilchenspuren. Je besser die Szintillatoren im Kalorimeter verteilt sind, desto höher ist die Energieauflösung des Geräts. Eine feinere Unterteilung oder "Granularität" hebt die Orts- oder Winkelmessungs-Qualitäten des Kalorimeters.

Größere Detektoren sind üblicherweise aus mehreren der beschriebenen Komponenten modular zusammengesetzt. Sind Verbesserungen an kleineren Einheiten nötig, können diese gegebenenfalls gegen entsprechende Neubauten ausgetauscht

werden. Am Reaktionspunkt werden hauptsächlich Spurkammern zur möglichst genauen Rekonstruktion der Teilchenbahnen verwendet, darum herum sind meist Kalorimeter zur Energiemessungen an den Partikeln montiert. Hinzu kommen Myonenkammern, Spulen für Magnetfelder und die mechanische Konstruktion der Detektoren.

Da in den Kalorimetern oft Szintillatoren mit Photomultipliern zum Lichtnachweis eingesetzt werden, sind die Röhren in der Kern- und Elementarteilchenphysik besonders wichtig.

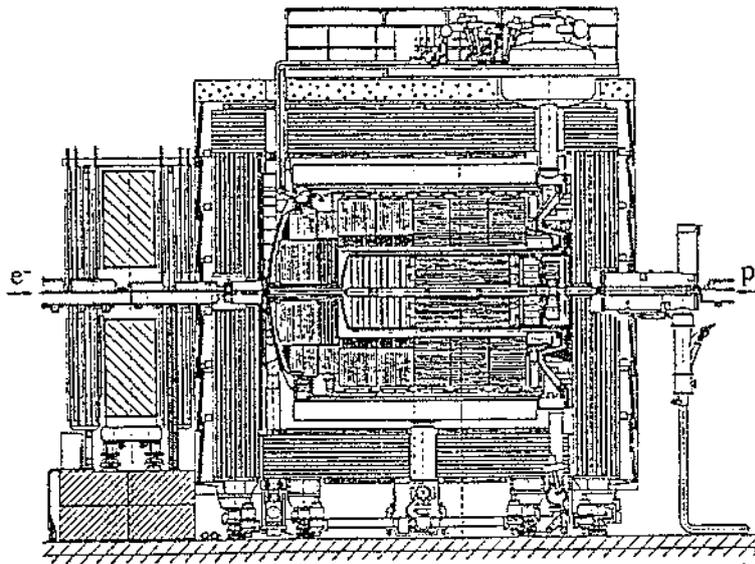
Am H1-Detektor an der HadronenElektronenRingAnlage HERA beim DeutschenElektronenSYnchrotron DESY in Hamburg ist der Austausch eines Kalorimeters nötig geworden, weil es gewachsenen Ansprüchen nicht mehr genügt. Das an seiner Stelle einzusetzende neue Kalorimeter ist auf die Verwendung von insgesamt 1340 Photomultiplier ausgelegt. Um die gewünschten Meßqualitäten zu erreichen, müssen besonders die Multiplier vor ihrem Einbau eingehend untersucht und kontrolliert werden. Zweck, Art und Ergebnisse der dazu notwendigen Untersuchungen sind im folgenden aufgeführt.

# Kapitel 2

## Die Photomultiplier für H1

### 2.1 H1 und der Kalorimeraustausch

Im HERA-Speicherring werden Elektronen und Protonen auf 27 bzw. 820 GeV beschleunigt und mit der sich daraus ergebenden Schwerpunktsenergie von 294 GeV zur Kollision gebracht. Dies geschieht in Abständen von 96 ns.

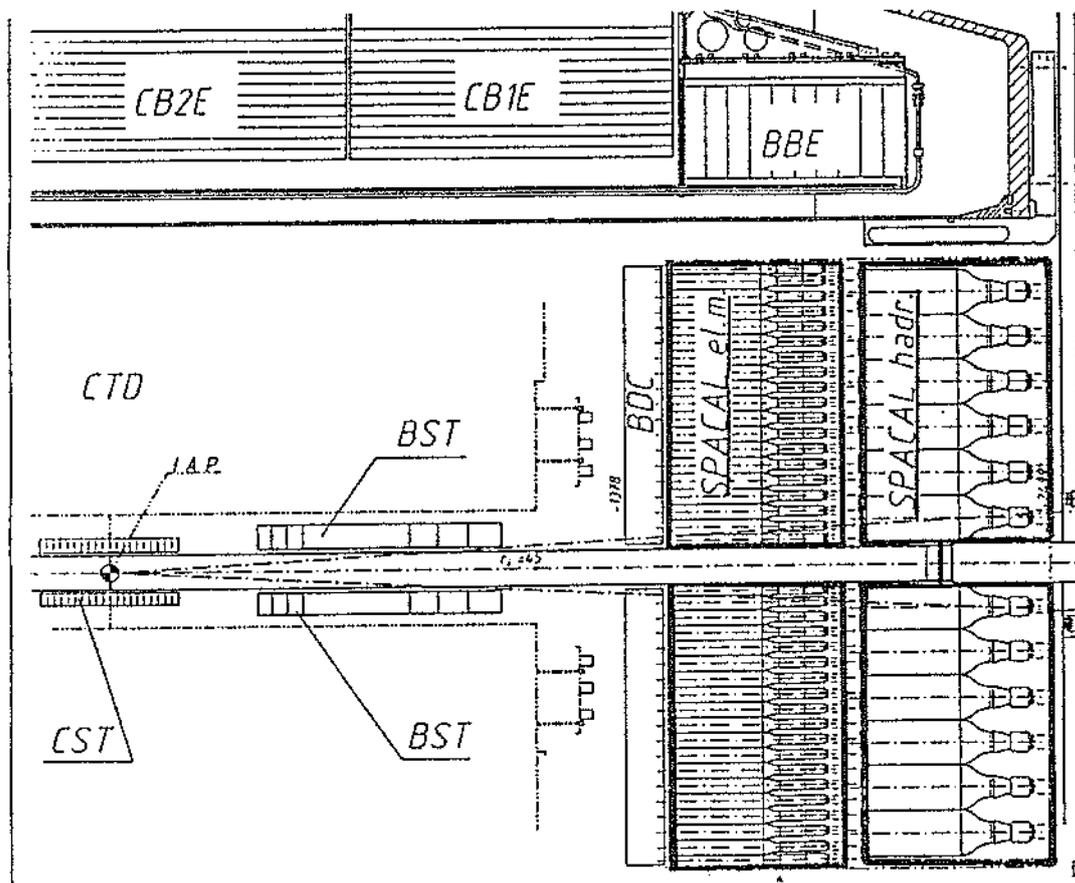


(Fig.2) Der H1-Detektor im Zustand von 1994

Der an diesem Speicherring betriebene H1-Detektor ([H1C1]) selbst ist ein Zylinder von ca. 8 m Durchmesser und ca. 9 m Länge. Da die zu vermessenden Endzustände der Reaktionen wegen der großen Energie der Protonen vor allem in deren Strahlrichtung, dem Vorwärtsbereich, erwartet werden, ist der Detektor entsprechend asymmetrisch aufgebaut. Der Rückwärtsbereich ist weniger stark instrumentiert, wie das Bild zeigt. Wie bei den meisten Detektoren wird der innere

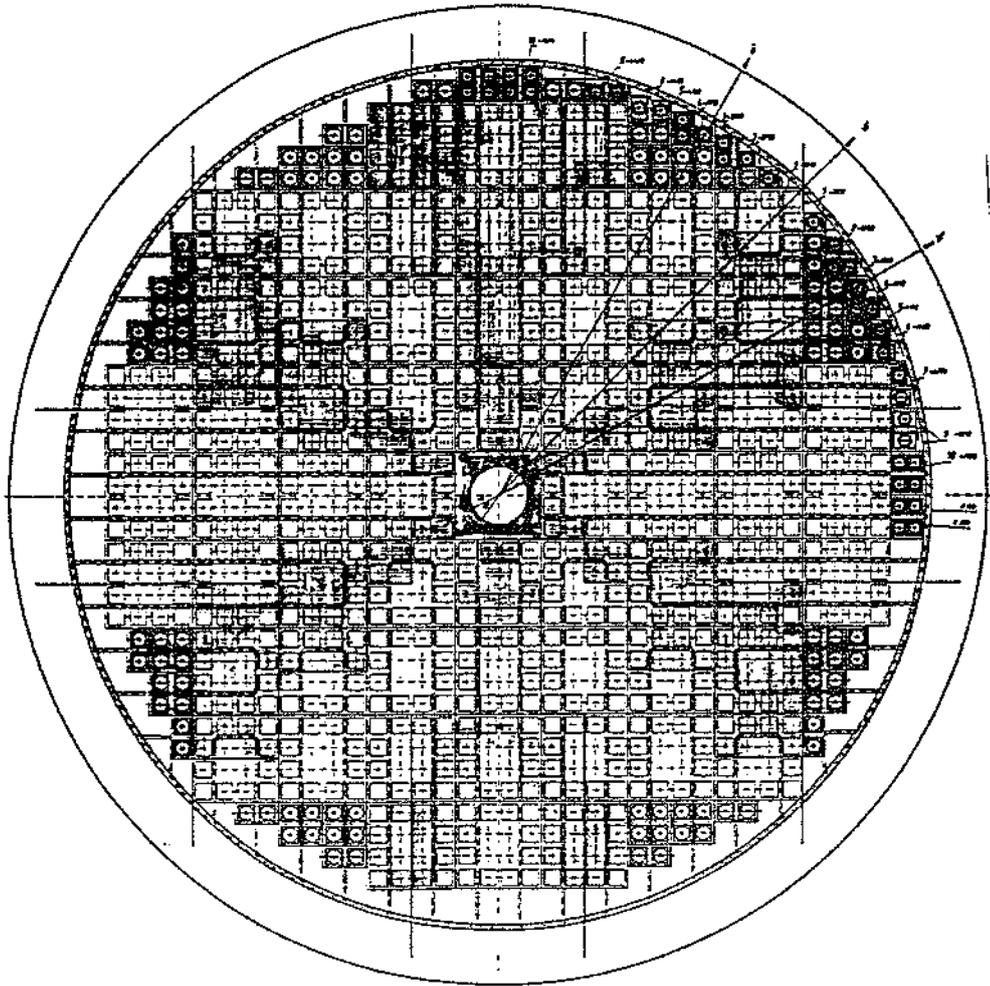
Bereich des Detektors am Strahlrohr von Spurenkammern gebildet. Es handelt sich um die CentralDriftChamber CDC, die CentralInner/OuterZ-chambers CIZ/COZ, die CentralInner/OuterProportionalchambers CIP/COP und den ForwardTrackingDetector FTD. Mehrere Kalorimeter umgeben die Spurenkammern. Es sind das das LiquidArgonCalorimeter LAC, das Vorwärtskalorimeter PLUG und das BackwardElectroMagneticCalorimeter BEMC. Hinter diesem befindet sich noch das TimeOfFlight- TOF- System. Darum herum liegt eine supraleitende Spule für Magnetfelder bis 1.16 T. Der Abschluß des Detektors wird von Myonenkammern gebildet.

Am H1-Detektor wird vor allem versucht, durch die Messung der Partondichten in Protonen neue Erkenntnisse über die starke Wechselwirkung zu gewinnen. Im Zuge vorgesehener neuer Untersuchungen ist die Erhöhung der Meßgenauigkeit im rückwärtigen Bereich des Detektors notwendig geworden. Dafür sollen BEMC und TOF durch das SPAGhettiCALorimeter SPACAL ersetzt werden ([H1C2]).



(Fig.3) Seitenansicht des SPACAL im H1-Detektor

Das SPACAL soll aus einem elektromagnetischen und einem hadronischen Teil bestehen. Als zylinderförmiges Teil von 4 t Gewicht, 1621 mm Außendurchmesser zur Montagekapsel, 90 mm Innendurchmesser zum Strahlrohr, 490 mm Länge über alles und 1440 mm Abstand zum Wechselwirkungspunkt kann es geometrisch einen Raumwinkelbereich von ca.  $151.4^\circ - 178.0^\circ$  vom Vorwärtsbereich aus gerechnet erfassen. Die Orts- oder Winkelauflösung wird im elektromagnetischen Teil durch 88 Submodule mit 1204 und im hadronischen Teil durch 22 Untereinheiten mit 136 auslesbaren Kanälen gegeben.



(Fig.4) Querschnitt des elektromagnetischen SPACAL mit dem Loch für das Strahlrohr

Die Submodule bestehen aus längs der SPACAL-Achse gerillten, übereinander geschichteten Bleiplatten. In den Rillen liegen Szintillatorfasern, die zu mehreren gebündelt durch pyramidenstumpfförmige Lichtmischer auf jeweils einen Kanal geführt werden. Die besondere spaghettiartige Anordnung von Szintillatoren ergibt eine hohe Homogenität bei der Auslese von Signalen. Die Gesamtkonzeption ermöglicht eine Energieauflösung von:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{7.2\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\% \quad (2.1)$$

$\sigma_E$  : Standardabweichung der Energie

7.2% : SPACAL-spezifische Proportionalitätskonstante

1% : Konstanter Term (Variationen der Submodule)

Zudem gab sie dem Modul seinen Namen. Da das SPACAL aus Platzgründen auch das TOF ersetzen soll, muß es dessen Funktion übernehmen. Das TOF ermöglicht durch Flugzeitmessungen an Teilchen die Entscheidung, ob sie aus einer Reaktion oder dem Untergrund kommen. Dafür sind Zeitaufösungen um 1 ns notwendig, was am besten mit Multipliern zu erreichen ist.

An diese werden besondere Anforderungen gestellt. Zunächst müssen sie in Magnetfeldern bis 1.2 T Flußdichte noch funktionieren, weil das SPACAL noch im Feld der Spurkammern liegt. Da für die Multipliekathoden pro im Kalorimeter deponiertem MeV nur 1 bis 2 Photoelektronen erwartet werden, muß die Verstärkung bei 1.2 T noch 10000- bis 20000-fach sein. Zudem muß die Empfindlichkeit der Multipliekathoden auf Licht möglichst gleichmässig sein. Bei Maximum-zu-Minimum-Verhältnissen der Empfindlichkeit von mehr als 2 bis 2.5 können auch die Lichtmischer falsche Signale für einzelne Szintillatorfasern nicht mehr ausgleichen. Weiter muß die Verstärkung der Röhren längere Zeiten stabil auf einem einmal eingestellten Wert bleiben. Da das SPACAL nur 1- bis 2-mal jährlich gewartet werden kann, wären größer Verstärkungsschwankungen schlecht für die Messungen. Schließlich darf der Dunkelstrom der Multiplier je nach Kalorimeterteil nicht mehr als 10 oder 100 nA betragen. Da die räumlichen Verhältnisse im neuen Kalorimeter begrenzt sind, werden besonders für das elektromagnetische Kalorimeter Multiplier mit geringen Abmessungen gefordert.

## 2.2 Auswahlkriterien für Photomultiplier

Wie schon geschildert, haben sich im Laufe der Entwicklung der Photomultiplier viele unterschiedliche Typen herausgebildet.

Zunächst werden verschiedene Materialien für das Lichteintritts- oder Kathodenfenster einer Röhre angeboten. Werden etwa starke Strahlungsbelastungen für den Betrieb eines Multipliers vorrausgesehen, so wählt man solche mit Fenstern, die hohe UV-Dosen vertragen können. Im folgenden sind einige wichtige Materialien aufgeführt ([Ham1]).

Material	Transparenz ab $\lambda$	Bemerkungen
Magnesiumfluorid	115 nm	UV-tauglich
Saphir	150 nm	UV-tauglich
Synth. Silizium	160 nm	thermisch empfindlich
Ultraviolettglas	185 nm	Quarzglas, UV-tauglich
Borosilikat	300 nm	gebräuchlich

Verschiedene Fensterprofile von beidseitig flach bis beidseitig gewölbt werden angeboten. Die Fenster mit den Kathoden liegen entweder seitlich (side-on-type) oder vorne (head-on-type) an einem Multiplier. Die Kathoden werden als sehr dünne

(einige 10 Å) Schicht auf einer besonderen Platte in der Röhre oder direkt auf ihrem Fenster aufgebracht. Die verwendeten Beschichtungsmaterialien haben eine möglichst niedrige Austrittsarbeit, insbesondere Verbindungen mit Halbleitern. Da dort ausgelöste Elektronen kaum von anderen Ladungsträgern gestört werden, sind entsprechend niedrige Energien möglich. Die Austrittsarbeiten typischer Verbindungen liegen zwischen ca. 0.72 (Ag-O-Cs) und 1.84 eV (SbCs) ([Ard1]), also grob bei 1.5 eV. Wie schon erwähnt existieren viele Beschichtungstypen, die sich hauptsächlich in der Empfindlichkeit auf bestimmte Spektralbereiche unterscheiden. Mit Graphen, die den Quotienten von Photoelektronenzahl und Photonen, die Quanteneffizienz, gegen die Wellenlänge eingestrahlt Lichts zeigen, kann man durch Vergleich die für eine Anwendung jeweils günstigste Beschichtung wählen. Eine Überblick über einige gebräuchliche Kathodenmaterialien gibt die folgende Tabelle ([Ham1]).

Beschichtung	Bezeichnung	max. Sens. bei $\lambda$	Bemerkungen
Cs-I	solar-blind	115 - 200 nm	Herkömmlich
Cs-Te	solar-blind	300 nm	Herkömmlich
Sb-Cs	alkali	150 - 700 nm	UV-tauglich, verträgt viel Licht
Sb-K-Cs	bialkali	150 - 700 nm	Hohe Sensitivität, ger. Dstr.
Sb-Na-Ka	bialkali	150 - 700 nm	H. Sens., ger. Dstr. bis 175° C
Sb-Na-Ka-Cs	trialkali	150 - 850 nm	tauglich von UV bis IR
Ag-O-Cs	S-1-Typ	300 - 1100 nm	IR-tauglich
Ga-As	—	300 - 850 nm	Stark lichtempfindlich
InGaAs	—	900 - 1000 nm	UV-tauglich

Ein Maß für Empfindlichkeit einer Multipliekathode gegenüber eingestrahlt Licht ist die Kathodensensitivität oder, ungenauer, der Kathodenstrom ([Phil]).

$$S_K = \frac{I_K}{\Phi} \quad (2.2)$$

$S_K$  : Kathodensensitivität

$I_K$  : Kathodenstrom in mA

$\Phi$  : Lichtleistung in Watt

Das Verstärkungs- oder Dynodensystem ist der wichtigste Teil eines Photomultipliers. Aus den einfachen Dynodenkonfigurationen der Anfangszeit der Röhren haben sich seither 6 Anordnungen mit besonderen Vor- und Nachteilen herausgebildet. So benötigen einige Typen komplexe Fokussierungen der Elektronen gerade zwischen Kathode und erster Dynode, teilweise auch noch im Dynodensystem selbst. Das ermöglicht gute Verstärkungen, schnelle Signalentstehungen und anderes, bewirkt aber auch ihr Versagen in stärkeren Magnetfeldern. Liegt ein Magnetfeld parallel zur Achse eines Multipliers, so bewirken die Fokussierungen zum Feld geneigte Bahnen der Elektronen in der Röhre. Das kann dazu führen, daß die einsetzende Lorentzkraft Ladungsträger zu ihren Ursprungsdynoden zurück oder an

anderen Dynoden vorbeibewegt und sie damit dem Verstärkungsprozeß entzieht. An der Kathode erzeugt dieser Effekt die Schrumpfung der empfindlichen Fläche durch den Verlust aller Photoelektronen, die die erste Dynode nicht auf direktem Weg erreichen können. Multiplier, deren Elektronen Bahnen parallel zu ihrer Achse und zum Feld beschreiben und somit nicht von der Lorentzkraft beeinflusst werden, erfahren im Magnetfeld keine derartigen Verstärkungsverluste ([Ham1]).

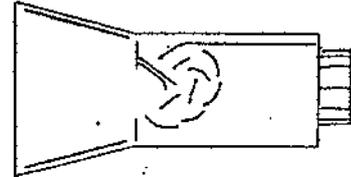
Modell "circular cage" :

Homogenität des Signals : schlecht

Güte der Fokussierung : gut

Magnetfeldtauglich bis : 0.1 mT

Bemerkungen zum Modell : kompakt, kleine Laufzeit



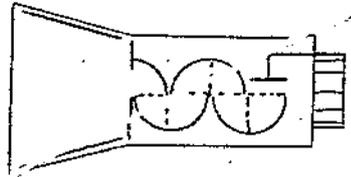
Modell "box and grid" :

Homogenität des Signals : gut

Güte der Fokussierung : sehr gut

Magnetfeldtauglich bis : 0.1 mT

Bemerkungen zum Modell : gute Laufzeit



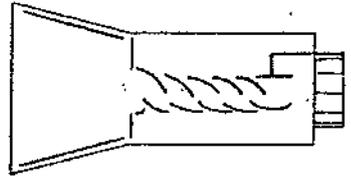
Modell "linear focus" :

Homogenität des Signals : schlecht

Güte der Fokussierung : gut

Magnetfeldtauglich bis : 0.1 mT

Bemerkungen zum Modell : sehr gute Laufzeit



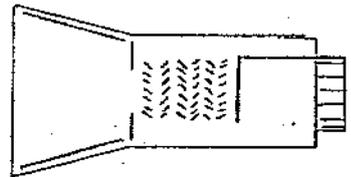
Modell "venetian blind" :

Homogenität des Signals : gut

Güte der Fokussierung : schlecht

Magnetfeldtauglich bis : 0.1 mT

Bemerkungen zum Modell : Für große Kathoden



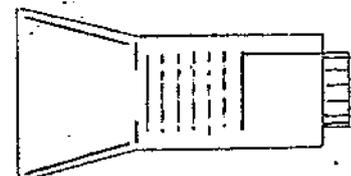
Modell "fine mesh" :

Homogenität des Signals : gut

Güte der Fokussierung : schlecht

Magnetfeldtauglich bis : 1200 mT

Bemerkungen zum Modell : hohe Magnetfelder



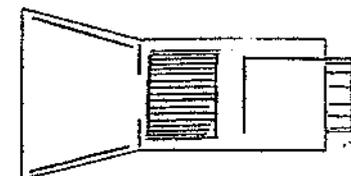
Modell "microchannel plate" :

Homogenität des Signals : gut

Güte der Fokussierung : schlecht

Magnetfeldtauglich bis : 1200 mT

Bemerkungen zum Modell : hohe Felder, schnell



Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, verlaufen die Photo- und Sekundärelektronenbahnen der beiden letztgenannten Modelle praktisch parallel zur Röhrenachse. So bleibt ihre Verstärkung auch im Magnetfeld erhalten. Da Fokussierungen bei diesen Typen zwischen Kathode und Dynoden nicht nötig sind und daher fortgelassen werden, sollte auch kaum eine Kathodenschrumpfung auftreten. Auch die Anoden der Photomultiplier sind leicht komplizierter geworden. Man kann grob zwei Typen unterscheiden.

Anodentyp	Beschreibung
Normal	Einfache Platte, u.U. mit besonderem Vorgitter
Positionssensitiv	Drahttraster/mehrere Platten bei mesh- oder mcp-Dy.

Das Ausgangssignal von der Anode und damit an sich des ganzen Multipliers wird durch die Anodensensitivität oder, weniger genau, den Anodenstrom ( $I_A$ ) charakterisiert.

$$S_A = \frac{I_A}{\Phi} \quad (2.3)$$

$S_A$  : Anodensensitivität  
 $I_A$  : Anodenstrom in A  
 $\Phi$  : Lichtleistung in Watt

Mit Anoden- und Kathodensensitivität läßt sich der entscheidende Parameter eines Photomultipliers, sein Gain, angeben ( $G$ ).

$$G = \frac{S_A}{S_K} \quad (2.4)$$

$G$  : Gain oder Verstärkung  
 $S_A$  : Anodensensitivität  
 $S_K$  : Kathodensensitivität

Kennt man die Verstärkungsfaktoren der Sekundäremission und die Effizienz der Fokussierung von jeder Dynode, so kann die Verstärkung auch so berechnet werden:

$$G = \prod_i^{N_D} \alpha_i \delta_i \quad (2.5)$$

$N_D$  : Anzahl der Dynoden einer Röhre  
 $\alpha$  : Konstante, in die die Sammeleffizienz der Dynoden eingeht

Sind alle Dynoden gleich, gilt einfacher:

$$G = \delta^{\alpha N_D} \quad (2.6)$$

Da  $\delta$  von der Energie, also vom durchfallenen Potential der den Sekundäremissions-Effekt auslösenden Elektronen, abhängig ist, gilt auch:

$$G = KU^{\alpha N_D} \quad (2.7)$$

$K$  :Sekundäremissionskonstante

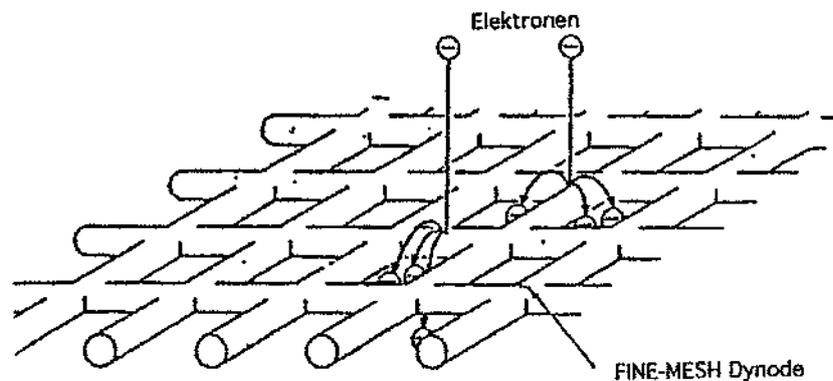
$U$  :Spannungsdifferenz zwischen Dynoden

Die Verstärkungen von Multipliern liegen üblicherweise zwischen  $10^6$  und  $10^8$ , allerdings nur ohne Magnetfeld.

Die letzte wichtige Größe eines Multipliers ist die Höhe seines Dunkelstroms. Die bereits erwähnten Prozesse von Thermo- und elektrischer Emission, aber auch Untergrundstrahlung, Eindiffusion von Restgasen aus der Luft bei langen Lagerzeiten, Leckströme und dergleichen mehr erzeugen diesen Störstrom. Üblicherweise erreicht er Werte um einige nA.

## 2.3 Die Photomultiplier für das SPACAL

Nach den vorangegangenen Ausführungen kommen nur zwei Photomultipliertypen für die Anwendung im SPACAL und dem dort herrschenden hohen Magnetfeld in Betracht: solche mit fine-mesh- oder microchannel-plate-Dynoden. Da die letzteren sehr teuer sind, wurden fine-mesh-Multiplier des bislang einzigen Herstellers dieses Typs, Hamamatsu Photonics K.K. aus Japan, für das SPACAL ausgewählt. Nach verschiedenen Voruntersuchungen ([Mor1]) ([Jan1]) und Kleinserientests ([Kor1]) ([Ug1]) ([Bip1]) entschied man sich für die kleineren R 5505-Typen im elektromagnetischen und die größeren R 2490-06mod-Typen im hadronischen SPACAL. Da besonders im elektromagnetischen Teil im Bereich des Strahlrohres eine hohe Belastung der Multiplier zu erwarten ist, werden hier auch einige zu den R 5505-Röhren bis auf ein strahlungshartes Kathodenfenster baugleiche R 5506-Multiplier verwendet. Die Kathodenempfindlichkeit der Röhren in den Vortests ([Bip1]) ([Ug1]) erreichte die geforderte Homogenität. Das Gain der Röhren erreichte ohne Magnetfeld etwa  $10^6$ , in einem Feld von 1.2 T reduzierte es sich bei den R 5505 um mittlere Faktoren von 40 - 50 ([Kor1]), bei den R 2490 um 100 ([Ug1]). Kathodenschumpfungen betragen bei den R 5505 um 16% des Durchmessers ([Jan1]), bei den R 2490 nur ca. 2% ([Ug1]). Die Verstärkung dieser Multiplier beruht darauf, daß erzeugte Sekundärelektronen durch die Löcher ihrer Gitterdynoden fallen und so von Dynode zu Dynode und schließlich zur Anode gelangen.



(Fig.5) Prinzip der Elektronenvervielfachung an Gitterdynoden ([Jan1]) ([Ham2])

Dadurch sind die Elektronenbahnen durch ein axiales Magnetfeld kaum zu beeinflussen. Bei Flußdichten von 1 bis 1.2 T genügen der Lorentzkraft aber schon kleinste Abweichungen der Elektronen von ihren axialen Bahnen wie durch Emissionswinkel oder leicht inhomogene elektrische Felder, um sie auf Spiralbahnen zu bringen. Dadurch erreichen Photoelektronen vom Rand des Kathodenraums die erste Dynode nicht mehr, einige Sekundärelektronen werden auf den Steg ihrer Ursprungsdynode zurückgedreht. Dadurch tritt eine gewisse Kathodenschrimpung und der beobachtete Gainverlust ein. Die gemessenen Verstärkungen im Magnetfeld erreichten aber gut die für das SPACAL notwendigen Werte. Die Zeitauflösung der großen Röhren lag bei ca. 100 - 250 ps [Mor1], was gut mit den Angaben des Herstellers übereinstimmt. Die gemessenen Dunkelströme lagen bei den kleineren Röhren nur bei ca. 100 pA [Kor1].

Die folgende Aufstellung zeigt die Daten ([Ham3]), die schließlich für die Multiplier im Liefervertrag fixiert wurden. In vielen Werten sind R 5505 und R 2490 gleich, darum werden hier nur Daten der kleineren Röhre angegeben; Abweichungen der größeren finden sich in Klammern.

Spezifikationen der Photomultiplier R 5505 (R 2490-05mod) :

Typ nach Kathodenlage : head-on

Länge der Röhre : 40.0 ±1.5 mm (50.0 ±2.0 mm)

Länge über Alles : 53.0 ±1.5 mm (63.0 ±2.0 mm)

Außendurchmesser der Röhre : 26.5 ±0.7 mm (52.0 ±1.0 mm)

Kathodendurchmesser der Röhre : 17.5 mm, 1 inch (36.0 mm, 2 inch)

Anschlüsse der Röhre : 17, 17 belegt (21, 18 belegt)  
Empfohlener Sockel : E678-17A (E678-21A)  
Spannungsteiler-Base K: DY 1: ...DY 15 (DY 16): A : 2:1:1...:1:1

Maximale Versorgungsspannung : 2300 V (2500 V)

Röhren- und Fenstermaterial : Borosilikat  
Fensterform außen - Innen : plano - plano

Spektraler Empfindlichkeitsbereich der Kathode: 300 - 650 nm  
Maximaler Empfindlichkeitsbereich der Kathode :  $420 \pm 50$  nm  
Photokathodentyp : bialkali  
Kathodenhomogenität bei 0 T : Max. : Min. = 2 : 1 (2.5 : 1)  
Kathodenhomogenität bei 1.2 T : Max. : Min. = 2.5 : 1  
Kathodendurchmesser bei 0 T : 17.5 mm (36.0 mm)  
Kathodendurchmesser bei 1.2 T : 15.0 mm (32.0 mm)

Dynodenkonfiguration : Gitter / proximity (fine) mesh  
Gitterabmessungen : 5.5  $\mu$ m Stegbreite (?), 12  $\mu$ m Lochlänge (?)  
Dynodenbeschichtung : bialkali  
Dynodenanzahl : 15 Stück (16 Stück)

Anodentyp : 'normal'  
Anodenstrom : 0.1 mA (0.01 mA)

Kathodensensitivität bei 25° C : 0.05 - 0.06 mA / lm  
Anodensensitivität bei 25° C : 60 A / lm  
Mindest-Verstärkung bei 0 T : 400000 (2000000)  
Mindest-Verstärkung bei 1.2 T : 10000 (20000)

Durchlaufzeit : 6.00 ns (9.20 ns)  
Anstiegszeit : 2.00 ns (2.30 ns)  
Schwankungen, 'jitter' : 0.35 ns (0.44 ns)

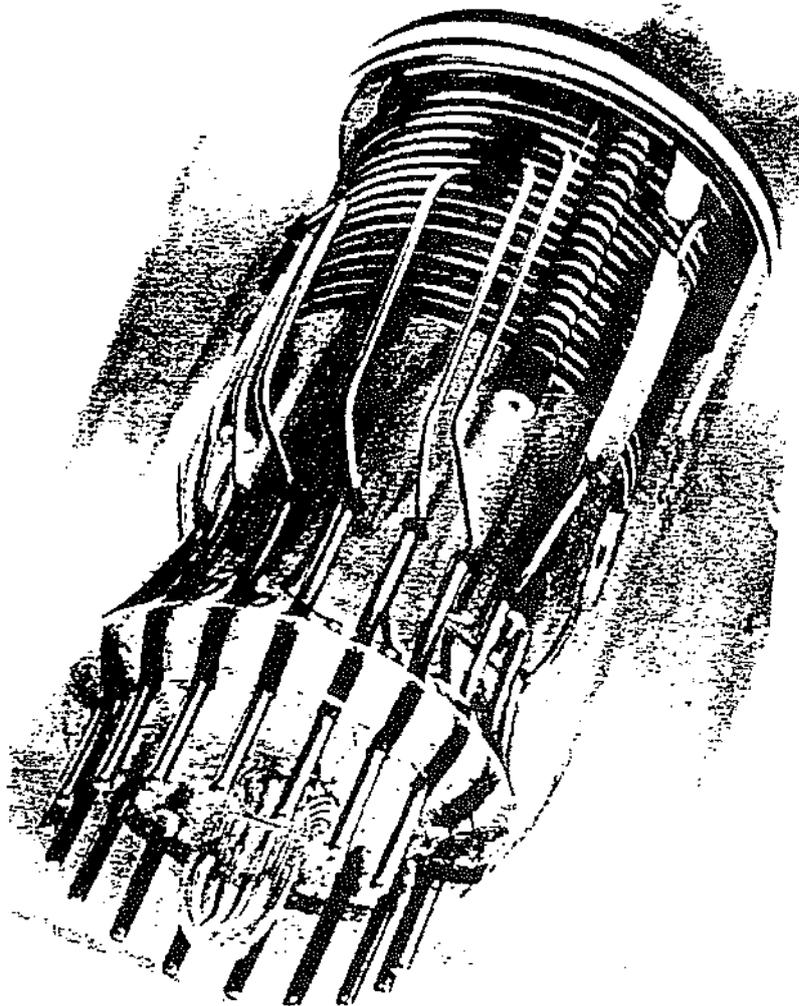
Garantie : 10000 h Betrieb bei maximal 50% Anodensignalverlust

Signal linear bis : 50 mA

Temperaturbereich bis : -80 - +50° C  
Typische Höhe des Dunkelstroms : 2 - 10 nA (15 - 100 nA)

Geordnete Zahl : 1220 + 100 (144)

Das folgende Bild zeigt den Aufbau der R 5505-Photomultiplier



(Fig.6) Ansicht eines R 5505-Photomultipliers

Ganz oben die Kathodenkontaktschicht um die Kathode, darunter der Kathodenkontaktring. Die Kathode selbst ist 10-100 Ang. ([Ham2]) dick. Die Spannungsversorgung erfolgt durch eine der 3 abisolierten Streben. Die Streben tragen 15 Gitterdynoden und Anode. Die Dynoden sind 100-1000 Ang. ([Ham2]) dick beschichtet. Dann folgen die Zuleitungen und Kontakte des Multipliers

Die R 2490-Röhren sind entsprechend gebaut, nur mit 16 Dynoden und 4 Streben. Die Photomultiplier werden zum größten Teil von Hand hergestellt, was verschiedene

Abweichungen der einzelnen Modelle untereinander erklären kann. Laut Hersteller ([Ham2]) wird die Kathodenschicht nach der Fertigstellung und Evakuierung der Röhre auf ca.  $10^{-7}$  Torr aufgebracht. Das Material wird verdampft und durch den Rohransatz im Sockel in den Multiplier geleitet. Nach Um- und Befliessen der Dynoden kondensiert es auf dem Kathodenfenster ab. Dadurch unterscheiden sich alle Kathodenhomogenitäten bis zu einem gewissen Grad voneinander.

Nach der Fertigung durchlaufen die Röhren eine Endkontrolle beim Hersteller, wo Kathoden-, Anoden- und Dunkelströme vermessen werden. Zur Dunkelstrommessung werden die Röhren wie spezifiziert mit Spannung versorgt und 30 min. im Dunkeln gehalten. Danach wird der Signalstrom gemessen. Zur Aufnahme der Anodensensitivität werden die Multiplier wieder im Normalmodus betrieben und dabei mit einer Konstantlichtquelle bekannter Leistung, die wegen der Lichtempfindlichkeit der Röhren durch Filter reduziert wird, beleuchtet. Die Messung der Kathodensensitivität ist wegen der Kleinheit des Stroms komplizierter. Zunächst wird der Photostrom erhöht, indem der Filter vor der Lichtquelle im Gegensatz zur Anodenstrommessung entfernt wird. Um den gesamten Photostrom zu messen, wird in den Röhren ein positives Feld zwischen den Kathoden und allen anderen Teilen wie Dynoden und Anoden angelegt und ein Meßgerät dazwischengeschaltet. Die Röhren können also bei dieser Messung nicht mehr wie spezifiziert betrieben werden. Durch die Kathodenstrommessung läßt sich dann aber ein experimentelles Absolutgain bestimmen, was sonst nur schwer möglich ist.

Um diese Werte des Herstellers und Daten aus den Lieferbedingungen stetig zu kontrollieren, aber vor allem, um die Eigenschaften jedes Photomultipliers im Betrieb mit oder ohne Magnetfeld für den Bau des SPACAL zu kennen, war die individuelle Untersuchung aller gelieferten Röhren im Zeitraum von ca. 12 Monaten nötig. Die dazu angewandten Methoden und Mittel werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

# Kapitel 3

## Aufbau der Serientestapparaturen

### 3.1 Die Grundlagen der Testaufbauten

Werden mehrere Photomultiplier in einem Nachweisgerät oder Detektor nebeneinander eingesetzt, müssen ihre Gains aufeinander abgeglichen sein. Das Gain variiert trotz gleicher Versorgungsspannungen etwas von Röhre zu Röhre. Zum Abgleich sind daher die Spannungen aller Multiplier solange zu verstellen, bis ein einheitliches Gain für den Detektor erreicht ist. Bei mehr als 100 gleichzeitig eingesetzten Multipliern ist das bei der Endkalibration des Detektors selbst nicht mehr genau genug zu machen. Daher muß das Gain für jede Röhre als Funktion der angelegten Spannung bekannt sein, damit ein Abgleichen des Detektors noch vor seiner Inbetriebnahme möglich ist.

Um das zu erreichen, verwendet man Testanlagen, in denen die Multiplier bei steigenden Spannungen beleuchtet werden. Die verwendete Lichtquelle sollte dabei die später im Detektor zu erwartenden Beleuchtungsverhältnisse simulieren. Auftragen der pro Spannung gemessenen Signalwerte liefert die gesuchte Beziehung. Die Signalwerte der so entstehenden "Kalibrationsrampen" sind allerdings nicht die absoluten Gains der Röhren. Letztlich wird mit einem Signal nur die Ladung der Elektronen nach dem Verstärkungsprozeß in der Röhre gemessen. Die Zahl der zum Signal führenden Photoelektronen ist nicht bekannt, so daß auch die genaue Verstärkung unbekannt bleibt. Mit diesen Messungen läßt sich also nur ein auf die Photoelektronenzahl bezogenes, relatives Gain der Röhren angeben, was zum Abgleichen von Multipliern aber auch genügt.

