

KfK 5258 B
Oktober 1993

Nachweis von Myonen aus der Höhenstrahlung mit Vieldraht- Proportionalkammern

F. Herm
Institut für Kernphysik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Institut für Kernphysik

KfK 5258 B

**Nachweis von Myonen aus der Höhenstrahlung
mit Vieldraht-Proportionalkammern**

Frank Herm

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Test- und Prüfstand errichtet, an dem eine Prozedur zur Funktionsüberprüfung und Instandsetzung von Vieldraht-Proportionalkammern ausgearbeitet wurde. Vier Kammern des gleichen Typs wurden instandgesetzt und in Betrieb genommen, wobei die zum Betrieb der Kammern erforderliche neuentwickelte Ausleseelektronik getestet wurde. Es wurden vergleichende Untersuchungen mit Argon-Isobutan und Argon-Methan durchgeführt, mit dem Ergebnis, daß die Kammern mit Argon-Methan gleichgute Nachweiseffizienzen für Myonen aufweisen, wie mit dem für diese Kammern üblich verwendeten Detektorgas Argon-Isobutan. Mit beiden Detektorgasen konnten Nachweiseffizienzen von etwa 98% gemessen werden.

Abstract

Detection of Cosmic Ray Muons with Multi-Wire Proportional Chambers

Using an adequate test setup the operation of Multi-Wire Proportional Chambers (MWPC) has been investigated. Four MWPC have been brought into operation with new-developped frontend electronics. The operation with two different detector gases (argon-methane, argon-isobutane) has been studied. Both gases prove to an efficiency of approximately 98 %.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Proportionalzähler	4
3. Versuchsaufbau	9
3.1 Vieldraht-Proportionalkammern	9
3.2 Teststand	12
3.3 Elektronik und Datenaufnahme	15
4. Betrieb von Vieldraht-Proportionalkammern	19
4.1 Vorbereitung der Inbetriebnahme	19
4.2 Inbetriebnahme	22
4.3 Reparatur	24
5. Messungen mit Vieldraht-Proportionalkammern	30
5.1 Gesamtspektren von Anodenebene und Kathodenebenen	30
5.2 Multiplizität	35
5.2.1 Einstellung der Ansprechschwellen	37
5.2.2 Einstellung der Hochspannung	42
5.2.3 Luftdruckabhängigkeit	45
5.3 Ansprechwahrscheinlichkeit	46
6. Zusammenfassende Bemerkungen	53

Literaturverzeichnis	55
Anhang	58
A Kammergeometrie der bei KASCADE eingesetzten Vieldraht-Proportionalkammern	58
B Integraler Myonfluß durch zwei quadratische Szintil- latoren	60

1. Einleitung

Ein traditioneller Weg zum Nachweis geladener nuklearer Teilchen sind gasgefüllte Ionisationsdetektoren. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Messung eines elektrischen Ladungsimpulses, der beim Durchgang von ionisierender Strahlung in Gasen entsteht. 1908 beschrieben E. Rutherford und H. Geiger [Rut 08] das erste *elektrische* Gaszählrohr für α -Teilchen. Es bestand aus einem zylindrischen Metallrohr in dessen Achse ein dünner Draht gespannt war und dessen Inneres mit einem Gas von verringertem Druck gefüllt wurde. Zwischen Zylinder und Draht wurde eine Spannung angelegt, die gerade so groß war, daß noch keine selbständige Entladung auftrat. Die α -Teilchen wurden durch ein dünnes Fenster in das Metallrohr eingestrahlt, wo die hervorgerufene primäre Ionisation etwa um das 1000fache vervielfacht wurde. Das mit dem Draht verbundene Elektrometer konnte die so entstandenen Stromstöße messen. Beim Betrieb eines Gaszählrohres wurde bereits damals deutlich zwischen einem Proportionalbereich und einem Auslösebereich unterschieden. Im Proportionalbereich ist die Ladung auf ein Vielfaches des Betrages der primären Ionisation angewachsen, ist aber immer noch zu dieser proportional. Im Auslösebereich löst bereits eine geringe primäre Ionisation eine Entladung aus, deren Stärke nicht mehr vom Betrag der primären Ionisation abhängt. Das eigentliche Auslösezählrohr wurde 1928 von H. Geiger und W. Müller entwickelt [Gei 28] und wird seither nach ihren Erfindern als Geiger-Müller-Zähler bezeichnet. Im Laufe der Jahre wurde das Proportionalzählrohr modifiziert, so daß sich auch schwach ionisierende β - und γ -Strahlung nachweisen ließ. Die Zählrohrspektroskopie erlangte in den darauffolgenden Jahren eine wichtige Bedeutung für die Kernphysik, so ließen sich die Spektren niederenergetischer β -Strahler, wie Tritium, C^{14} u.a. mit dem Proportionalzählrohr messen. Eine aktuelle Anwendung findet das sogenannte "low-level" (störstrahlungsarme)-Proportionalzählrohr beim Nachweis der durch Neutrino-Einfang im Gallium entstandenen radioaktiven Germanium-Atome im GALLEX- Experiment [Ans 92].

Eine Weiterentwicklung erfuhr das Proportionalzählrohr durch G. Charpak, der die Entdeckung machte, daß in einer Anordnung, bei der eine große Zahl parallel gespannter, dünner Drähte (etwa 20-40 μm) zwischen zwei Kathodenebenen angebracht wird, jeder einzelne Draht als individueller Proportionalzähler funktioniert, dies war die Erfindung der Vieldraht-Proportionalkammer (MWPC) [Cha 68].

Mit diesem Detektortyp läßt sich der Ort eines durchgegangenen Teilchens sehr genau bestimmen, da selbst bei einem Drahtabstand von nur wenigen Millimetern das Signal des Teilchens im wesentlichen auf einen Zähldraht beschränkt bleibt und gleichzeitig durch genügend große Gasverstärkung eine Nachweiswahrscheinlichkeit von nahezu 100% für minimal ionisierende Teilchen erreicht werden kann. Eine Abwandlung der MWPC ist die Driftkammer, ihr Prinzip beruht auf der Beobachtung, daß die Zeitdifferenz zwischen dem Teilchendurchgang und dem Anstieg des Anodenimpulses mit dem Abstand des Ortes der Primärionisation und dem nächsten Anodendraht zusammenhängt. Heute werden Vieldraht- und Driftkammern in Kernphysik, Hochenergiephysik, Astrophysik, Kristallographie, Nuklearmedizin und anderen Gebieten eingesetzt. In der Astrophysik werden diese Detektortypen beispielsweise in Satellitenexperimenten zum Nachweis der kosmischen Röntgen- und γ -Strahlung verwendet. In der Kristallographie werden mit Vieldraht-Proportionalkammern zweidimensionale Beugungsmuster von Röntgenstrahlen an Kristallen gemessen und in der Nuklearmedizin sind zweidimensionale Abbildungen mit γ -Strahlen eine bedeutende Anwendung für die medizinische Diagnostik.

Im KASCADE(KARlsruhe Shower Core and Array DETector)-Experiment [Dol 90] werden Vieldraht-Proportionalkammern mit einer Gesamtnachweisfläche von 260 m² zur Messung der Myonzahl und der Lateralverteilung von Myonen aus der Höhenstrahlung unter dem Hadron-Kalorimeter (16.20 m²) eingesetzt (Abbildung 1.1).

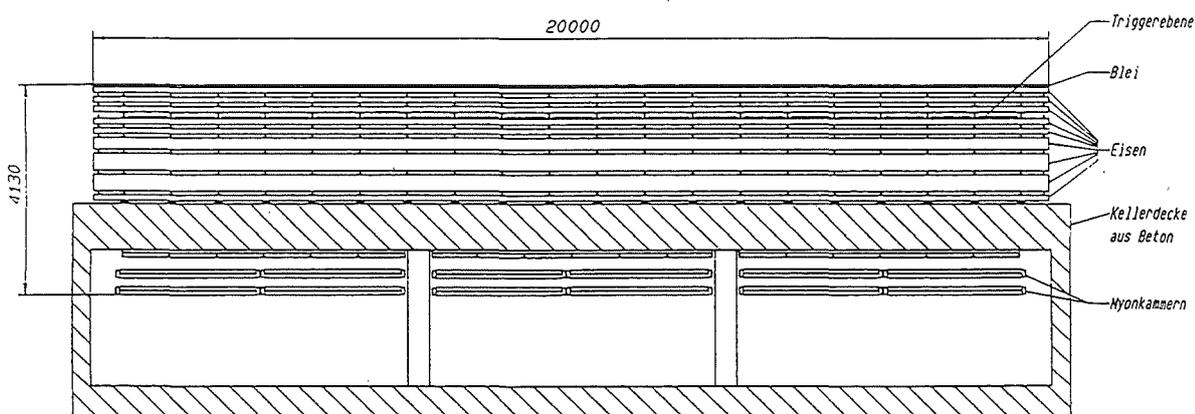


Abbildung 1.1: Seitenansicht des Zentraldetektors: Unter dem Hadron-Kalorimeter aus Eisenabsorbem und Flüssig-Ionisationskammern [Kna 92A] befinden sich zwei Lagen Vieldraht-Proportionalkammern.