Zudem kann man bei Kenntnis eines Absolutgains bei einer Spannung der Rampe den vermessenen Multiplier im nachhinein eichen. Liegen Kathoden- und Anodensensitivitätsmessungen des Herstellers vor, ist das leicht möglich. Wenn nicht oder wenn vorliegende Werte wenigstens kontrolliert werden sollen, kann man eine derartige Messung selbst machen oder aber versuchen, die Testlichtquelle so weit zu schwächen, daß in einer Röhre nur noch ein einziges Photoelektron ausgelöst wird. Bei letzterem Verfahren kann das Gain durch die Anzahl dabei gemessener

Elektronen direkt gewonnen werden. Beide Methoden sind jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden und in Serienmessungen schlecht zu realisieren. Existiert nur eine geeichte Röhre, können Schwierigkeiten beim Übertragen des Wertes auf andere Röhren entstehen. Eine in Testapparaturen seriell durchführbare Absolutgainbestimmung basiert auf einer großen Anzahl von Signalen an einer Spannung. Aus Mittelwert und Standardabweichung der zugehörigen Verteilung kann die Photoelektronenzahl und damit das Gain errechnet werden ([Jan1]). Nimmt man an, daß alle in einer Röhre freigesetzten Elektronen einer idealen Poissonverteilung folgen, gilt für die Gesamtabweichung des Signals:

$$\sigma_S^2 = \sigma_K^2 + \sum_i^{N_D} \sigma_{D_i}^2 = \frac{1}{N_p} + \frac{1}{N_p \prod_i^{N_D} \delta_i} \quad (3.1)$$

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{N_p} \left( 1 + \sum_i^{N_D} \frac{1}{\prod_i^n \delta_i} \right) \quad (3.2)$$

$\sigma_S$  : Gesamtbreite

$\sigma_K$  : Standardabweichung der Photoelektronenzahl

$\sigma_{D_i}$  : Breite der Sekundärelektronenzahl von Dynode  $i$

$\delta_i$  : Standardabweichung von Dynode  $i$

$N_D$  : Anzahl der Dynoden

$N_p$  : mittlere Photoelektronenzahl

$n$  : Dynoden-Zählvariable

Werden alle Verstärkungsfaktoren als gleich angenommen, kann man die Gleichung nach  $N_p$  umstellen und entwickeln. Mit der Anzahl vor und nach dem Verstärkungsprozeß einer Röhre vorhandener Elektronen läßt sich das Gain ermitteln.

$$G = \frac{\sigma_S^2 \delta - 1}{S \delta} = \delta^{\alpha N_D} \quad (3.3)$$

$S$  : Mittelwert aller Meßsignale

Da  $\delta$  durch ein Potenzgesetz mit dem Gain verbunden ist, kann die Gleichung iteriert werden. Nach etwa 20 Iterationen sind die Abweichungen aufeinanderfolgender Gainwerte kleiner als 1%. Diese Methode ist einfacher als die experimentelle Gainbestimmung. Sie berücksichtigt allerdings keine möglichen Nebeneffekte im Verstärkungsprozeß und benötigt eine hohe Statistik, um wegen eventueller Ausreißer keine falschen Ergebnisse zu liefern. Das ist zeitaufwendig und kann in einer Messung nur wenige Male gemacht werden.

Immerhin lassen sich so die Werte des Herstellers grob kontrollieren. Die Eichung des Detektors kann kaum mit diesen Werten durchgeführt werden, was aber auch nicht nötig ist.

Wichtiger an der Kalibration der Röhren ist die Konstanz, mit der die Multiplier auf einem einmal eingestellten Gainwert bleiben, also ihre Gainstabilität über längere Zeiträume. Photomultiplier tendieren immer dazu, ihr Gain auch an einer gleichbleibenden Spannung zu höheren oder tieferen Werten zu verändern. Die dadurch erzeugten Schwankungen in der Kalibration eines Detektors sind üblicherweise klein und nicht weiter störend. Multiplier mit großen Gainveränderungen in Zeiträumen von einigen Stunden sind aber für die Meßqualitäten eines Nachweisgeräts extrem schädlich. Sie müssen daher schon vor der Endmontage im Detektor aussortiert werden.

Die zur Feststellung solcher instabilen Multiplier notwendigen Daten kann man in einem Testaufbau erhalten, in dem eine Röhre für mehrere Stunden an konstanter Spannung liegt und in festen Zeitabständen beleuchtet wird. Vergleicht man die zu verschiedenen Zeiten genommenen Signale mit dem Signal zu Beginn der Messung, erhält man Aufschluß über die Konstanz des Multipliergains.

Werden in einem Nachweisgerät mehrere Lichtsignale auf die Kathode eines Multipliers geleitet, spielen auch noch die Gainunterschiede durch unterschiedliche Beleuchtungspunkte auf der Kathode eine Rolle. Da die Kathoden im Allgemeinen auf eine Fläche eines Multipliers aufgedampft werden, sind ungleichmäßige Kathodenmaterialverteilungen zu erwarten. Die jeweilige Kathodenschichtdicke bestimmt die Anzahl der an einem Punkt bei Beleuchtung erzeugbaren Photoelektronen und somit das Ausgangssignal eines Multipliers. Will man nur Photomultiplier mit einer gleichmäßigen Beschichtungsdicke einsetzen, muß die Änderung von Multipliersignalen in Abhängigkeit des Beleuchtungspunkts ihrer Kathode bekannt sein.

Zur Aufnahme der Kathodenhomogenität ist ein Teststand erforderlich, bei dem Kathoden Punkt für Punkt in einem möglichst feinen Raster beleuchtet werden. Durch Vergleich der Signalthöhen aller Punkte kann dann ein Maximum-Minimum-Verhältnis für die Homogenität der entsprechenden Kathode angegeben werden, was eine Sortierung vermessener Röhren erlaubt.

Für Detektoren mit guter Zeitaufösung müssen die Differenzen von allen Signalentstehungszeiten der eingesetzten Photomultiplier in der Größe der geforderten Auflösung liegen. Dazu sind die Zeiten aller Röhren vorab zu messen, um diesbezüglich schlechte Multiplier auszusortieren.

Die benötigten Meßdaten können durch die Messung der Zeitspanne zwischen Beleuchtung und Signalabnahme an einem Multiplier in einer entsprechenden Apparatur erhalten werden.

Um störendes Detektorrauschen zu vermeiden, muß der Dunkelstrom der verwendeten Multiplier gleichmäßig niedrig sein. Röhren mit hohen Dunkelströmen sollten also gar nicht erst eingebaut, sondern schon vorher festgestellt und weggelassen werden.

Wie schon beschrieben verwendet man dazu Testapparaturen, in denen ein Multiplier bis zur Einstellung eines stabilen Wertes ohne Beleuchtung unter Spannung gehalten wird. Da elektrisch oder thermisch emittierte Elektronen auch im Multi-

plier verstärkt werden, wählt man Prüfspannungen, die erwarteten Betriebsspannungen in etwa entsprechen. So erhält man einigermaßen relevante Ströme.

Wenn irgend möglich, wird versucht, alle beschriebenen Tests in einer einzigen Anlage durchzuführen. Das erleichtert gerade Serienmessungen erheblich.

Da die hier zu vermessenden R 5505- und R 2490-Photomultiplier für das SPACAL in einem Magnetfeld arbeiten sollen, hätte eine solche vollständige Testanlage in einem entsprechenden Feld betrieben werden müssen. Das war jedoch nicht möglich. Der ohnehin meist niedrige Dunkelstrom der Multiplier wäre im Magnetfeld mit dem Gain gesunken und nicht mehr meßbar gewesen. Für diesen Test war also ein eigener Aufbau ohne Magnetfeld notwendig. Um die übrigen Messungen in einer Apparatur durchführen zu können, waren programmierbare elektrische Verstärker erforderlich, die Lichtquellen vor und über die Kathoden der zu testenden Multiplier bewegten. Gerade eine hochauflösende Homogenitätsmessung und die zeitraubende Kontrolle der Gainstabilität machten solche Fahrtrische unbedingt nötig. Ihre Elektromotoren hätten jedoch in einem Magnetfeld versagt. Im Feld war nur ein manueller Betrieb von Testmechaniken möglich, was zur Kalibration der Röhren, aber nicht oder nur in gewissem Umfang für die anderen Messungen machbar war. Auch hier waren also zwei Apparate für Tests mit und ohne Magnetfeld nötig, deren Ergebnisse sich gegenseitig ergänzen und so vervollständigen konnten.

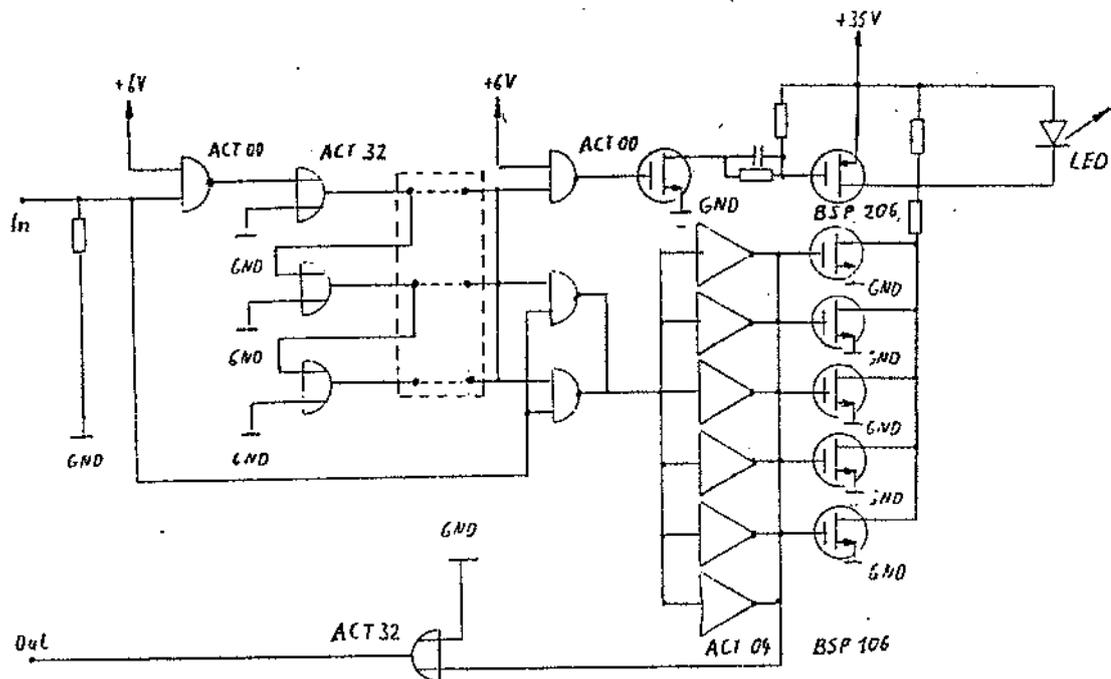
Die schließlich zu den Photomultipliertests verwendeten Aufbauten sind im folgenden beschrieben.

## 3.2 Die Apparatur für Tests ohne Magnetfeld

Dieser Teststand wurde als erster im Institut für Hochenergiephysik in Heidelberg aufgebaut. Einige prinzipielle Konzeptionen wurden für die später zu beschreibenden Apparate übernommen. Dazu gehörten die zu den Test-Beleuchtungen verwendeten Lichtquellen, die Spannungsteiler-Basen der Photomultiplier sowie das Prinzip der Steuerung und Datennahme des Geräts.

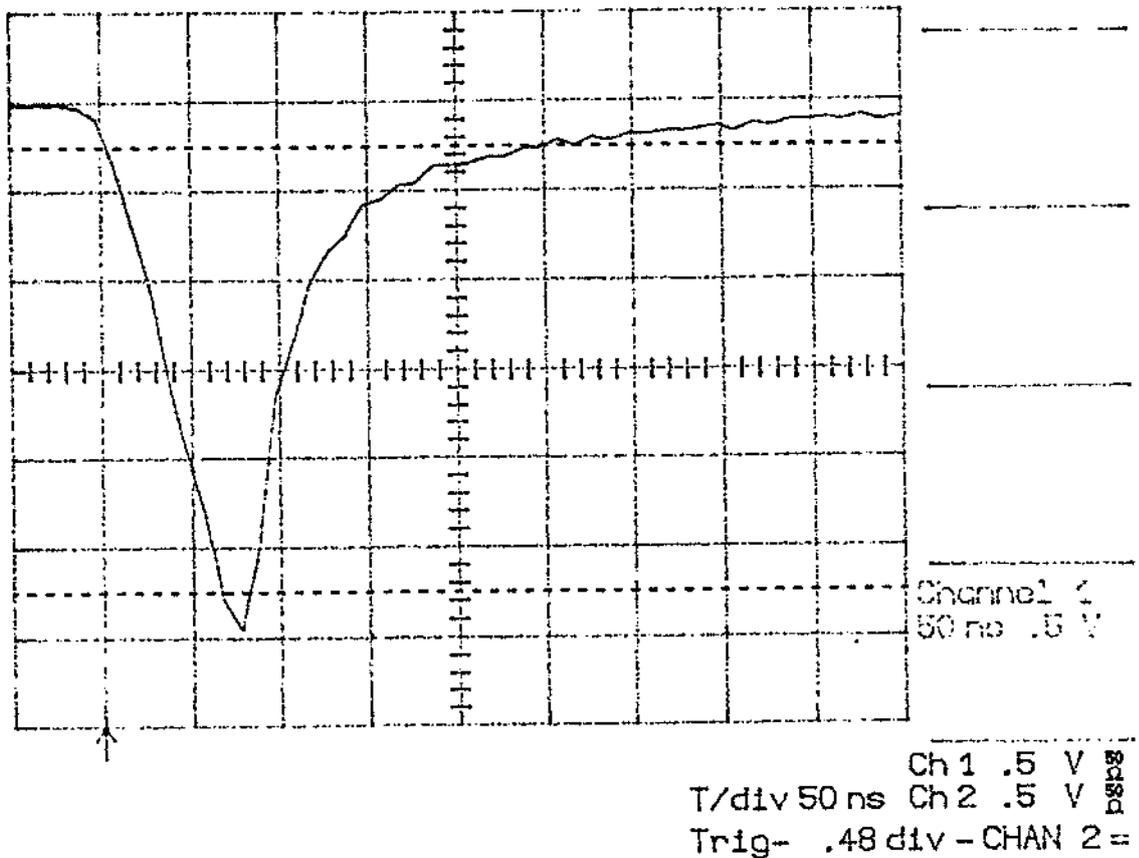
Wie schon zuvor erwähnt, sollte die Beleuchtung der zu testenden Photomultiplier die im SPACAL erwarteten Lichtverhältnisse möglichst genau nachahmen. Das bedeutete kurze, aber intensive blaue Lichtpulse von hoher Folgerate. Die maximal von Elektronen im SPACAL deponierbare Energie ist ca. 27 GeV, wahrscheinlicher sind Energien um ca. 1 bis ca. 10 GeV. Mit der Zahl von 1 bis 2 Photoelektronen pro MeV sind zwischen ca. 2000 und ca. 20000 Photoelektronen pro Puls möglich. Die Dauern derartiger Pulse kann auf ca. 40 ns abgeschätzt werden. Die Szintillatoren des SPACAL geben Licht mit einer Wellenlänge von ca. 420 nm ab, also im blauen Spektralbereich. Die Auslese erfolgt mit einer Frequenz von mehreren Hz. Mit einem Gaslaser hätte man solche Lichtpulse erzeugen können, allerdings wäre

der Betrieb wegen des Gases und eventueller Wartungen wenig anwendungsfreundlich gewesen. Zudem hatte man für das SPACAL-interne Kalibrationssystem schon Beleuchtungen mit LEDs geplant. Normalerweise kann mit LEDs kein intensives Signal erzeugt werden, da dazu nötige Betriebsspannungen um ca. 30 V das lichtemittierende Substrat des Elements innerhalb 1  $\mu$ s zerstören würden. Wird ein LED aber nur für die Zeit von einigen ns mit dieser Spannung beaufschlagt, indem er normal eingeschaltet und dann kurzgeschlossen wird, sind solche Signale zumindest für grüne Dioden möglich ([Sch1]). Die folgende Schaltung erreicht die Zeitschaltung der LED-Spannung durch Gatter-Laufzeiten:



(Fig.7)Prinzipieller Schaltplan eines LED-Pulsers

Blaue LEDs erreichen heute noch keine so hohen Lichtausbeuten wie grüne. Um dennoch intensives blaues Licht auf diesem Wege zu erzeugen, muß der LED für ca. 400 bis ca. 600 ns eingeschaltet werden, was in der gezeigten Schaltung durch zusätzliche Gatter zu erreichen ist.



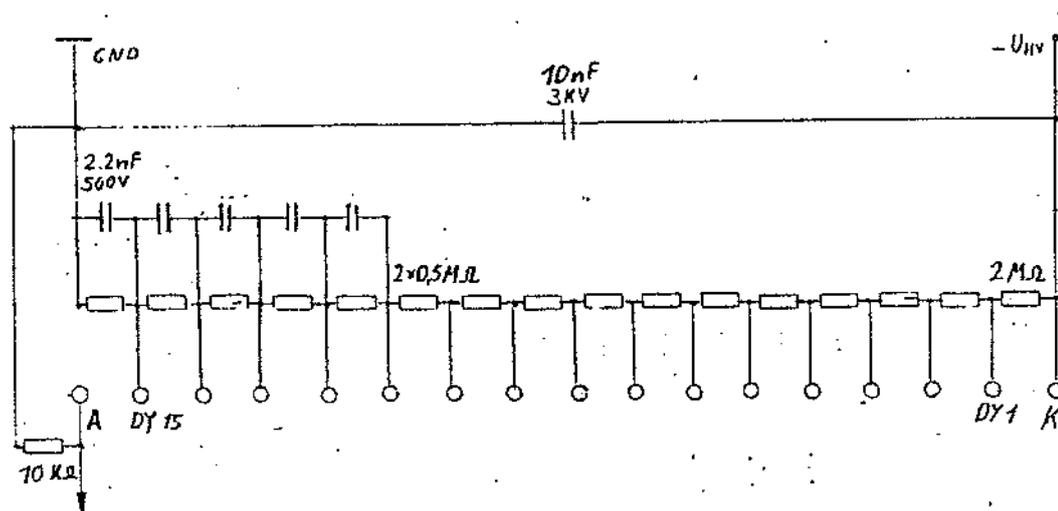
(Fig.8) Aufnahme eines blauen Lichtpulses durch einen R 5505 ohne Magnetfeld ((Zub1))

Wegen der Signalfarbe im Experiment, aber vor allem für die liefervertraglich zugesagte Kontrolle der Multiplier mit blauem Licht, wurden für die Tests blaue LEDs mit den größeren Signalen benutzt. Damit mußten auch die Signalzeitmessungen aufgegeben werden. Die langen Pulse und zugehörige Nebeneffekte hätten jede Multiplizierzeit überdeckt. Andererseits sind Kathodenhomogenitäten mit blauem Licht besser wie mit grünem. Aufgrund dieser Tatsache war das blaue Licht in den Tests auch für das SPACAL wichtig und notwendig.

Die Spannungsteiler der Multiplierbasen wurden als "passive", d.h. Basen ohne eingebaute Verstärkungsschaltung, gebaut. Für das SPACAL werden "aktive" Basen, also solche mit Verstärkung, verwendet, um die aufgenommenen Signale über meterlange Kabel aus dem Detektor zu bringen. Damit die Kalibration der Röhren auch im Detektor absolut korrekt bleibt, hätten eigentlich die gleichen aktiven Basen zu den Tests verwendet werden müssen. Da aber seinerzeit noch keine endgültigen Konzeptionen einer solchen Base existierten und daraus entstehende potentielle Kalibrationsfehler eher gering anzusetzen waren, wurden passive Basen genommen. Mit ihnen gestaltete sich außerdem die Ausleselektronik einfacher.

Die Basen wurden nach Angaben des Herstellers und herkömmlichen Regeln ([Sch1]) konzipiert. Die im folgenden Schaltplan sichtbaren Widerstände erzeugen aus einer angelegten Spannung das Potentialgefälle für alle Dynoden und die Anode. Die Kondensatoren an den letzten 5 Dynoden dienen zum Puffern hoher Elektronenströme. Der Verstärkungsstrom einer Dynode darf höchstens 1% des Querstroms vom Spannungsteiler betragen ([Phi1]). Sonst werden die Spannungsschritte der Dynoden instabil und das Gain des betreffenden Multipliers ändert sich in Abhängigkeit der gemessenen Lichtmenge. Durch Nachliefern nötiger Ströme an die Dynoden und langsames Wiederaufladen bei geringen Strömen verhindern die Kondensatoren das.

Der groß dimensionierte Kondensator zwischen Hochspannung und Masse koppelt die Multiplierspannungen von kleinen Spannungsschwankungen des Versorgungsgeräts ab.



(Fig.9) Prinzipieller Schaltplan einer R 5505-Base

Bis auf eine weitere Dynode waren die Basen für die R 2490- Multiplier identisch.

Obwohl nur maximal 2500 V Spannung für die Photomultiplier anzulegen waren, hielten die Basen bis zu 7800 V ohne Durchschläge zwischen den elektrischen Elementen und Verbindungen aus. Sie boten also ca. 3-fache Betriebssicherheit.

Da wegen Fertigungs- und Bauteiltoleranzen Spannungsgefälle- und damit Gainunterschiede von Multipliern an verschiedenen Basen möglich sind, wurde die Qualität der Spannungsteiler in mehreren Tests überprüft. Dazu wurde jeweils derselbe Multiplier in Basen bei immer gleicher Spannung und Beleuchtung vermessen. Die Kontrolle von Signalströmen mit einem Amperemeter an 68 Basen bewies deren Gleichheit auf durchschnittlich 2%.

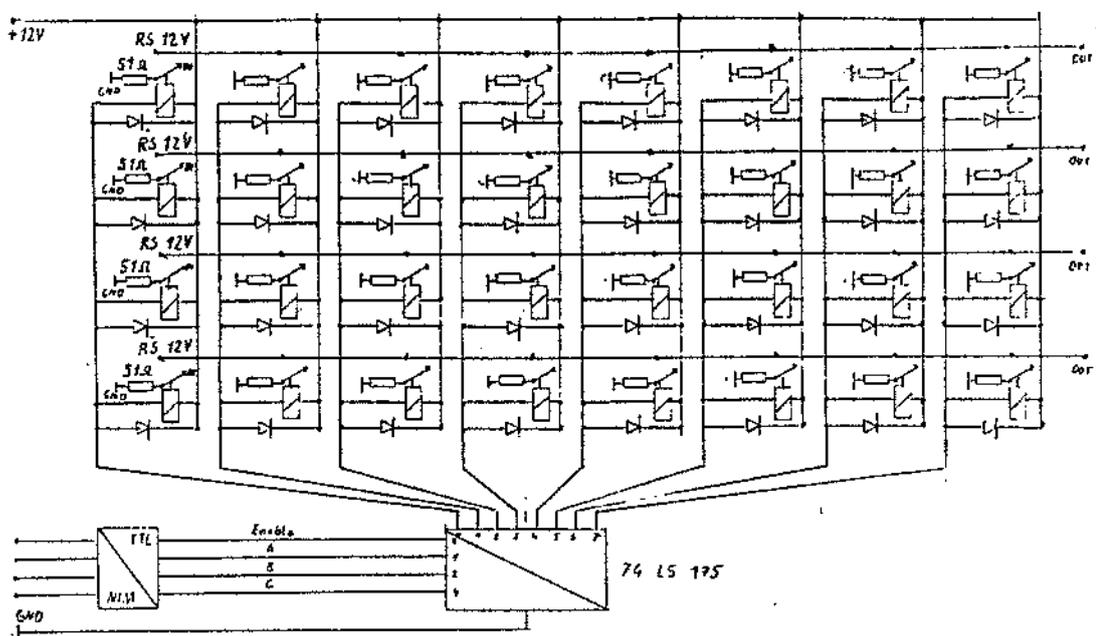
Die Elektronik basierte auf NIM- und CAMAC-Einschubsystemen. Während NIM-Einheiten durch ihr Versorgungssystem oder "Crate" nur mit nötigen Betriebsspannungen versorgt werden, können CAMAC-Module über ihr Crate noch von einem Computer bedient und ausgelesen werden.

Bei diesen Tests war der Rechner ein ursprünglich von der Gesellschaft für Schwerionenforschung GSI zum Gebrauch in Kleinexperimenten entwickelter und derzeit von der Firma Struck vertriebener CAMAC Verbose Controller CVC. Der Rechner läßt sich selbst als Modul in ein CAMAC-Crate einsetzen, ist also ein "stand-alone-System". Er basiert auf einem MC-68030-Mikroprozessor, der mit 20 Mhz betrieben wird. Weiter verfügt er über einen Arbeitsspeicher von maximal 3 Mbyte, mit seinem üblichen Betriebssystem OS-9 noch über ca. 2 Mbyte. Mit OS-9 ist eine Programmierung des Rechners in C möglich. Die Ansteuerung von CAMAC-Einheiten erfordert nur einige spezielle Befehlssequenzen. Zur Programmierung durch ein Terminal und zur Kommunikation mit anderen Rechnern oder weiteren anzusteuern den Einheiten besitzt der CVC zwei serielle Schnittstellen sowie einen Ethernet-, einen SCSI- und einen VME-Anschluß. Für die Multiplier-Tests stellte er ein in jeder Hinsicht gut geeignetes Gerät dar.

Die vom CVC kontrollierten, in den Tests meistgebrauchten CAMAC-Module waren AnalogtoDigitalConverters ADCs, TimetoDigitalConverters TDCs, Outputregister zur Umsetzung von Rechnerbefehlen in NIM- oder TTL-Signale und spezielle Interfaces zur Steuerung von Hochspannungsgeräten.

Häufig eingesetzte NIM-Module waren Timing Units, Fanouts für analoge und digitale Signale, Shaper, Delays und Diskriminatoren. Zusätzlich wurden Spezialmodule wie automatisch beschaltbare Multiplexer ([Sch1]) benutzt.

Bei den Testmessungen wurden mehr Multiplier in einem Zuge vermessen, als ein ADC auslesbare Signaleingänge besitzt. Da die Multiplier nacheinander getestet wurden, wären mehrere ADCs mit ausreichend vielen Eingängen eine Lösung gewesen. Rationeller war die Umlegung von mehreren Multiplier-Ausgängen auf jeweils nur einen ADC-Eingang. Zu diesem Zweck wurden die Multiplexer gebaut ([Sch1]). Sie enthalten einen Decodierer zum Empfang von Schalt- und Auswahlsignalen eines NIM-Outputregisters. Dieser legt je einen von 8 Eingängen auf eine Ausgangsbuchse. Das geschieht in vier Schalteinheiten gleichzeitig. Da das Umlegen der Signale durch Relais erfolgt, muß bei der Ansteuerung des Moduls die Einstellzeit dieser Bauelemente zu einigen ms einkalkuliert werden. Um Signale im Multiplexer nicht zu verfälschen, sind die Verbindungen der Buchsen zu den Relais so kurz wie möglich gehalten. Der folgende Schaltplan zeigt das Aufbauprinzip:



(Fig.10) Schaltplan einer Multiplexer-Einheit

Der Gesamtaufbau des Teststands ohne Magnetfeld wurde hauptsächlich von seinen zu den Messungen nötigen technischen Komponenten bestimmt.

Zwei zusammenmontierte Versteller des Typs M-535 der Firma PhysikInstrumente PI dominierten die Meßapparatur. Mit jeweils 300 mm Fahrweite konnten sie in horizontaler X- und vertikaler Y-Richtung ein Gebiet von  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  mit einer Positioniergenauigkeit von 0.003 mm erfassen. Die Fahrtische wurden mit einem 825-Motor-Power-Amplifier von PI betrieben. Ihre automatische Steuerung besorgte der CVC über einen 804-Motor-Controller von PI als Interface. Die Befehlssequenzen ([Kle1]) ([Sch1]) zur Verwendung der Versteller umfassen das Anfahren eines Nullpunktes, verschiedener definierter Positionen und 0.001 mm-Schritte.

Der durch die Versteller abfahrbare Bereich gab die Anzahl von in einer Testreihe vermessbaren Multipliern vor. Von den kleineren ließen sich so maximal  $8 \times 8$ , also 64 Stück in einer Testreihe überprüfen. Da damit die von den Verstellern erreichbare Fläche an sich ausgefüllt war, mußten die größeren R 2490 in einer Reihe von 4 Stück über den R 5505 montiert vermessen werden. Um diese Reihe mit den Verstellern abfahren zu können, wurde der vertikale Hub durch eine Kleinschiene auf dem entsprechenden Fahrtisch variabel gemacht. Diese künstliche Verlängerung des Fahrtisches mußte je nach zu vermessenem Röhrentyp manuell größer oder kleiner eingestellt werden. Damit wurden Tests der R 2490 ohne zusätzliche Auf-

bauten möglich.

Alle Multiplier wurden in einem Doppelrack aus Aluminium von 565 mm Höhe, 340 mm Länge und 43.6 bis ca. 44.8 mm Breite montiert. Die R 5505 wurden mit von Platten gequetschten O-Ringen an den Schutzhüllen ihrer Basen festgeklemmt. Die R 2490 konnten, da in nur einer Reihe angeordnet, durch Klemmschrauben an ihre Basenhüllen befestigt werden. Das gesamte Rack war exakt parallel zu den Fahrwegen der Versteller ausgerichtet und so mit ihnen auf einer massiven Grundplatte verschraubt. Damit auch die Kathoden der Multiplier dieser Ausrichtung folgten, konnte bei ihrem Einbau ein entsprechender Anschlag am Rack befestigt werden.

Die genaue Ausrichtung aller Komponenten einschließlich der Testmultiplier zueinander war für das von den Verstellern bewegte Beleuchtungssystem entscheidend. Unterschiedliche Abstände der Teile hätten dazu geführt, daß die Lichtmenge für eine Röhre und damit auch ihre Testergebnisse abhängig von ihrer Position im Rack gewesen wären.

Das Beleuchtungssystem an den Verstellern bestand aus zwei je 1 mm durchmessenden Kunststofflichtleitern mit polierten Enden, die von LED-Pulsern Licht erhielten. Sie waren in unterschiedlichen Abständen von ca. 10 mm und ca. 0.2 mm zur Fläche aller Multiplierkathoden montiert. Da ein Lichtkegel im und nach Austritt aus dem Leiter auf dessen Totalreflexionswinkel von typisch ca.  $40^\circ$  begrenzt ist, konnte mit der Faser größeren Abstands eine fast vollständige (Kegeldurchmesser ca. 16.8 mm), mit der anderen eine punktuelle (Kegeldurchmesser ca. 0.34 mm) Ausleuchtung einer R 5505-Multiplierkathode erreicht werden. Das volle Beleuchten einer Kathode war zur Kalibration, das Punktuelle zur Homogenitätsmessung an einer Röhre notwendig.

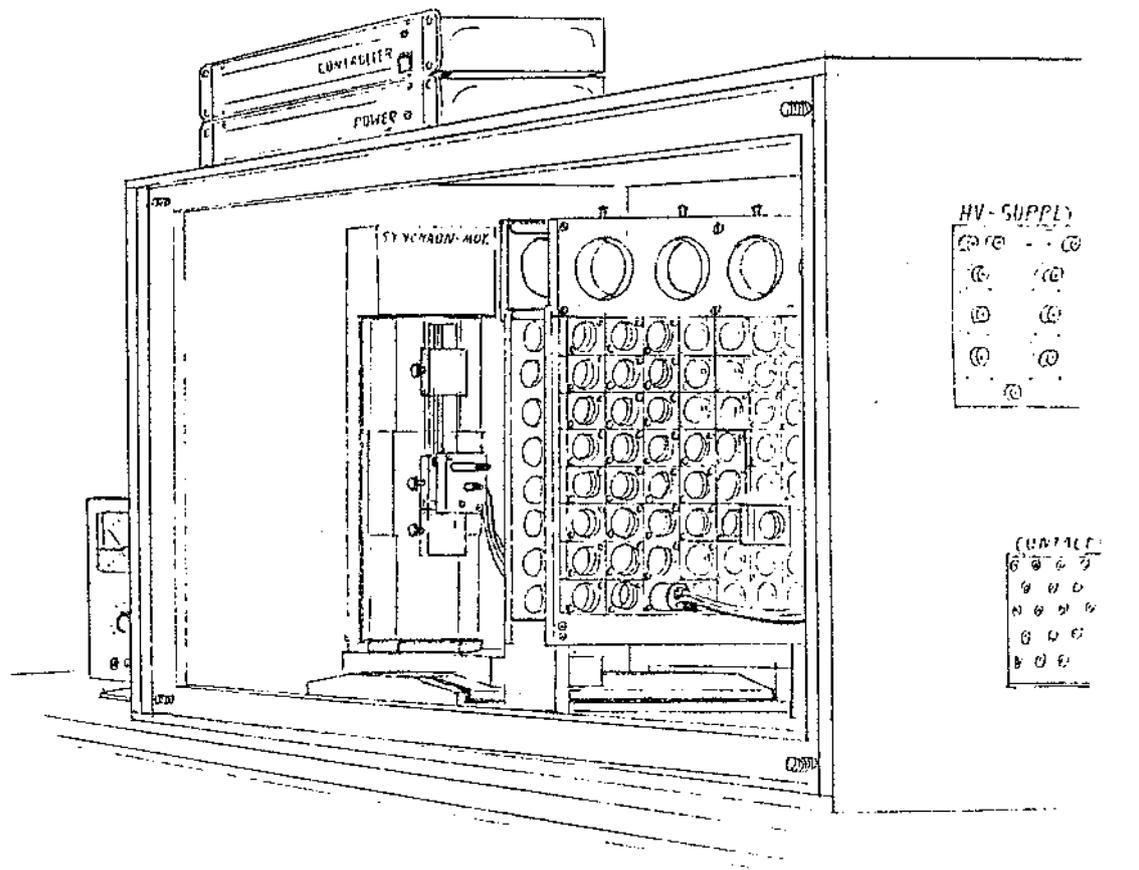
Diese Art der Beleuchtung hatte allerdings ihre eigenen Probleme. Da die Kathoden der R 5505 und R 2490 im Betrieb stark negativ geladen waren, entstanden ebenfalls negative Influenzladungen auf den Außenseiten ihrer Kathodenfenster. Wegen der nahen Lichtleiter wurde dann auf diese, insbesondere auf die Homogenitätsfaser, positive Ladung influenziert. In gewissen Abständen ergaben sich so Entladungen. Das Licht dieser Mikroblitze registrierten betroffene Multiplier als kurze (einige ns), hohe (um 1 V) Pulse. Sie ließen sich mit einiger Geduld gut mit einem Oszilloskop beobachten. Um die Blitze zu verhindern, wurden die beiden Fasern auf das gleiche Potential wie die Kathode gelegt, vor der sie sich befanden. Dadurch ging zwar eine Meßposition für einen R 5505-Multiplier verloren, aber die Tests konnten nicht mehr von Mikroblitzen verfälscht werden.

Um mögliche Schwankungen der Lichtmengen feststellen zu können, wurden die LEDs als Lichtquellen mit zwei verlässlichen Photomultipliern vom Typ Philips AVP und SRC 75 B01 referenziert. Wieder erfolgte die Lichtübertragung mit Lichtleitern von 1 mm Durchmesser. Um jeweils 3 Leiter an einen LED zu koppeln, wurden die Fasern als dreieckiges Bündel in einer Metallhülse zusammengefaßt, mit dieser poliert und dann in eine Bohrung des LED-Körpers geklebt. Die

ausgefräste Bohrung reichte bis auf einige 0.1 mm an das Substrat des LEDs heran. Die Befestigung der Fasern erfolgte mit Sekundenkleber. Um die Einkopplung von Restlicht zu vermeiden, wurde die LED-Faser-Kombination mit schwarzem Schrumpfschlauch und dunklem Silikonkitt lichtdicht umschlossen. Die Lichtleiter selbst besaßen noch optische Abschwächer, also verstellbare Unterbrechungen zu einer eventuell nötigen Reduktion der Lichtmengen.

Die zum Betrieb der so präparierten LEDs verwendeten Pulser wurden von einem Transformator NGL 20 der Firma Rohde und Schwarz versorgt und über ein NIM-Outputregister vom CVC beschaltet.

Abgesehen von Pulsern und LEDs befanden sich alle beschriebenen apparativen Meßsysteme in einer lichtdichten Kiste zum Schutz der Photomultiplier vor Tages- oder Restlicht. Die Kiste von 1025 x 777 x 766 mm<sup>3</sup> Größe bestand aus Holz und war inwendig mit schwarzem Filz ausgekleidet. Durch entsprechende Stecker konnten alle Multiplier mit Spannung versorgt und ausgelesen werden. Durch eine weitere Öffnung konnten die Versteller versorgt und gesteuert sowie die Lichtleiter in die Kiste geführt werden. Die lichtdicht verschließbare, seitlich der Kiste angebrachte Hauptluke ermöglichte das Bestücken des Racks mit Multipliern und Wartungsarbeiten. Das folgende Bild vermittelt einen Eindruck von der Testapparatur ([Kle1]):



(Fig.11) Die Apparatur für Tests ohne Magnetfeld

Links in der Lichtschutzkiste die 2 aufeinandermontierten Versteller,  
rechts das Doppelpack zur Halterung der Photomultiplier.

Die Steuerung der Anlage erfolgte vom CVC-Rechner aus. Über ein LeCroy I 2132-Interface konnte dazu zunächst ein 32-kanaliges LeCroy HV4032A-Hochspannungsgerät beschaltet werden. Als modulares Gerät hatte letzteres in der Konfiguration für diese Tests 16 getrennt steuerbare Kanäle. Damit keine Kalibrationsfehler der Röhren durch inkorrekt gegebene Hochspannungen auftreten konnten, wurden alle Kanäle von der Steuerung auf ca.  $\pm 1\%$  genau aufeinander abgestimmt. 2 Kanäle versorgten die Referenzen, die übrigen die jeweils in Gruppen zu 4 bis 6 zusammengefaßten anderen Multiplier.

Durch das Interface der Versteller konnte weiter jede Position vor und auf den Multiplierkathoden angefahren werden. Definierte Positionen im Rack wurden mit

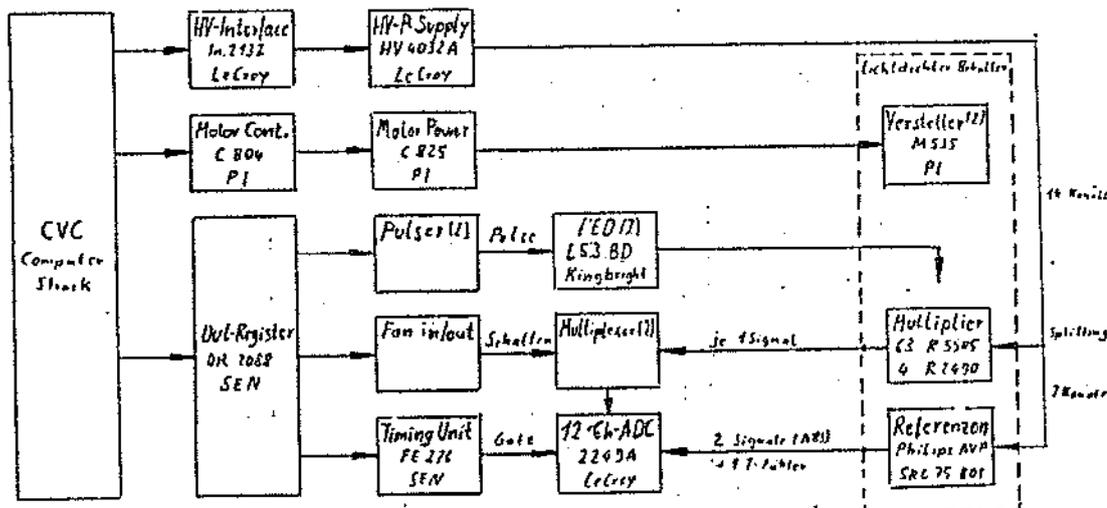
einer Genauigkeit von mindestens ca. 0.5 mm erreicht. Schlecht eingestellte Bewegungen der Versteller hätten insbesondere eine hochaufgelöste Homogenitätsmessung sinnlos gemacht.

Über ein SEN OR 2088-Outputregister wurden die Pulser eingeschaltet. Pro Vermessungspunkt wurden jeweils 100 Pulse in ca. 0.1 s abgegeben. Durch Feineinstellungen der Pulserspannungen und Lichtmengen wurden die Pulshöhen von Test- und Referenzmultipliern in einen sinnvollen Meßbereich des verwendeten ADCs gelegt, um Bereichsüber- oder Unterschreitungen einiger besonders guter oder schlechter Multiplier zu verhindern.

Das gleiche Outputregister beschaltete über ein Fanout für digitale Signale zwei Multiplexer-Module, um die Signale eines der zu testenden Multiplier auf den ADC zu bringen. Nur die Referenzen sowie ein zusätzlicher Temperaturfühler hatten festgelegte ADC-Eingänge, da sie bei jeder Messung mitausgelesen werden mußten. Wiederum mit diesem Register gab der CVC auch das Gatesignal für den ADC, das mit einer SEN FE 276-Timing Unit auf die für das blaue Licht notwendige Länge von ca. 400 ns gebracht wurde.

Nach Signalempfang konnte der CVC den benutzten 12-Kanäligen LeCroy 2249A-ADC direkt auslesen. Der ADC konvertierte empfangene Ladungen von Signalen in maximal 1024 Einheiten oder channels zu je 0.25 pC. Dabei wurde das Pedestal von 20 - 60 channels eigens immer vor Signalen gemessen und vom CVC sofort vom ausgelesenen Meßergebnis abgezogen. Um Kalibrationsfehler der Multiplier durch ADC-Kanäle, die untereinander und im Anstieg von Kanälen nicht linear sind, zu kennen, wurde die Linearität der Kanäle auf ca.  $\pm 4\%$  vermessen und eingerichtet, während kanalintern laut Hersteller mit ca.  $\pm 2\%$  zu rechnen war.

Das nachstehende Blockschaltbild gibt einen Überblick der Steuerelektronik:



(Fig.12) Die Elektronik der Testapparatur

Der Ablauf der Messungen war sowohl für die R 5505 als auch für die R 2490 im Prinzip gleich. Abweichungen in den Testprogrammen ([Sch1]) sind im folgenden in Klammern gesetzt.