Um den Zentraldetektor befinden sich 252 Detektorstationen, in einer großflächigen Verteilung über 200·200 m² mit einer Flächenbelegung von 2%, um die Grundparameter der nachgewiesenen Luftschauer (Einfallrichtung, Schauerzentrum und Schauergröße, sowie Gesamtelektronenzahl) zu bestimmen [Völ 92].

Die Myonen stammen aus dem Zerfall der Kaonen und geladener Pionen und haben aufgrund ihres hohen Durchdringungsvermögens die Eigenschaft ohne nennenswerte Wechselwirkungen Meeressniveau zu erreichen. Dem Myonnachweis kommt somit eine besondere Bedeutung zu, da er eine verhältnismäßig direkte Information über die frühe Schauerentwicklung liefert und somit Rückschlüsse auf die ersten Wechselwirkungen zuläßt. Zusammen mit der elektromagnetischen Komponente lassen sich aus der myonischen Komponente die Primärenergien der einfallenden Teilchen bestimmen, sowie zwischen p, CNO, Fe und γ -induzierten Schauern unterscheiden [Gab 92].

Ziel dieser Arbeit ist es einen Test- und Reparaturstand für die aus dem CELLO-Experiment [Beh 80] stammenden Vieldraht-Proportionalkammern aufzubauen. Dabei soll eine Prozedur entwickelt werden, in dem die Kammern, die mehrere Jahre außer Betrieb waren, instandgesetzt werden und durch anschließende Testmessungen auf ihre Funktion hin überprüft werden. Die Datenauslese erfolgt durch eine neuentwickelte Nachweiselektronik [Kna 92B], die im Laufe der Testmessungen mit den Kammern erprobt werden soll. Es wird ein Reinzelt errichtet, in dem die Kammern in staubarmer Umgebung gewartet und repariert werden sollen. Insbesondere wird untersucht, ob die Detektoren auch mit einem anderen Gasgemisch, als mit dem bislang verwendeten Argon-Isobutan betrieben werden können. Die Messungen zielen darauf ab, die Nachweiseffizienz der Detektoren zu bestimmen und in dieser Hinsicht die Operation zweier unterschiedlicher Gasgemische miteinander zu vergleichen.

2. Proportionalzähler

Ein Proportionalzähler besteht im wesentlichen aus einem zylindrischen Metallrohr (Kathode) in dessen Zentrum ein 20-40 μm dünner Anodendraht gespannt ist (Abbildung 2.1a). Durch Anlegen einer Hochspannung im Kilovoltbereich an den zentralen Zählendraht bewegen sich die beim Durchqueren eines geladenen Teilchens entstandenen Elektronen zunächst auf den Anodendraht zu. Infolge des starken elektrischen Feldes in Drahtnähe werden die Elektronen dort extrem beschleunigt und lösen selber weitere Ionisationsprozesse aus [Fün 59]. Es entsteht eine Lawine von Elektronen und positiven Ionen; die positiven Ionen, welche sich vom Zählendraht entfernen und zur Kathode wandern induzieren auf dem Zählendraht ein negatives Signal. Der Hochspannungsbereich indem das entstandene Signal proportional der primären Ionisation ist wird Proportionalbereich genannt (Abbildung 2.2). Zu höheren Spannungen hin gelangt man in den Bereich schwindender Proportionalität, welcher direkt in den Bereich ständiger Gasentladung (Auslösebereich oder Geiger-Müller-Bereich) übergeht. Vieldraht-Proportionalkammern sind im Prinzip eine Aneinanderreihung von vielen Proportionalzählern innerhalb eines Gasvolumens (Abbildung 2.1b) [Cha 68]. Das folgende gilt somit sowohl für Proportionalzähler als auch für Vieldraht-Proportionalkammern.

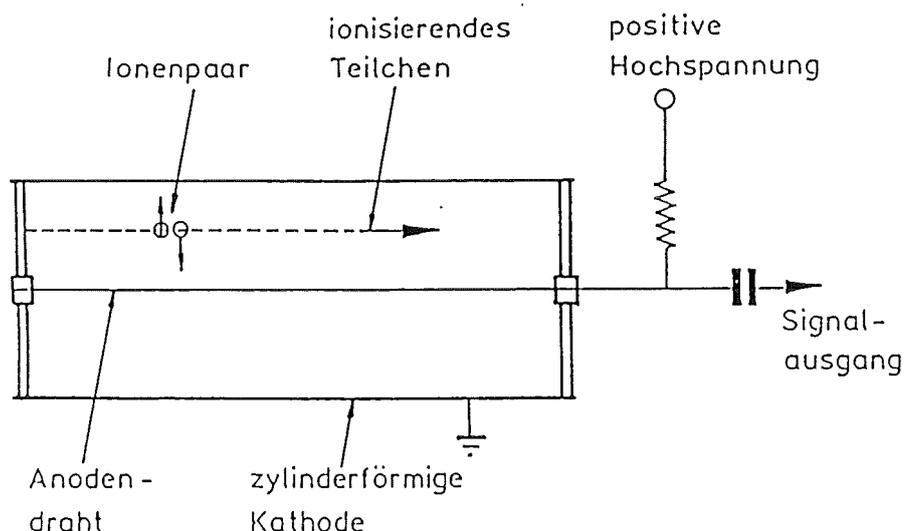


Abbildung 2.1a: Seitenansicht eines Proportionalzählers der aus einem zylindrischen Metallrohr und einem Zählendraht (Anodendraht) besteht.

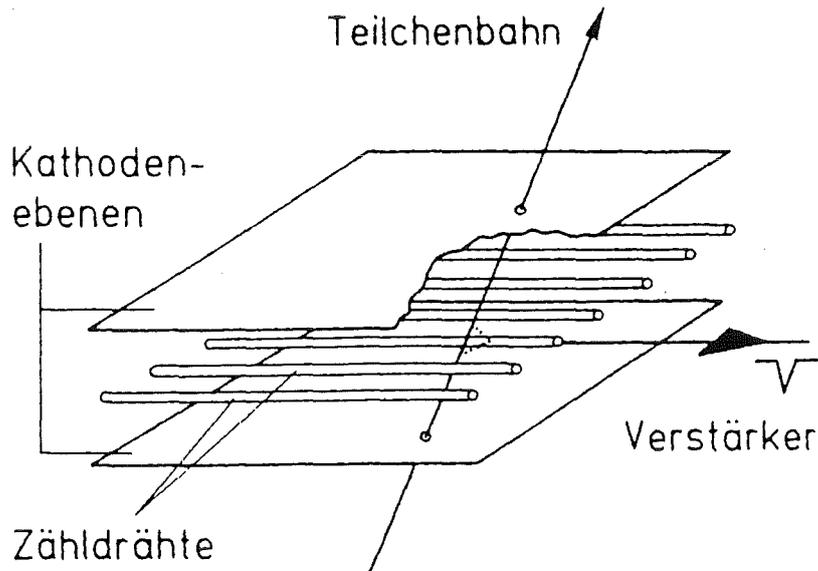


Abbildung 2.1b: Das Bild zeigt das Prinzip der Vieldraht-Proportionalkammer, welches aus zwei Kathodenebenen und einer Ebene mit parallel gespannten Drähten besteht. Das elektrische Signal eines getroffenen Drahtes bzw. eines Kathodenstreifens wird verstärkt, anschließend über einen Rechner ausgelesen und verarbeitet.