Zuerst benötigte das Programm des CVC eine Datenbank, die angab, welcher Multiplier sich wo im Rack fand. Zudem waren Ausführung und Schrittweite der Homogenitäts- sowie Takt und Zeiten der Stabilitätsmessung anzugeben. Daraufhin wurden die Versteller initialisiert, Hochspannung an die Referenzen gelegt und von diesen dann Kontrollsignale genommen. Waren die Werte im Rahmen der ursprünglich vorgenommenen Einstellungen, konnten die Testmessungen gegebenenfalls nach einer Anwärmphase der Multiplier beginnen. Das Anwärmen der Multiplier über üblicherweise 1 h bei 2000 V sollte Gainschwankungen der Multiplier nach dem Anlegen der Spannung zu Beginn der Messung verhindern. Zum Test selbst wurde dann Multiplier nach Multiplier angefahren und jeweils Datenfiles unter der entsprechenden Seriennummer mit Position und Zeit der Messung angelegt. Bei jeder Röhre wurde die erste Spannung zur Aufnahme der Kalibrationsrampe auf 1500 V (1200 V) gelegt. Nach Bepulsen und Signalnahme wurde bei der Kalibration 1 s gewartet, um den Prozeß zu wiederholen. War der nächste Wert auf  $\pm 1\%$  mit dem vorigen gleich, konnte als sicher angenommen werden, daß der betreffende Multiplier sein Gain schon auf die anliegende Spannung eingestellt hat und ein korrekter Wert ermittelt worden war. Praktisch mußte nie länger als 1 s gewartet werden. Zusammen mit der Spannung und der X- und Y-Positionswerte der Röhre im Rack, den Referenzwerten und den Daten des Temperaturfühlers wurde der letzte Signalmittelwert mit Breite in ADC-channels ins Datenfile des Multipliers übertragen. Dasselbe wiederholte sich, wenn die Spannung des Multipliers um je 10 V erhöht wurde, bis 2300 V oder aber das Ende des ADC-Meßbereichs erreicht wurden. Je nach Gain des vermessenen Multipliers wurde innerhalb der Rampe der ADC-Wert einer Referenz erreicht, der bei ca. 720 channels lag. Durch einfachen Dreisatz unter Bezugnahme auf den bei 10 V geringeren Spannung gemessenen Wert konnte die Hochspannung, die zur exakten Übereinstimmung der Werte führt, errechnet werden. Wegen der kleinen Spannungsschritte konnte zu dieser Rechnung ein linearer Zusammenhang von Gain und Spannung angenommen werden. An dieser Kalibrationsspannung wurde dann eine Bestimmung des Absolutgains des Photomultipliers mit 10000 Lichtpulsen durchgeführt.

Außerdem wurde an dieser Spannung nach abgeschlossener Aufnahme der Kalibrationsrampe die Homogenitätsvermessung der jeweiligen Kathode durchgeführt. Normalerweise wurde dafür ein Quadrat über einer Multiplierkathode von 24 24 mm (52 52 mm) mit 49 49 (53 53) Schritten zu 0.5 mm (1 mm) in einer Schlangenlinie 49 Y -1 X -49 Y ... abgefahren. Die Mittelwerte und Breiten der Pulssignale pro Punkt konnten bei fester Spannung direkt mit Positionsangaben auf der Kathode und sonstigen Daten wie bei der Kalibration ins Datenfile der Röhre geschrieben werden.

Nach Abschluß der Homogenität des letzten vom Programm zu vermessenden Multipliers wurde die Stabilitätsmessung begonnen. Im Abstand von meist 30 min. wurden alle Röhren kurz nacheinander von den Verstellern angefahren und unter ihrer Kalibrationsspannung bepulst. Mit der jeweiligen Meßzeit wurden die so erhaltenen Werte im gleichen Format wie bei der Kalibration ins jeweilige Datenfile geschrieben. Zwischen den Messungen wurden die Multiplier auf ca. 1200 V gehalten. Diese Prozedur wurde 73 mal (30 mal) wiederholt. Danach schaltete der CVC alle Hochspannungen aus, bevor das Programm endete.

Bei einer vollen Bestückung der Apparatur mit 63 (4) Multipliern dauerte der gesamte Test ca. 108 h (16 h).

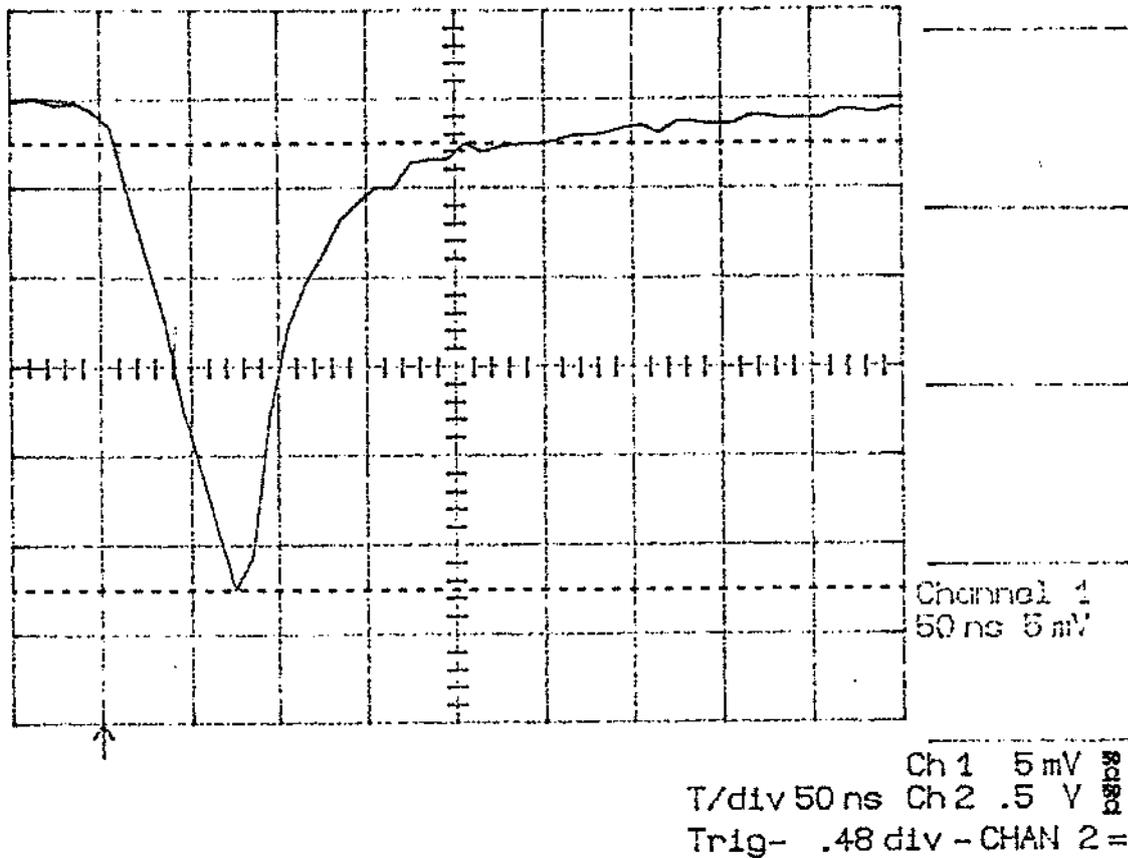
Die gewonnenen Daten wurden dann vom CVC auf andere Rechner zur Speicherung, Weiterverarbeitung und graphischen Darstellung überspielt.

### 3.3 Die Apparatur für Tests mit Magnetfeld

Mit den Erfahrungen aus dem vorangegangenen Teststand wurde diese Apparatur zum Betrieb am DESY in Hamburg aufgebaut. Die Durchführung der Multipliertests in Hamburg war nötig, da in Heidelberg kein Magnet für Felder bis 1.2 T zur Verfügung stand.

Der Testmagnet in Hamburg mit dem Namen Rehabeam war ein Strahlführungsmagnet eines aufgelösten Speicherringexperiments. Das fast 21 t schwere Gerät lieferte mit 1500 A und 400 kW ein maximales Magnetfeld von 2.07 T. Bis in Bereiche von etwa 1.2 T war die Erregung des Magneten auf wenigstens 0.1% linear, die eingestellten Magnetfelder stimmten auf einige 0.001 T. Der nutzbare Polspalt war 1975 mm lang, dafür aber nur 483 mm breit und 168 mm hoch.

Diesen Maßen mußte die Vermessungsapparatur der Röhren angepaßt werden. Teile wie Multiplierbasen, LED-Pulser und Steuerelektronik waren, wie schon gesagt, auch schon zu einem gewissen Grad vorgegeben.

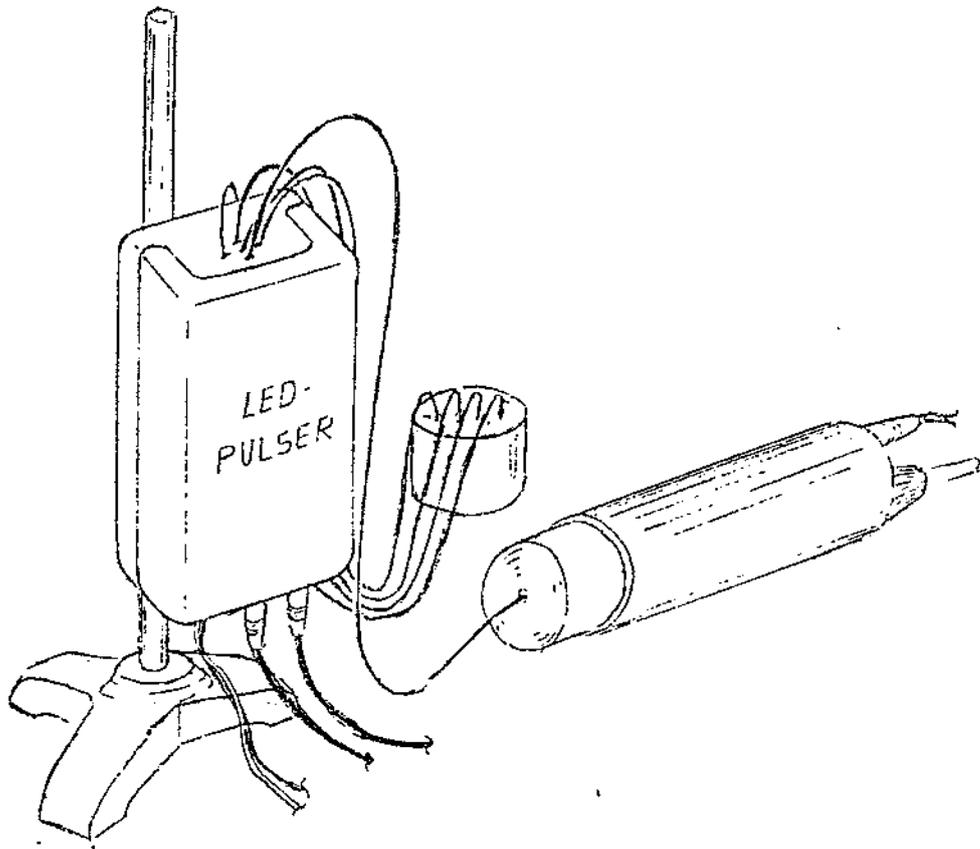


(Fig.13) Aufnahme eines blauen Lichtpulses durch einen R 5505 mit Magnetfeld ([Zub1])

Während aber die Basenkonzeption praktisch vollständig übernommen werden konnte, war das gerade für das Beleuchtungssystem nicht möglich. Für die Beleuchtung im Teststand ohne Feld genügten zwei Lichtquellen, die zu den für die jeweiligen Tests notwendigen Punkten gefahren wurden. Im Magnetfeld kam außer der recht ungenauen pneumatischen Bewegung von Lichtquellen nur der manuelle Betrieb in Frage. Für wenige Verstellungen pro Meßreihe ließ sich eine Präzisionsmechanik zu genauer Positionsanführung machen, aber zur Aufnahme einer Homogenität mit mehr als 5 bis 10 Punkten war dies schon aus Platzgründen undenkbar. Daher sollte die Anzahl der Lichtquellen erhöht werden ([Sti1]): ein festes Schema von je 8 in drei konzentrischen Ringen um eine weitere angeordnete Lichtquellen sollten die Homogenitätsmessung zumindest an den R 5505 ermöglichen. Für die R 2490 hingegen wurde die Homogenitätsmessung ganz aufgegeben. Man vertraute darauf, daß die einander in vielerlei Hinsicht so ähnlichen Multipliertypen den Schluß von den R 5505-Homogenitäten mit und ohne Feld auf die der R 2490 zulassen würden. Das geplante Schema sollte dann manuell von Multiplier zu Multiplier bewegt werden und direkt auf deren Kathoden abgesetzt werden. Die Mit-

telung über Signalwerte von Pulsen aller 25 Lichtquellen würde einer vollständigen Kathodenausleuchtung, also einer Kalibration entsprechen. Die Homogenität setzt sich aus Signalwerten von Pulsen der einzelnen Lichtquellen zusammen. Wegen der zu vermessenden großen Stückzahlen der kleineren Röhren wurde auch diese Prozedur weiter rationalisiert. So sollten 4 Multiplier gleichzeitig vermessen werden. Dies ließ sich ähnlich wie beim vorangegangenen Aufbau durch insgesamt 25 LEDs mit je 4, unter Hinzunahme einer Referenzierung mit je 5 angeschlossenen Lichtleitern verwirklichen. Anders als zuvor konnte die Auskopplung des Lichts der LEDs aber nicht willkürlich auf die Fasern verteilt sein. Zur Referenzierung einer Lichtmenge sind solche Unterschiede gleichgültig, da nur Schwankungen in der Lichtmenge nachgewiesen werden sollen. Falls nötig, können bestimmte Signalwerte durch elektrische Abschwächer und anderes eingestellt werden. Sollen aber mehrere Messungen mit ausgekoppeltem Licht übereinstimmen, so sollten die Lichtmengen wenigstens nur um einen Faktor 2 oder 3 differieren. Um das für die Multipliertests zu erreichen, mußten spezielle Versuche mit einem eigenen kleinen Aufbau gemacht werden.

Letztlich sollte dieser Aufbau den genauen Vergleich von je 5 Lichtleitern mehrerer Versuchskonfigurationen ermöglichen. Dazu wurde zunächst ein LED-Pulser in einer zweckentfremdeten, lichtdichten Schalterkiste untergebracht, da die Versuchs-LEDs nicht mit Schrumpfschlauch und dergleichen abgedichtet werden sollten. Aus einem Durchlaß an einem Ende der Kiste wurden Lichtleiter nach außen gebracht. Ein R 5506 (Strahlungsharter R 5505) mit Base und vor seiner Kathode angebrachtem Lichtmischer in einer lichtdichten Röhre nahm das Licht einzelner Fasern auf. Um über die gerade nicht vermessenen Fasern kein Restlicht in den Multiplier zu bekommen, wurden sie in Bohrungen in einem Kunststoffblock gesteckt. Das Bild zeigt den Aufbau:

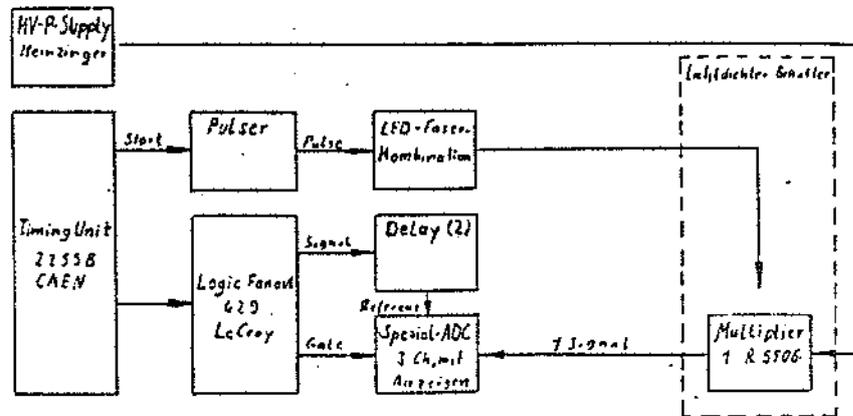


(Fig.14) Prinzipieller Aufbau der Faservermessungsanlage

Das Gehäuse enthält den LED-Pulser. 4 Fasern führen einmal zu einem Lichtschutz für ihre Enden, eine geht auf einen Multiplier.

Der LED-Pulser wurde von einem normalen Transformator versorgt und von einer als Pulsgenerator geschalteten CAEN 93 B-Timing Unit gestartet. Über ein analoges Fanout erzeugte die Timing Unit sowohl Gates für einen ADC als auch zusammen mit einem Shaper und einem Delay ein festes Referenzsignal. Ein ADC konnte Referenz- und das Meßsignal des unter Spannung stehenden Multipliers auslesen. Richtig eingestellt, konnte aus dem Quotienten beider Größen direkt eine Prozentangabe für jede von 5 Fasern erhalten werden, die die erforderlichen Vergleiche möglich machte. Der verwendete ADC war eine 3-Kanälige Sonderanfertigung, die ehemals für ganz ähnliche Zwecke gebaut worden war ([Sch2]). Zwei Kanäle nahmen Signale auf, der dritte ermöglichte eine Division der Signale. Über eingebaute Wandler waren die digitalen Werte auf analogen Anzeigen ablesbar, was einfache und doch genaue Ergebnisse zuließ. Der Schaltplan zeigt die Elektronik

dieses Versuchsaufbaus:



(Fig.15) Schaltplan der Faservermessungsanlage

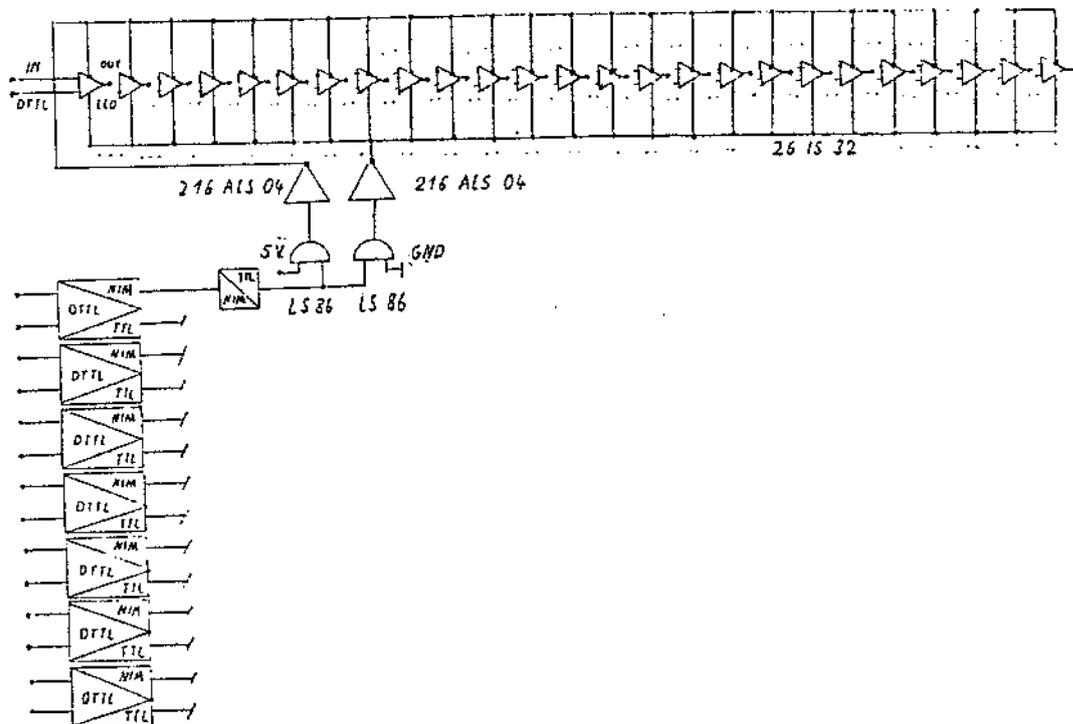
Zu den Versuchen wurden Kunststofflichtleiter von 0.5 mm Durchmesser eingesetzt. Es zeigte sich, daß deren Enden durch maschinelles Schleifen mit Papier Körnung 1500 und Wasserspülung ausreichend poliert waren. Als Klebstoff erwiesen sich Harz und Härter 301 von Epoxy Technology Inc. im Mischungsverhältnis 4 zu 1 als gut geeignet.

Allerdings zeigte die ursprünglich geplante Verklebung der Fasern in Löchern im LED-Körper mit Kreuzanordnung Mängel. Da die meisten Fasern zu weit vom Substrat des LEDs entfernt lagen, war die Lichtausbeute schlechter als erwartet. Der Versuch, die Fasern als pentagonales Bündel in nur eine zentrale Bohrung des LEDs zu kleben erhöhte die Ausbeute, aber auch die Unterschiede in der Auskopplung. Die Befestigung des Substrats an einem Bein des LEDs störte immer eine Faser. So wurde schließlich ein 1,5 mm durchmessender, beidseitig polierter Lichtleiter von ca. 200 mm Länge mit Metallhülle in einer Bohrung des LED-Körpers verklebt, der als Lichtmischer für die Auskopplung von Licht in die fünf dünnen Fasern dient. Diese wurden mit einer weiteren Metallfassung als pentagonal angeordnetes Bündel am freien Ende des großen Lichtleiters verklebt. Die kleineren Lichtleiter waren 3000 mm lang. Diese Konfiguration machte die geforderte Gleichheit der Lichtausbeute von 5 Fasern erreichbar. Bei der Kleinserien-Fertigung der Faserbündel wurden alle Schnittstellen LED-Kontakte, LED-zu-Faser und Faser-an-Fasern mit Schrumpfschlauch und Silikonkitt abgedichtet.

Die Fasertestanlage wurde im Weiteren bei Experimenten zu Krümmungseffekten an Lichtleitern ([Kas1]) verwendet.

Die 25 für diese Testanlage notwendigen LED-Pulser wurden zusammen mit Transformatoren zu ihrer Versorgung in einer Kiste aus verlöteten, kupferbeschichteten

Platinen untergebracht. Die Kupferhülle schirmte andere Geräte gegen mögliche Störfelder ab, die von Pulsen mit 400 ns Länge erzeugt werden konnten. Damit die Pulser für Zeitmessungen zwischen Beleuchtung und Antwortsignal der Multiplier brauchbar waren, mußten sie ihr Startsignal alle zur gleichen Zeit bekommen und bestätigen können, d.h. die Längen der entsprechenden Kabel hatten gleich zu sein. Daher wurden die Pulser in der Kiste zu einem Kreis angeordnet, in dessen Mitte eine besondere Beschaltung installiert war. Diese machte es möglich, einen oder mehrere LED-Pulser über ein DTTL-Signal anzuwählen und dann mit einem weiteren Signal zu starten. Die Schaltung ist unten gezeigt:

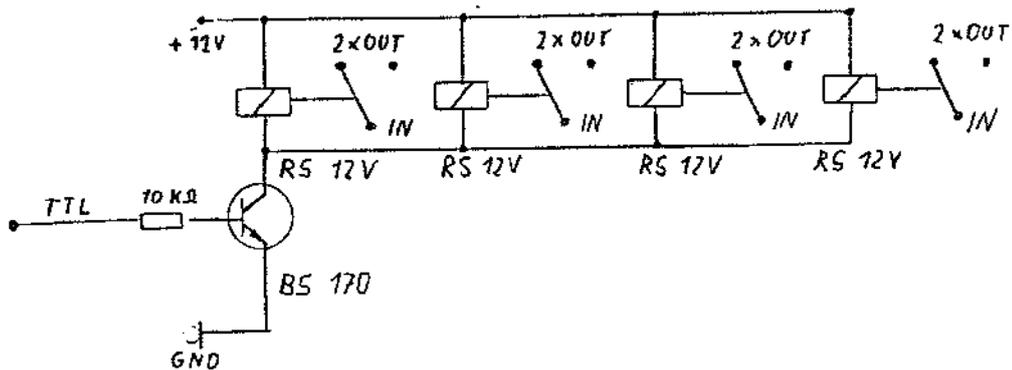


(Fig.16) Schaltplan der LED-Pulser-Steuerung

Zur Übersetzung der zum Betrieb des ganzen Aufbaus vorgesehenen DifferentialTTL-Signale in TTL- und NIM-Signale umfaßte die Pulser-Einheit auch noch einen Konverter.

Die Steuerelektronik des gesamten Teststands konnte wieder in Anlehnung an diejenige der Testapparatur ohne Magnetfeld aufgebaut werden. Das wichtigste Element war wieder ein CVC mit fast denselben Spezifikationen wie der schon beschriebene. Nur sein Speicherplatz war um 1 Mbyte größer wie das des anderen Modells.

Die Module der Elektronik waren gegenüber den schon geschilderten noch um eine Signal-Umschalt-Einheit oder Switcher-Box ([Sch2]) erweitert worden. In Aufbauten kann es nötig werden, einen Meßsignal-Eingang auf nacheinander auf zwei verschiedene Ausgänge zu legen. Die Box macht dies durch entsprechendes Beschalten von Relais mit TTL-Signalen möglich. Wieder muß beim Betrieb die Einstellzeit der Relais mit berücksichtigt werden. Die Schaltung ([Sch2]) ist wie folgt gemacht:



(Fig.17) Schaltplan der Umschalt-Einheit oder Switch-Box

Ansonsten erfolgte der Aufbau mit bekannten Elementen.

Der Aufbau der Magnetfeld-Testapparatur für die kleineren R 5505-Multiplier wurde noch mehr als die andere von ihrer mechanischen Komponente bestimmt. Um die 4 vorgesehenen Beleuchtungsmasken zu den jeweiligen Multipliern einer Meßreihe zu bringen, wurden sie auf einen Gleitschlitten montiert. Dieser ließ sich durch einen Stab auf Führungsschienen bewegen, so daß 8 Viererreihen von Multipliern, insgesamt also 32, in einem Test vermessen werden konnten. Um die Masken immer korrekt auf den Multiplierkathoden plazieren zu können, rasteten Zentrierstifte des Schlittens in zugehörige Vertiefungen bei jeder Multiplierreihe ein. Das ermöglichte eine Positionsgenauigkeit von wenigstens 0.1 mm, was letztlich der Genauigkeit der Homogenitäts-Meßpunkte zugute kam. Durch Drehen des Stabes nach Einrasten der Zentrierer bei einer Reihe konnte der Schlitten an seiner Position verriegelt werden. Das sicherte die Beleuchtungsmasken gegen eventuelle Verrückungen während des eigentlichen Meßvorgangs ab. Da die Masken zur Fahrt von Multiplierreihe zu Multiplierreihe über der Ebene der Röhrenkathoden laufen, zu Messungen aber auf den Kathoden sitzen mußten, wurden sie gleichzeitig mit der Verriegelung auf die Kathoden gesenkt oder beim Entriegeln auch wieder gehoben. Dazu wurde die Drehbewegung des Bedienstabes beim Verriegeln über Zahnräder an Exzenter am Schlitten übertragen, die die Masken trugen. Um Höhertoleranzen der Röhren auszugleichen, war jedes Beleuchtungsschema einzeln gelagert und wurde zudem durch Federn an die zugehörige Kathode gepreßt. Das ver-

hinderte verschiedene Abstände der Lichtquellen von den Kathoden der zu vermessenden Röhren. Neben der so erreichten Sicherstellung korrekter Ergebnisse in Kalibration und Homogenität der Multiplier wurden mit der Mechanik auch falsche und für die Röhren vielleicht schädliche Bedienungsabläufe bei der Bewegung der Masken verhindert. Zudem konnten die schon erwähnten Mikroblitze nicht mehr auftreten, da die Multiplierkathoden und die Beleuchtung festen Kontakt hatten. Die Ebene, auf der der Gleitschlitten lief, wurde von Öffnungen für die Kathoden der zu vermessenden Multiplier durchbrochen. Durch Ringe in den Öffnungen konnten die Multiplier für die Beleuchtungsmasken zusätzlich zentriert werden. Diese Ebene bildete die oberste in einem Kasten, der die Multiplier auch vor Licht schützte. In einer zweiten Ebene darunter wurden die Kolben der Multiplier untergebracht. Um die Multiplier für Messungen in ihren Basensockeln zu montieren, war die erste Ebene mit Schlitten abnehmbar gestaltet. Die Basen selbst waren in der dritten Ebene des Kastens fest eingebaut. Vom Steuerprogramm her wurde die Gleichheit der Ausgangssignale aller Basen auf mindestens ca.  $\pm 1\%$  eingestellt. Hier verliefen auch Versorgungsspannungs- und Signalleitungen der Multiplier. Diese Ebene war durch Abschrauben des Kastenbodens erreichbar. An einer Seitenwand des Kastens befanden sich die entsprechenden Stecker und Öffnungen zur Durchführung von Zuleitungen, Bedienstab und der Lichtleiter für die Beleuchtungsschemen.

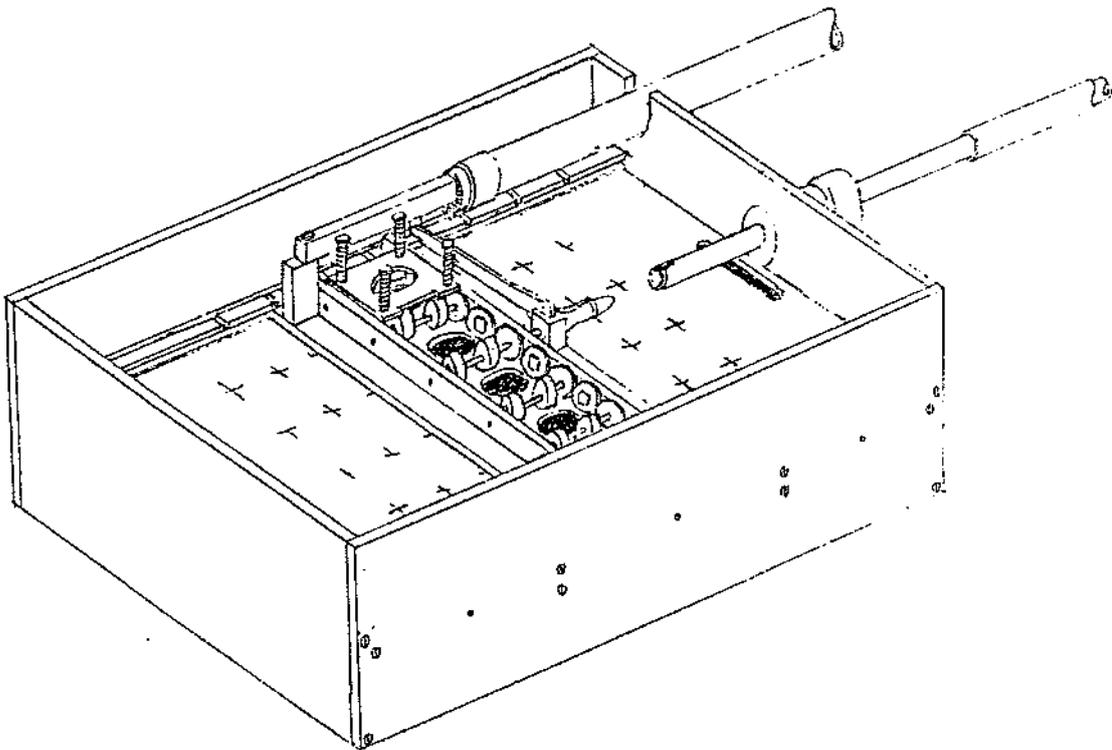
Diese Beleuchtungsmasken bestanden aus einem Metalltisch zur Lagerung in der Bewegungsmechanik und einem Kunststoffeinsatz. Das runde Kunststoffteil enthielt 25 0.5 mm-Bohrungen nach der schon beschriebenen Anordnung, nämlich 1 zentrisch, 8 im Radius von 3, 8 im Radius von 5.5 und weitere 8 im Radius von 7.25 mm. Das letztere, krumme Maß rührt vom garantierten Kathodenradius von 15 mm der R. 5505 im Magnetfeld her. Mit den Durchmessern der Bohrungen wurden die 15 mm so gerade erreicht. Das verhinderte genaue Informationen über Kathodenschrumpfungen im Magnetfeld, lieferte aber unter den gegebenen Umständen das größtmögliche Wissen über die Homogenität einer Kathode im garantierten Bereich. Die Ausleuchtung der ganzen Kathode zur Kalibration war ja ohnedies nur bedingt möglich.

. In die Bohrungen wurden die 0.5 mm-Fasern der Lichtleiterbündel, je eine pro Schema, geklebt und die zu den Kathoden gewandte Fläche des Schemas dann mit Schleifpapier und Emulsion poliert.

Die am Ende übrigen 25 Fasern von allen LEDs wurden auf einen Referenzmultiplier des Typs SRC 75 B01 gegeben. Da dieser nicht im Magnetfeld vermessen werden konnte, geschah dies in einer lichtdichten Röhre außerhalb des bisher geschilderten Testapparats. Die LEDs selbst wurden mit der von Ventilatoren gekühlten Pulsarkiste betrieben. Die Ventilatoren erwiesen sich als nötig, da die Lichtausbeute der blauen LEDs stark von der Temperatur abhing. So konnten die Schwankungen der Lichtmenge in einem vertretbaren Rahmen von mehreren % gehalten werden. Die Ausbeute der LEDs und ihrer einzelnen Fasern selbst wurde durch Verändern der Pulszeiten und Abgleich ihrer Betriebsspannungen, aber auch durch entsprechende

automatische Korrekturen der Steuerung an gemessenen Signalwerten auf ca. 1% genau abgeglichen.

Die Kiste zur Vermessung der Testmultiplier, also ohne Referenz und LED-Pulser, erreichte mit ihrem Deckel zum lichtdichten Verschießen der Gleitslitten-Ebene eine Höhe von 167.8 mm. Mit ca. 600 mm Länge und einer Breite von ca. 360 mm ließ sie sich gerade in den Polspalt des Testmagneten einführen. Wegen dieses Magnetfeldes mußte die Kiste aus nichtmagnetischem Material bestehen. Die Präzisionsmechanik in ihrem Inneren war allerdings nur mit Metallteilen aufzubauen. Daher bestand der gesamte Apparat aus Aluminium, Messing, V2A-Stahl, Tombak und einigen Kunststoffteilen. Das Bild zeigt eine Ansicht der beschriebenen Testapparatur:



(Fig.18) Die Apparatur für Tests im Magnetfeld

Blick auf die erste Ebene mit Gleitslitten. Eine Schemenhalterung ist zu sehen. Das Rohr rechts oben dient zur Führung der Lichtleiter, der Stab zum Bedienen der darunter zum Bedienen der Mechanik. Die Kreuze auf der Ebene markieren die Positionen der Multiplier.

Die Magnetfeld-Testapparatur für die R 2490 war wegen des Verzichts auf die Kathodenhomogenitätsmessungen, aber auch wegen des geringeren Testumfangs wesentlich einfacher aufgebaut. Nur je zwei Fasern eines Lichtleiterbündels gingen auf eine Test- und eine Referenzröhre gleichen Typs. Die fünfte Faser wurde abgedunkelt. Die Multiplier befanden sich mit ihren Basen in lichtdichten Röhren aus Aluminium von etwa 154 mm Länge und 70 mm Durchmesser. Zur Montage eines zu vermessenden Multipliers wurde ein Boden der Röhren mit Base entfernt, das Testobjekt eingesetzt und die Kombination dann wieder in die Röhre eingesetzt. Die Teströhre konnte mit Hilfe dreier Stützen auch in den Magneten gestellt werden.

Der zur Beleuchtung notwendige LED-Pulser war zur Abschirmung in einem kleinen Metallkasten untergebracht und wurde von einem Transformator der Firma Rohde und Schwarz mit Spannung versorgt. Abgesehen davon, daß das Startsignal dieses Pulsers in TTL- statt NIM-Pulsen gegeben werden mußte, bestand in der Steuerungselektronik kein Unterschied zu der des Aufbaus für die R 5505.

Die Steuerung der Anlage für die R 5505 erfolgte vom CVC-Rechner aus. Über ein CAEN 117 N-Interface konnte dazu zunächst ein 4-kanäliges CAEN 470 N-Hochspannungsgerät beschaltet werden. Damit keine Kalibrationsfehler der Röhren durch inkorrekt gegebene Hochspannungen auftreten konnten, wurden alle Kanäle am Gerät auf ca.  $\pm 0.05\%$  genau aufeinander abgestimmt. Jeder Kanal versorgte 8 jeweils hintereinanderliegende Multiplier der Viererreihen. Bei der Homogenitätsmessung konnte so jeder Multiplier wie bei den Tests ohne Feld auf seine eigene Kalibrationsspannung gelegt werden. Die Referenz wurde von einem Fug-Hochspannungsgerät mit Spannung versorgt, das vor Beginn von Messungen per Hand einzustellen war.

Ebenfalls manuell mußte die Bewegung des Beleuchtungssystems vorgenommen werden, wenn der CVC über ein angeschlossenes Terminal das Zeichen dazu gab.

Die LED-Pulser-Kiste wurde vom CVC über zwei 460-1 DifferentialTTL-Outputregister der Firma Hytec beschaltet.

Die Outputregister schalteten nach Konvertierung ihrer Signale auf NIM auch einen Multiplexer. Da dieser 4 Eingänge gleichzeitig auf vier Ausgänge bringt, konnte er die Signale einer vermessenen Reihe gut auf die Eingänge verwendeter Meßgeräte bringen. Um an einem Meßsignalausgang des Multiplexers wahlweise einen ADC oder TDC zu betreiben, gingen die Meßsignale aus dem Multiplexer-zuerst in die Switch-Box. Diese wurde auch von den Registern nach Konvertierung der Signale auf TTL geschaltet.

Wiederum über diese Outputregister und nach Konvertierung der Signale in NIM startete der CVC die LED-Pulser. Das Startsignal wurde noch über ein digitales Fanout geführt, so daß es einen TDC starten konnte. Ein eingesetzter ADC bekam ein eigenes Gate über Register und Konverter. Nach Signalempfang konnte der CVC den benutzten 12-Kanäliges LeCroy 2249A-ADC direkt auslesen. Dabei wurde die Pedestals von ca. 20 bis ca. 60 channels eigens immer vor Signalen gemessen und vom CVC sofort vom ausgelesenen Meßergebnis abge-



im Prinzip gleich. Abweichungen in den Testprogrammen ([Sch2]) sind im folgenden in Klammern gesetzt.

Die Messungen wurden für je 3 Magnetfelder, nämlich 0, 0.95 und 1.2 T (0, 0.88 und 1.2 T), durchgeführt. Ursprünglich waren nur Versuche mit 0 und 1.2 T geplant. Eine neue Vermessung des Magnetfelds vom H1-Detektor ((New1)) zeigte aber ([Zub2]), daß das Feld an der Stelle des SPACAL gar keine 1.2 T erreicht. Wie bei jeder Magnetspule wird auch das Feld der Detektorspule an ihren Enden inhomogener und schwächer. Daher waren für die Multiplier des elektromagnetischen SPACAL nur ca. 1 T, für die des hadronischen nur ca. 0.9 T zu erwarten. Entsprechend dieser neuen Erkenntnisse wurde ein zusätzlicher Magnetfeldtest der Multiplier eingeführt. Gegebenenfalls nach dem Anfahren des Magneten konnte das dazugehörige Meßprogramm des CVC gestartet werden.

Zuerst benötigte das Programm die Identität der Multiplier und ihre Positionen in der Apparatur. Nach der Bestätigung der Homogenität durchführung wurde eine erneute LED-Feinabstimmung zur Wahl gestellt, um dann die Referenzwerte für alle 25 LEDs zur Kontrolle auszugeben und eine Anwärmzeit für die Multiplier abzufragen. Danach konnte die eigentliche Messung beginnen.

Der Rechner gab die erste nach der Datenbank einzustellende Reihe an. Während der manuellen Verstellung schaltete er die Hochspannungen für die Multiplier ab. Nach Ausführung konnte der Rechner mit der Kalibration der Röhren einer Viererreihe beginnen. Je nach Stärke des Magnetfeldes lag die Anfangsspannung bei 1400, 1300 oder 1400 V (1220 V), wurde in Schritten von 60, 30 oder 60 V (30 V) erhöht und bis maximal 2300, 1900 oder 2300 V (2300 V) gebracht, wenn nicht zuvor der Meßbereich des ADC überschritten worden ist. An jedem Schritt pulsten alle 25 LEDs (1 LED) nacheinander, der Mittelwert der Signalmittelwerte ergab den Meßwert für die Kalibrationsrampe. Da bei den Messungen ohne Magnetfeld nie eine Einstellzeit des Gains auf die angelegte Spannung größer als 1 s beobachtet worden war, wurde hier keine Wertekontrolle im Abstand von 1 s vorgenommen, sondern nur noch diese Zeit zwischen Spannungseinstellung und Datennahme abgewartet. Positionen, Spannung, Mittelwert und Breite sowie Referenzwerte wurden für jeden Schritt in ein Datenfile des vermessenen Multipliers geschrieben. Wurde ein von der Referenz vorgegebener ADC-Wert von 200 channels erreicht, wurde wie bei den Messungen ohne Feld eine genaue Kalibrationsspannung errechnet. Das Absolutgain wurde allerdings diesmal bei festen Werten von 1880, 1600 oder 2000 V (1400 V) mit 2000 Pulsen pro LED ermittelt. Insbesondere sollte dadurch ursprünglich das Absolutgain wie die diesbezüglichen Angaben des Herstellers bei 2000 V gewonnen werden.

Homogenität und Signalzeitmessung wurden aber wie üblich an der Kalibrationsspannung durchgeführt. Dazu wurde der Signal- oder Zeitmittelwert von Beleuchtungspulsen für jedes einzelne der 25 (1) LEDs im gleichen Format wie bei der Kalibration ins entsprechende Datenfile übertragen, und zwar zunächst für die Homogenitäts-, dann für die Signalzeitmessung.

Nach Beendigung der Messungen an einer Reihe wurde die Hochspannung der zu

testenden Röhren abgeschaltet, so daß eine neue Reihe eingestellt werden konnte. Die gesamte Prozedur wiederholte sich Reihe für Reihe, bis die jeweilige Meßreihe beendet und das Programm abgearbeitet war. Bei einer vollen Bestückung der Apparatur mit 32 (1) Multipliern dauerte der gesamte Test für ein Magnetfeld ca. 3 h (10 min.).

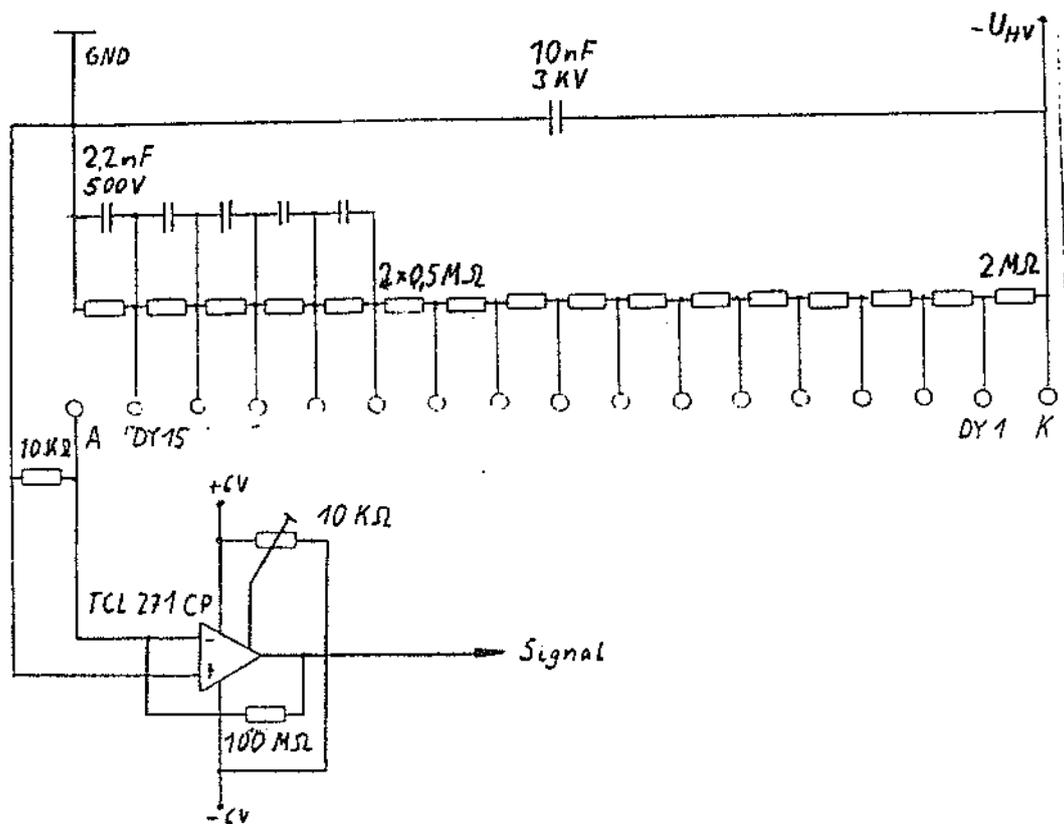
Die gewonnenen Daten wurden dann vom CVC auf andere Rechner zur Speicherung, Weiterverarbeitung und graphischen Darstellung überspielt.

### 3.4 Die Apparatur für Dunkelstrommessungen

Ursprünglich sollten die Dunkelströme der Multiplier in der Apparatur für Tests ohne Magnetfeld gemessen werden. An den Signalausgängen der im Dunklen unter einer Spannung von 2000 V liegenden Multiplier sollte nach deren Führung aus der Kiste einfach ein Multimeter mit einem Meßbereich von einigen pA angeschlossen werden.

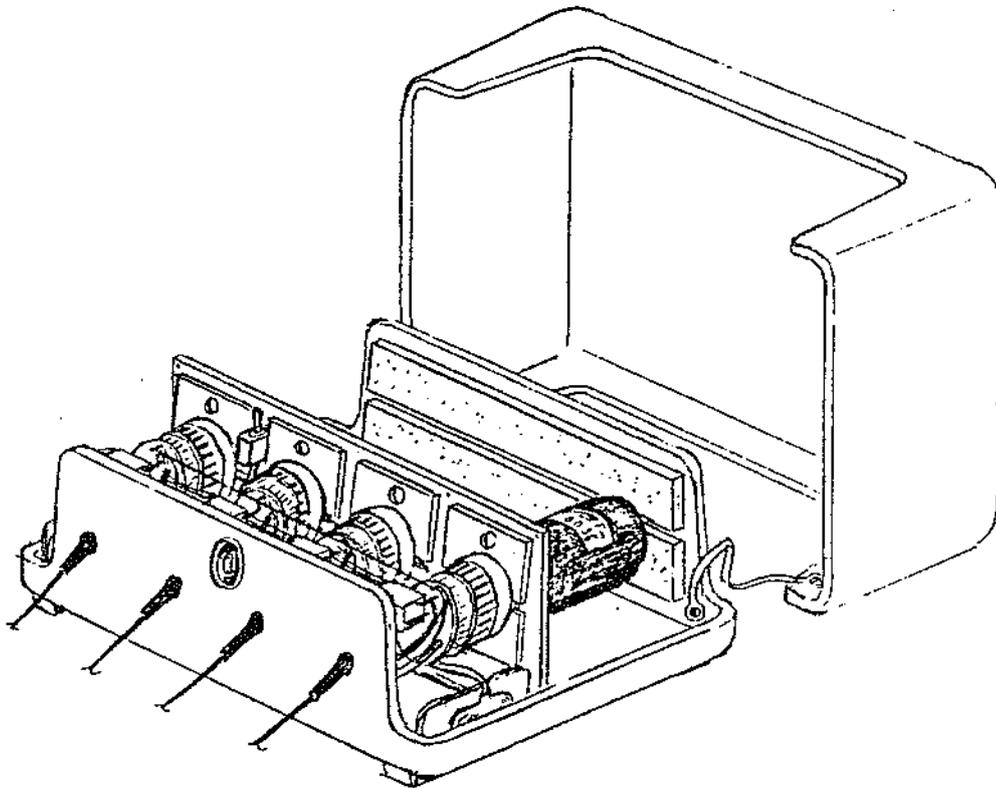
Dementsprechend durchgeführte Messungen ergaben Werte um mehrere 10 nA, die für Dunkelströme viel zu hoch waren. Es stellte sich heraus, daß schon Kontakt- und Thermospannungen der Steckermaterialien in Verbindung mit dem Widerstand der Kabel Ströme um ca. 100 nA bei etwa Zimmertemperatur auslösen können. Zudem gibt es Einkopplungen von Wechselfeldern in die verwendeten Kabel, was ebenfalls kleine Ströme erzeugen kann. Offenbar überdeckten die Ströme solcher Störeffekte den zu messenden Dunkelstrom völlig, bis er durch Kabel beim Meßgerät ankam. Daher war es erforderlich, Meßgeräte oder vielmehr die für diese Geräte wichtigen Verstärker direkt an den Anodenkontakten der Multiplier in deren Basen unterzubringen. Dadurch ließen sich Thermospannungen durch Stecker oder Einkopplungen von Störfeldern durch Kabellängen vermeiden. Die Werte nach der Verstärkung konnten dann über ein normales, aber doch möglichst kurzes Kabel an herkömmliche Meßgeräte gegeben und dort abgelesen werden.

Um das zu erreichen, wurden die Anodenausgänge in einigen Multiplierbasen mit genau abgleichbaren Operationsverstärkern und entsprechenden Vorwiderständen modifiziert. Die Spannungsversorgung der Verstärker übernahmen Batterien, um kein über Transformatoren einkoppelbares Netzrauschen zu bekommen. Der Schaltplan einer so geänderten Base ist für die R 5505- und die R 2490-Multiplier prinzipiell gleich:



(Fig.20) Der Schaltplan für Basen zur Dunkelstrommessung

Zu Dunkelstrommessungen wurden 4 Basen für die R 5505 gebaut und zum zusätzlichen Schutz vor Störfeldern in einem zweckentfremdeten Metall-Transformatorgehäuse untergebracht. Da das Gehäuse nicht vollständig lichtdicht schloß, wurde das Gerät in einer Holzkiste mit weiterer Abdeckung betrieben.



(Fig.21) Die Apparatur für Dunkelstrommessungen der R 5505

Im Schutzgehäuse aus Metall sind die 4 modifizierten Basen zu sehen, die zur Dunkelstrommessung dienen. Ein Multiplier ist in Position.  
Die Kabel vorne führen zu Anzeigeräten.

Für die Messungen an den R 2490 wurde lediglich eine spezielle Base gebaut, die auch eine Metallröhre als Schutzgehäuse bekam. Ebenso wie das Dunkelstrom-Meßgerät der kleineren Multiplier wurde auch dieses Gerät in der erwähnten Holzkiste verwendet.

Als Anzeigeräte wurden ITTmetrix MX 202 B-Multimeter verwendet, die zusammen mit den Operationsverstärkern in den Multiplierbasen die Messung von Dunkelströmen auf 33 pA genau ermöglichte. Die Hochspannungsversorgung der Multiplier übernahm zuletzt ein Gerät der Firma Heinzinger. Beim Anlegen der Hochspannung zeigte es sich, daß ein langsames Anfahren der hier benutzten Spannung von ca. 2000 V nötig war, da sonst Operationsverstärker durch zu hohe Spannungsspitzen beim Schalten Schaden nehmen konnten.

Bei den Messungen wurde im Allgemeinen die Einstellung eines stabilen Dunkelstromwertes abgewartet, sie dauerten also für 4 kleine oder 1 große Röhre ca. 5 min.

Die mit den drei beschriebenen Testständen durchgeführten Serienmessungen sind inzwischen fast vollständig abgeschlossen worden. Die Beobachtungen und Ergebnisse, die sich aus diesen Messungen ergaben, sind im Folgenden beschrieben.

# Kapitel 4

## Ergebnisse der Serientests

### 4.1 Probleme mit den R 5505

Die Serientests begannen mit der Vermessung der R 5505-Photomultiplier im Heidelberger Teststand.

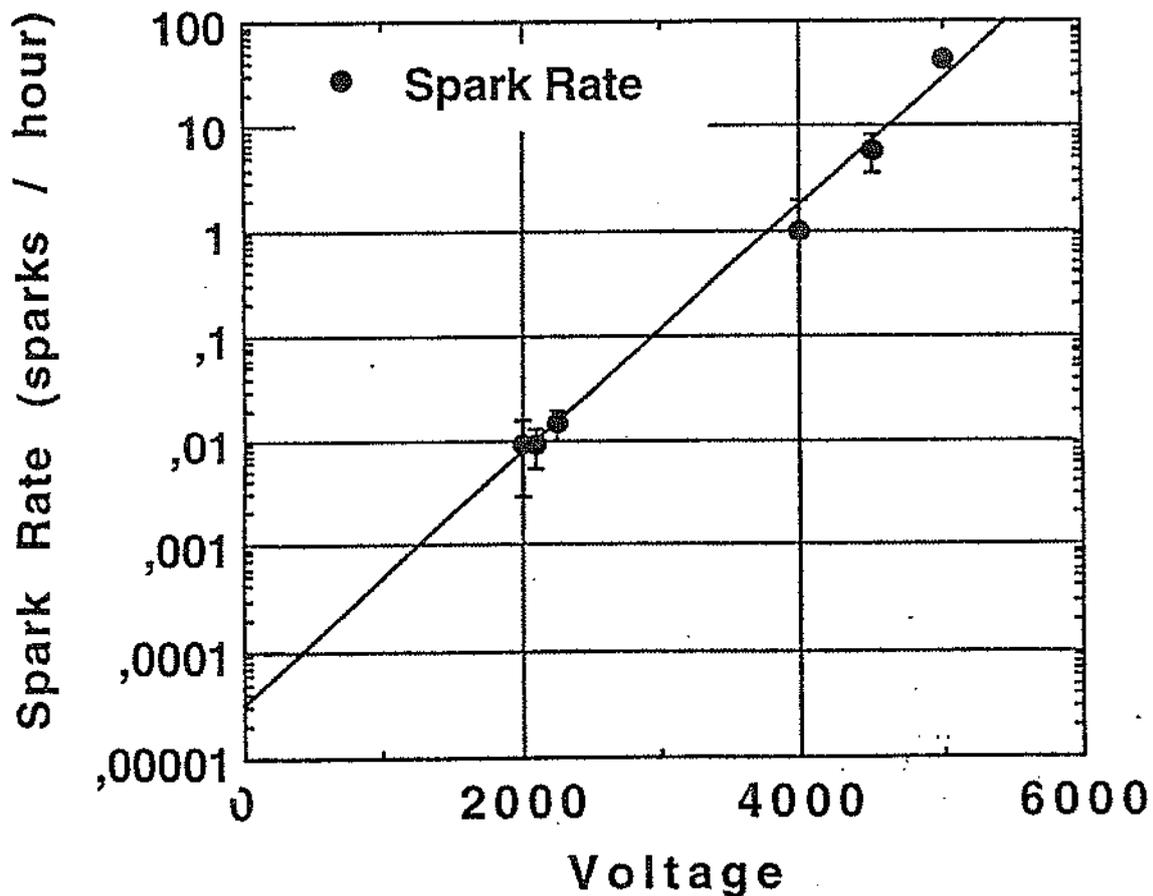
Anfängliche Messungen von ca. 15.5 bis ca. 72 h Dauer an 36 Multipliern unter durchschnittlich ca. 2000 V Versorgungsspannung zeigten je 5 Multiplier, die keine ADC-Werte lieferten. Kontrollen ergaben, daß die Multiplier funktionierten, aber verschiedene ADC-Kanäle während der Messungen Schaden genommen hatten. Meist waren die 34- $\Omega$ -Widerstände an den Eingängen der betroffenen Kanäle auf sehr hohe Werte aufgebrannt. Diese Widerstände dienen zum Schutz der ADC-Elektronik vor zu hohen Signalspannungen. Laut Spezifikation des Geräts sind sie auf Spannungen von 50 V für etwa 1  $\mu$ s ausgelegt, erfahrungsgemäß halten sie in dieser Zeit sogar bis ca. 600 V aus. Demnach konnten nur längere Signale sehr hoher Spannung in die Kanäle die aufgetretenen Defekte ausgelöst haben.

Zur Untersuchung derartiger Signale wurden die teuren ADCs von Panelen mit durch 51  $\Omega$ -Widerstände terminierten Buchsen ersetzt. Mit diesen Panelen wurde die Abhängigkeit der Widerstandsdefekte vom Hochspannungsgerät, der Röhrenhalterung, den Basen und den an die Multiplier angelegten Spannungen im Aufbau überprüft.

Ein Baufehler im Hochspannungsgerät hätte etwa Spannung in seine Masse einkoppeln können. Da diese mit den Anoden der Multiplier verbunden ist, hätte so Hochspannung in die ADC-Kanäle gelangt sein können. Eine ca. 3 h-Kontrollmessung von 24 Multipliern, die von einem anderen als dem eigentlichen Gerät des Aufbaus mit ca. 2250 V versorgt wurden, ergab aber auch 1 zerstörten Widerstand. Das schloß das Hochspannungsgerät als Ursache der Signale aus.

Ladungen auf dem Metallrack der Multiplier hätten ebenfalls Hochspannungen in Anodenausgänge von Multipliern bringen können. Der ca. 18 h-Betrieb von 30 Multipliern ohne Halterung an 2250 V lieferte jedoch wieder 3 defekte Widerstände.

Auch Konstruktions- oder Baufehler an den Spannungsteiler-Basen der Multiplier hätten Hochspannungen im Anodenausgang zum ADC verursachen können. Bei verschiedenen Tests von Basen mit und ohne Multipliern erwiesen sich die Basen aber als sicher. In einem ca. 17 h-Test von 32 Basen mit und 31 Basen ohne Multiplier unter 2250 V gab es 8 defekte Widerstände durch die bestückten Basen, von den anderen keinen. Das zeigte in Verbindung mit den vorangegangenen Tests auch, daß die Multiplier selbst die Ursache der zerstörten Widerstände waren. Das Testen von Multipliern unter verschiedenen Hochspannungen ergab eine klare Abhängigkeit der Anzahl defekter Widerstände von den an den Röhren liegenden Spannungen. Die Ereignisse traten zwar statistisch und für jeden untersuchten Photomultiplier in verschiedener Stärke auf, sie stiegen jedoch mit steigender Spannung offenbar stetig an. Dies wurde bis ca. 5000 V Spannung an einem Multiplier nachgeprüft.



(Fig.22) Die Funkenrate als Funktion der Multiplierspannung ([Meil])

Beim Unterschreiten einer Spannung von ca. 1900 V brach der Effekt jeweils

ab. Das statistische Auftreten, die Spannungsabhängigkeit und die Abbruchspannung bewiesen, daß Überschläge in den Multipliern der Grund für die beobachteten Hochspannungssignale sein mußten.

Überschläge in Medien entstehen durch Bildung von Elektronenlawinen. Werden Elektronen durch Sekundär-, Photo-, Thermo- oder Elektroemission aus einem als Kathode fungierenden Material freigesetzt, können sie auf ihrem Weg zu einer Art von Anode Energie aus dem vorhandenen Potentialgefälle aufnehmen. Mit dieser Energie setzen sie durch Ionisation getroffener Atome oder Moleküle des Mediums weitere Elektronen frei. Die erzeugten Ionen wandern ihrerseits zur Kathode und lösen dort durch Sekundäremission zusätzliche Elektronen aus. Dadurch kommt eine Teilchenlawine ([Ger1]) von:

$$N_1 = N_0 \frac{\exp \gamma d}{1 - \delta(\exp \gamma d - 1)} \quad (4.1)$$

$N_1$  : Zahl an die Anode kommender Elektronen

$N_0$  : Anzahl der Anfangselektronen

$\gamma$  : Ionisierungsvermögen eines Elektrons im Medium

$d$  : Distanz Kathode zu Anode

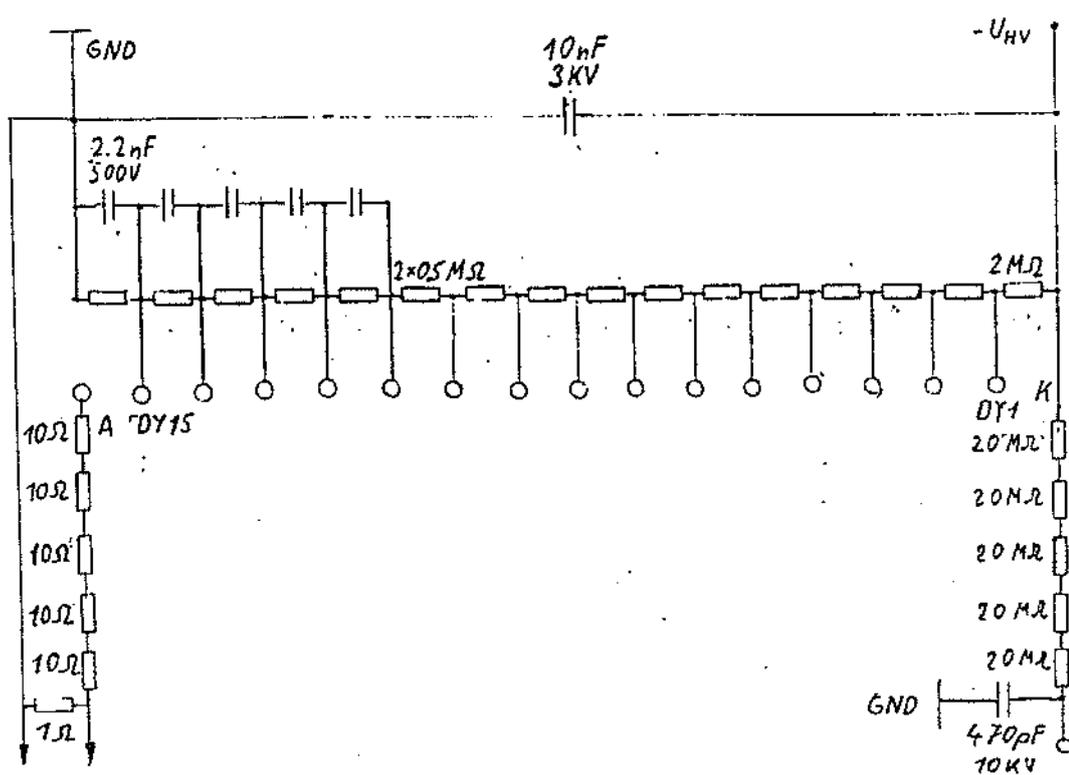
Ist der Nenner dieses Ausdrucks kleiner oder gleich Null, die Zahl im Prozeß erzeugter Ionen und damit Sekundärelektronen also hoch genug, kann schon aus wenigen Anfangselektronen eine große Lawine entstehen. Deren Elektronen ermöglichen Entladungen in einem Medium. Je nachdem, ob hauptsächlich das Medium zwischen Kathode und Anode oder auch noch die Anode die Ionen für die Sekundäremission liefern, teilt man die Entladungen in Leader- oder Generations-Durchschlag ein. Entscheidend für diese Durchschläge ist nach dem Potentialgefälle für die Elektronen die Form der Kathode. Je spitzer diese ist, desto höher ist das in ihrer Nähe herrschende elektrische Feld. Mit der Höhe der Feldstärke steigt aber auch die Anzahl feldemittierter Elektronen. Das läßt Spannungsdurchbrüche über größere Distanzen und in geringeren Zeitabständen zu. Bei glatten Elektroden können Spannungen von ca. 2000 V in Luft unter Normaldruck ca. 0.5 mm überbrücken. Abgesehen davon, daß die Distanzen von Teilen mit entsprechendem Potentialgefälle in den Multipliern ca. 1 bis ca. 2 mm bei Spannungen von normal nur 2300 V betragen, mußte auch das in den Röhren herrschende Vakuum von ca.  $10^{-7}$  Torr jeden Durchschlag nach der geschilderten Art verhindern. Bei Drücken von ca.  $10^{-7}$  Torr müssen Anfangselektronen ca. 400 mm laufen, um ionisierbare Teilchen anzutreffen. Dieser Weg ist aber länger wie die Multiplier selbst. Allerdings gibt es noch einen etwas anderen Durchschlagsmechanismus ([Bey1]), der betrachtet werden mußte.

Bei Feldstärken von ca. 30 bis ca. 100 kV/mm treten Elektronen durch Feldemission aus einer Kathode in ein Vakuum aus. Auf ihrem Weg zu einer Anode nehmen sie Energie auf, die nicht durch Ionisation oder ähnliches abgegeben wird. Dadurch können diese Elektronen beim Auftreffen auf die Anode mehrere Ionen

auslösen. Diese driften zur Kathode, lösen dort Sekundärelektronen aus und der Prozeß beginnt, etwas stärker geworden, von vorn. Nach einiger Zeit ist das Vakuum mit immer mehr zwischen Anode und Kathode driftenden Elektronen und Ionen gefüllt. Einige Ionen rekombinieren in diesem Teilchenstrom unter Lichtemission, andere, schon rekombinierte, werden aufs neue ionisiert. Irgendwann ist die Teilchendichte im Vakuum so gestiegen, daß ein Generations-Durchschlag stattfinden kann. Das geht umso schneller, je mehr Elektronen zu Beginn feldemittiert werden und je höher das von ihnen durchlaufene Potentialgefälle ist. Nach dem Aufbrauch der Ionen und Elektronen bricht die Entladung ab, bis wieder genügend Gas nachproduziert worden ist. Dann beginnt der Vorgang aufs neue. Dieser Durchschlagsmechanismus wird Vakuumdurchschlag genannt. Sehr vereinfacht ausgedrückt handelt es sich dabei um einen Generations-Durchschlag, der sein eigenes Medium produziert.

Wie die Untersuchung des Innenaufbaus einiger Multiplier zeigte, waren diese, wie bei manueller Fertigung kaum anders zu erwarten, sehr unterschiedlich in der Verarbeitung. Scharf abgeschnittene Zuleitungsdrähte und Dynodenstreben waren zu sehen. Bei Schnittkanten von schätzungsweise 0.05 mm Breite und Spannungen von 2000 V an den jeweiligen Drähten konnten stellenweise die zur Elektroemission nötigen Felder mit ca. 40 kV/mm durchaus erreicht werden. Die elektrischen Felder zwischen verschiedenen scharfen Kanten und dünnen Zuleitungen machten Entladungen auch über ca. 1 bis ca. 2 mm möglich.

Um die Prozesse in den Multipliern visuell beobachten zu können, wurden einige Röhren von ihren Umhüllungen befreit. Um nicht Tage auf ein Ereignis warten zu müssen, wurde die Spannung an den Teströhren über den eigentlich erlaubten Bereich hinaus bis maximal 5000 V erhöht. Dies geschah unter der Annahme, daß damit nur die Rate, aber nicht der auftretende Effekt geändert wird. Die Multiplier wurden an einer nach und nach speziell modifizierten Base betrieben. Um die Röhren vor zu starken Entladungsströmen zu bewahren, wurden sie über einen 470 pF-Kondensator und einen 100 M $\Omega$ -Widerstand statt mit dem normal eingebauten 10 nF-Kondensator mit Spannung versorgt. Zwischen Hochspannung und Kathode wurde ein weiterer Widerstand von 2 M $\Omega$  gelegt. Ein 50 : 1-Spannungsteiler an der Anode erlaubte die Betrachtung der Hochspannungssignale an einem Oszilloskop. Das Bild zeigt die Schaltung ([Sch3]):



(Fig.23) Aufbau der Hochspannungs-Versuchsbase

Die Versuche wurden üblicherweise bei ca. 3000 bis ca. 3500 V begonnen. Im Verlauf der Tests wurde die Spannung gegebenenfalls weiter gesteigert. Bei diesen Spannungen ließen sich bei entsprechend abgedunkelter Umgebung zunächst kleine, bläuliche Lichter an den scharfen Enden der Dynodenträger-Streben eines Multipliers sehen. Bei steigenden Spannungen wurden diese Elmsfeuer-artigen Lichter intensiver. An diesen Stelle wurden Elektronen durch Feldemission produziert. Sie trafen anscheinend auf die Isolationen der Strebe und lösten dort Ionen aus. Zurückdriftende Ionen rekombinierten besonders im stärkeren Elektronenstrom in der näheren Umgebung der Strebenspitze. Dadurch wurde das blaue Leuchten erzeugt.

Nach gewisser Zeit begann das Innere des Multipliers zuerst schwach, dann immer stärker werdend bläulich zu glimmen. Dieser Vorgang dauerte je nach Höhe der angelegten Spannung einige Minuten. Offenbar war hier der Anfüllprozeß des Vakuums der Röhre mit Ionen zu sehen. Durch deren Auftreffen auf das Glas des Multiplierkolbens, aber auch durch ihre verschiedentlich stattfindenden Rekombinationen wurde das Glimmen erzeugt.

Bei Spannungen um und über ca. 4000 V konnten auch Durchschläge selbst beobachtet werden. Große Überschläge fanden in zwei Schritten statt. Zuerst erfolgte eine Entladung zwischen dem scharfen Rand der Kathodenkontaktschicht und der Zuleitung zur ersten Dynode. Dadurch wurde diese Leitung auf Katho-

denspannung gebracht. Da sie nahe an den scharfen Rändern der Anodenplatten vorbeilief, erfolgte hier der Überschlag der Kathodenspannung auf die Anode und damit auf die Signalleitung des Multipliers. Die beiden deutlich sichtbaren Funken blieben bis zur Entleerung des Spannungsversorgungs-Kondensators stehen. Bei dem zu diesen Tests verwendeten Aufbau dauerte das wegen der geringen Kapazität dieses Elements und dem Vorwiderstand nur ca. 50 ms. Mit den Kondensatoren und Widerständen des Spannungsteilers in der Serienmeßapparatur konnten die Funken um ca. 170 ms stabil gehalten werden. Das reichte aus, um die Widerstände der ADCs zu zerstören.

Gleichzeitig mit dem Auftreten der Funken verschwand das Glimmen im Multiplier und das blaue Leuchten an den Enden seiner Dynodenträger, um nach dem Verlöschen der Entladungen wieder einzusetzen. Damit begann der beschriebene Prozeß von Neuem. Das Ionen-Gas wurde also in der Entladung verbraucht und konnte sich nach dieser wieder neu bilden.

Kleinere Überschläge zwischen Stellen geringerer Potentialdifferenz konnten ebenfalls beobachtet werden. Sie bauten jeweils nur Teile des Ionengases ab, waren dafür aber häufiger als die größeren Funken.

Je nach Verarbeitung der Röhre dauerte das Auffüllen ihres Vakuums mit Ionen mehr oder minder lang. Das bestimmte die individuelle Funkenrate einer Röhre. Später in der Apparatur für Messungen mit Magnetfeld durchgeführte Ratenmessungen an den R 5505-Multipliern zeigten keine Änderung der Häufigkeit des Effekts trotz hohen Magnetfelds. Der 10 h-Betrieb von 28 Röhren unter ca. 2000 V in einem Magnetfeld von 1.2 T Stärke ergab 3 zerstörte Widerstände, was gut zu den ohne Feld ermittelten Raten paßte. Auch das war mit der Theorie des Vakuumdurchschlags erklärbar.

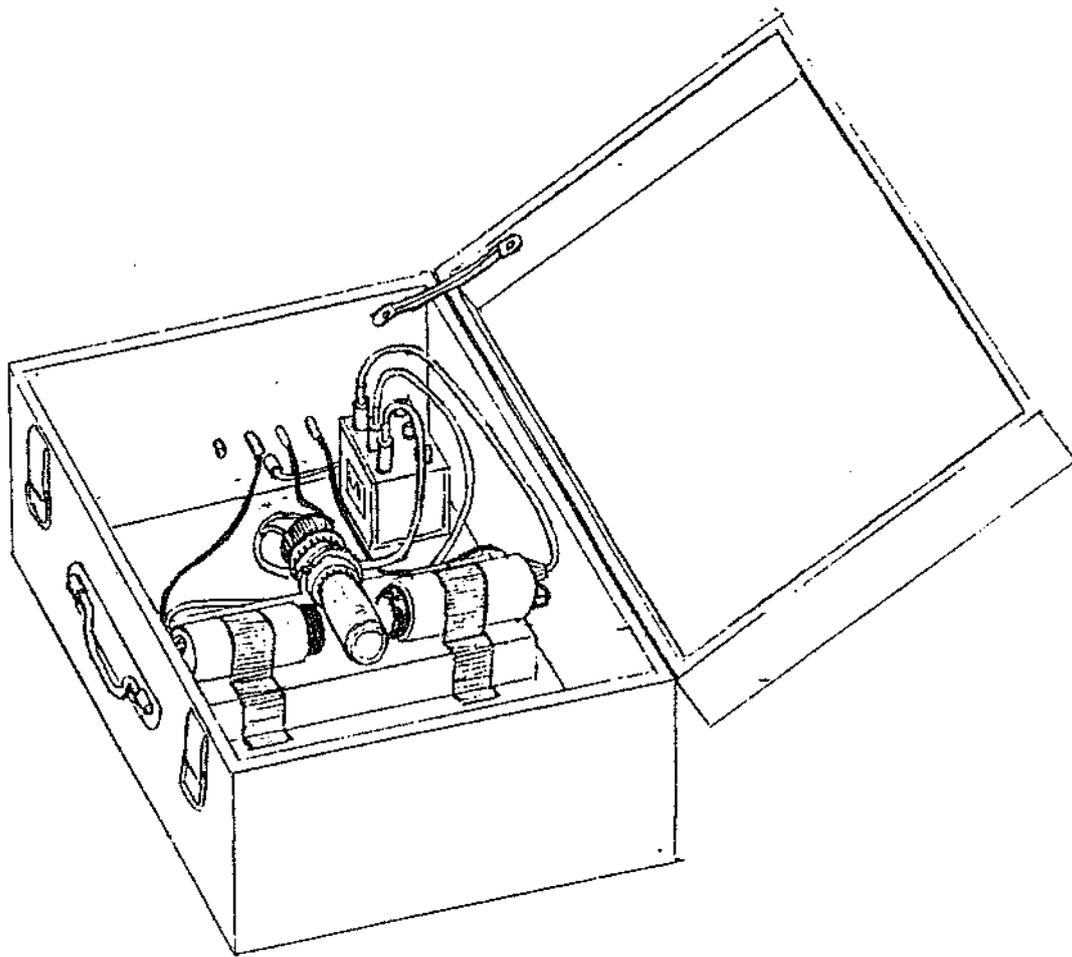
So werden weder die Feldemission noch die Ionisierungsprozesse zum Bilden des Durchschlagsmediums von einem Magnetfeld beeinflusst. Die Driftbewegungen der partikel erfahren jedoch eine magnetfeldbedingte Änderung. Je nach Stärke des Feldes werden die Bahnen der Teilchen zu Spiralen. Damit erhöht sich ihre Wahrscheinlichkeit, mit anderen Partikeln zu kollidieren. Ihre mittlere freie Weglänge sinkt so, was scheinbar die Dichte des Mediums erhöht. Die höhere Dichte ist aber positiv für einen Vakuumdurchschlag. Folglich sollte die Rate der Entladungen in einem Magnetfeld wenigstens gleich der vom feldfreien Fall, eher sogar höher sein.

Im selben Magnetfeldversuch wurden auch die Dunkelstrompulse von Multipliern mit einem Diskriminator und einem elektronischen Zähler aufgenommen. Die Schwellen des Diskriminators standen dabei auf 100 mV. Es stellte sich heraus, daß die Multiplier mit Raten von ca. 0.5 bis ca. 1 mHz Signale verzeichneten, die größer als die Schwellenwerte des Diskriminators waren. Weitere analoge Messungen ohne Magnetfeld ergaben die gleichen Werte. Wie die Funkenrate wurden also auch diese Signale in ihrer Häufigkeit nicht durch ein Magnetfeld beeinflusst. Sie ließen sich als Nebeneffekt des Vakuumdurchschlags identifizieren.

Beim Auffüllen eines Multipliers mit Ionen und Elektronen prallen einige Teilchen

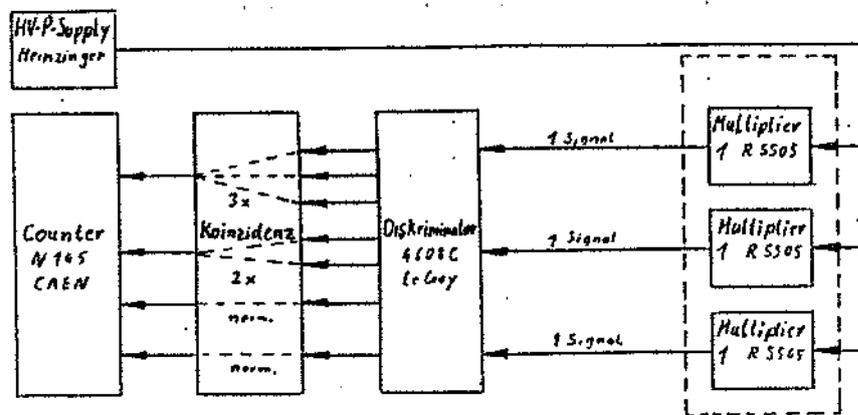
auf die Anode, wo sie wegen ihrer teils hohen Geschwindigkeiten kurze Signale auslösen. Wie das Rekombinationsleuchten im Inneren der Röhre nimmt auch die Zahl der auf die Multiplieranode prallenden Teilchen mit dem lawinenartigen Wachsen der Gesamtteilchenzahl zu. Entsprechend steigt die Höhe der an der Anode gemessenen Signale. Kurz vor größeren oder kleineren Entladungen erreichen die Signale wie das Rekombinationsleuchten ihr Maximum, um danach bis zur Neuproduktion eines Durchschlagsmediums wieder zu verschwinden. Wie zuvor beschrieben, ist dieser Prozeß und seine Stärke unabhängig von äußeren Magnetfeldern. Die Verarbeitung des Inneren des Multipliers ist aber wieder entscheidend für die Signalrate jeder einzelnen Röhre.

Um festzustellen, ob Funken und Signale tatsächlich den gleichen Ursprung haben, wurde ein entsprechender Test konzipiert. Da das Rekombinationsleuchten gleichzeitig mit den hohen Signalen auftreten sollte, mußte die Koinzidenz des Glimmens eines Photomultipliers mit gemessenen Signalen bei normalen Betriebsspannungen der Röhre festgestellt werden. Dazu beobachteten 2 R 5505-Multiplier einen dritten ohne seine Schutzumhüllungen. Mit einem Verteiler für die Multiplier-Spannungen und den notwendigen Basen war alles in einer lichtdicht verschließbaren Kiste mit Steckern für Hochspannung und Signalleitungen untergebracht. Der Aufbau ist im nachstehenden Bild verdeutlicht:



(Fig.24) Aufbau zur Untersuchung der Dunkelpulse

Die Ausgangssignale aller Multiplier wurden mit einem LeCroy 4608C-Diskriminator mit Schwellen bei ca. 100 mV aufgeteilt und für die erforderlichen Koinzidenzen geformt. Die Koinzidenzeinheit gab zum einen das Aufeinandertreffen der Signale aller 3, zum anderen nur die der 2 beobachtenden Multiplier an. Zusammen mit den Signalen der Beobachtungs-Multiplier für sich wurden alle Meßsignale auf einen CAEN 145 N-Counter gegeben. Die Versorgungsspannungen der Multiplier wurden von einem Gerät der Firma Heinzinger auf ca. 2000 V gehalten. Das Schaltbild zeigt den Aufbau der Elektronik:



(Fig.25) Elektronik zur Untersuchung der Dunkelpulse

Der Aufbau wurde durch 2 Leerläufe mit den Beobachtungs-Multipliern allein zu je ca. 1 h Dauer überprüft. In diesen Tests lieferten die Koinzidenzschaltungen wie erwartet keine Zählwerte. Bei der Messung in vorgesehener Anordnung wurden von allen 3 Multipliern 5859 Signale gleichzeitig registriert. Das stimmte gut mit den 5469 Signalen überein, die die beobachtenden Multiplier gesehen hatten. Die Multiplier bemerkten also in ihren Dunkelsignalen den Aufbau des Mediums, das Durchschläge in ihnen hervorrufen konnte.

An den R 2490 wurde keiner der beiden Effekte auffällig. Das mag daran liegen, daß ihre Größe eine qualitativ bessere Fertigung ihrer Einbauten ermöglicht.

Die Serienmessungen, aber vor allem der Detektor, für den die Multiplier bestimmt waren, standen mit diesen Effekten vor einem ernsten Problem. Die Funken konnten die Ausleseelektronik von Testständen und SPACAL innerhalb kurzer Zeit stark beeinträchtigen. Die Dunkelsignale stellten keine technische Gefährdung für Tests und Detektor dar. Letzterer würde sie im Betrieb aber nur schlecht von wirklichen Signalen unterscheiden können und unter Umständen als solche aufnehmen. Um das Funken-Problem einzudämmen, boten sich zwei Möglichkeiten an. Die Erste bestand im Parallelschalten einer handelsüblichen Glimmlampe zum Signal. Bei Signalen mit höheren Spannungen als 90 - 100 V spricht die Lampe an und begrenzt die Signalhöhe auf die Höhe ihrer Zündspannung, die auch von ADCs verkraftet wird. Bauen sich aber von Funken ausgelöste Hochspannungsschwingungen in Kabeln vor der Lampe auf, kann deren Dämpfungszeit zu lang für den Eingang eines ADCs sein; trotz begrenzter Spannung wird dieser dann zerstört. Für Messungen an kurzen Signalen mit einigen 10 ns Dauer ist diese Methode wegen der Eigenkapazität der Glimmlampe nicht zu gebrauchen, bei Signalen mit einigen

100 ns ist sie aber möglich.