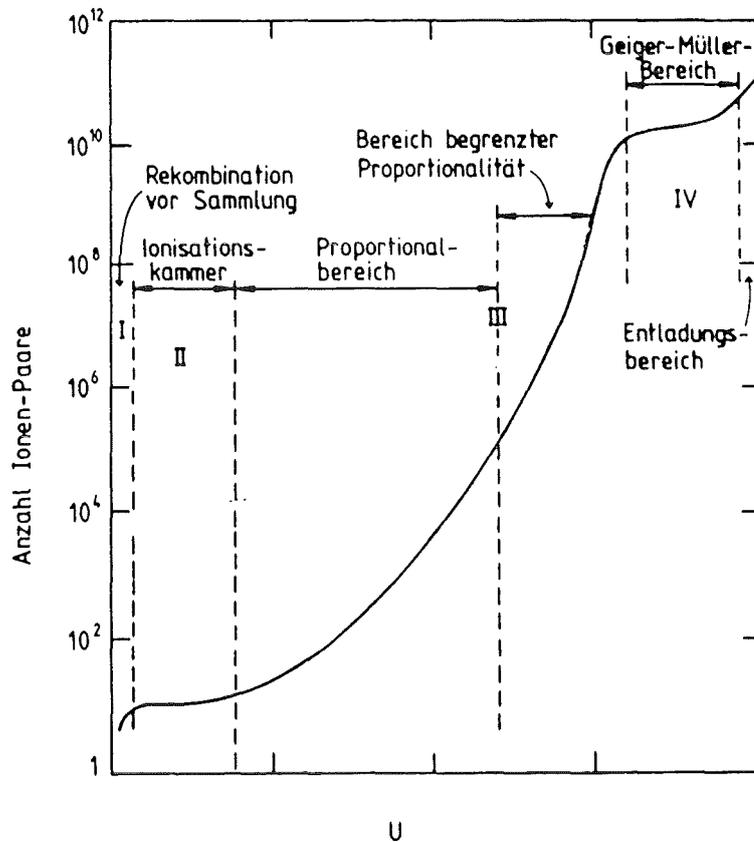


Abbildung 2.2: Gasverstärkung als Funktion der angelegten Spannung U im Proportionalzähler

Minimal ionisierende Teilchen deponieren in einem Proportionalzähler Energien im Bereich von einigen keV/cm (siehe Tabelle 1), die dadurch erzeugten Primärelektronen (n_p) können, wenn ihre kinetische Energie (ohne Gasverstärkung) über dem Ionisationspotential des betreffenden Gases liegt, Sekundärelektronen erzeugen. Die Gesamtanzahl der primär und sekundär erzeugten Elektronen und Ionen (n_t) ist vom Detektorgas abhängig und läßt sich aus Tabelle 1 für einige typische Gasgemische leicht berechnen:

Ar-CO₂ (80:20 Vol%; 77:23 M%) : $n_t = 93$
 Ar-CH₄ (90:10 Vol%; 95:5 M%) : $n_t = 92$
 Ar-C₄H₁₀ (75:25 Vol%; 67:33 M%) : $n_t = 126$

Dies entspricht einer Ladung in der Größenordnung von 10^{-16} C, welche nicht zum direkten elektronischen Nachweis ausreicht. Die Anzahl der Elektron-Ion-Paare läßt sich durch Anlegen eines elektrischen Feldes so stark vervielfachen, daß die gesammelte Ladung an der Anode bzw. den Kathoden etwa 10^{-13} C beträgt. Bei den im KASCADE-Experiment verwendeten Kammern läßt sich diese Größenordnung nur durch größtmögliche Gasverstärkung (kurz vor Erreichen der ständigen Gasentladung), hier etwa 10^5 , erreichen.

Gas	Z	A	dE/dx [keV/cm]	E _i [eV]	n _p [cm ⁻¹]	n _t [cm ⁻¹]	W _i [eV]
Ar	18	40,0	2,44	15,7	29,4	94	26
CO ₂	22	44,0	3,01	13,7	34	91	33
CH ₄	10	16,0	1,48	15,2	16	53	28
C ₄ H ₁₀	34	58,1	4,50	10,6	46	195	23

Z: Kernladungszahl

A: Massenzahl

dE/dx: spezifischer Energieverlust von minimal ionisierenden Teilchen

E_i: Ionisationspotential

n_p: Anzahl der erzeugten primären Elektron-Ion-Paare pro cm

n_t: Anzahl der erzeugten primären und sekundären Elektron-Ion-Paare vor der Gasverstärkung pro cm

W_i: mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares

Tabelle 1: Kenngrößen einiger Detektorgase [Sau 77]

Die Gasverstärkung (Multiplikationsfaktor M) aufgrund eines angelegten elektrischen Feldes ist nach Sauli [Sau 77]:

$$M = \exp \left[c \cdot \sqrt{a \cdot U_0} \cdot \left(\sqrt{\frac{U_0}{U_s(a)}} - 1 \right) \right]$$

U_0 : angelegte Hochspannung

$U_s(a)$: Schwellenspannung: diejenige Spannung bei der die proportionale Verstärkung beginnt (abhängig vom Anodendrahtdurchmesser a).

c: gasspezifischer Faktor

Jedes Gasgemisch hat seine charakteristische Schwellenspannung und Durchschlagsfestigkeit (maximal anlegbare Hochspannung). Gasgemische mit komplexen Gasmolekülen (z.B. C_4H_{10}) haben aufgrund der größeren Anzahl von strahlungslosen Übergängen den Vorteil einer hohen Durchschlagsfestigkeit; Gase mit einfachen Molekülstrukturen (z.B. CH_4) hingegen besitzen den Vorteil einer niedrigeren Schwellenspannung, was bedeutet, daß die Gasverstärkung schon bei relativ geringen Hochspannungen einsetzt. Ein Kriterium mit welchem Gas die größere Gasverstärkung erreicht werden kann, ist nicht alleine die Durchschlagsfestigkeit, sondern vielmehr das Verhältnis der maximal anlegbaren Hochspannung U_0 und der Schwellenspannung $U_s(a)$. Die Beimischung einer geringen Menge Alkoholdampf (Isopropanol) löst "Crack"-Reste (Kohlenwasserstoff-Ketten), die sich mit der Zeit auf den Drähten ablagern, so daß ein Alterungseffekt der Kammer weitgehend verhindert wird.

Aufgrund der höheren Anzahl von Elektron-Ion-Paare n_i liefert eine mit Argon-Isobutan betriebene Proportionalkammer, verglichen mit Argon-Methan und Argon-Kohlendioxid, unter der Annahme gleicher Gasverstärkung das größere analoge Signal. Berücksichtigt man, daß Detektoren, die mit Argon-Methan und Argon-Kohlendioxid betrieben werden bei niedrigeren Einsatzspannungen höhere Gasverstärkungen liefern [Bou 70], bedeutet dies, daß mit diesen Gasgemischen möglicherweise ein ebenso großes analoges Signal entstehen kann, wie beispielsweise mit Argon-Isobutan, obwohl weniger Elektron-Ion-Paare bei Beginn der Gasverstärkung zu Verfügung stehen. Die etwas schlechtere Energieauflösung aufgrund der geringeren Anzahl an Primär- und Sekundärelektronen hat für den Betrieb der Vieldraht-Proportionalkammern, die im KASCADE-Experiment eingesetzt werden keine

Bedeutung, da aus dem in der Myonkammer entstandenem analogen Signal in der Ausleseelektronik ein digitaler Impuls erzeugt wird, sofern das ankommende Signal eine gesetzte Schwelle überschreitet (siehe Kapitel 3.3). Die Energieinformation des Signals wird nicht verwendet.

Somit ergibt sich aus den erläuterten Gründen, daß Gasgemische wie Argon-Methan oder Argon-Kohlendioxid im Betrieb mit Proportionalkammern durchaus ähnlich oder gleich gute Nachweiswahrscheinlichkeiten liefern sollten wie der Betrieb mit Argon-Isobutan, das bei Voruntersuchungen der Kammern im CELLO-Experiment empfohlen wurde.

3. Versuchsaufbau

Der geplante Einsatz in einem Prototypaufbau von vier übereinandergestapelten Vieldraht-Proportionalkammern [Wen 93], machte einen Prüf- und Reparaturstand für die Myonkammern des CELLO-Experimentes [Ale 81] erforderlich, da diese mehrere Jahre außer Betrieb waren. Bei eventuell auftretenden Mängeln, die von außen nicht behebbar sind, müssen die Kammern in einem eigens dafür aufgebauten "Reinzel" geöffnet und repariert werden (siehe Kapitel 4).