Die zweite Möglichkeit bestand in der Begrenzung des Versorgungsstroms zur Kathode durch einen 2 M $\Omega$ -Widerstand in den Basen der Multiplier zwischen Kathode und Hochspannung. Bei einem Funken kann so nur die Ladung der Kathodenkapazität fließen. Das begrenzt die Dauer der Entladung auf etwa die Zeit, in der der Eingangsschutz eines ADCs oder einer sonstigen Elektronik auch eine hohe Spannung noch verkraften kann. Der Widerstand vor der Kathode schadet den Meßqualitäten einer Base praktisch nicht.

Aus konstruktiven Gründen wurde zum Schutz der Apparatur für Tests im Magnetfeld die erste Methode angewandt. Alle weiteren Testapparaturen wurden mit umgebauten Basen nach der zweiten Methode versehen und so gesichert. Nach Test einer mit Kathodenwiderstand versehenen aktiven Base des SPACAL, in dem eine Funkenstrecke die entsprechenden Ausgangssignale eines Multipliers mit hoher Rate simulierte, wurde die zweite Methode auch für den Detektor übernommen. Sicherheitshalber wurde nicht nur für die R 5505-, sondern auch für die R 2490-Basen ein Kathodenwiderstand vorgesehen.

Die Dunkelsignale ließen sich mit derartigen Vorkehrungen jedoch nicht beseitigen. Werden die Signale der Multiplier im Betrieb extern getriggert wie in den Testaufbauten, wäre die Registrierung von Dunkelsignalen reiner Zufall. Dadurch können die Dunkelsignale so gewonnene Meßergebnisse praktisch nicht verfälschen.

Wird in Versuchen aber auf Signale selbst getriggert, werden die Dunkelpulse mit aufgenommen. Entsprechend verfälschte Messungen lassen sich nur verhindern, indem die Versorgungsspannung der Multiplier unter ca. 1900 V gehalten oder die Triggerschwelle für alle Signale gehoben wird. Die Einhaltung der Abbruchspannung der Durchschlagsprozeße beseitigen außer den Dunkelpulsen auch die Funken der Multiplier. Andererseits wird so nicht das volle Gain der Röhren erreicht, was insbesondere bei der Anwendung der Multiplier in in ohnehin gainsenkenden Magnetfeldern ungünstig ist. Das Heben einer Triggerschwelle über die Raten der Dunkelsignale ermöglicht zwar korrekte Meßergebnisse an sonstigen Signalen, aber vielleicht wichtige reale Pulse im Bereich der Dunkelsignale gehen mit diesen verloren.

Beim SPACAL mag ein Kompromiß aus beiden Dunkelsignal-Beseitigungen in Frage kommen. Das kann aber erst nach endgültiger Festlegung des Detektor-gains entschieden werden. Bei niedrigen Multipliergains und damit niedrigerer Spannung würden sich die Dunkelpulse reduzieren und die Triggerschwelle des Detektors müßte nur wenig angehoben werden.

Grundlegend lassen sich diese Probleme nur durch einige Änderungen im Innern der Multiplier beseitigen. Besonders die Verkleidung spitzer Drahtenden mit Kugeln aus spezieller Fertigung oder Lötzinn-Tropfen und die Abdeckung scharfer Beschichtungskanten mit Isolierlack würden die Ursachen der Durchschläge bekämpfen.

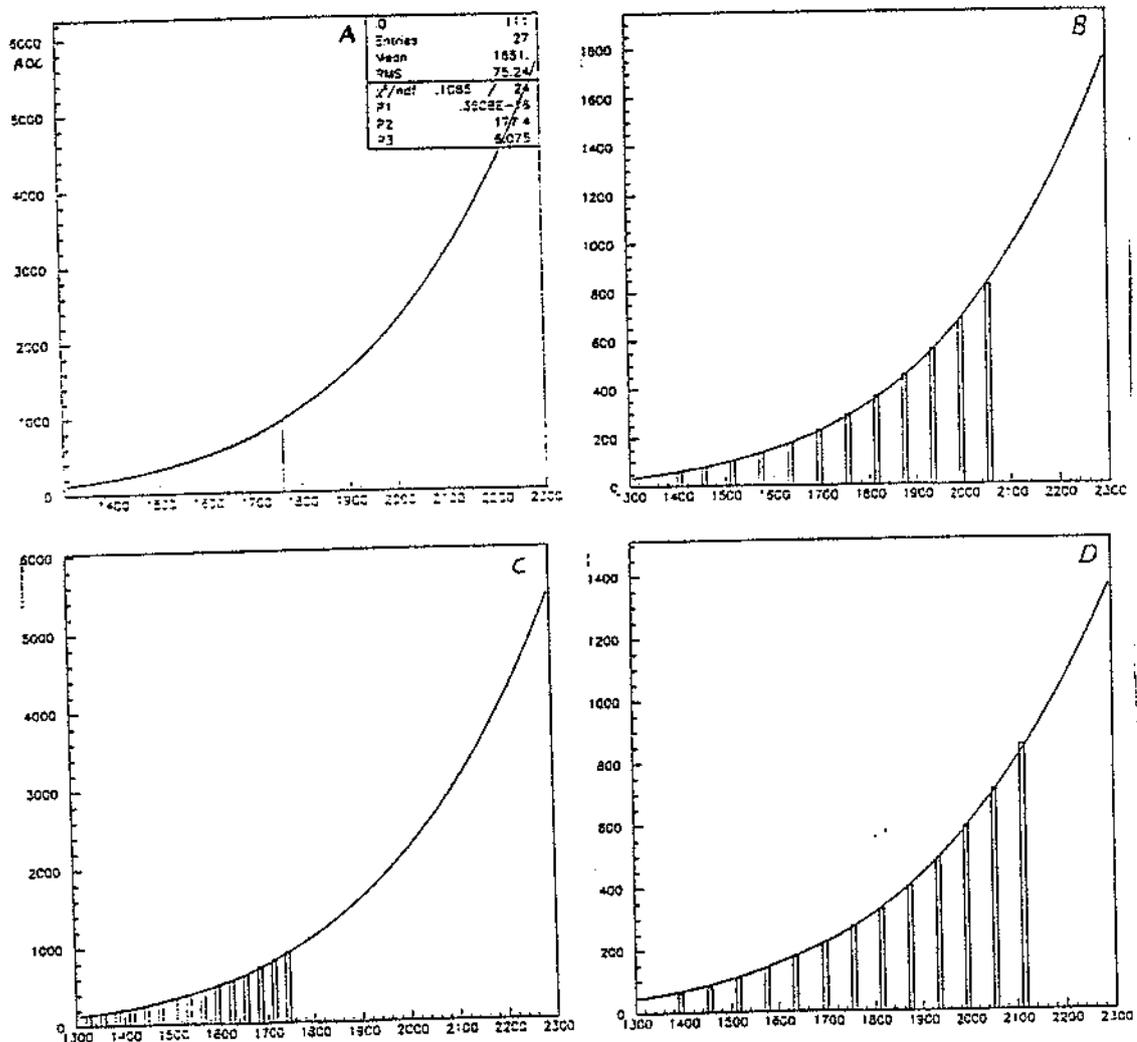
Derartige Änderungen in der Multiplier-Fertigung hätten für die Lieferungen der Röhren zum Einbau ins SPACAL zuviel Zeit in Anspruch genommen. Da die Probleme auch so einigermaßen beherrschbar erschienen, wurde weiterhin mit den

vorhandenen Multipliern gearbeitet.

Der Hersteller ist um Verbesserungen an den R 5505 bemüht.

## 4.2 Die Ergebnisse der Kalibrationsmessungen

Insgesamt wurden 1320 R 5505 aus Serien- und Reklamationslieferungen, 34 R 5506 (Strahlungsharte R 5505) von den Vortests und 144 R 2490 aus Serienlieferungen nach den beschriebenen Verfahren mit und ohne Magnetfelder kalibriert. Das Bild zeigt die Kalibrationsrampen eines R 5505 in verschiedenen Magnetfeldern. Entsprechend sahen die Rampen der anderen Multipliermodelle aus.



(Fig.26) Kalibrationsrampen 0T: (A) HD, (B) HH, 0.95 T: (C) HH, 1.2 T: (D) HH

Die Informationen aus den anfallenden Meßdaten wurden von speziellen Programmen ([Zub3]) ([Zub4]) ausgelesen, ausgewertet und in 3 Datenbanken ([Zub4]) für die jeweilige Multipliergruppe überspielt. Die von den Kalibrationsmessungen in diese Banken geschriebenen Werte waren 3 Größen zum Parametrisieren der Rampen, die Verlustfaktoren der Multipliergains zwischen Messungen mit und ohne Magnetfelder, die Relativgainwerte der Multiplier in allen Feldern und zugehörige Absolutgainwerte nach Angaben des Herstellers.

Die Parameter der Kalibrationsrampen wurden durch Anpassen einer Funktion mit 3 freien Größen an eine Rampe bestimmt. Die Funktion wurde der wirklichen Gainformel für Multiplier nachempfunden:

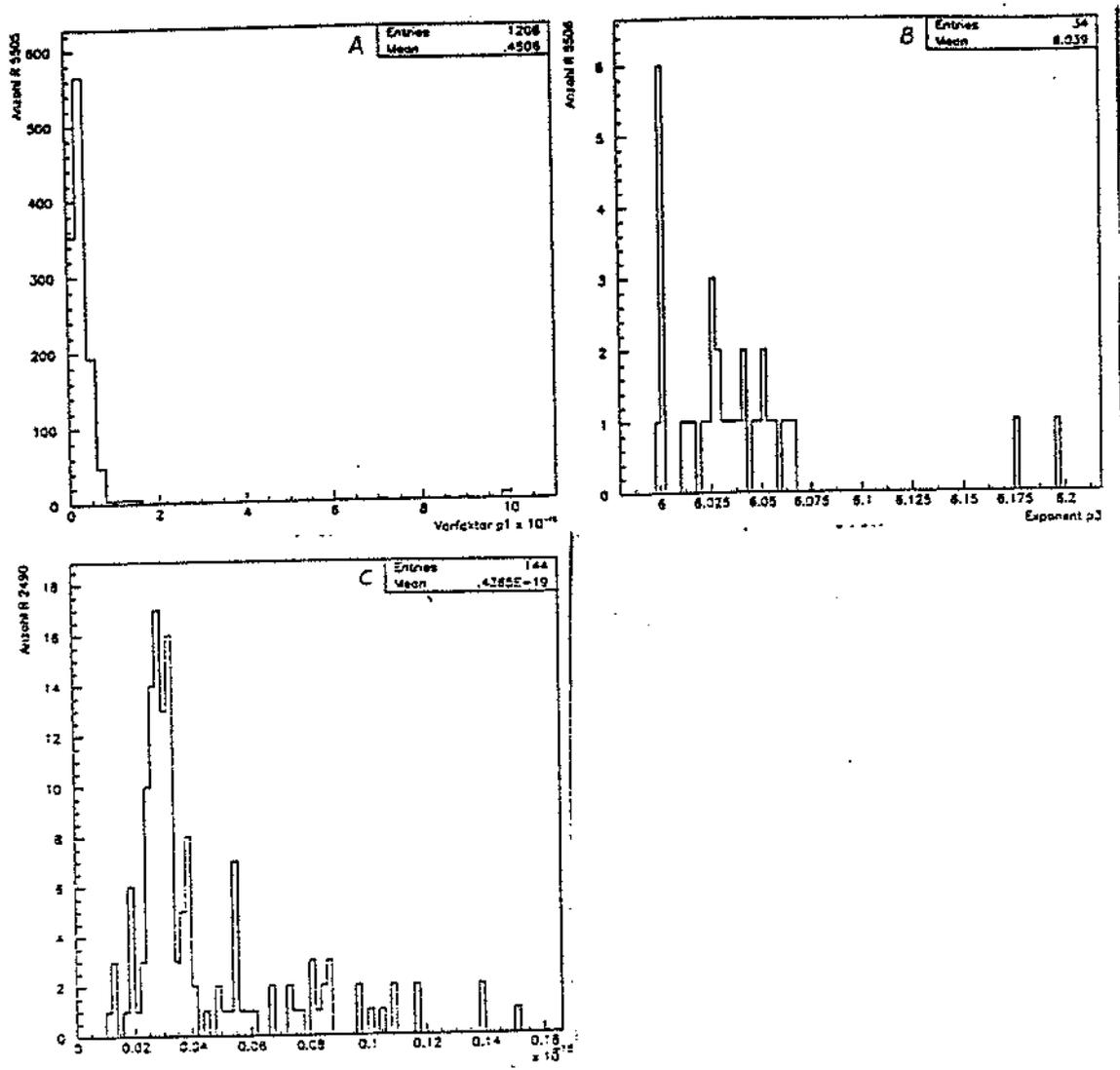
$$G = \delta^{\alpha N_D} = (\kappa U)^{\alpha N_D} \Rightarrow G = p_1 (U - p_2)^{p_3} \quad (4.2)$$

$p_1$  : Vorfaktor zur Errechnung von ADC-channels oder anderen Einheiten

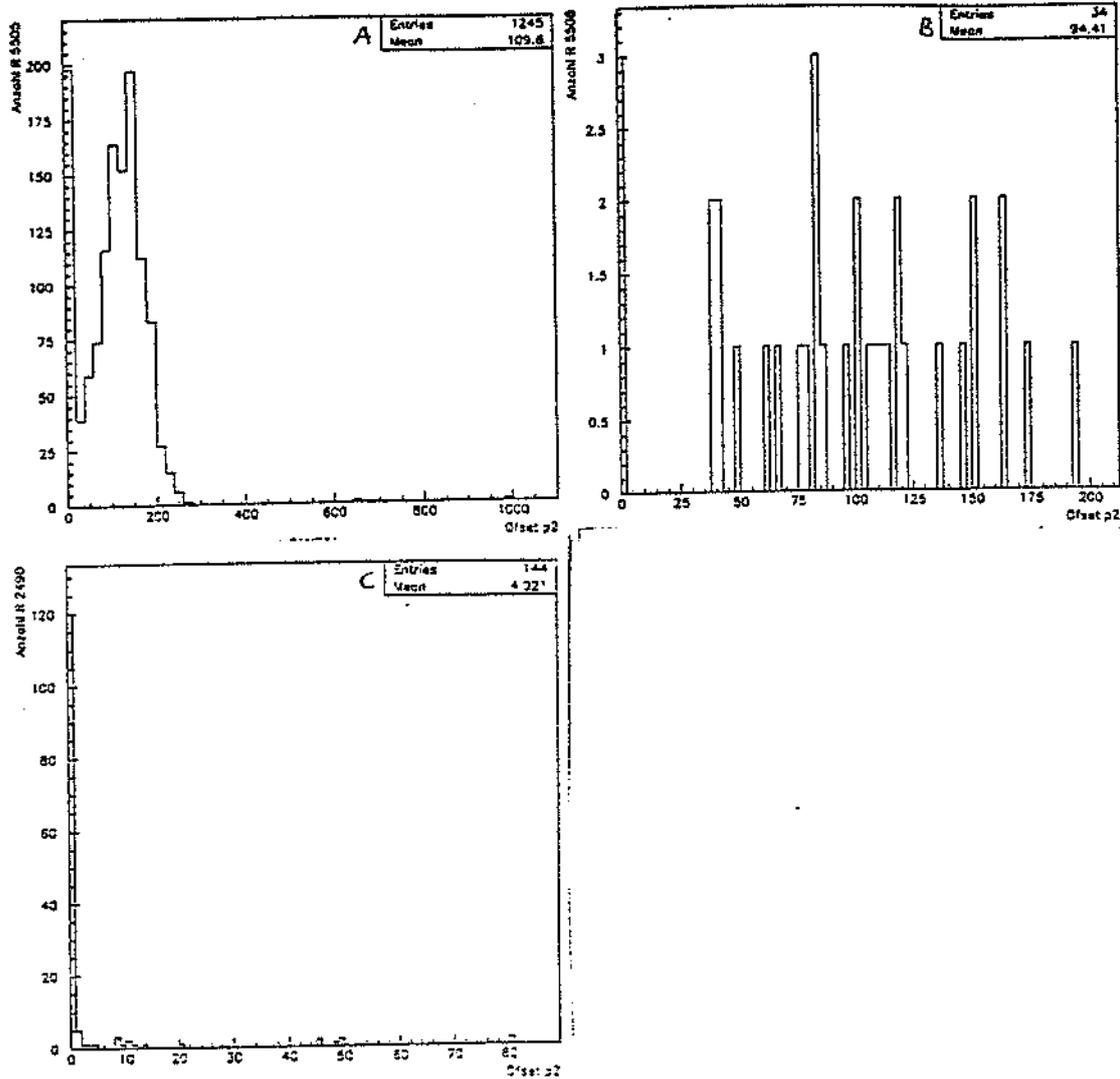
$p_2$  : Eine "Offset"-Spannung

$p_3$  : Exponent als Entsprechung zu  $\alpha N_D$

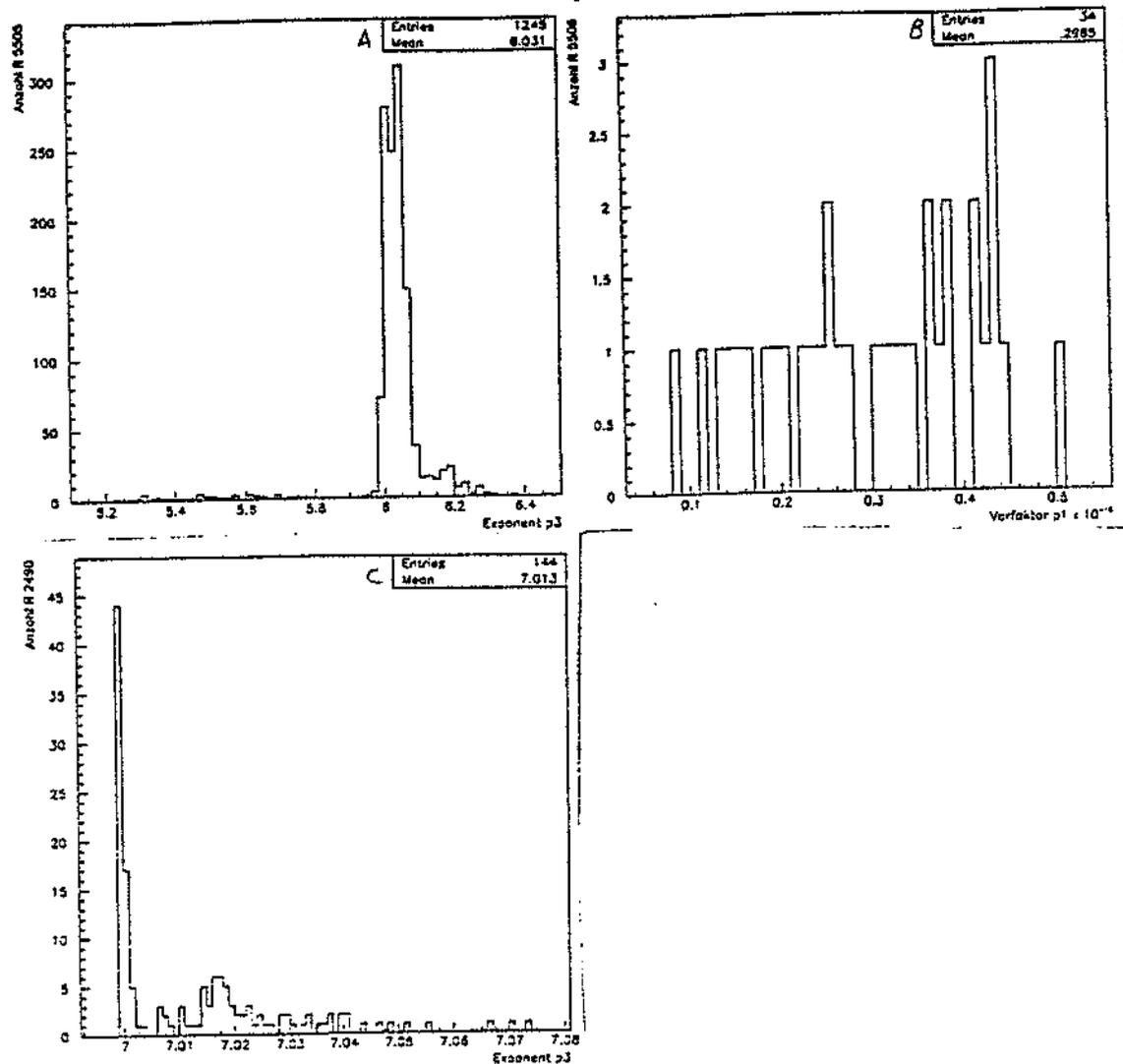
Der Parameter  $p_1$  diente nur zum Erreichen bestimmter Einheiten, etwa der ADC-channels des Relativgains. Der Wert von  $p_2$  wurde als eine Art von Offset-Spannung hilfswiese eingeführt und ist in den Messungen oft nahe Null gewesen, wie es nach der Gainformel auch zu erwarten war. Der wichtigste Parameter war  $p_3$ . Er bestimmte die Höhe des jeweils erreichten Gains der Multiplier. Die nachstehenden Bilder zeigen die Verteilungen der verschiedenen Rampenparameter für die vermessenen Multipliertypen ohne Magnetfelder.



(Fig.27) P1 bei 0T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

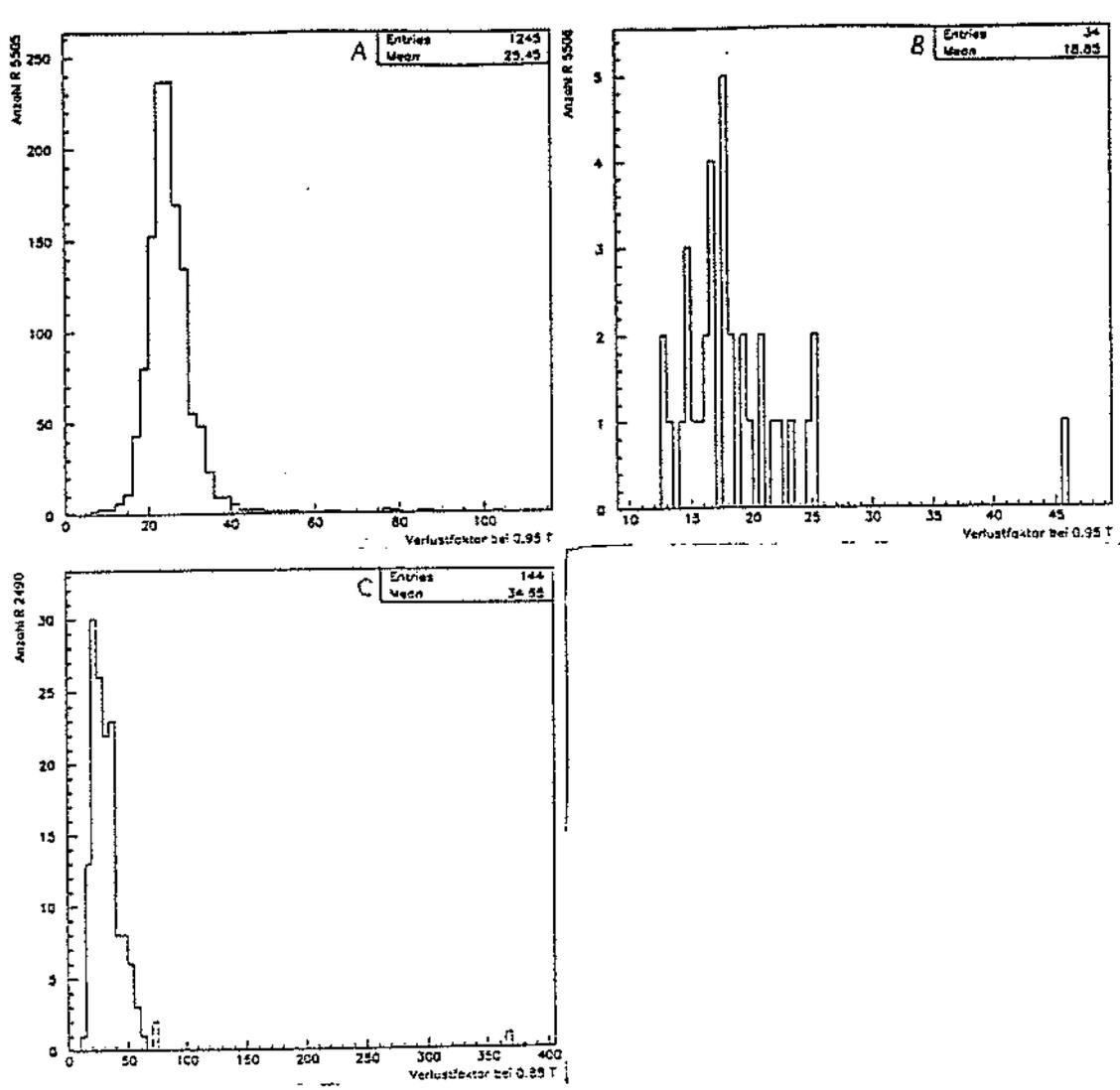


(Fig.28) p2 bei 0T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

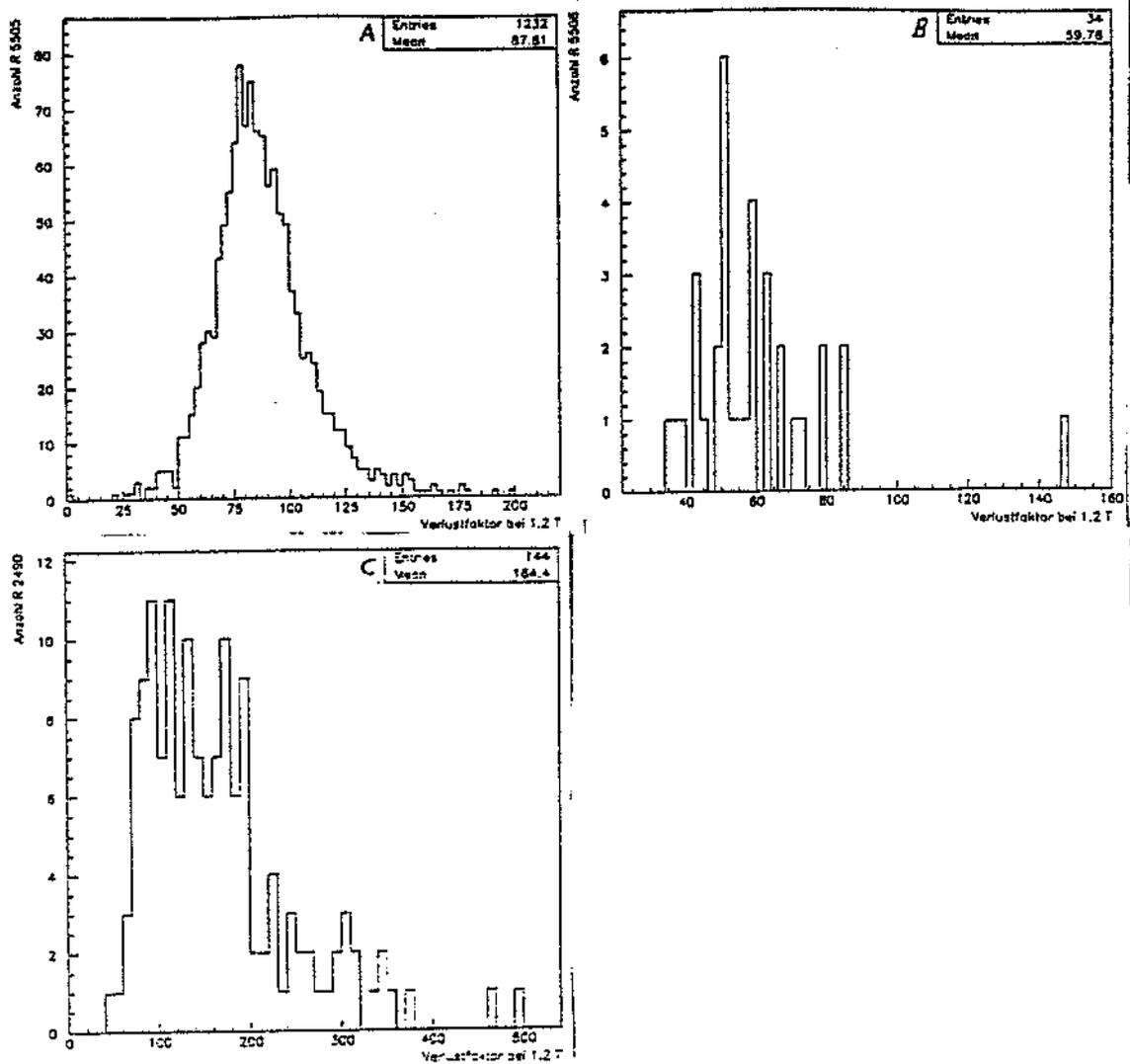


(Fig.29) p3 bei 0T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

Die Magnetfeld-Verlustfaktoren der einzelnen Multiplier wurden mit gegebenenfalls anhand der Rampen extrapolierten Relativgains bei 2000 V an den jeweiligen Multipliern erhalten. Die nachstehenden Bilder zeigen die Verteilungen der Verlustfaktoren für die vermessenen Multipliertypen in allen Magnetfeldern.

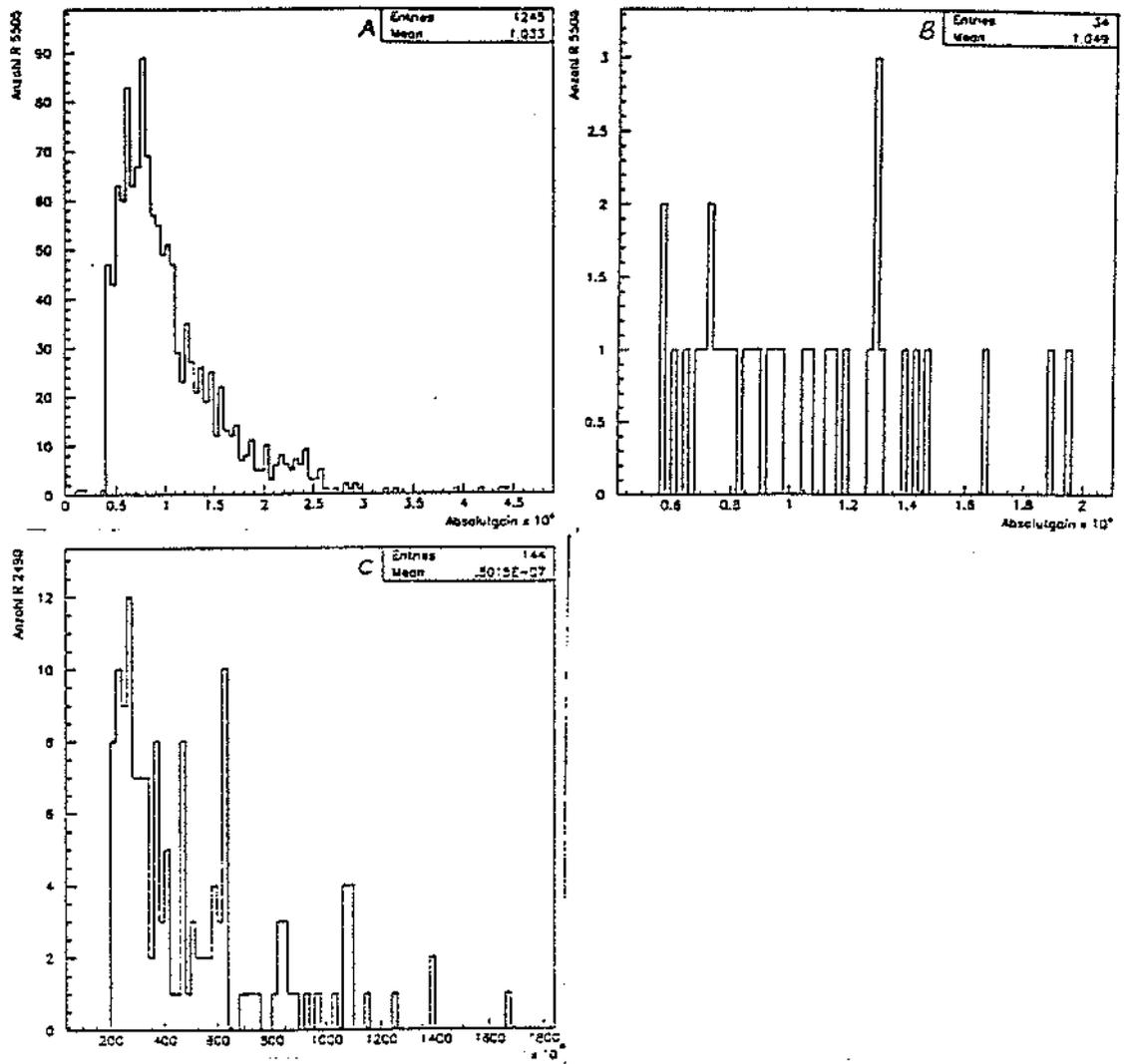


(Fig.30) Verlustfaktoren zu 0.95/0.88T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

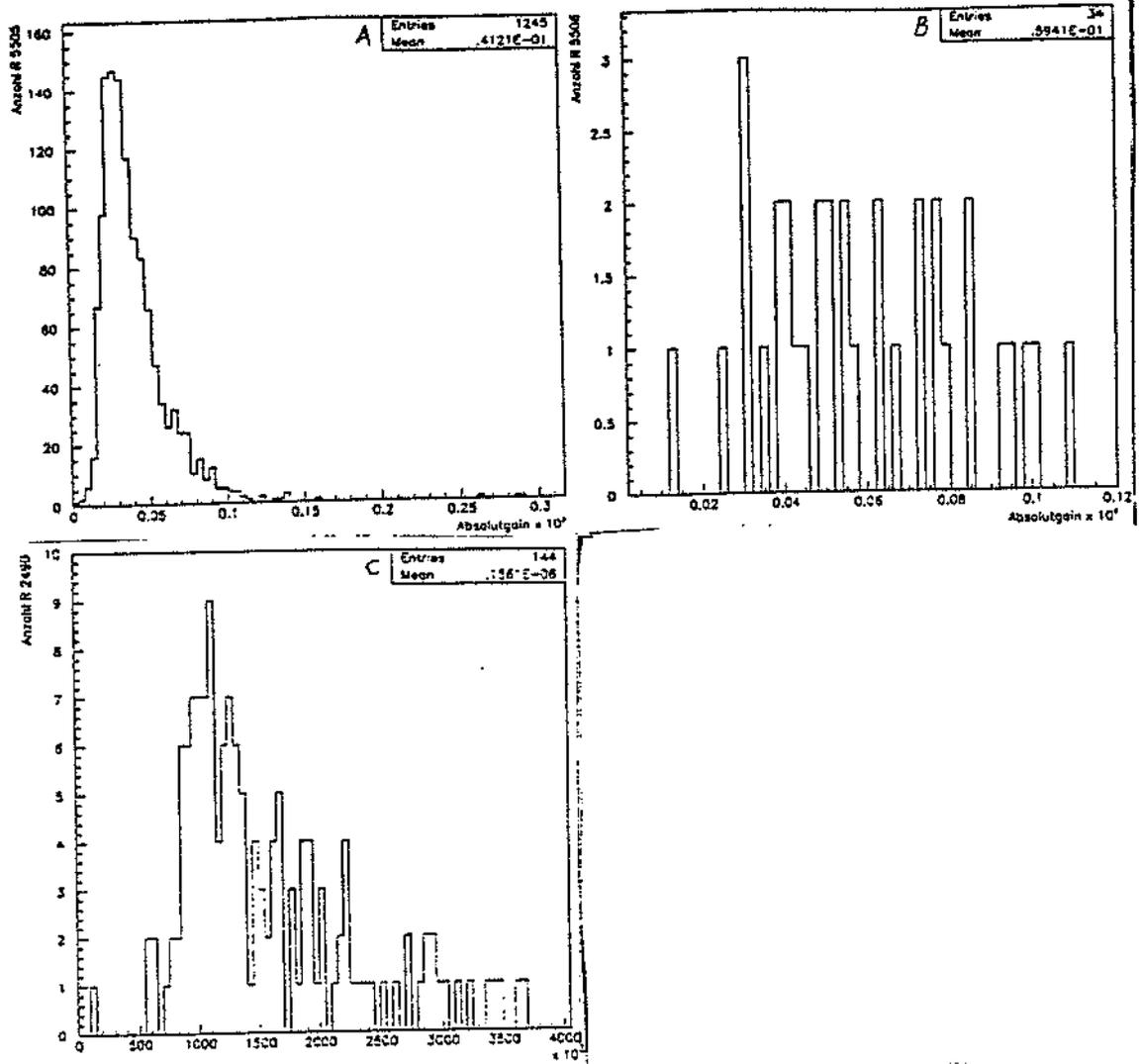


(Fig.31) Verlustfaktoren zu 1.2T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

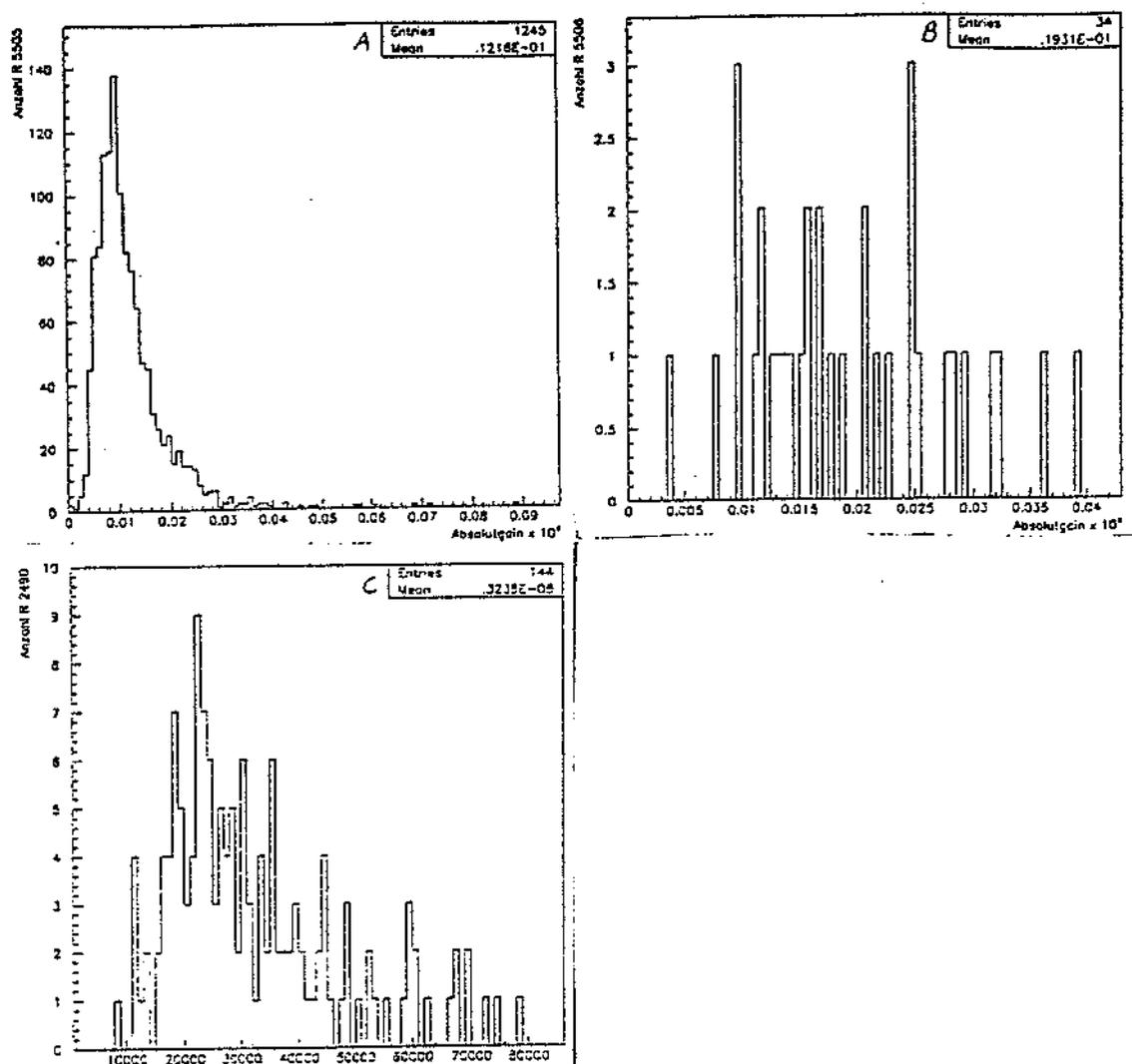
Das Gain von Kathoden- und Anodensensitivitätsmessungen des Herstellers an einem Multiplier lieferte dessen Absolutgain ohne Magnetfelder, der Quotient dieses Gains mit Verlustfaktoren das Absolutgain mit Feldern. Die folgenden Bilder zeigen die Gainverteilungen für die Photomultipliertypen in allen Magnetfeldern.