3.1 Vieldraht-Proportionalkammer

Im KASCADE-Experiment sollen 35 Vieldraht-Proportionalkammern eingesetzt werden, wobei drei verschiedene Typen unterschiedlicher Größe verwendet werden (siehe Anhang A). Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Qualitätsprüfung der Myonkammern bei Untersuchung der Betriebsbedingungen von vier Detektoren des Typs 2 (Bezeichnungsweise: 201, 202, ..., 216) entwickelt, die jeweils eine sensitive Fläche von etwa $3,6 \times 2,5 \text{ m}^2$ haben, und auf dessen Brauchbarkeit untersucht. Der mechanische Aufbau eines Detektors ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

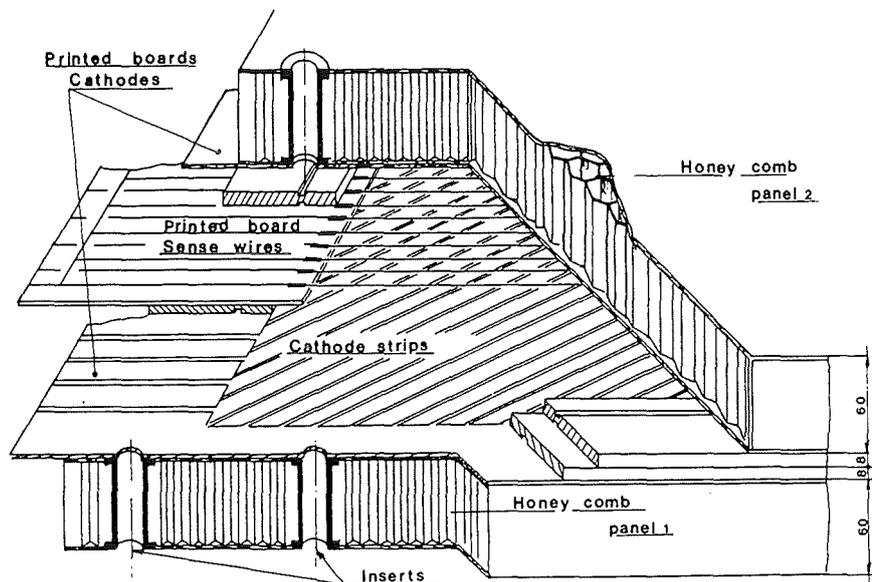


Abbildung 3.1: Mechanischer Aufbau der Myonkammer bei Ansicht von unten

Die Anodenebene, bestehend aus vergoldeten Wolframdrähten mit $20 \mu\text{m}$ Durchmesser, befindet sich zwischen zwei Kathodenebenen aus $10,6 \text{ mm}$ breiten Kupferstreifen, welche auf Platten aufgeklebt sind. Der Winkel zwischen der Richtung der

Anodendrähte und den Richtungen der Kupferstreifen beträgt $34^{\circ}16'$ bzw. $-34^{\circ}16'$. Diese Anordnung hat den Vorteil, daß die gesamte Kammer in ein feines Raster unterteilt wird, wodurch der Ort eines durchgehenden ionisierenden Teilchens bestimmt werden kann. Die Größe des Winkels ist so gewählt, daß bei allen drei Kammertypen das Auslesen der Detektorsignale nur an Vorder- und Rückfront zu erfolgen braucht (Abbildung 3.2).

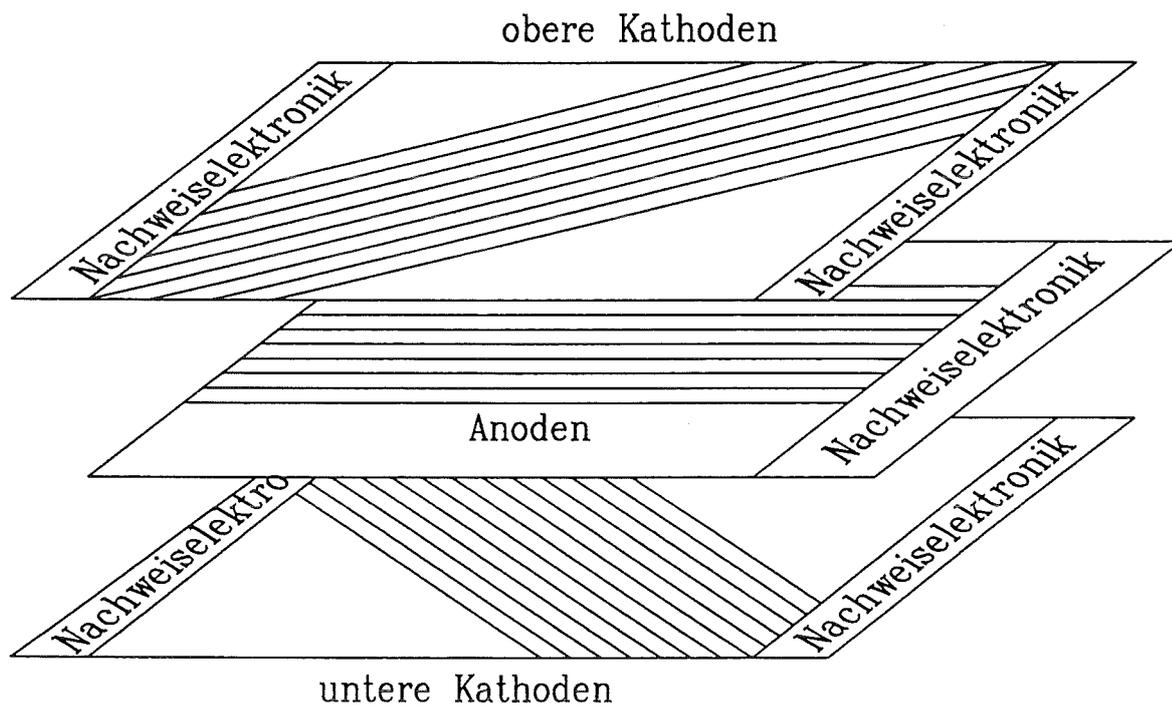


Abbildung 3.2: Darstellung der drei Ebenen mit der Position der Frontend-Elektronik

Die Anoden sind mit der positiven Hochspannung verbunden, während die Kathoden auf Nullpotential liegen. Jeweils zwischen zwei Anodendrähten befindet sich ein mit der negativen Hochspannung verbundener, $100\ \mu\text{m}$ Potentialdraht aus Kupfer-Beryllium (Abbildung 3.3). Dadurch wird eine homogene Formung des elektrischen Feldes erreicht, sowie eine weitgehende Unterdrückung des Ansprechens naheliegender Anoden erreicht. Der Abstand der beiden Kathodenebenen und damit die sensitive Dicke des Detektors beträgt $16\ \text{mm}$. Zur mechanischen Stabilisierung sind Kammerboden und Kammerdeckel aus wabenförmigen Phenolpapierzellen mit aufgeklebten Kunststoffplatten aufgebaut, wobei sowohl der Boden als auch der Deckel durch Aluminium-U-Schienen verstärkt werden.

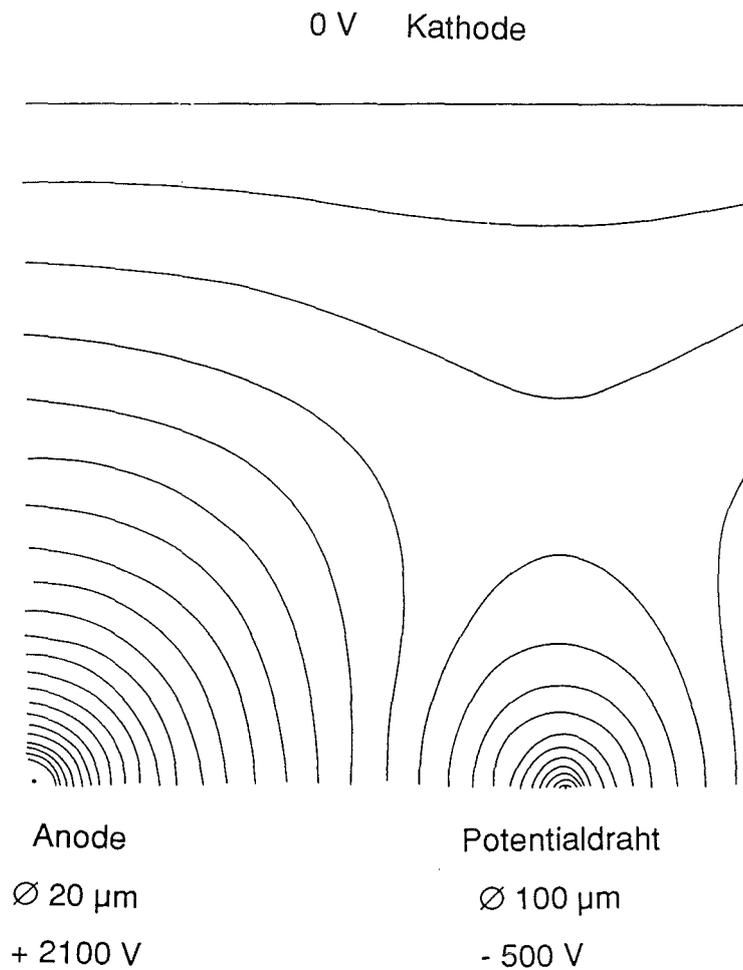


Abbildung 3.3: Teilausschnitt der Kammer von der Seite: Äquipotentiallinien des elektrischen Feldes um Anoden- und Potentialdraht. Der Abstand der beiden Drähte beträgt 6 mm, der Abstand zu den Kathoden beträgt 8 mm.

3.2 Teststand

Die Hauptkomponenten des Teststandes für die knapp 9 m² große Vieldraht-Proportionalkammer des Typs 2 bestehen aus einem Gasversorgungssystem, einer Hochspannungsversorgung, zwei Triggerszintillatoren (je 30·30 cm²) mit zugehöriger Elektronik, sowie einem Personal Computer zur Datenaufnahme und Vorauswertung (Abbildung 3.4). Der Aufbau befindet sich in einer Halle auf dem MZFR-Gelände, in der auch das Reinzelt für die Wartungsarbeiten der Myonkammern aufgestellt ist (siehe Kapitel 4.3).

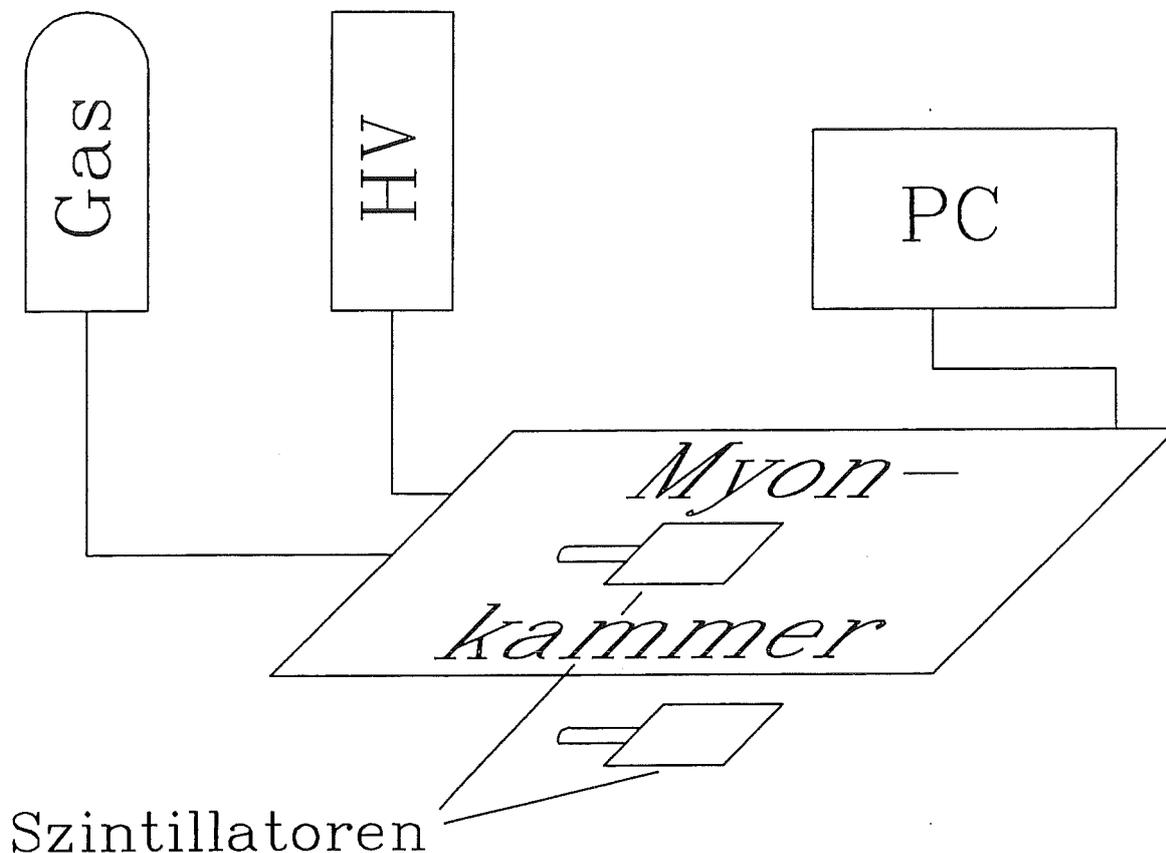
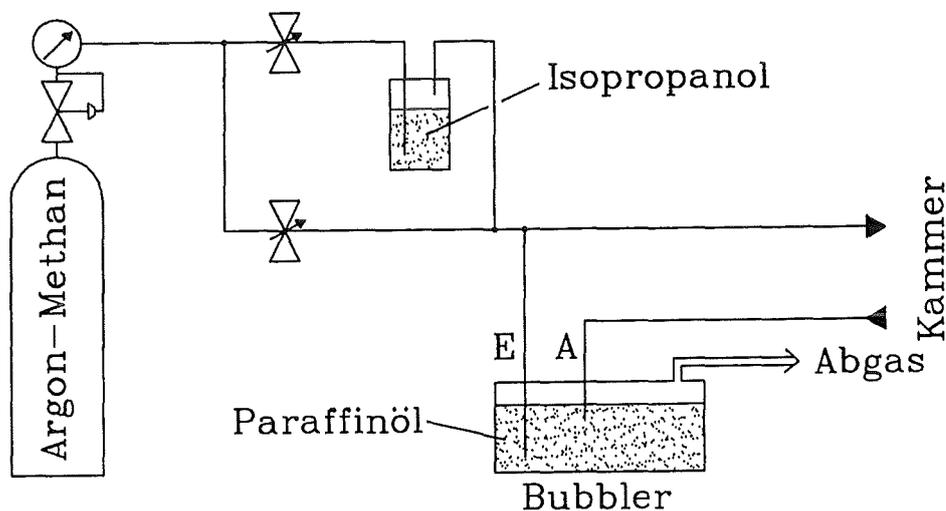


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau des Myonkammer-Teststandes

Unter Verwendung der beiden Szintillationszähler als Koinzidenztrigger (siehe Kapitel 3.3) wurden systematische Testmessungen mit Myonen der Höhenstrahlung durchgeführt. Es galt für die Myonkammern ein Gasgemisch auszuwählen, das zunächst aus praktischen Gründen kein aufwendiges Sicherheitssystem, wie für das im Detektorsystem verwendete Argon-Isobutan-Gemisch [Hor 90], benötigt. Zur

Auswahl standen Ar-CO₂ und Ar-CH₄-Gemische, die üblicherweise für Proportionalzählrohre verwendet werden. Da mit beiden Gasgemischen die gleichen Gasverstärkungen zu erreichen sind [Arm 88], wurde Ar-CH₄ ausgewählt, hauptsächlich deshalb, weil es bereits vorgemischt in Gasflaschen erhältlich ist. Für Argon-Kohlendioxid hingegen wäre erst eine aufwendige Mischanlage aufzubauen. Das verwendete Argon-Methan wird in einem Mischungsverhältnis von 90:10 Volumenprozent über ein einfaches Gasversorgungssystem (Abbildung 3.5) durch die Kammer geführt, wobei ein Teil des Gases über einen Durchflußregler durch eine Gaswaschflasche geleitet wird, in der das Argon-Methan mit Isopropanol angereichert wird. Dieser zusätzliche Durchflußregler ermöglicht es die Alkoholkonzentration im Argon-Methan-Gemisch zu variieren.