(Fig.32) Gains bei OT: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490



(Fig.33) Gains bei 0.95/0.88T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490



(Fig.34) Gains bei 1.2T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

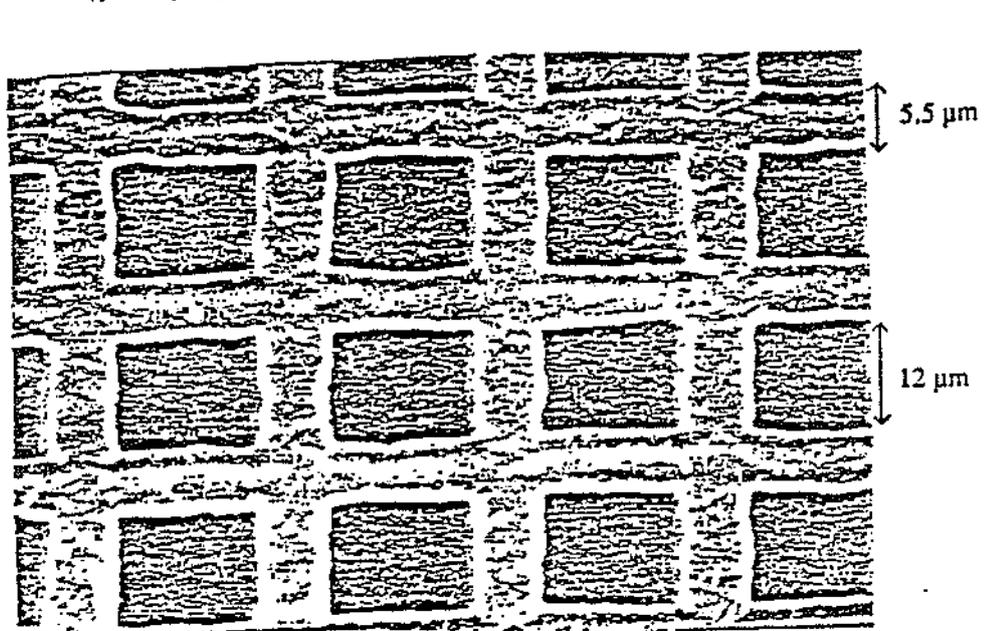
Von 1245 R 5505-Multiplier erreichten 3 schon ohne Magnetfeld kein Absolutgain in der Höhe von  $4 \times 10^5$ . In einem Magnetfeld von 1.2 T lagen die Absolutgains von weiteren 594 Multipliern unter dem dafür spezifizierten Wert von  $10^4$ . Die R 5506 aus den Vortests erwiesen sich, wie schon bekannt, als in jeder Hinsicht in Ordnung. Von 144 R 2490-Multipliern erreichten alle ein ausreichendes Absolutgain ohne Magnetfeld, bei einem Feld von 1.2 T jedoch unterschritt 1 den geforderten Wert von  $2 \times 10^4$ .

An den Verteilungen fiel zunächst auf, daß der Kalibrationsrampen-Parameter  $p_3$  für die meisten R 5505-Multiplier auf ca. 6, maximal ca. 6.3, für die R2490-

Multipliiert auf ca. 7 liegt, maximal ca. 7.11 liegt.

Vergleicht man  $p_3$  mit dem entsprechenden Exponenten in der Gainformel, so muß der Parameter das Produkt aus der Sammeleffizienz von Dynoden eines Multipliers und deren Anzahl sein. Bei herkömmlichen Multipliern hat die Sammeleffizienz wegen meist guter Fokussierung und günstig geformten, durchgehenden Dynodenblechen ein Wert wenig kleiner als 1. In diesem Fall ist der Exponent, der gewissermaßen die effektive Dynodenzahl einer Röhre angibt, fast gleich der wirklichen Dynodenzahl eines Multipliers. Bei den hier zu testenden Multipliern existieren aber aus schon genannten Gründen weder durchgehende Dynodenbleche noch gute Fokussierungen. Dadurch ist die Sammeleffizienz der Dynoden und so ihre effektive Zahl klein.

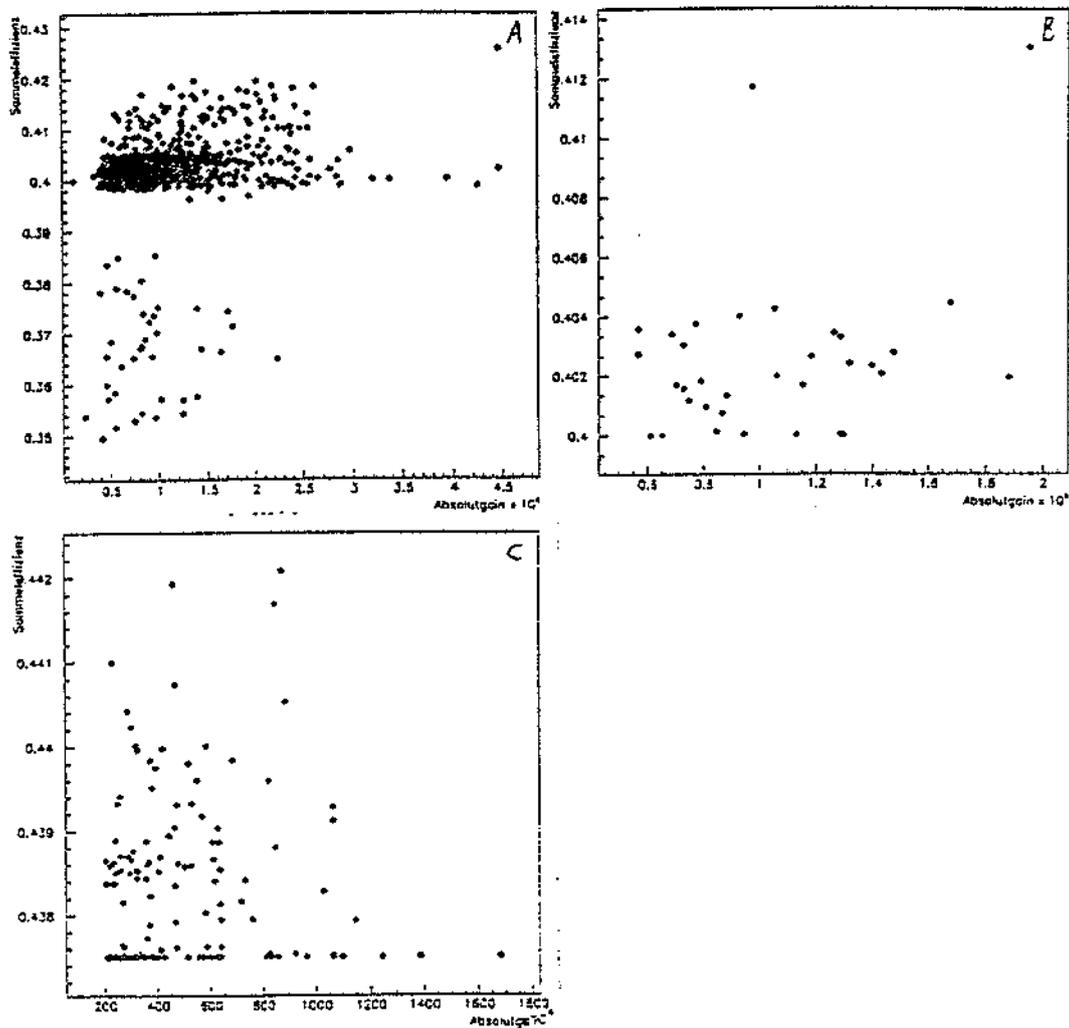
Die Sammeleffizienz oder die Wahrscheinlichkeit, daß ein Elektron eine Dynode trifft, muß hier durch das Verhältnis von Stegen zu Löchern der Dynodengitter gegeben sein. Das Bild zeigt die elektronenmikroskopische Aufnahme eines Dynodengitters ([Jan1]) ([Mor2]).



(Fig.35) Das Dynodengitter eines fine-mesh-Multipliers ([Jan1]) ([Mor2])

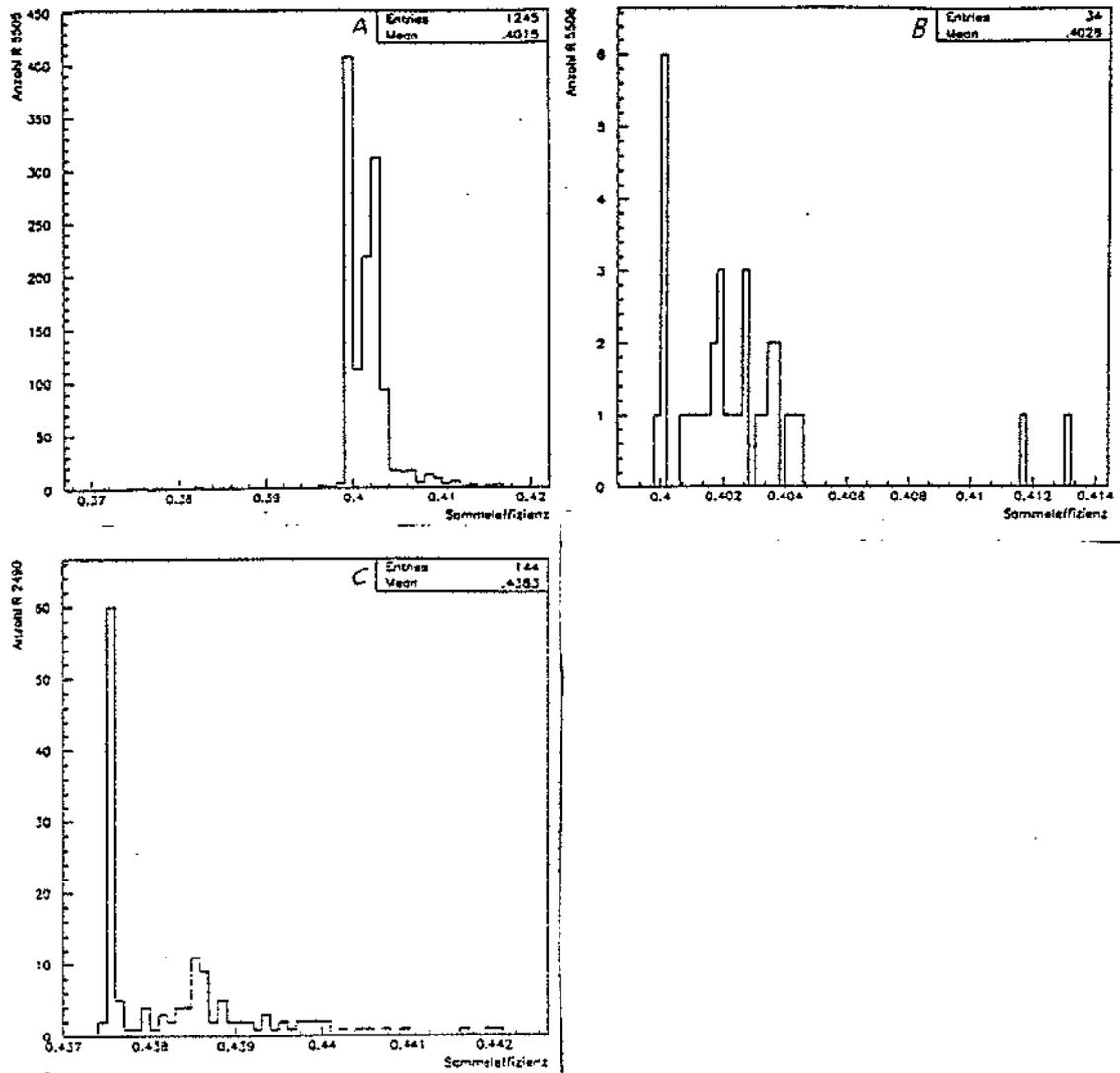
Ein genaues Vermessen des Verhältnisses ergibt, daß ein auf eine Dynode zufliegendes Elektron mit 0.588 Wahrscheinlichkeit einen Steg erreicht. Dies gilt so jedoch nur für Elektronen, die von der Kathode kommend zur ersten Dynode laufen. Von dort ab ist das Steg-zu-Loch-Verhältnis der jeweils folgenden Dynoden, welches durch das Loch der gegebenen Dynode zusätzlich begrenzt ist, entscheidend. Die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten sind dann die Mittelwerte der Wahrscheinlichkeiten aus den Konstellationen Loch-hinter-Loch (0.0) und maximale Größe von

Steg-hinter-Loch(0.81), also 0.405. Für die kleinen R 5505 - Modelle erhält man so nach Aufaddieren und Mitteln über deren 15 Dynoden eine mittlere Sammeleffizienz von ca. 0.417, für die großen R 2490-05mod mit ihren 16 Dynodeneine von ca. 0.416. Multipliziert mit der jeweiligen Dynodenzahl ergeben sich maximale effektive Dynodenzahlen von 6.255 und 6.66, die insbesondere bei den kleinen Röhren gut mit der Realität übereinstimmen. Die Abweichungen in den Werten lassen sich durch günstigere und weniger günstigere Verschiebungen der Gitter gegeneinander und leicht mögliche Toleranzen in den photochemisch geätzten Dynodengittern erklären. Da die Exponenten letztlich auch die Höhe des Gains eines Multipliers bestimmen, rühren die beobachteten Verstärkungsschwankungen ebenfalls von den zuvor genannten Gitterunterschieden her. Das folgende Bild zeigt die gefundene Korrelation zwischen Werten von  $p_3$  und den Gains der Multiplier ohne Magnetfeld.

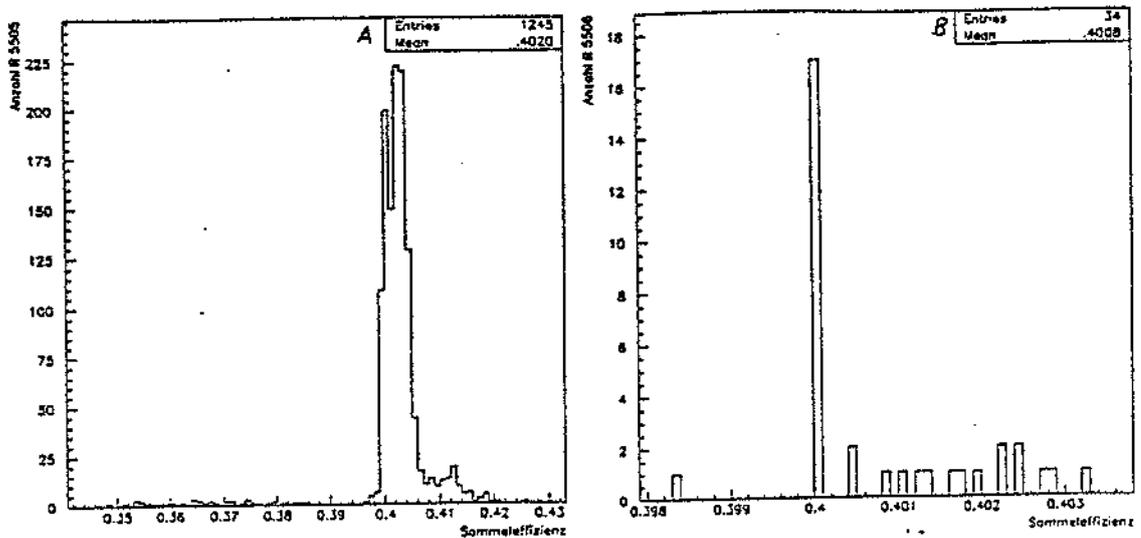


(Fig.36) Korrelationen: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

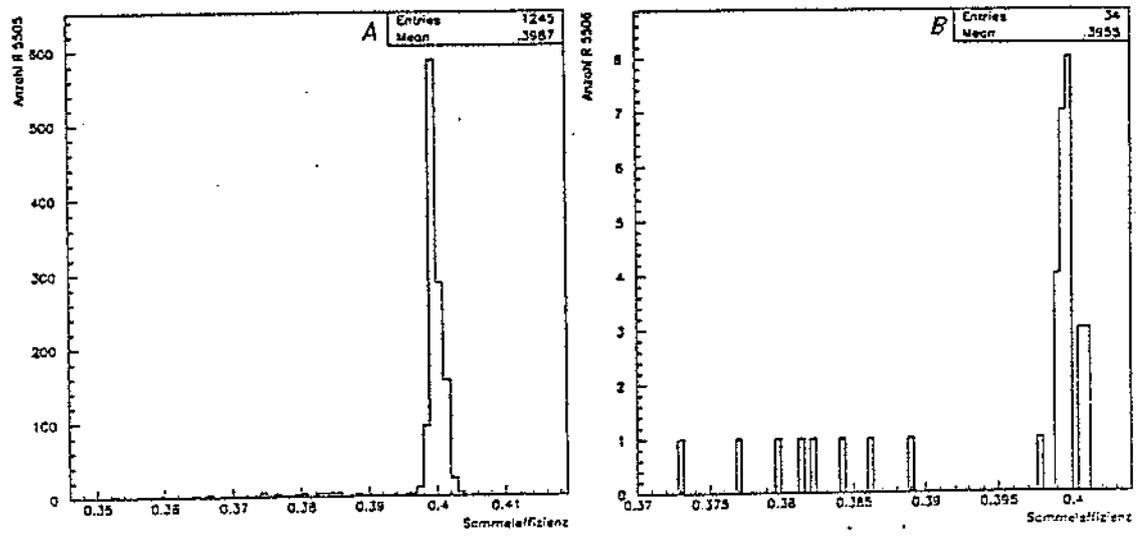
Wie das folgende Bild zeigt, ändern sich die Werte von  $p_3$  auch in Magnetfeldern praktisch nicht. Die effektive Dynodenzahl ist also zumindest in erster Näherung eine konstante Kenngröße der Multiplier.



(Fig.37) Sammeleffizienz bei 0T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490



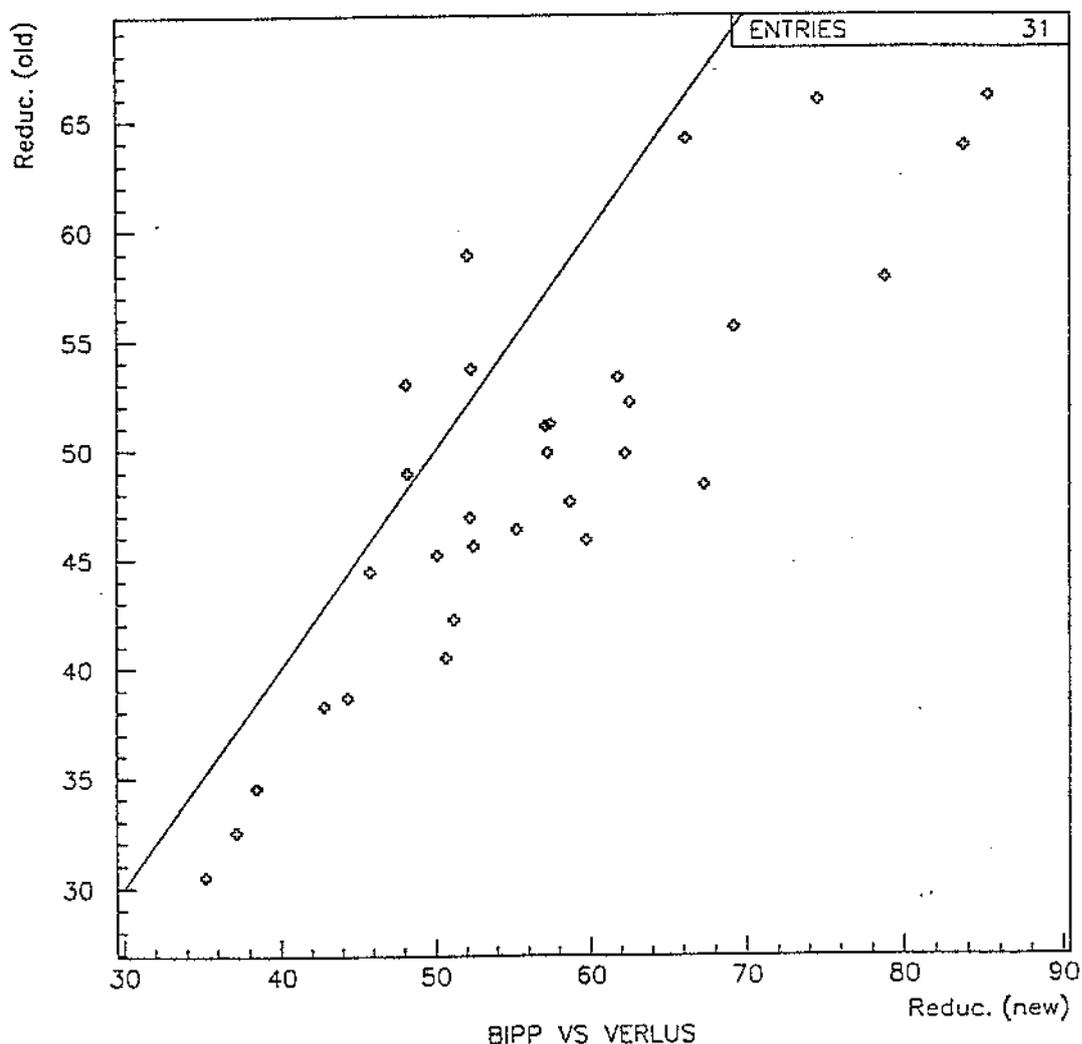
(Fig.38) Sammeleffizienz bei 0.95/0.88T: (A) R 5505, (B) R 5506



(Fig.39) Sammeleffizienz bei 1.2T: (A) R 5505, (B) R 5506

Offenbar wäre es von Vorteil, wenn der Hersteller der Multiplier bei allen Dynoden einer Röhre das maximale Steg-hinter-Loch-Verhältnis erreichen könnte. Das würde die mittlere Sammeleffizienz der Multipliertynoden fast verdoppeln und damit das Gain einer Röhre quadrieren. Vermutlich erfordert das aber kaum erreichbare Fertigungsgenauigkeiten.

Weiter war an den Verteilungen der Meßwerte die Höhe der Verlustfaktoren für die R 5505- und die R 2490-Multiplier bemerkenswert. Während die Vortests Faktoren von ca. 40 bis ca. 50 zwischen 0 und 1.2 T für die kleinen Multiplier ergeben hatten, wiesen sie jetzt durchschnittlich Faktoren von ca. 86 auf. Bei den großen Multipliern waren einmal Verlustfaktoren um ca. 100 festgestellt worden. Nun erreichten sie im Durchschnitt Faktoren um ca. 164. Die Ergebnisse der kleinen R 5506-Multiplier im Magnetfeld-Testapparat stimmten aber gut mit ihren Vortestwerten überein. Das schloß Fehler im Testapparat aus. Die Serien-Multiplier waren offenbar schlechter als die Testmodelle.



(Fig.40) Verlustfaktoren der Vortests gegen die der Serientests

Die in Magnetfeldern auftretenden Gainverluste lassen sich mit einer einfachen

Betrachtung abschätzen. In den fine-mesh-Multipliern müssen aus dem Steg einer Gitterdynode sekundäremittierte Elektronen erst ihren Ursprungsteg überqueren, bevor sie durch ein Gitterloch zur nächsten Dynode gelangen können. Die Sekundäremission kann unter allen Winkeln erfolgen. Nimmt man ein parallel zu einem entsprechenden Multiplier gerichtetes Magnetfeld und hauptsächlich senkrecht zum Feld emittierte Sekundärelektronen an, so kann das Magnetfeld die Elektronen auf Kreisbahnen zwingen. Ist der Radius dieser Bahnen ähnlich groß wie die Breite des Ursprungs-Dynodenstegs der Elektronen, so können einige der Ladungsträger den Dynodensteg nach ihrem Entstehen nicht mehr verlassen. Diese Elektronen werden in gewissem Sinn von ihrer Ursprungsdynode absorbiert. Sie gehen damit dem Verstärkungsprozeß des betreffenden Multipliers verloren und verursachen dessen Gainverlust im Magnetfeld. Nimmt man also für jede Dynode bzw. die an ihr stattfindenden Sekundäremissionsprozesse ein einfaches Absorptionsgesetz an und reduziert den Sekundäremissionsfaktor ohne Magnetfeld damit, so erhält man:

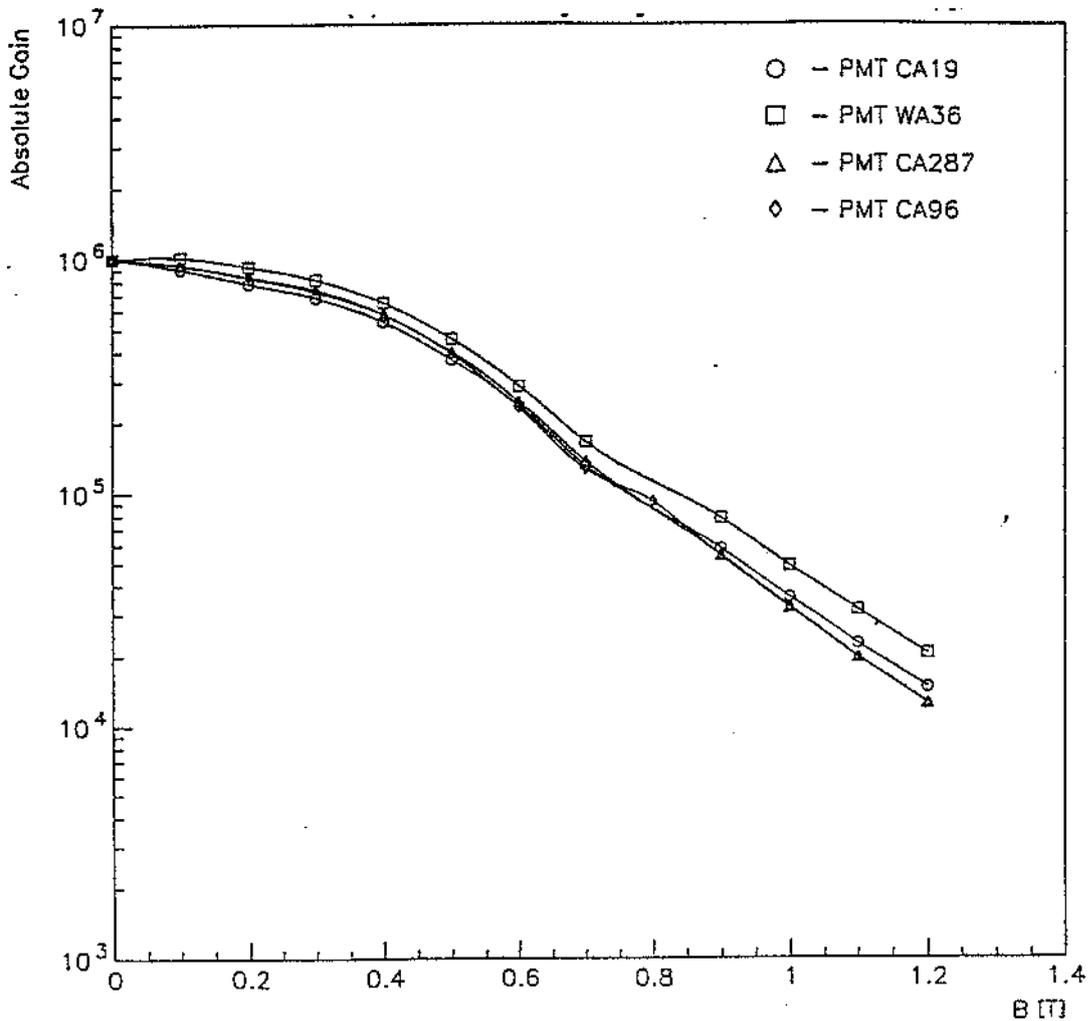
$$G = \left( \delta \left( 1 - \exp \left( - \frac{2\phi}{B v s_D} \right) \right) \right)^{\alpha N_D} \quad (4.3)$$

$B$  : Magnetische Flußdichte

$v$  : Geschwindigkeit der Sekundärelektronen mit Energie  $\phi$

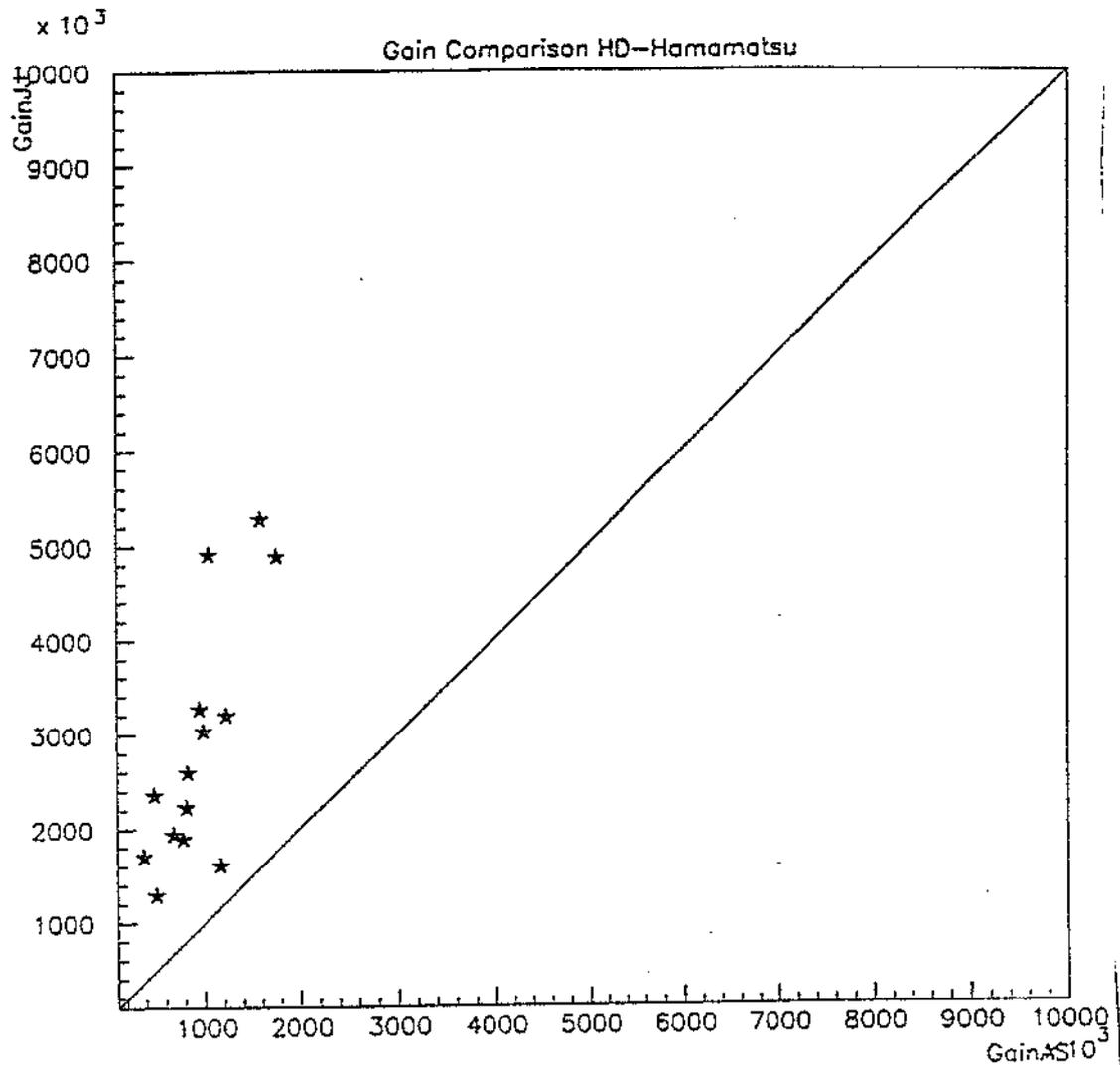
$s_D$  : Dynodenstegbreite

Rechnet man mit den Werten von ca. 1.5 eV für die Austrittsarbeit und ca. 5.5  $\mu\text{m}$  als Dynodenstegbreite, so findet man für die kleinen Röhren in einem Feld von 0.95 T eine Gainabschwächung um einen Faktor 37, bei 1.2 T einen um 97. Für die größeren Röhren findet man analog bei 0.88 T einen Faktor um 60, bei 1.2 T einen um 208. Diese Betrachtung mag für konservative Abschätzungen der Gainverlustfaktoren von Multipliern in Magnetfeldern brauchbar sein. Wie die nachfolgenden Bilder ([Zub1]) von schrittweise bis 1.2 T aufgenommenen Verlustfaktoren für kleine Multiplier zeigen, geben die abgeschätzten Faktoren ähnliche Werte wie die Messungen.



(Fig.41) Gains von Multipliern in ansteigendem Magnetfeld

Sowohl die Betrachtung als auch die Kontrolle ergeben, daß die in den Serientests ermittelten Verlustfaktoren korrekt sind. Die seit den Vortests höher gewordenen Verlustfaktoren und die starke Streuung, die diese aufweisen, lassen sich vermutlich wieder auf Probleme in der manuellen Fertigung der Multiplier zurückführen. Die Absolutgains der Multiplier zeigten eine interessante Diskrepanz zu den Werten, die dafür in den Messungen aus Mittelwerten und Breiten von Signalverteilungen bei einer Spannung errechnet wurden. Die jeweiligen Werte für einen Multiplier entsprachen sich gut, allerdings lag das Gain nach Herstellerangaben durchweg um einen Faktor von ca. 2.5 tiefer als das anders ermittelte Gain. Das Bild zeigt einen Vergleich beider Gains für einige der kleineren R 5505-Multiplier.



(Fig.42) Vergleich von Gains laut Hersteller und errechneten Gains für R 5505

Die Unterschiede zwischen diesen beiden Absolutgain-Bestimmungen rühren von der schon geschilderten Kathodensensitivitätsmessung des Herstellers her ([Sti2]). Bei dieser wird durch die spezielle, nicht für den Normalbetrieb geeignete Beschaltung eines Multipliers der ganze Strom von Photoelektronen aus dessen Kathode gemessen. Bei der folgenden Errechnung des Gains mit der Anodensensitivität, die im Normalbetrieb des Multipliers gemessen wird, wird vorausgesetzt, daß der gemessene Kathodenstrom ganz zur Verstärkung beiträgt. Im Normalbetrieb des Multipliers ist das aber nicht der Fall. Dann nämlich trägt nur der Teil des Kathodenstroms zum Gain bei, der auch von der ersten oder, unter Umständen, von allen Dynoden des Multipliers aufgefangen wird. Das ist bei den kleineren Röhren

aber im Mittel nur 41.7%, bei den grösseren nur 41.6%, wie die Betrachtung der mittleren Sammeleffizienz aller Dynoden schon zeigte. Daraus folgt, daß der vom Hersteller angegebene Kathodenstrom in der zugehörigen Absolutgainbestimmung als zu groß eingesetzt wird, wodurch das resultierende Gain zu klein wird. Das wirkliche Absolutgain der getesteten Röhren ist also das Gain nach Herstellerangaben mal dem Kehrwert ihrer jeweiligen Sammeleffizienz. So ergeben sich für kleine und große Multiplier gerade die gesuchten Faktoren von ca. 2.5.

Mit einer einfachen Betrachtung kann man die Größenordnung des wirklichen Absolutgains der Multiplier auch grob abschätzen. Die die Sekundärelektronenemission hervorrufenden schnellen Elektronen dringen relativ ungestört in ein Material ein und vermitteln dort sovielen Elektronen die nötige Austrittsenergie, bis ihre eigene Energie verbraucht ist. Die ausgelösten Elektronen bewegen sich mit maximal ihrer Austrittsenergie zur Materialoberfläche, wobei ihre Zahl durch Stöße mit anderen Elektronen und Atomrümpfen reduziert wird. Diejenigen, die die Oberfläche erreichen und verlassen können, sind die Sekundärelektronen. Etwas quantitativer gilt demnach:

$$\delta = \frac{Ue}{\phi} \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (4.4)$$

$\phi$  : Ablösearbeit für Sekundärelektronen im Materialinnern

$Ue$  : Energie des in die Dynode eindringenden Elektrons

$x$  : Dicke der Dynodenbeschichtung

$L$  : Mittlere freie Weglänge für Elektronen in der Beschichtung

Bei 2000 V erreichen die meisten der kleineren Multiplier laut Hersteller ein Gain von etwa 1000000. Nimmt man für die Rechnung ca. 120 V zwischen den Dynoden an, 1.5 eV als typische Austrittsenergie der Sekundärelektronen, ca. 100 Angstrom als mittlere freie Weglänge und die dünnste Dynodenbeschichtung mal einem Faktor zwei für ein Maximum-Minimum-Verhältnis ähnlich der Kathode, dann erhält man 11.2 Sekundärelektronen. Mit einer effektiven Dynodenzahl von 6.1 potenziert ergibt sich ein Absolutgain für die kleinen Röhren von ca. 2500000, was den Faktor von ca. 2.5 zwischen Herstellergain und wirklichem Gain der Röhren bestätigt. Eine analoge Rechnung für die größeren Multiplier liefert ein Gain von ca. 12000000, was wieder etwa um den Faktor von ca. 2.5 über dem Herstellergain für diese Röhren von ca. 5000000 liegt. Auch nach diesen Abschätzungen ist das Absolutgain der Röhren also größer als nach Angaben des Herstellers der Multiplier zu erwarten.

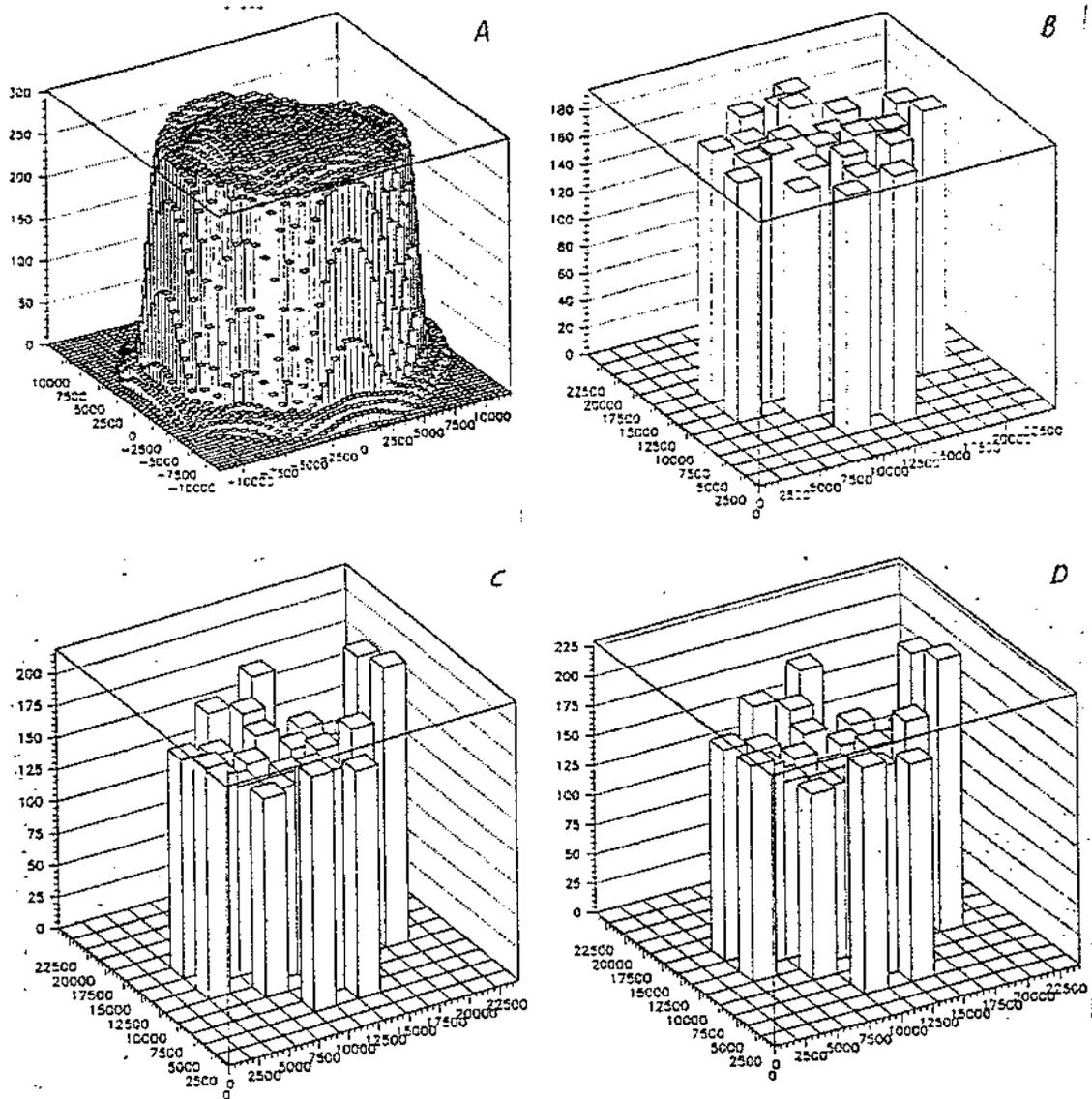
Das scheinbar zu niedrige Absolutgain vieler Multiplier in einem Magnetfeld von 1.2 T Stärke ist damit auch erhöht. Da das Magnetfeld des H1-Detektors an den Einsatzorten der Multiplier schwächer als 1.2 T ist, wird das Gain der Multiplier vielleicht sogar höher als zuvor geplant sein. Die Multiplier könnten dann bei Einhaltung des ursprünglich für das SPACAL geplanten Gains mit niedrigen Versorgungsspannungen arbeiten, was sich wieder positiv auf die Unterdrückung der

Funkeneffekte in den Röhren auswirken würde.