- ⊙ : Druckanzeige
- ⌵ : Druckminderer
- ⌵ : Durchflußregler

Abbildung 3.5: Gasversorgungssystem mit Argon-Methan für eine Myonkammer. Der Gasfluß wird über zwei Durchflußregler gesteuert, wobei sich durch ändern des oberen Durchflußregler der Alkoholgehalt in der Kammer variieren läßt.

Durch ihre Leichtbauweise können die großflächigen Vieldraht-Proportionalkammern nicht bei konstantem absolutem Gasdruck betrieben werden, da durch

Luftdruckschwankungen die Kammerdeckel bei Hoch- und Tiefdruck zusammen- bzw. auseinandergedrückt werden. Es ist daher notwendig ein Gasversorgungssystem zu verwenden, das zwischen Kammergas und Außenluft einen ständigen Druckausgleich herstellen kann. Dies wird dadurch erreicht, indem man die Abgase in ein Gefäß mit Paraffinöl, dem sogenannten "Gas-Bubbler" leitet. Der hydrostatische Druck des Paraffinöls, welcher den Gegendruck zum Detektorgas darstellt, ist eine vom Luftdruck abhängige Größe und fällt oder steigt mit diesem, somit haben Gasdruck und Luftdruck immer den gleichen relativen Druckunterschied, der nur von der Eintauchtiefe des Glasröhrchens A abhängig ist. Der Bubbler dient gleichzeitig noch als optische Durchflußkontrolle des Argon-Methans durch die Kammer. Als zusätzliche Sicherheit dient das Glasröhrchen E, welches als Überlaufventil wirkt und dafür sorgt, daß bei eventuellen Verstopfungen im Gasversorgungssystem kein Überdruck entsteht, welcher die Kammer beschädigen könnte. Die Abgase werden in einem etwa 20 Meter langen Schlauch (\varnothing 6 mm) in 4 Meter Höhe aus der Halle geleitet. Wegen dem geringen Anteil an Methan und dessen geringere Dichte gegenüber Luft, sowie einem niedrigen Gasfluß von maximal 20 Liter pro Stunde sind weitere Sicherheitsvorkehrungen nicht nötig. Auch durch ein komplettes Auslaufen einer vollen Gasflasche könnte der kritische Wert von etwa 8 Volumenprozent Methan in Luft kaum erreicht werden, da der große Anteil an Argon in dem Gasgemisch ein kritisches Verhältnis von Luftsauerstoff zu Methan während der Expansion verhindert.

Zusätzlich wurden weitere Testmessungen mit den Myonkammern innerhalb des Prototypaufbaus durchgeführt, in denen die Gasmischungen Argon-Methan (90:10) und Argon-Isobutan (67:33) miteinander verglichen werden. Der wesentliche Unterschied des Prototypaufbaus zu diesem Teststand besteht darin, daß die Detektoren durch Blei und Eisen gegen den e/γ -Untergrund der kosmischen Strahlung abgeschirmt werden und ein der Gesamtfläche der Kammern überdeckender Trigger zur Verfügung steht [Mat 93].

3.3 Elektronik und Datenaufnahme

Die ursprüngliche Ausleseelektronik wurde vor ungefähr 15 Jahren entwickelt, und weist für den Einsatz im KASCADE-Experiment gravierende Nachteile auf [Koe 91A]. Neben einer großen Temperaturdrift, sowie einer hohen elektrischen Leistungsaufnahme, lassen sich die Triggerschwellen und Koinzidenzverzögerungen nur manuell und mit einem gemeinsamen Einstellregler für alle acht Kanäle eines Moduls einstellen. Bei einer Neuentwicklung wurde die Frontend-Elektronik bezüglich dieser Probleme entscheidend verbessert [Koe 91B]. Insbesondere ist nun eine rechnergesteuerte Einstellung der Triggerschwellen für jeden einzelnen Kanal möglich.

Die Ausleseelektronik ist auf sogenannten Mutterkarten installiert, welche an Kammer Vorder- und rückseite auf die Signalausgänge des Detektors aufgesteckt sind. Auf einer Mutterkarte befindet sich die Elektronik für 32 Kanäle. Diese besteht im wesentlichen aus acht Vier-Kanal-Vorverstärkermodulen, vier 6Bit DigitalAnalog-Convertern (DAC) mit je acht individuell über einen I²C-Bus einstellbare Analogausgänge, sowie einem ASIC, der 32 Verzögerungszähler, 32 Speicherplätze und den digitalen Steuerteil enthält.

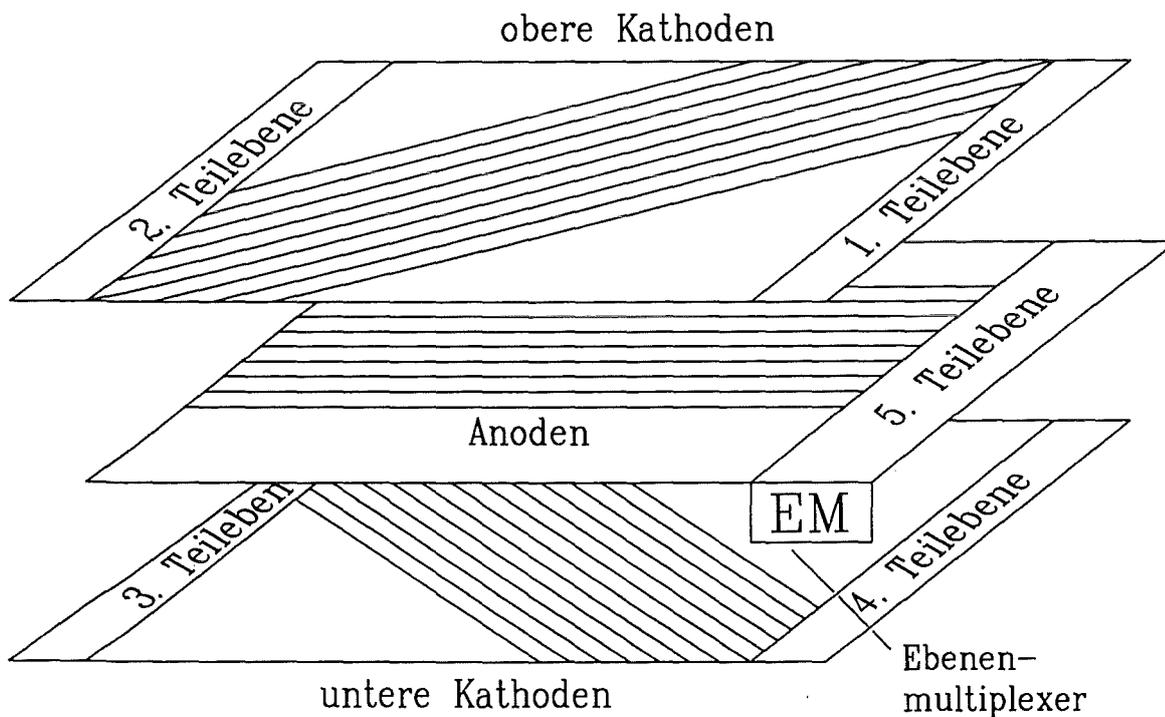


Abbildung 3.6: Die fünf Teilebenen einer Kammer, die jeweils über einen Teilbus mit dem Ebenenmultiplexer verbunden sind.

Da die Auslese der Kammer an zwei gegenüberliegenden Seiten erfolgt, zerfallen die Kathodenebenen in zwei sogenannte Teilebenen. Zusammen mit der Anodenebene ergeben sich fünf Teilebenen, die über fünf Teilbusse mit dem sogenannten Ebenenmultiplexer verbunden sind (Abbildung 3.6). Dieser wiederum ist über den Ebenenbus mit dem Personal Computer verbunden [Wen 91].