Trotz aufgetauchter Probleme kann man also sagen, daß die R 5505- und die R 2490-Multiplier von ihrer Kalibration her mehrheitlich zum Einsatz im SPACAL tauglich sind. Bei 0.95 bzw. 0.88 T erreichen die Röhren im Durchschnitt ein korrigiertes Absolutgain von  $1.025 \times 10^5$  bzw. von  $3.593 \times 10^5$  unter 2000 V Versorgungsspannung.

### 4.3 Die Ergebnisse der Homogenitätsmessungen

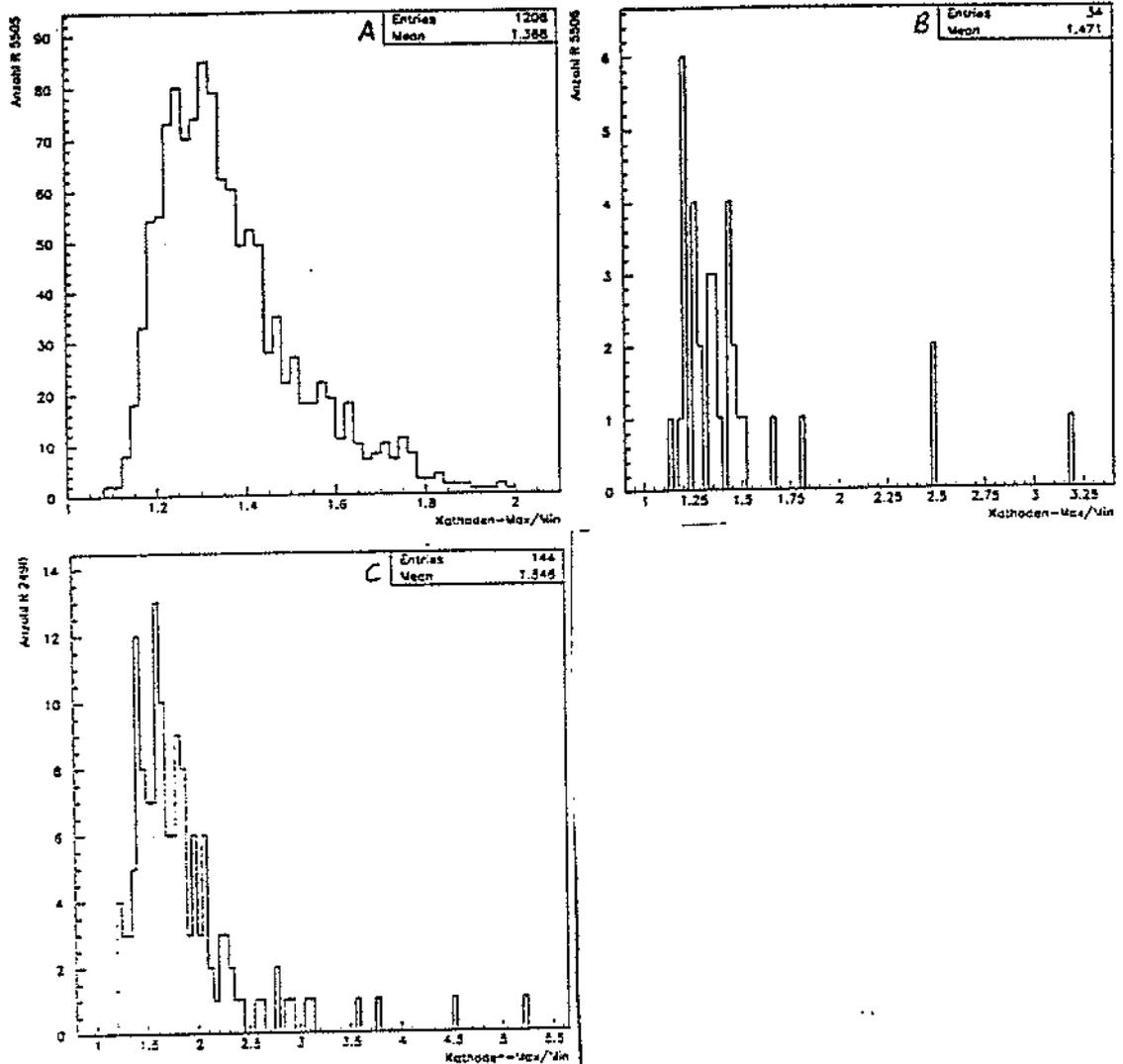
Insgesamt wurden 1320 R 5505 aus Serien- und Reklamationslieferungen, 34 R 5506 (Strahlungsharte R 5505) von den Vortests und 144 R 2490 aus Serienlieferungen nach den beschriebenen Verfahren mit und ohne Magnetfelder in ihrer Kathodenhomogenität vermessen. Das Bild zeigt die typischen Homogenitäten eines der vermessenen Multiplier in verschiedenen Magnetfeldern.



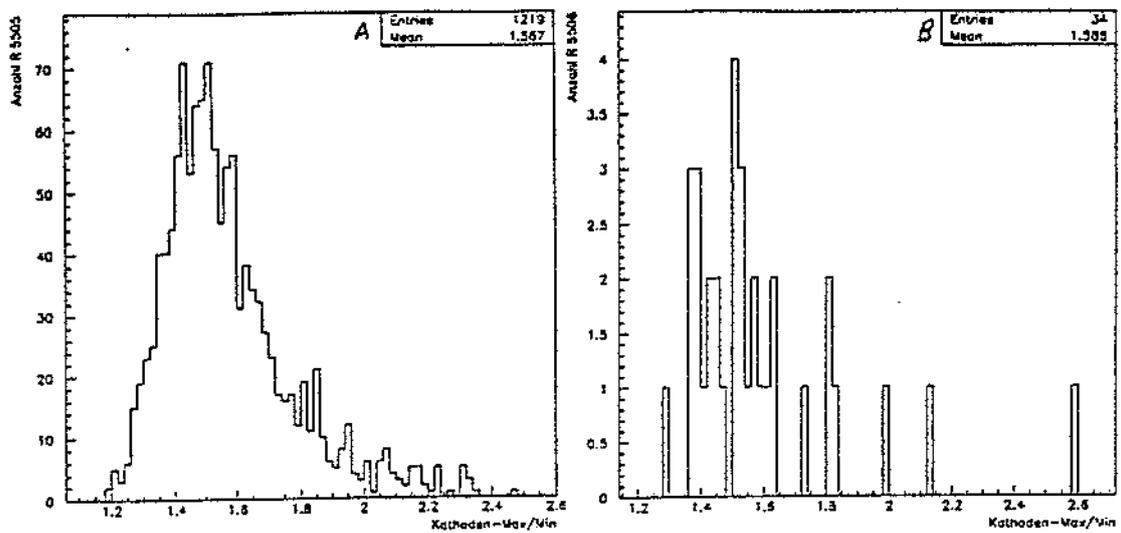
(Fig.44) Homogenitäten bei 0T: (A) HD, (B) HH, 0.95 T: (C) HH, 1.2 T: (D) HH

Wie zuvor bei der Kalibration wurden die Meßergebnisse der Kathodenuntersuchungen von besonderen Programmen [Zub2] ausgelesen und weiterverarbeitet. Die wichtigen Daten wurden wieder in eine der 3 schon erwähnten Datenbanken für die jeweiligen Multipliemodelle geschrieben. Bei diesen Werten handelte es sich um die Maximum-zu-Minimum-Verhältnisse einer Kathode in den verschiedenen Magnetfeldern, die Standardabweichungen der Verteilungen von Signalen einzelner Kathoden-Rasterpunkte in allen Feldern und eine Güteklasse der Kathode. Das Verhältnis wurde durch Vergleich aller Signale der Rasterpunkte einer Kath-

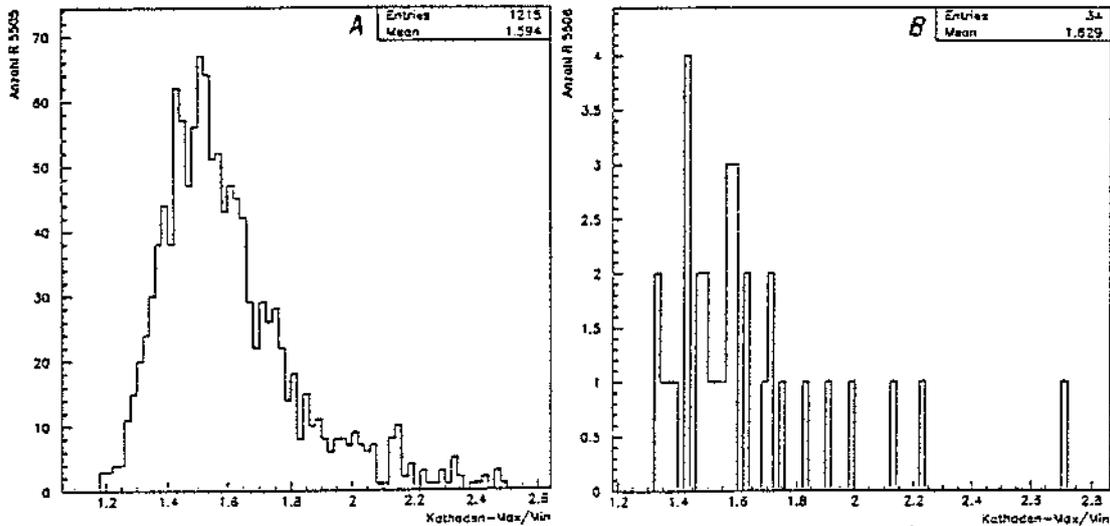
odenmessung gewonnen. Dieser Wert hatte den Vorteil, direkt mit den liefervertraglich festgelegten Werten vergleichbar zu sein. Andererseits konnte schon ein Ausreißer in den Rasterpunkt-Signalen das Verhältnis verfälschen. Allerdings kamen während der Messungen nur 3 derartiger Zweifelsfälle vor. Das Bild zeigt die Maximum-zu-Minimum-Verteilungen der vermessenen Multiplier in allen Magnetfeldern, sofern vorhanden:



(Fig.45) Max/Min bei 0T: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490



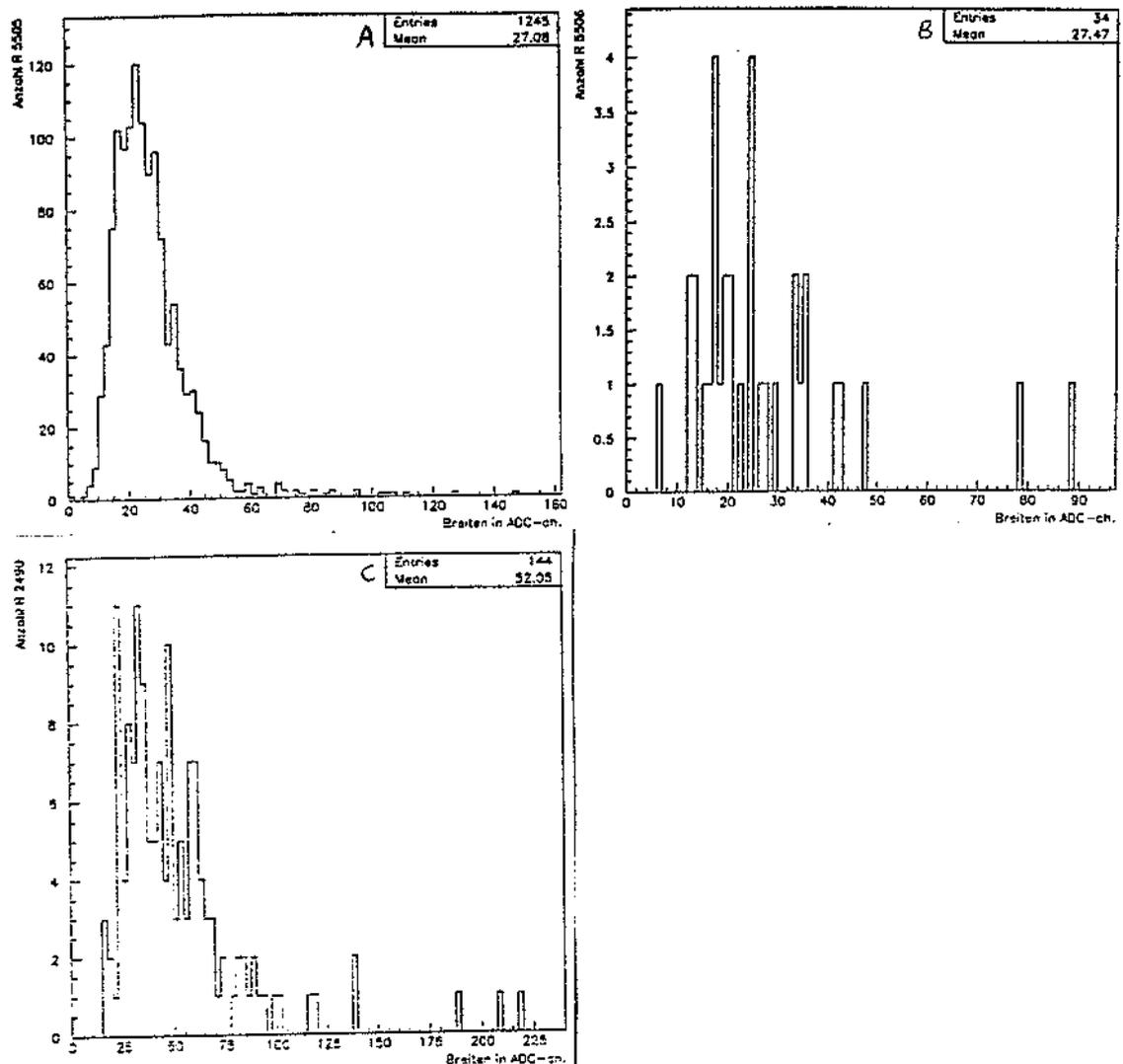
(Fig.46) Max/Min bei 0.95T: (A) R 5505, (B) R 5506



(Fig.47) Max/Min bei 1.2T: (A) R 5505, (B) R 5506

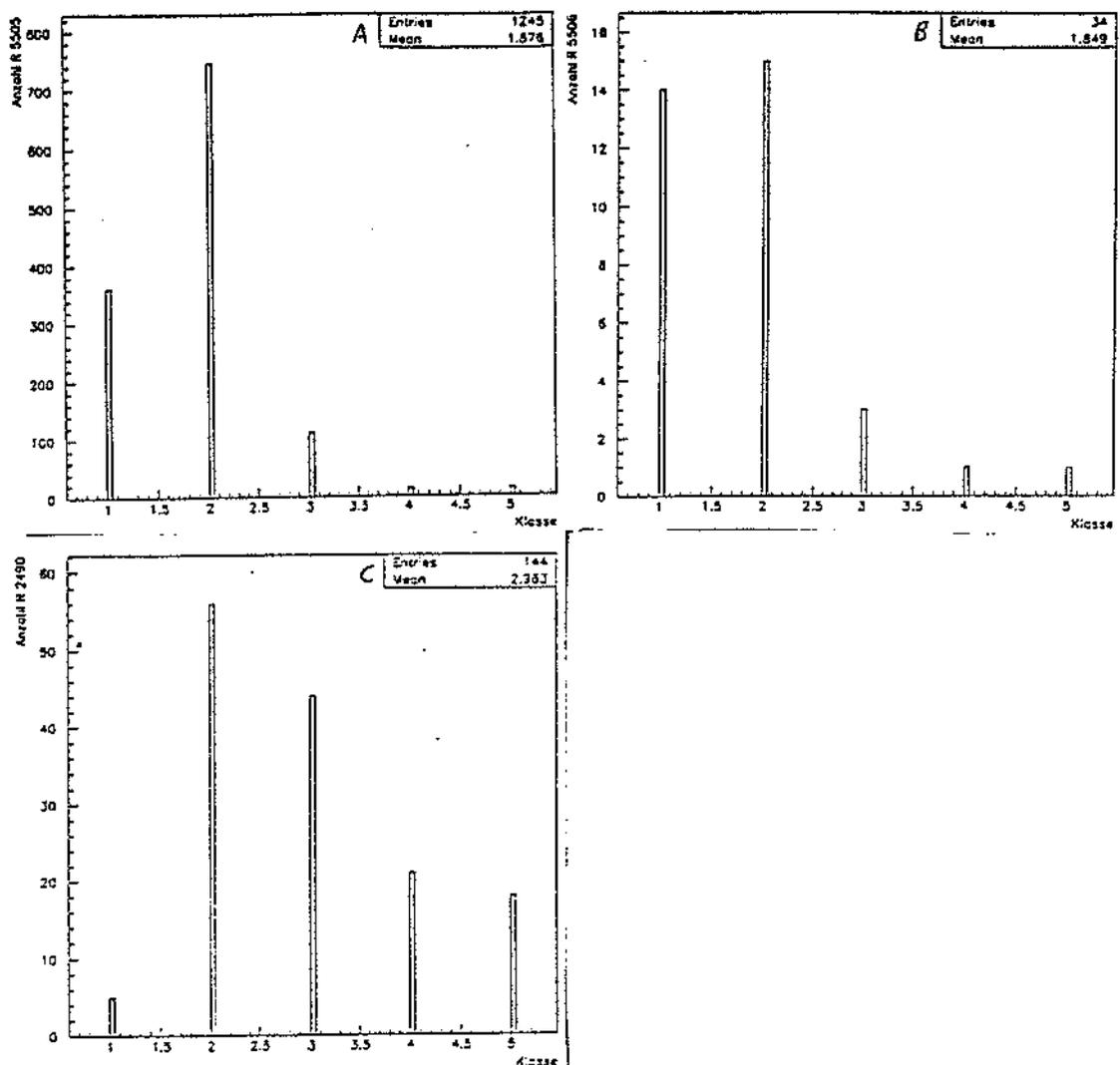
Durch Auftragung aller Rasterpunktwerte einer Multiplierekathode etwa in ADC-channels nach der Anzahl ihres Vorkommens ließ sich eine Verteilung der Meßwerte erhalten, deren Breite Auskunft über die Homogenität der Kathode gab. Je weniger die Signalwerte um einen Mittelwert streuten, desto gleichmäßiger war die Empfindlichkeit der vermessenen Kathode. Die Ergebnisse dieser Methode waren

weniger gut mit spezifizierten Verhältniszahlen zu vergleichen, aber dafür enthielten sie alle Informationen über eine Kathodenmessung. Das nachstehende Bild zeigt die Verteilungen der Standardabweichungen aller Multiplier in den Testmagnetfeldern.



(Fig.48) Standardabweichungen bei OT: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

Nach den Breiten ihrer Rasterpunkt-Verteilungen wurden die in Heidelberg vermessenen Multiplier schließlich noch verschiedenen Güteklassen zugeordnet. Dies geschah, um die verlässlichen Breiten-Ergebnisse leichter brauchbar zu machen. Es existierten insgesamt 5 Ränge, nämlich von einer Breite unter 20 ADC-channels Rang 1, unter 40 Rang 2, unter 60 Rang 3, unter 80 Rang 4 und ansonsten Rang 5. Das Bild zeigt die Klassifikationen ohne Magnetfeld.



(Fig.51) Qualitätsklassen: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

Da die Apparatur für Test ohne Magnetfeld die R 5505 über eine Fläche von  $24 \times 24 \text{ mm}^2$ , die R 2490 über eine von  $52 \times 52 \text{ mm}^2$  vermaß, während die vom Hersteller angegebenen Kathodendurchmesser nur 17.5 und 36 mm betragen, wurde für solche Meßwerte eine entsprechende Korrektur vorgenommen. Das zugehörige Datenverarbeitungsprogramm bearbeitete in den abgenommenen Kathodenprofilen nur die Werte, die innerhalb des jeweils festgesetzten Kathodendurchmessers lagen. Von 1245 R 5505-Multiplier erreichten 29 ohne Magnetfeld nicht das für sie geltende Homogenitätsverhältnis von 2. Mit Magnetfeld von 1.2 T Stärke erreichten 32 nicht ihr spezifiziertes Verhältnis von 2.5. Bei den R 5506 fielen unter den gleichen Bedingungen keiner ohne und 2 mit Magnetfeld aus. Bei einem Verhältnis

von 2.5 erreichten von 144 R 2490 12 ohne Magnetfeld nicht die vorgegebenen Werte. Obwohl die Kathodenschrumpfung in den Magnetfeld-Meßapparaturen nicht direkt zu beobachten war, konnten starke Schrumpfungen doch mit in die Homogenitätsmessung hineinspielen und auf diesem Weg im Homogenitätsverhältnis indirekt ablesbar sein. Es war allerdings auch möglich, daß Multiplier, die ohne Magnetfeld ein Verhältnis über 2 aufwiesen, im Magnetfeld scheinbar weniger inhomogen wurden. Das lag an der groben Rasterung der Beleuchtung im Magnetfeld-Testapparat. Scharf begrenzte Inhomogenitäten einer Multiplierkathode konnten dadurch unter Umständen übersehen werden.

Mit den Schnitten in den Kathodenmeßergebnissen der Apparatur für Tests ohne Magnetfeld fielen insbesondere die interessanten "Ringwälle", wie sie auf dem Anfangs gezeigten Kathodenbild eines Multipliers ohne Magnetfeld zu sehen sind, weg. Zum Verständnis der Multiplier ist aber die gesamte aufgenommene Kathode einer Röhre interessant.

Beim Vergleich der Ringwall-Durchmesser mit Durchmessern von Kathodenkontaktschicht und -ring in einem Multiplier fällt die Gleichheit der Maße auf.

Der äußere, niedrigere Ringwall wird durch Beleuchtung der Kathodenkontaktschicht erzeugt. Die spiegelnde Schicht reflektiert eingestrahktes Licht ins Kathodenfensterglas, wo es erneut reflektiert wird. Dadurch gelangt das Licht schließlich auf die Kathode und erzeugt so ein Signal im Multiplier. Die Gesamtheit dieser Signale bildet den kleinen Ringwall.

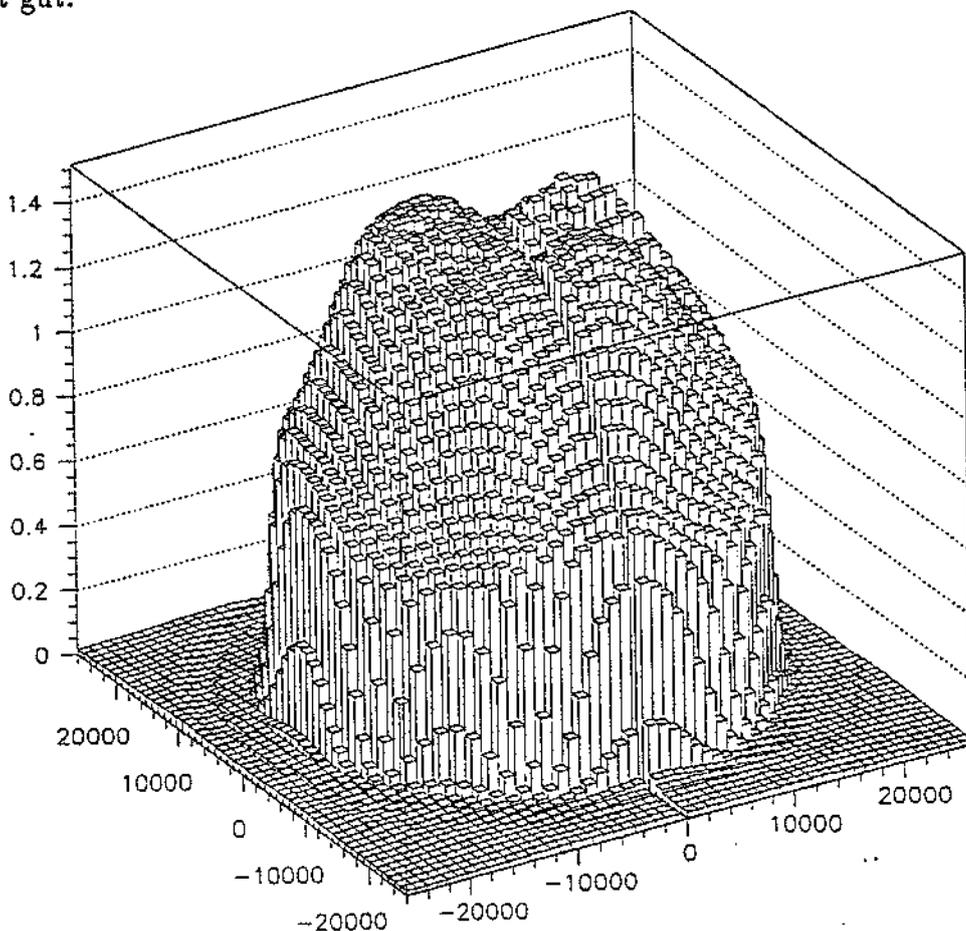
Der innere Ringwall, der sehr ungleichmäßig und teilweise auch höher wie der eigentliche Kathodenbereich eines Multipliers ist, wird durch den Kathodenkontakttring verursacht. Er liegt unter Hochspannung und ist durch die Fertigungsmethoden der Multiplier zum großen Teil mit demselben Bedampfungsmaterial bedeckt wie Kathode und Dynoden. Wird er von Photoelektronen der Kathode getroffen, kann er deshalb als zusätzliche Dynode für die Elektronen wirken. Die am inneren Rand des Rings erzeugten Sekundärelektronen können dann diese weitere Dynode verlassen und das normale Verstärkungssystem des Multipliers durchlaufen. Je nach der Oberflächenstruktur und der Gleichmäßigkeit der Bedampfung des Kontakttrings werden so am Umfang des eigentlichen Kathodenbereichs einer Röhre Signale erzeugt, die höher sein können als auf dem üblichen Weg entstandene.

Die Form einer Multiplierkathode selbst wird von ihrem Herstellungsprozeß bestimmt. Im Prinzip folgt der schon geschilderte Bedampfungsvorgang einer Photokathode den Gesetzen der Rohrströmung einer viskosen Flüssigkeit, wobei der Abstand der Kathode zur ersten Dynode die Rohrlänge und der Innendurchmesser des Multiplierkolbens den Rohrradius darstellt. Nach etwa dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz würde man also bei genügend großem Abstand zwischen Kathode und erster Dynode, damit sich eine Rohrströmung auch ausbilden kann, eine Art paraboloider Materialverteilung auf einer Kathode erwarten.

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{8 \eta l} R^4 \quad (4.5)$$

$Q$  : Materialfluß  
 $\Delta p$  : Druckunterschied an den Rohrenden  
 $\eta$  : Viskosität des Mediums  
 $l$  : Rohrlänge  
 $R$  : Rohrradius

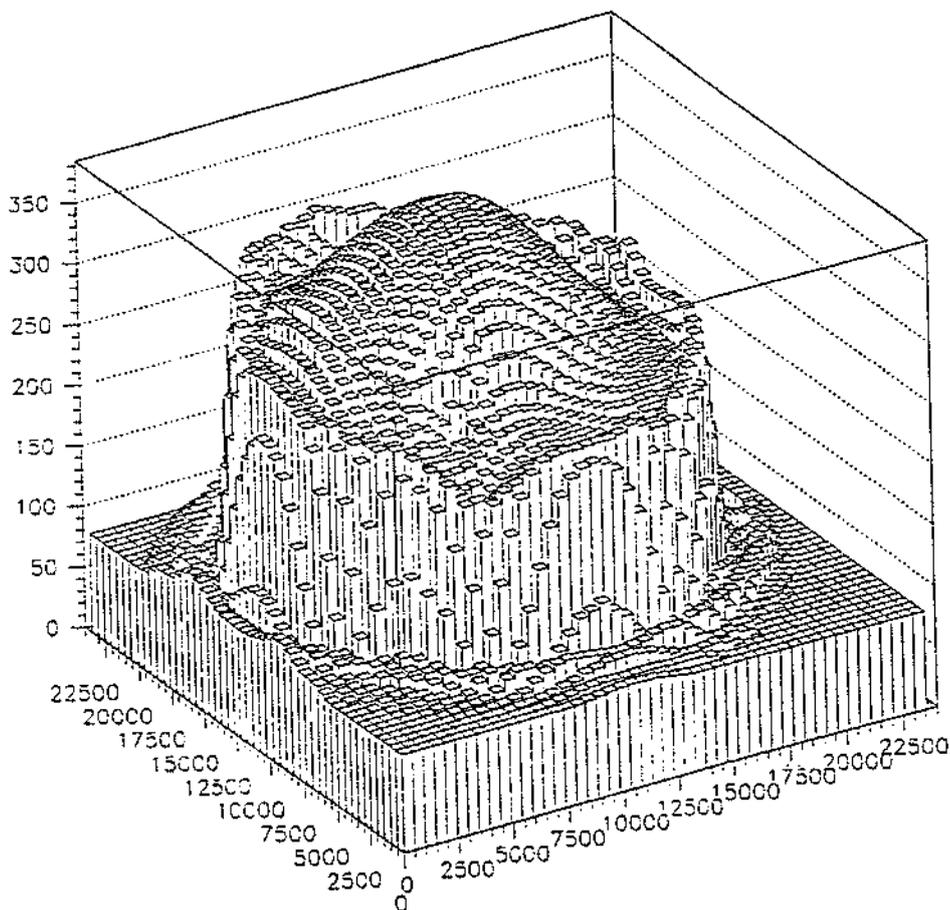
Der Homogenitätsscan eines direkten Vorgängermodells des R 2490 zeigt diesen Effekt gut.



(Fig.52) Homogenität eines R 2490-06mod-Vorgängers

Die Rohrlänge ist um das etwa zehnfache größer als beim Nachfolgemodell, so daß die Kathode sich fast zum Paraboloid schließt. Die Einsenkungen im oberen Teil des Profils rühren von den beim Bedampfungsprozeß umströmten vier Streben her. Noch eins fällt auf: Bei diesem Modell wirkt der Kathodenkontaktring nicht als zusätzliche Dynode, da er ein Profil besitzt und auftreffende Photoelektronen

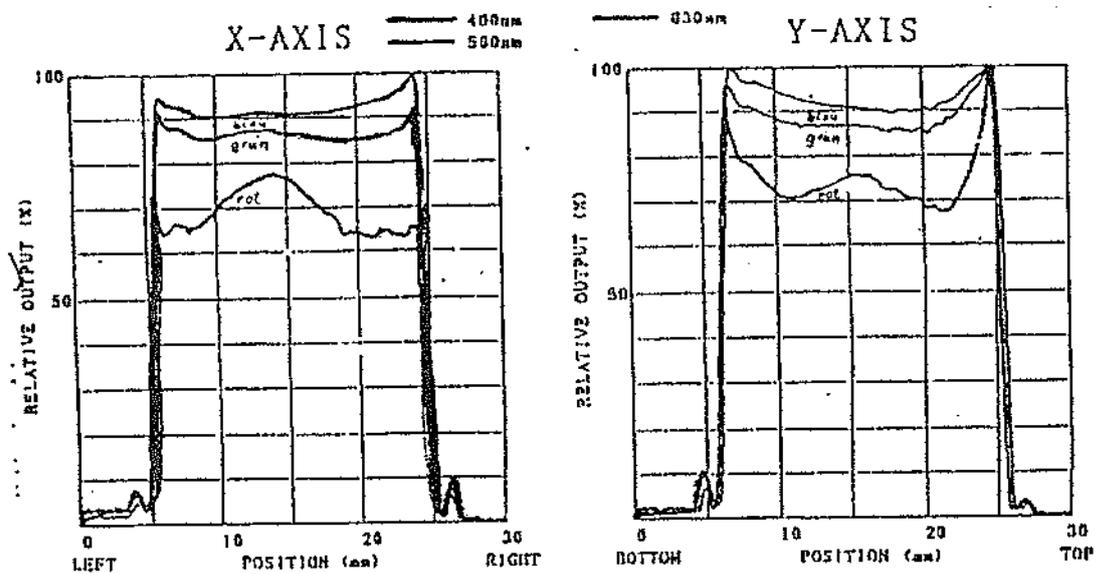
somit absorbiert. Daher gibt es keinen zweiten Ringwall. Beim R 2490, aber genauso beim R 5505-Multiplier sind die Abstände von Kathode zu erster Dynode jedoch klein. Da sich so keine volle Rohrströmung mehr ausbilden kann, erwartet man eine starke Bedampfung der Kathode im Bereich des Spalts zwischen Stapel und Glas und eine weniger Starke in der Mitte des Kathodenfensters. Diese Kraterstruktur der Photokathode tritt bei den vermessenen Röhren prozentual tatsächlich am häufigsten auf, nämlich zu ca. 75 %. Die über den Bedampfungsprozeß gemachten Aussagen gelten allerdings nur für große Stückzahlen; im einzelnen Fall kann durch mehr Material, leicht andere Viskosität und unterschiedliche Drücke auch sonst eine paraboloidale Kathode entstehen. Außerdem können mechanische Beschädigungen insbesondere an den ersten Dynoden Löcher ins Kathodenprofil projizieren, da das Gain an diesen Stellen kleiner ist.



(Fig.53) Homogenität eines Multipliers mit Delle in der ersten Dynode

Bei Multipliern mit kompliziertem Fokussiersystem zwischen Kathode und erster Dynode verwischt sich die Form der Photokathode-Bedampfung.

Bei diesen Betrachtungen wird davon ausgegangen, daß die Zahl aus einer Kathode gelöster Photoelektronen proportional zur Dicke des Beschichtungsmaterials dieser Kathode ist, d.h. das Stellen größerer Beschichtungsdicke einer Kathode bei Beleuchtung auch ein höheres Signal des betreffenden Multipliers ergeben. Diese Annahme läßt sich durch das Verhalten der Homogenität einer Multiplierkathode bei verschiedenen Wellenlängen eingestrahlt Lichts belegen. Das folgende Bild zeigt die Kathodenhomogenitäten eines Multipliers bei Beleuchtung mit blauem, grünem und rotem Licht nach Messungen des Herstellers.



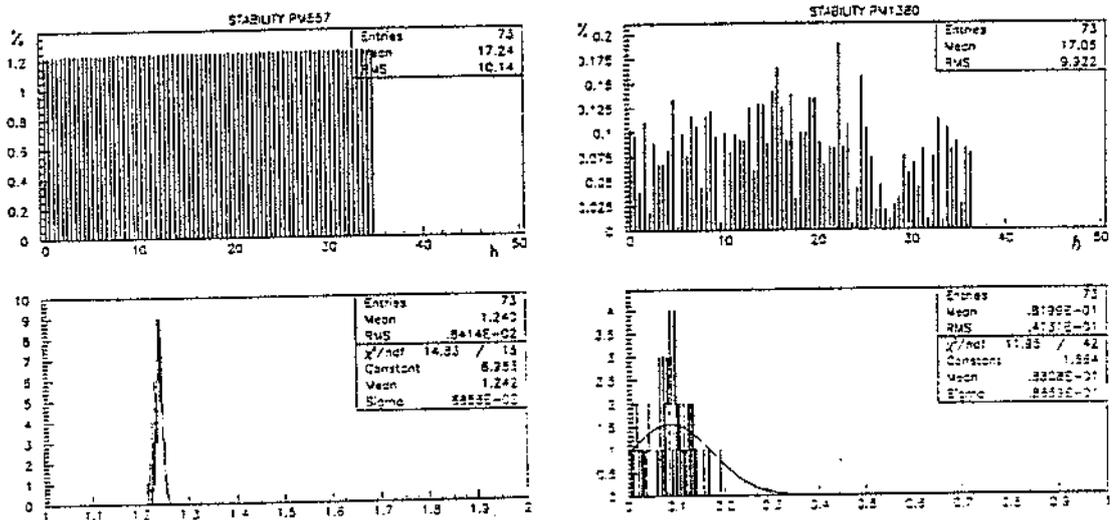
(Fig.54) Kathodenhomogenitäten in X-Y-Richtung mit 3 Wellenlängen

Laut Spezifikation der Multiplier erreichen deren Kathoden bei blauem Licht eine maximale Ausbeute an Photoelektronen. In einer Materialschicht festgelegter Dicke lösen kürzerwellige, energiereichere Photonen blauen Lichts also mehr Elektronen durch den lichtelektrischen Effekt aus wie längerwellige, energieärmere von grünem oder rotem Licht. Entsprechend sind die von grünem oder rotem Licht erreichten Ausbeuten an Photoelektronen stärker auf die Dicke des Materials empfindlich wie die Ausbeute mit blauem Licht. Dadurch erklären sich die von den Farben oder den Wellenlängen der Beleuchtungen abhängigen Homogenitätsmessungen. Außerdem zeigt sich so auch, daß die Materialdicke einer Kathode wirklich direkt proportional zur Photoelektronenzahl ist. Weiterhin wird damit verständlich, daß die Ausführung der Serientests mit blauem Licht wichtig war. Im Ganzen betrachtet sind die Kathodenhomogenitäten der getesteten Photomul-

tiplier sicherlich ausreichend für die Ansprüche des SPACAL.

## 4.4 Die Ergebnisse der Stabilitätsmessungen

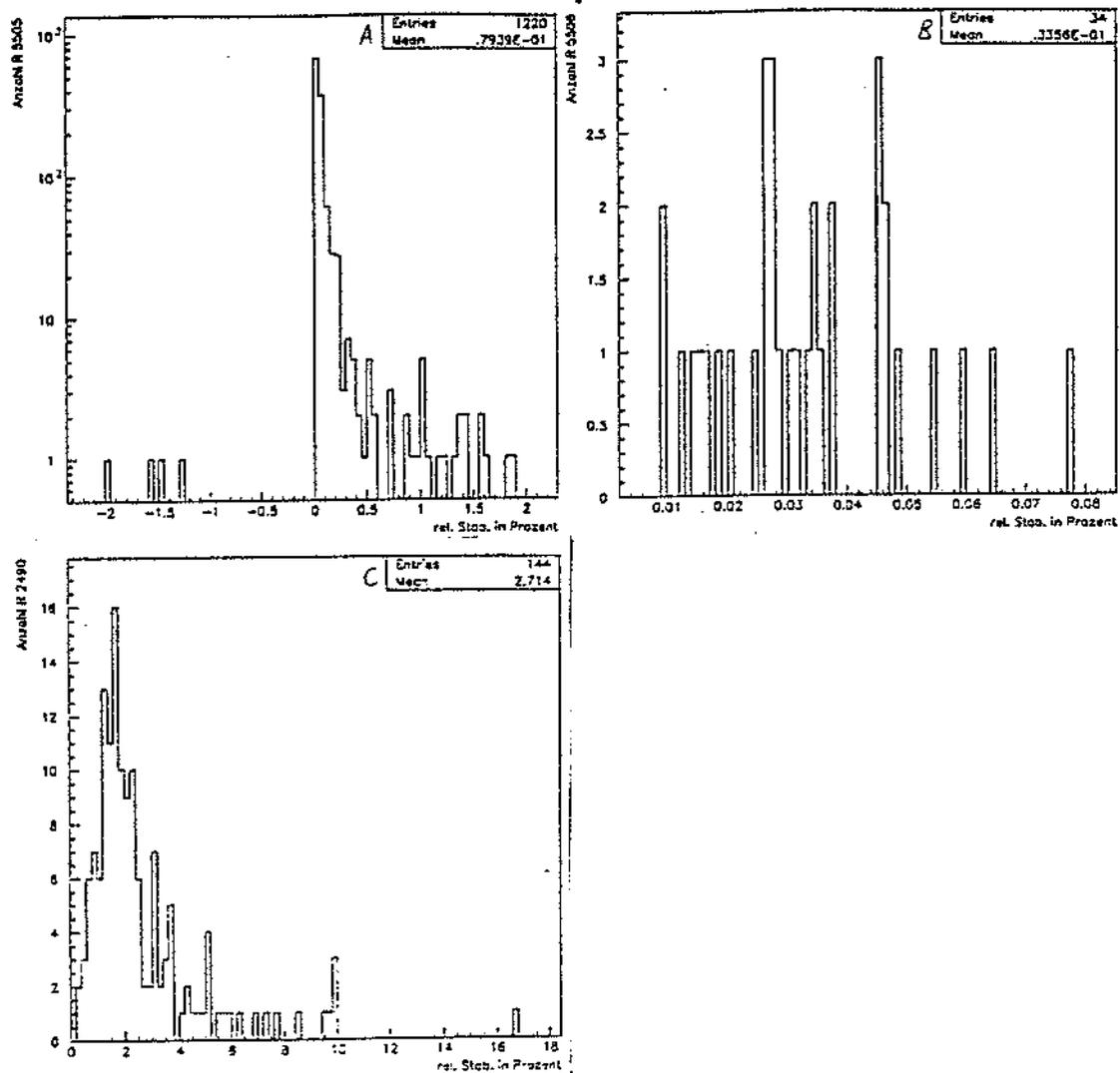
Insgesamt wurden 1320 R 5505 aus Serien- und Reklamationslieferungen, 34 R 5506 (Strahlungsharte R 5505) von den Vortests und 144 R 2490 aus Serienlieferungen nach den beschriebenen Verfahren ohne Magnetfelder in ihrer Gainstabilität vermessen. Das Bild zeigt je ein Beispiel für eine gute und eine schlechte Gainstabilität von R 5505-Multipliern. Entsprechend sahen die Stabilitäten der anderen Multipliermodelle aus.