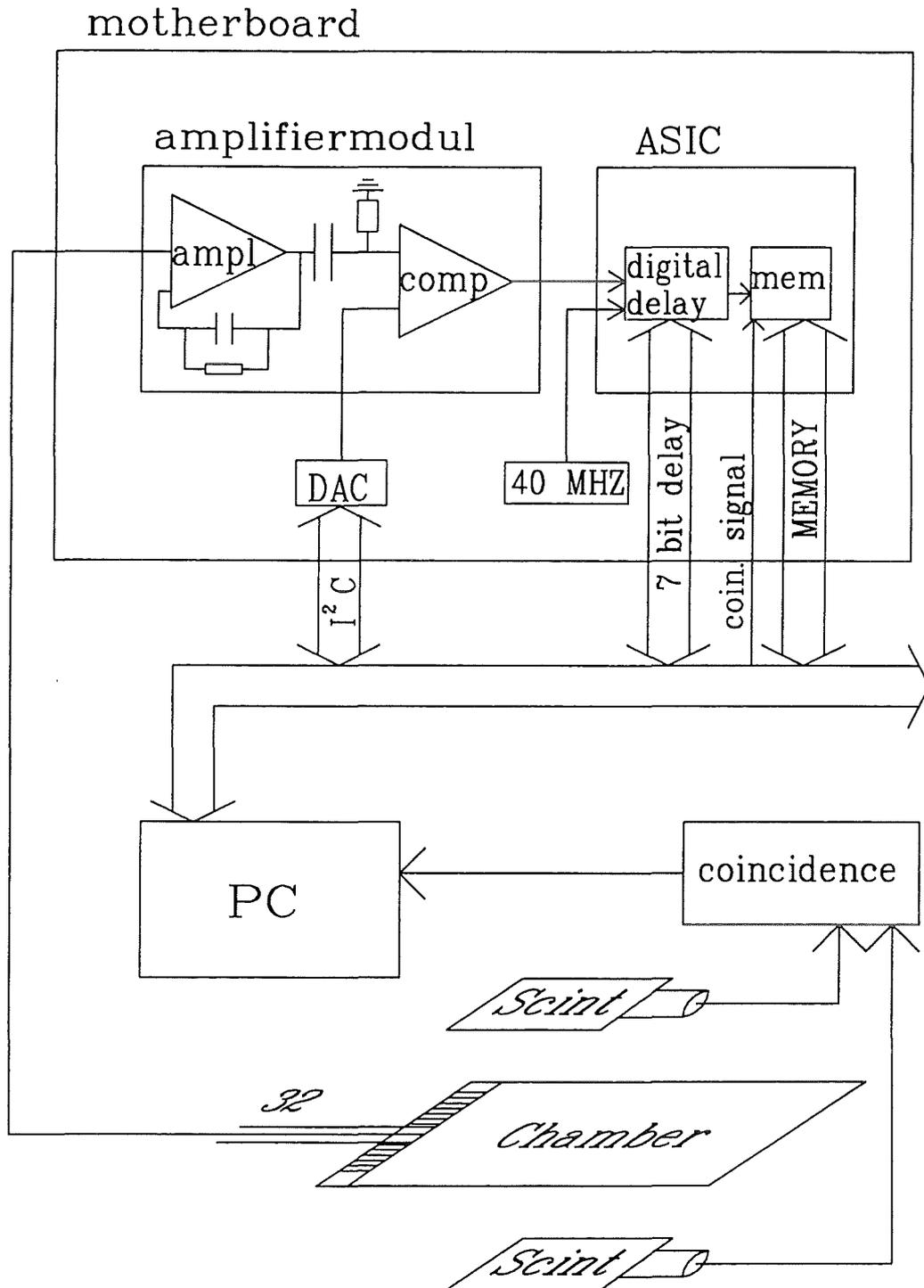


Abbildung 3.7: Meßaufbau mit schematischer Darstellung der Nachweiselektronik.

In Abbildung 3.7 ist der schematische Aufbau der Ausleseelektronik für die Vieldraht-Proportionalkammern dargestellt. Ein von den Anoden oder Kathoden kommendes Signal gelangt zunächst auf ein Vorverstärkermodul, auf denen sich vier ladungsintegrierende Verstärker und Diskriminatoren befinden. Nach den ladungsintegrierenden Verstärkern wird die Pulshöhe des Signals im Diskriminator (Komparator) mit der gesetzten Schwellenspannung des betreffenden DAC-Kanals verglichen. Das nunmehr digitale Ausgangssignal wird im ASIC durch eine Zählerlogik, welche mit einem 40MHz-Quarzoszillator getaktet wird verzögert. Die Verzögerungszeit wird durch einen vorgebbaren Zählerstand für alle 32 Kanäle im ASIC eingestellt. Erreichen Koinzidenzsignal und Kammersignal die Speichereinheit im gleichen Zeitfenster ($\approx 400\text{ns}$), so werden die Zustände in Flip-Flop Speicherzellen gehalten bis der PC alle Kanäle der Kammer ausgelesen hat.

In Abbildung 3.8 ist die Koinzidenzschaltung der Triggerelektronik dargestellt. Die Signale von den Photomultipliern werden, nachdem sie die Diskriminatoren passiert haben, auf eine Koinzidenzeinheit gegeben.

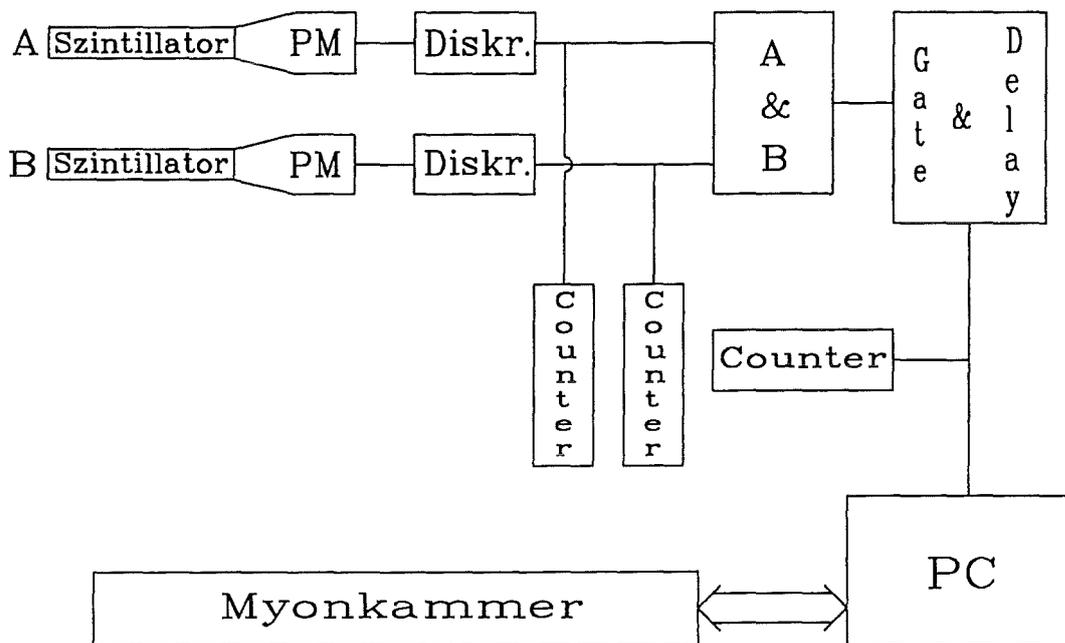


Abbildung 3.8: Koinzidenzanordnung zum Nachweis minimal ionisierender Teilchen

Im Falle einer Koinzidenz zwischen den beiden Szintillatoren wird ein Signal über einen "Gate and Delay Generator" an einen Zähler zur Totzeitkorrektur und über den

Personal Computer zur Ausleseelektronik der Myonkammer weitergeleitet. Das Trig-
gerteleskop deckt einen Raumwinkel von etwa $0,3 \text{ sr}$ ab, und weist mit einer Fre-
quenz von durchschnittlich $0,8 \text{ Hz}$ koinzident durchgegangene Teilchen nach. Diese
Rate stimmt mit dem erwarteten Myonfluß gut überein [All 84] (siehe Anhang B).

Die Datenaufnahme, Auswertung sowie Darstellung werden am PC mit dem in der
Sprache "C" geschriebenen Programm "MU" [Kre 93] durchgeführt. Neben der rei-
nen Datenaufnahme und Speicherung verfügt das Programm über eine Benutzer-
oberfläche, welche eine einfache Einstellung aller experimentellen Parameter, sowie
die graphische "on-line"-Darstellung der Daten erlaubt. Desweiteren besteht die
Möglichkeit bei der Auswertung eines Datenfiles, über einen oder mehrere Filter, be-
stimmte Ereignisse gesondert zu analysieren.

4. Betrieb von Vieldraht-Proportionalkammern

Bei Übernahme der Kammern Ende 1990 waren diese bereits längere Zeit außer Betrieb, wurden aber weiter mit Gas (Argon) durchspült. Seit etwa drei Jahren werden die Kammern (ohne Gasspülung), zum Teil in Kisten, in einer Montagehalle gelagert. Dies erfordert vor Inbetriebnahme eine grundlegende Reinigung und Überprüfung.