(Fig.55) Gainstabilitäten zweier R 5505 ohne Magnetfeld

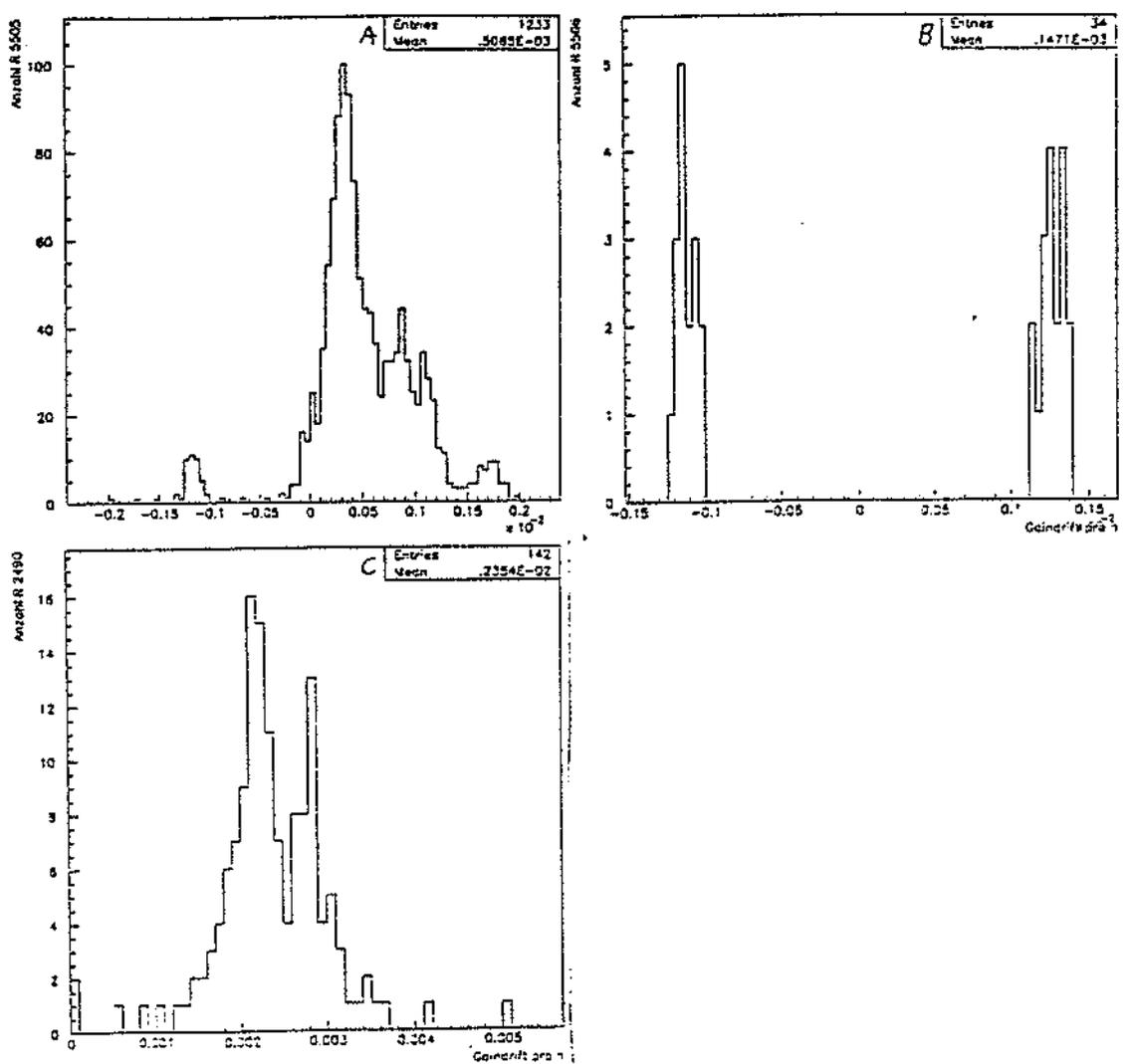
Wie zuvor wurden auch diese Messungen mit speziellen Programmen ausgewertet und die so gewonnenen Daten in eine von 3 Datenbanken geschrieben. Die Werte waren zum einen die Breite einer Verteilung aller für einen Multiplier in einer Messung aufgenommenen Relativgains und zum anderen die Gain drift einer Röhre pro Stunde.

Der erste Wert wurde durch Ordnen aller in der Meßzeit erhaltenen Relativgainwerte nach ihrer Häufigkeit ermittelt. Je niedriger die Breite einer zu dieser Verteilung passenden Gaußfunktion lag, desto stabiler lag das Gain des entsprechenden Multipliers an einem Mittelwert. Der Einfachheit halber wurden die gemessenen Gains noch in Relativwerte umgerechnet. Das Bild zeigt die Verteilungen aller gemessenen Stabilitätsbreiten.



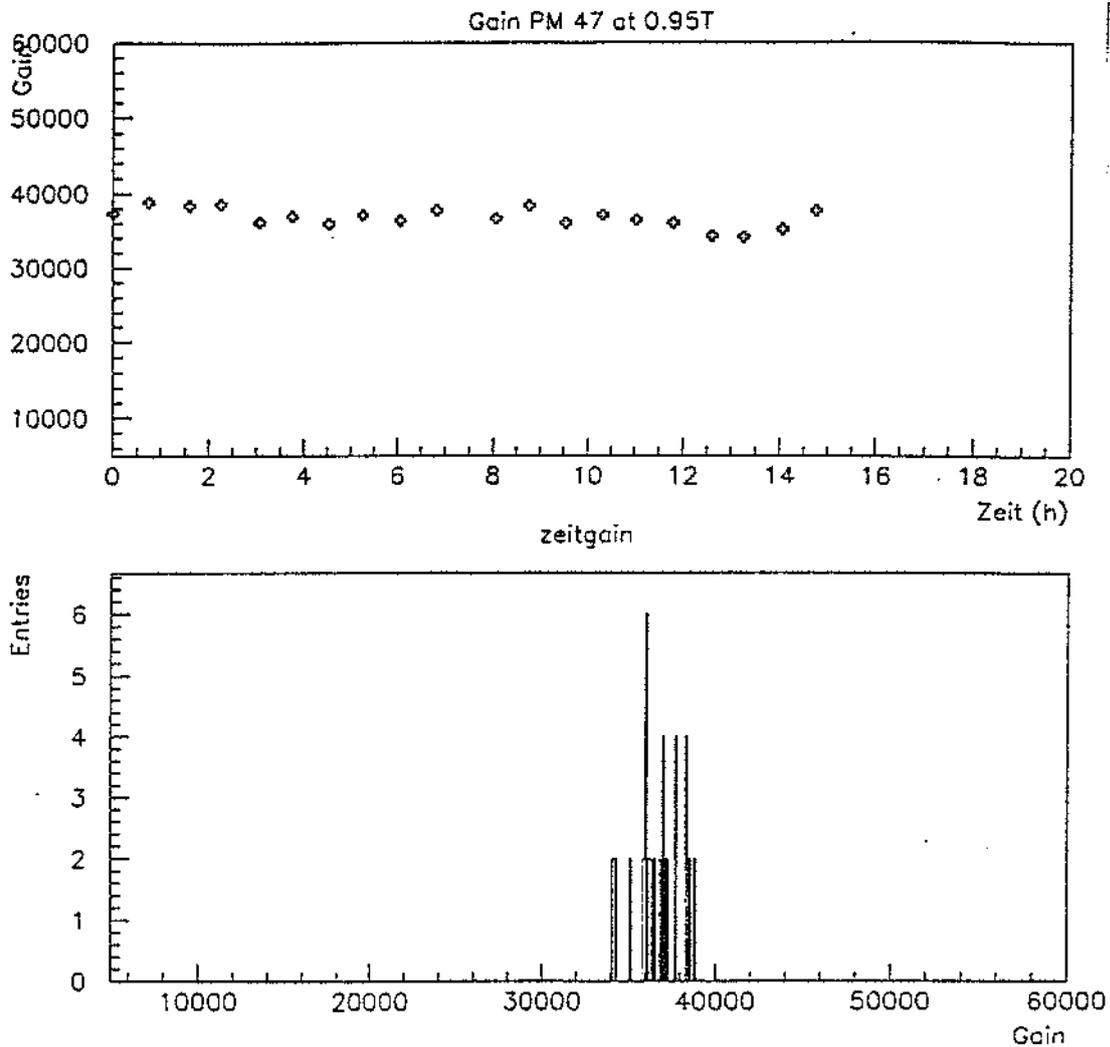
(Fig.56) Stabilitäten: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

Der zweite Wert ließ auch die Richtung von Gainänderungen erkennen. Zu seiner Ermittlung wurden die Abweichungen der Relativgainwerte einer Stabilitätsmessung an einem Multiplier vom Anfangswert der Untersuchung berechnet. Das Mittel dieser Differenzen durch die Stabilitätsmeßzeit in Stunden ergab dann die Gaindrift. Das Bild zeigt die Verteilungen aller festgestellten Driften.



(Fig.57) Gaindrift pro h: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

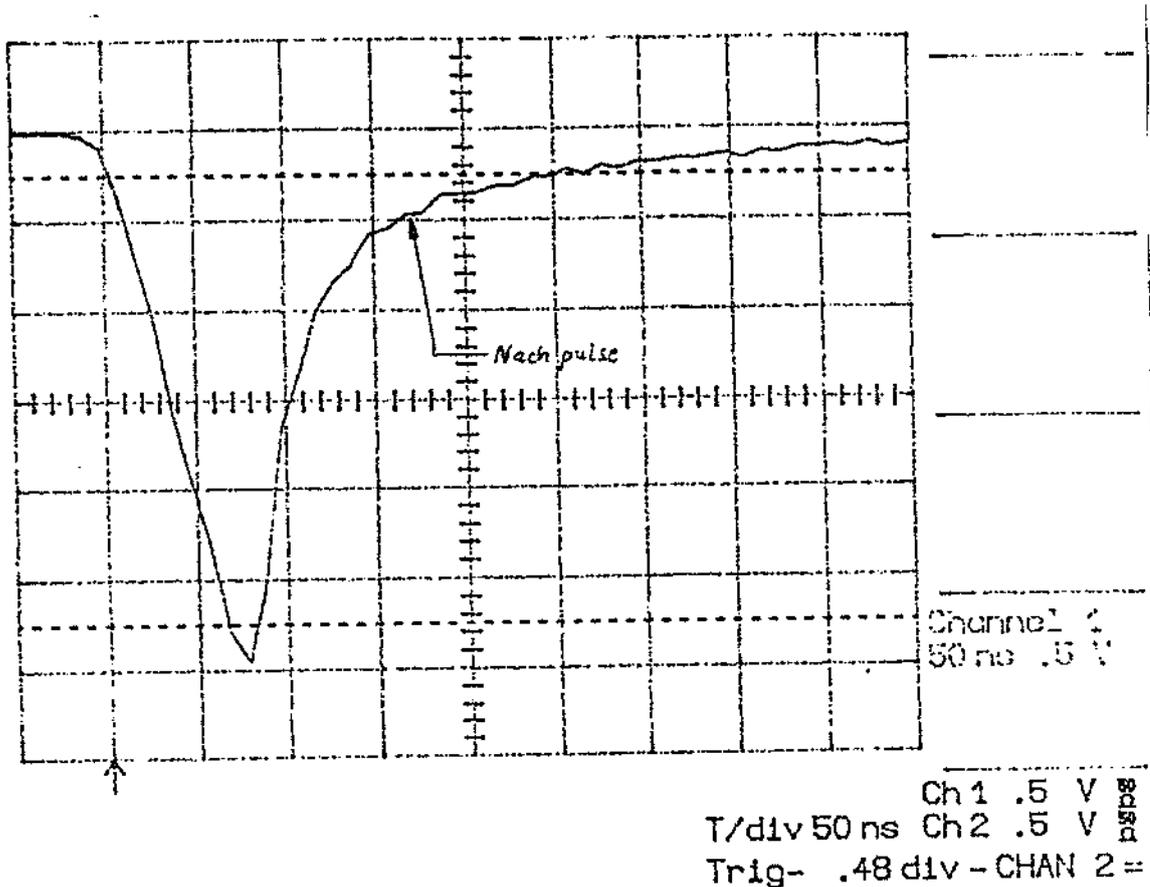
Bei allen vermessenen Multipliern bis auf einen R 5505 gab es keine bemerkenswerten Gaindriften über  $\pm 0.5\%$  pro h. Sie konnten sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren Gainwerten führen, wie das entsprechende Bild zeigt. Die Stabilitätsmessung ([Zub1]) an einem R 5505-Multiplier in einem Magnetfeld von 1.2 T Stärke zeigt, daß sich die ohne Feld gefundenen Ergebnisse gut übertragen lassen.



(Fig.58) Gainstabilität eines R 5505 im Magnetfeld

Die Drift der Multipliergains an sich ist zum Verständnis der Röhren von Bedeutung. Wie in allen Multipliern befinden sich auch in den hier Vermessenen Reste von Gasen. Diese rühren von der nicht vollkommenen Evakuierung der Multiplier, der Kathodenbedampfung oder auch von Gasen der Umgebung her, die durch mikroskopische Poren im Glaskolben der Röhre nach und nach eindiffundiert sind. Die Restgase sind auch an normalen Ausgangssignalen von Multipliern festzustellen [Phil]. Die Gase werden durch die Beleuchtung oder die dadurch freigesetzten Elektronen im Multiplier ionisiert und driften langsam zur Kathode. Dort angekommen, lösen sie bei ihrem Aufprall Elektronen aus, die zusätzliche Nachpulse erzeugen. Gemäß der geringen Wandergeschwindigkeit der Ionen zur

Kathode kommen diese Pulse einige  $\mu\text{s}$  nach den wirklichen Beleuchtungssignalen des Multipliers. Das Bild zeigt die Nachpulse eines R 5505-Multipliers.



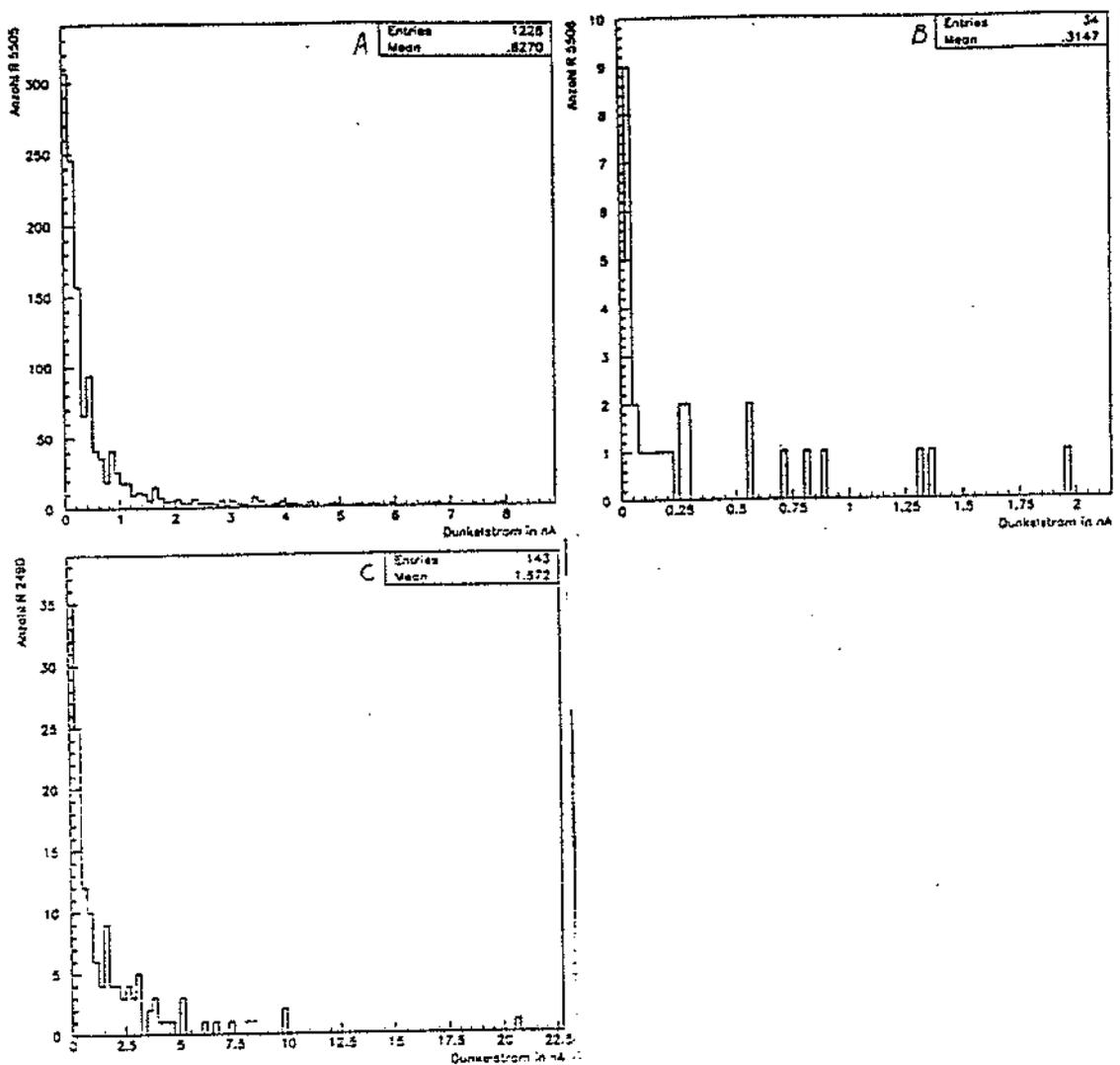
(Fig.59) Nachpulse eines R 5505 ohne Magnetfeld

Es ist klar, daß das Restgas die Eigenschaften eines Multipliers, besonders auch sein Gain, beeinträchtigen kann. So werden zum Ionisieren des Restgases bei der Beleuchtung einer Röhre Elektronen vom Gas dem normalen Verstärkungsprozeß entzogen. Liegt allerdings über längere Zeit Spannung an einer Röhre, werden viele Restgasteilchen schließlich von Komponenten im Innern des Multipliers, die auf entsprechendem Potential liegen, polarisiert, angezogen und absorbiert. Das Gain des jeweiligen Multipliers hebt sich damit ein wenig. Durch Auflösung von irgendwelchen Materialanhäufungen im Multiplier kann diese Gainverbesserung sogar dauerhaft sein. Allerdings diffundieren auch im Betrieb einer Röhre weitere Restgaspartikel in deren Inneres. Das kann das Gain auch verschlechtern. Je nachdem, welcher Prozeß jeweils überwiegt, wird das Gain eines Multipliers etwas höher, niedriger oder bleibt einfach gleich. Von einem Magnetfeld werden diese Vorgänge wohl kaum beeinflusst.

Das Gain der vermessenen Photomultiplier bleibt offenbar zeitlich meist sehr konstant. Das ist gerade im Hinblick auf die Durchschlagsprozesse in den Multipliern bedeutsam. Anscheinend ist die Rate der Dunkelsignale-Prozesse zu hoch und die der Funken-Vorgänge zu niedrig, um die Gainstabilität entscheidend zu beeinflussen. Daher kann man sagen, daß praktisch alle getesteten Multiplier von der Kontrolle ihrer Gainstabilität her für einen Einsatz im SPACAL brauchbar sind.

## 4.5 Die Ergebnisse der Dunkelstrommessungen

Insgesamt wurden 1320 R 5505 aus Serien- und Reklamationslieferungen, 34 R 5506 (Strahlungsharteharte R 5505) von den Vortests und 144 R 2490 aus Serienlieferungen den Dunkelstrommessungen unterzogen. Das Bild zeigt die Verteilungen der Dunkelströme aller vermessenen Multiplier.



(Fig.60) Dunkelströme: (A) R 5505, (B) R 5506, (C) R 2490

Wie die anderen Daten wurden die Dunkelstromwerte für alle Multiplier in eine der 3 existierenden Datenbanken geschrieben.

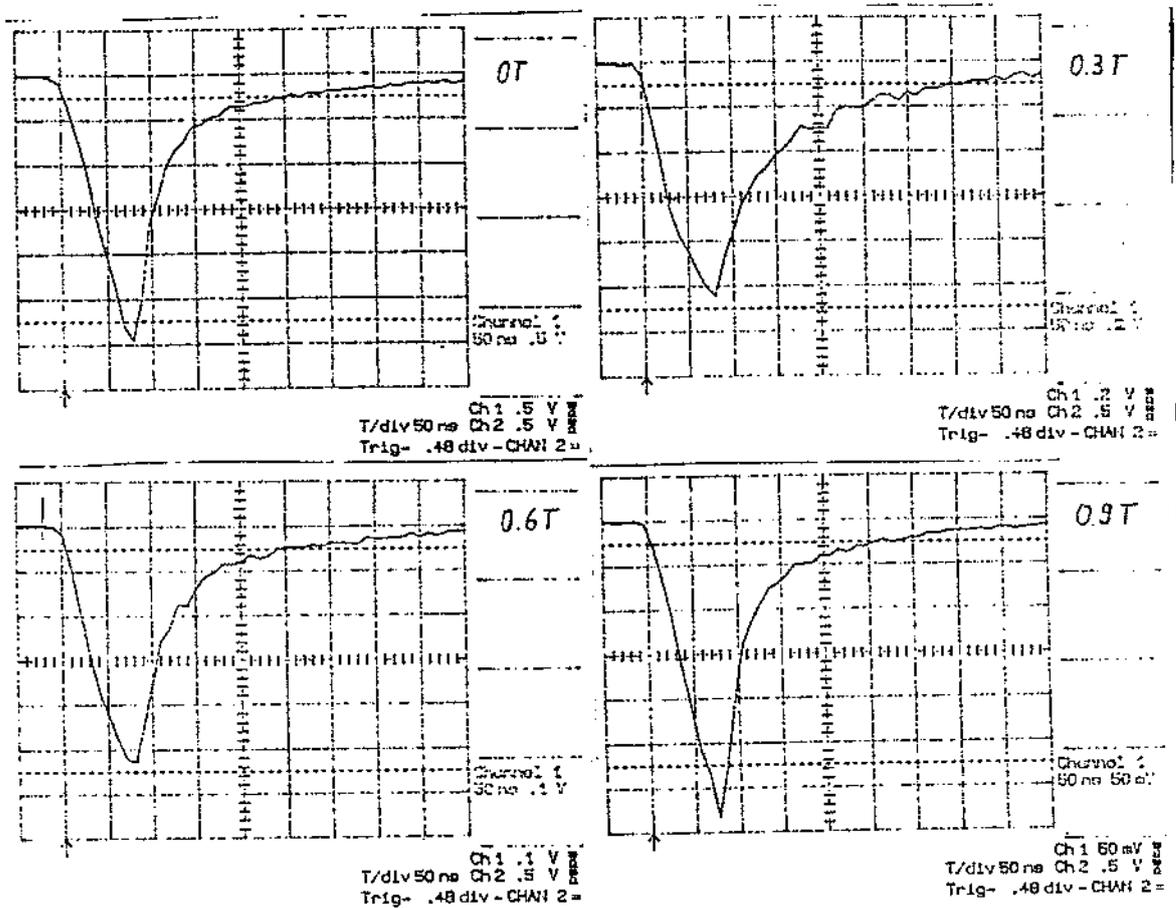
Von 1245 R 5505 hatten 20 höhere Dunkelströme als laut Liefervertrag garantiert, von den R 5506 keiner und von 144 R 2490 ein einziger.

Einige wenige Multiplier wiesen teils rapide Schwankungen im Dunkelstrom auf. Bei einem Extremfall lag zwischen dem oberen und unteren Grenzwert der Ströme ein Bereich von ca. 60 nA.

Der Dunkelstrom entsteht durch Leckströme und Restgase in einem Multiplier, aber hauptsächlich durch von Untergrundstrahlung sowie thermisch oder elektrisch ausgelöste Elektronen. Letztere durchlaufen wenigstens teilweise das Dynodensystem der betroffenen Röhre, wodurch der Dunkelstrom erhöht wird. Fällt das Gain des Multipliers in einem Magnetfeld, so sinkt der Dunkelstrom entsprechend mit [Ham1]. Beim Einsatz eines Multipliers im Magnetfeld kann man den ohne Feld gemessenen Dunkelstrom also um einen ähnlichen Faktor wie das jeweilige Gain reduzieren und erhält so eine Abschätzung für den Dunkelstrom der Röhre im Feld. Die Eindiffusion von Restgas während Lieferung und Lagerung erklärt wohl die Multiplier, die trotz entsprechender Endkontrolle des Herstellers zu hohe Dunkelströme aufwiesen.

Generell sind die Dunkelströme der vermessenen Multiplier niedrig. Auch hier haben die Durchschlagseffekte eher einen moderaten Einfluß auf die Ströme. So sind Rate und Pulshöhe der Dunkelsignale außer in besonderen Fällen zu klein, um eine Gleichstrommessung stark verändern zu können. Die Funken sind dafür einfach zu selten. Bis auf wenige Ausnahmen, wie bei dem großen Lieferumfang auch zu erwarten war, sind alle vermessenen Multiplier also auch von ihren Dunkelströmen her für ihren Betrieb im SPACAL geeignet.

Zum Schluß der Darstellung der in den Serienmessungen ermittelten Ergebnisse ist noch anzumerken, daß sich wenigstens die R 5505-Multiplier Signale in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfelds verformten. Dieser Effekt wurde unabhängig an einem analogen und einem digitalen Oszilloskop beobachtet. Mit letzterem wurden auch die nachstehenden Aufnahmen ([Zub1]) von Multipliersignalen bei Beleuchtung in verschiedenen Magnetfeldern gemacht.



(Fig.61) Änderung der Signalform in Magnetfeldern von 0 bis 0.9 T

Es wäre möglich, daß der Effekt eine durch den Hallwiderstand der Dynoden erzeugte Ratenabhängigkeit eines Multipliers ist. Der Hallwiderstand nimmt in steigenden Magnetfeldern stetig zu, die Verstärkungsströme im Multiplier bleiben dagegen bis ca. 0.3 T recht konstant und sinken dann erst stark ab. Unter Umständen ist der Strom an Elektronen bei 0.3 T im Bereich der letzten Dynoden und Anode stark genug, um mit dem Hallwiderstand einen Spannungsabfall an den jeweiligen Zuleitungen zu erzeugen, der eine Gain-Nichtlinearität des ganzen Multipliers verursacht. So würde ein Ausgangssignal bei diesen Magnetfeldern gebogene Flanken bekommen. Bei weiter steigendem Magnetfeld sinkt das Gain und damit die Verstärkungsströme eines Multipliers wieder, und der Effekt verschwindet. Der Effekt verschwindet zwar bei den für das SPACAL zu betrachtenden Magnet-

feldern, dürfte aber dennoch einer etwas eingehenderen Behandlung wert sein.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung

In den vorigen Abschnitten wurden Serientests an fine-mesh-Photomultipliern in Magnetfeldern bis zu 1.2 T beschrieben. Sowohl die Durchführung von Serientests in derartig hohen Magnetfeldern als auch die getestete Anzahl an fine-mesh-Multipliern war zuvor noch selten erreicht worden.

Insgesamt wurden 3 fine-mesh-Multipliermodelle einer Untersuchung ihres Gains, der Homogenität ihrer Kathodenempfindlichkeit, ihrer Gainstabilität und ihrer Dunkelströme unterzogen worden. Es handelte sich dabei um die Multiplier R 5505, R 5506 (Strahlungsharte R 5505) und R 2490-06mod der Firma Hamamatsu Photonics K.K..

Die vermessenen 1245 R 5505 erreichten ohne Magnetfeld laut Hersteller ein Absolutgain von durchschnittlich 1033000. Lediglich 4 hatten nach diesen Werten ein Gain kleiner als 400000. Dabei ist das mittlere Verhältnis von Empfindlichkeitsmaxima zu -minima auf den Kathoden der Multiplier 1.368. Nur 29 lagen in ihrem Verhältnis über 2. Die Gaindrift dieser Multiplier betrug im Mittel 0.50 % pro h. Nur ein Multiplier zeigte extreme Gainschwankungen. Außer bei 20 Multipliern waren die Dunkelströme der Röhren kleiner als 10 nA. Der Durchschnitt lag bei 0.6270 nA.

In einem Magnetfeld von 0.95 T Stärke hatten die Multiplier laut Hersteller ein Absolutgain von durchschnittlich 41210. Nur 4 lagen im Gain unter 10000. Etwa 26 hatten ein Homogenitätsverhältnis größer als 2.5, normal war eins von 1.567.

In einem Magnetfeld von 1.2 T Stärke hatten die Multiplier laut Hersteller ein Absolutgain von durchschnittlich 12160. Hier lagen 594 im Gain unter 10000. Etwa 32 hatten ein Homogenitätsverhältnis größer als 2.5, normal war eins von 1.594.

Die 34 getesteten R 5506 hatten alle entsprechend den vorigen Angaben ohne Magnetfeld ein mittleres Gain von 1049000. Ihr mittleres Homogenitätsverhältnis lag bei 1.471. Etwa 3 lagen in ihrem Verhältnis über 2. Die stündliche Gaindrift der Röhren war durchschnittlich 0.0147%. Das Mittel der Dunkelströme dieser Multiplier lag bei 0.3147 nA.

Bei 0.95 T-Magnetfeldern erreichten diese Multiplier ein mittleres Gain von 59410 und ein mittleres Homogenitätsverhältnis von 1.585. Etwa 1 hatte ein Verhältnis über 2.5.

Bei 1.2 T-Magnetfeldern erreichten diese Multiplier ein mittleres Gain von 19130 und ein mittleres Homogenitätsverhältnis von 1.629. Etwa 1 hatte ein Verhältnis über 2.5.

Die vermessenen 144 R 2490 erreichten ohne Magnetfeld laut Hersteller ein Absolutgain von durchschnittlich 5015000. Keiner hatte nach diesen Werten ein Gain kleiner als 2000000. Dabei ist das mittlere Verhältnis von Empfindlichkeitsmaxima zu -minima auf den Kathoden der Multiplier 1.714. Nur 12 lagen in ihrem Verhältnis über 2.5. Die Gaindrift dieser Multiplier betrug im Mittel 0.24 % pro h. Außer bei 1 Multiplier waren die Dunkelströme der Röhren kleiner als 100 nA. Der Durchschnitt lag bei 1.672 nA.

In einem Magnetfeld von 0.88 T Stärke hatten die Multiplier laut Hersteller ein Absolutgain von durchschnittlich 156000. Etwa 1 lag im Gain unter 20000.

In einem Magnetfeld von 1.2 T Stärke hatten die Multiplier laut Hersteller ein Absolutgain von durchschnittlich 32350. Hier lagen 30 im Gain unter 20000.

Eigene Absolutgainergebnisse ergaben aber um Faktoren von 2.5 für die kleineren und 2.3 für die größeren Multiplier höhere Werte wie die des Herstellers. Dies konnte auf die mittlere Sammeffizienz der Dynoden in den Multipliern zurückgeführt werden. Da durch sie nur ein Teil des Kathodenstroms vom Dynodensystem Aufgefangen und Verstärkt wird, während in den Herstellerergebnissen der ganze Kathodenstrom zum Gain beiträgt, ergibt sich bei jeweils gleichem Anodenstrom so ein höheres Absolutgain. Der höhere Gainwert wird auch durch die angegebene grobe Abschätzung für die Verstärkung der fine-mesh-Multiplier mit und ohne Magnetfelder bestätigt:

$$G = \left( \frac{Ue}{\phi} \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{2\phi}{Bevs_D}\right)\right) \right)^{\alpha N_D} \quad (5.1)$$

Die Formel bestätigt auch grob die Gainverluste der Multiplier im Magnetfeld. Die Feststellung, daß das Magnetfeld am Einsatzort der Multiplier nicht die ursprünglich erwarteten ca. 1.2 T beträgt, sondern nur um ca. 0.9 bis ca. 1.0 T hebt die Verstärkung der Multiplier im vorgesehenen Betrieb der Röhren zusätzlich. Die Kathodenhomogenitäten der Multiplier entstanden durch einen Bedampfungsvorgang, der den Gesetzen für die Rohrströmung einer viskosen Flüssigkeit folgte, etwa:

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{8\eta l} R^4 \quad (5.2)$$

Daher sind die Homogenitäten mehr oder minder kraterförmig ausgebildet. Im Ganzen sind sie für das SPACAL durchaus zufriedenstellend. Stabilitäten und Dunkelströme der getesteten Multiplier waren im Ganzen ausgesprochen niedrig, was die Röhren für ihren Betrieb im H1-Detektor tauglich macht.

Das wichtigste Ergebniss der gesamten Serienmessungen war zweifellos die Erkenntnis, daß die R 5505-Photomultiplier durch Vakuumdurchschlags-Prozesse in ihrem Innern Hochspannungssignale, also Funken, und starke Dunkelsignale produzieren können. Bei einer typischen Versorgungsspannung dieser Multiplier von 2000 V kann etwa alle 100 Stunden mit einem Funken pro Röhre gerechnet werden. Die Dunkelsignale treten bei ähnlichen Spannungen mit einer Rate von ca. 0.0005 bis ca. 0.001 Hz auf. Die Funken lassen sich am besten mit Widerständen zwischen Kathode und Hochspannung in ihrer Wirkung begrenzen, die Dunkelsignale nur durch konstruktive Änderungen in den Multipliern selbst. Da die Effekte erst ab einer Spannung von ca. 1900 V auftreten, kann eine niedrigere Spannung diese Probleme beseitigen, sofern das Gain der Multiplier dann noch hoch genug bleibt. Beim geplanten Einsatz der getesteten Multiplier mag das möglich sein.



# Literaturverzeichnis

- [Ard1] M. v. Ardenne, G. Musiol, S. Reball: Effekte der Physik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1988
- [Bey1] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl: Hochspannungstechnik, Springer 1986
- [Bip1] T. Bipp: Messungen an Photomultipliern im Magnetfeld bis zu 1.2 T., Diplomarbeit, Hamburg 1994
- [Ein1] A. Einstein: Annalen der Physik 17 (1905) 132
- [Els1] J. Elster, H. Geitel: Annalen der Physik 38 (1889) 497
- [Ger1] Ch. Gerthsen, H. O. Kneser, H. Vogel: Physik, Springer 1989
- [Gre1] W. Greiner, L. Neise, H. Stöcker: Thermodynamik und statistische Mechanik, Harri Deutsch 1987
- [H1C1] H1-Collaboration: The H1 Detector at HERA, DESY 93-103 1993
- [H1C2] H1-Collaboration: Technical Proposal to Upgrade the BSR of the H1 Detector, DESY, 1993
- [Hal1] W. Hallwachs: Annalen der Physik 33 (1888) 301
- [Ham1] Hamamatsu Photonics K.K.: Photomultiplier Tube, 1994
- [Ham2] Hamamatsu Photonics K.K.: Zeichnung einer Gitterdynode, 1992
- [Ham3] Hamamatsu Photonics K.K.: Interne Mitteilung, 1994
- [Ham4] Hamamatsu Photonics K.K.: Interne Mitteilung, 1993
- [Her1] H. Hertz: Annalen der Physik 31 (1887) 983
- [Iam1] H. E. Iams, B. Salzberg: Proceedings IRE 23 (1935) 55

- [Jan1] J. Janoth: Untersuchungen zum Verhalten von Photomultipliern in Magnetfeldern., Diplomarbeit, Dortmund 1993
- [Kle1] C. Klein: Aufbau eines Exp. zur Automat. Verm. char. Param. von Fine-Mesh-Photomultipliern., Diplomarbeit, Heidelberg 1994
- [Kas1] W. Kasper: Untersuchung optischer Fasern, Staatsexamensarbeit, Heidelberg 1994
- [Knol] H. Knoblich: Untersuchungen zur Stabilität von Fine-Mesh-Photomultipliern, Diplomarbeit, Heidelberg 1994
- [Kor1] V. Korbelt: Report on Performance Tests with 58 Phototubes for 1.2 T Magnetic Field, DESY 1993
- [Mei1] K. Meier: Interne Mitteilung, 1994
- [Mor1] S. Mordhorst, H. H. Duhm, R. Langkau, W. Scobel: H1-Note H1-02/88-82, 1988
- [Mor2] S. Mordhorst: Untersuchungen von Photomultipliern im Magnetfeld, Diplomarbeit, Hamburg 1989
- [New1] D. Newton: H1-Note H1-08/90-144, 1994
- [Phil] Philips Photonics: Photomultiplier tubes, 1994
- [Sch1] K. Schmitt: Interne Mitteilung, 1993
- [Sch2] K. Schmitt: Interne Mitteilung, 1994
- [Sch3] K. Schmitt: Interne Mitteilung, 1994
- [Sti1] J. Stiewe: Interne Mitteilung, 1993
- [Sti2] J. Stiewe: Interne Mitteilung, 1994
- [Ug1] Ug: First Results on 2" PMT Tests, DESY, 1993
- [Zub1] K. Zuber: Aufnahme von Multipliersignalen in Magnetfeldern, 1994
- [Zub2] K. Zuber: Magnetfelder im Bereich des SPACAL, 1994
- [Zub3] K. Zuber: Auswerteprogramme für Multiplier-Meßergebnisse ohne Magnetfeld, 1993

- [Zub4] K. Zuber: Auswerteprogramme für Multiplier-Meßergebnisse mit Magnetfeld, 1994
- [Zub5] K. Zuber: Erstellung der Multiplier-Datenbanken, 1994
- [Zwo1] V. K. Zworykin, G. A. Morton, L. Malter: Proceedings IRE 24 (1936) 351
- [Zwo2] V. K. Zworykin, J. A. Rajchmann: Proceedings IRE 27 (1939) 558

## Danksagung

Zunächst gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Meier, der diese Arbeit durch die Aufgabenstellung, aber auch durch seine stetige Unterstützung und Betreuung erst ermöglichte.

Herr Prof. Dr. Tittel übernahm freundlicherweise die Zweitkorrektur, wofür ich ihm danke.

Weiter habe ich Herrn Dr. J. Stiewe für seine vielfältigen fachlichen, aber auch menschlichen Hilfen zu danken. Gespräche über physikalische und sonstige Fragen waren wichtig für mich.

Wie schon an den Referenzierungen der zur Durchführung und Auswertung der beschriebenen Experimente wichtigen Komponenten zu sehen ist, wäre die Arbeit ohne die umfassende Mithilfe der Herren Dr. K. Zuber und K. Schmitt gar nicht machbar gewesen. Die Auswertungen Herrn Dr. K. Zubers machten erst die ermittelte Datenfülle beherrschbar und einer weiteren Betrachtung zugänglich. Die Kenntnisse, Erfahrungen und Hilfen von Herrn K. Schmitt waren zum Aufbau, Eichen und Betreiben der Testapparaturen selbst von entscheidender Bedeutung. Beiden habe ich zudem für viele anregende fachliche und sonstige Gespräche zu danken.

Besonders Danken muß ich den Herren Musch und Maier, die fast alle mechanischen Teile der Serientestapparaturen geplant und aufgebaut haben. Gerade der Aufbau für Tests der R 5505/5506 im Magnetfeld war eine großartige Konstruktion.

Viele wichtige Hinweise für diese Arbeit habe ich den Herren Dipl. Phys. J. Janoth, Dipl. Phys. S. Tapproge und Dipl. Phys. C. Klein zu verdanken.

Bei den Messungen beim Desy in Hamburg habe ich besonders den Herren Dr. Ferrencej, Dr. Smirnov, Dipl. Phys. Schleif und Stappelfeld für ihre Bemühungen zu danken.

Dann danke ich den Herren R. Megele, E. Ulses und T. Steigleder für die Fertigung so vieler Teile für die Serientestaufbauten, sowie für die Unterstützung, die sie mir auch sonst gaben.

Gerade für letzteres habe ich auch den Herren Dr. P. Hanke, Dipl. Ing. M. Keller, P. Stock, E. Damaschek, K. Roland und O. Braun zu danken.

Ansonsten bedanke ich mich bei allen bisher nicht speziell genannten Mitglieder der Heidelberger H1-Gruppe und den anderen Mitgliedern des Instituts für Hochenergiephysik.

Schließlich danke ich meinen Eltern und meiner Schwester dafür, daß sie mir in vielfältiger Beziehung das Studium erst möglich machten.