4.1 Vorbereitung der Inbetriebnahme

Vor der Reinigung wird zunächst die alte Frontend-Elektronik entfernt und der lose Schmutz auf der Kammer mit Preßluft weggeblasen. Einige Kammern sind jedoch zu einem erheblichen Teil mit Ölschmutz verunreinigt, was auf Transport und ungünstige Lagerbedingungen zurückzuführen ist. Der gesamte Detektor wird mit ethanolbenetzten Zellstofftüchern gesäubert, wobei die Steckanschlüsse an Vorder- und Rückfront besonders gründlich gereinigt werden müssen, da sie den Kontakt zu den Mutterkarten der neuen Ausleseelektronik herstellen.

Beim Öffnen einer Kammer läßt sich feststellen, ob die Leitsilberkontaktierungen zwischen den Kathodenstreifen und den nach außen führenden Leiterbahnen unterbrochen sind [Mat 90]. Eine Methode solche nicht vorhandenen Kontaktierungen nachzuweisen, ohne die Kammer zu öffnen, ist die der Kapazitätsmessungen aller Kathodenstreifen gegenüber dem Kammerdeckel. Hierbei kommt es nicht auf die absolut gemessenen Werte an, sondern lediglich darauf, ob die Kapazität eines Streifens gegenüber seinen Nachbarstreifen signifikant abfällt. Bei unterbrochenem Kontakt besteht der "Kondensator" nur noch aus der Leiterbahn und Kammerdeckel (Abbildung 4.1).

Bei der unter anderen untersuchten Myonkammer 207 stellt man mit dieser Methode fest, daß fünf Kathodenstreifen der unteren Ebene keine Verbindung zu den Steckanschlüssen für der Ausleseelektronik haben (Abbildung 4.2). Dieser Befund wird zum Anlaß genommen die Kammer zu öffnen, um die Kontaktierungen wieder herzustellen (siehe Kapitel 4.3). Da das Öffnen und Schließen einer Vieldraht-Proportionalkammer diesen Ausmaßes mit einem erheblichen Aufwand und einem gewissen Risiko verbunden ist, werden zunächst nur solche Myonkammern geöffnet,

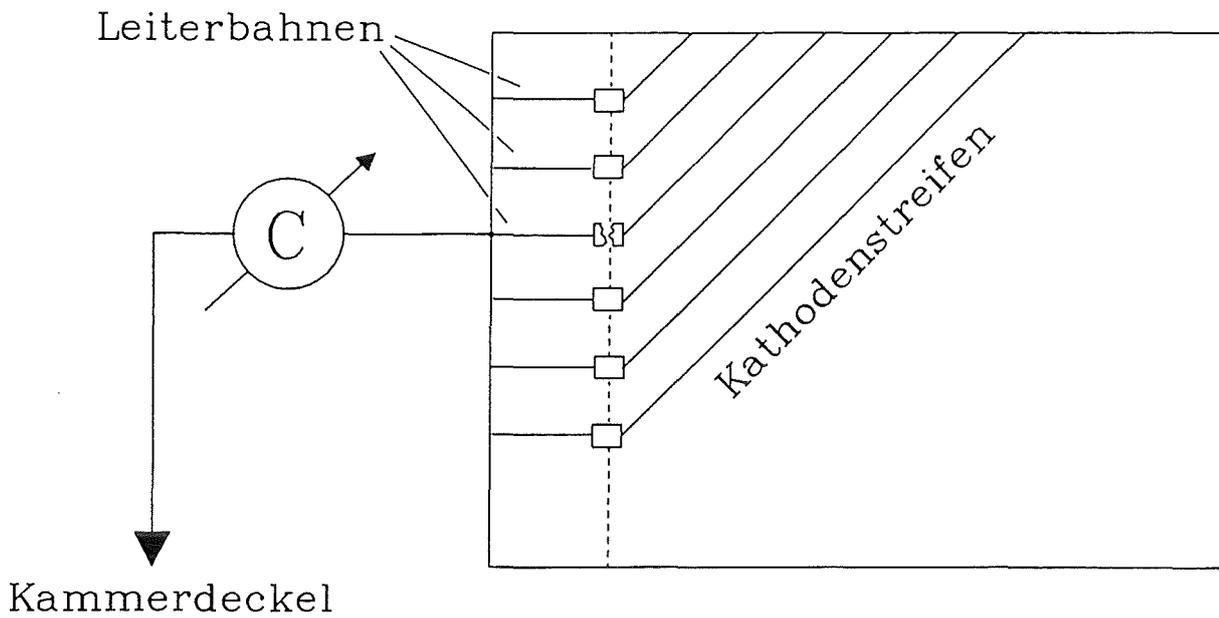


Abbildung 4.1: Kapazitätsmessung der Kathodenstreifen; der Kontakt des dritten Streifens von oben zur Leiterbahn ist unterbrochen, weshalb die Kapazität im Vergleich mit den Nachbarstreifen stark abweicht.

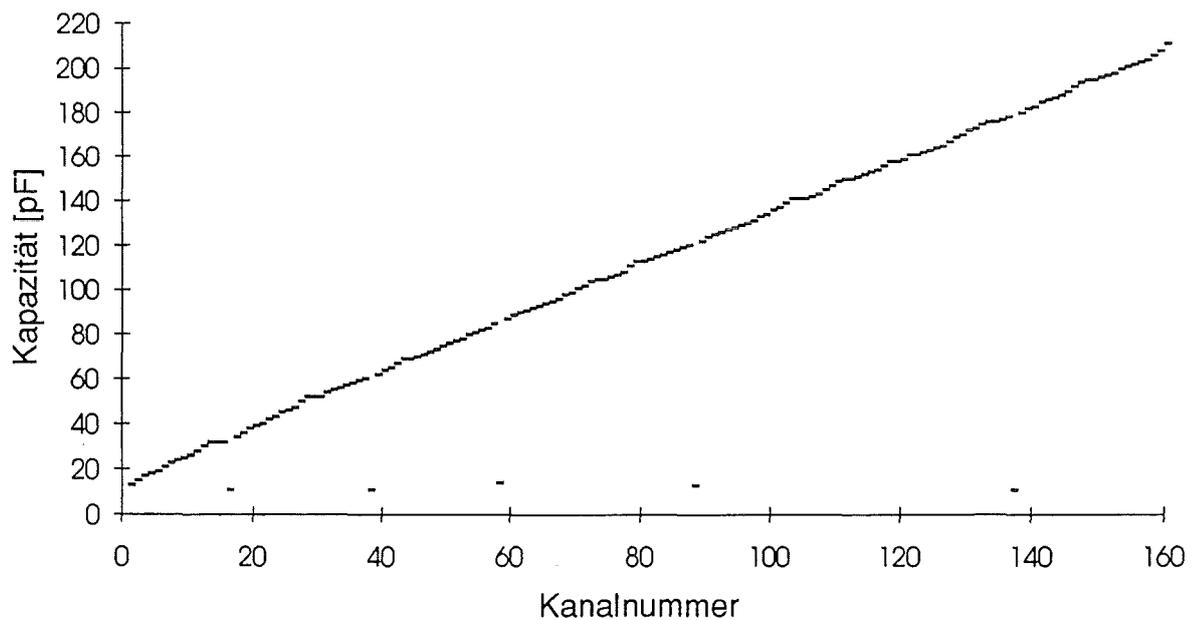


Abbildung 4.2 : Kapazitäten der 2. Teilebene von Kammer 207; es liegen fünf unterbrochene Kontakte vor.

bei denen mehrere Kathodenstreifen ohne Kontakt sind. Es wird somit eine Ausfallrate von ein bis drei Kathodenstreifen pro Kammer toleriert, sofern diese nicht gerade nebeneinander liegen. Da man die Betriebsparameter des Detektors letztlich so einstellt, daß beim Durchgang eines minimal ionisierenden Teilchens im Mittel drei bis vier Kathodenstreifen pro Ebene ansprechen, läßt sich ein Treffer in der Regel auch dann noch nachweisen, wenn in diesem Cluster von drei bis vier Streifen eine Lücke ist.

4.2 Inbetriebnahme

Das wichtigste Kriterium beim Betrieb ist die Hochspannungsfestigkeit einer Vieldraht-Proportionalkammer. Bevor man den Detektor mit der Ausleseelektronik bestückt, wird dieser daher zunächst mit Argon-Methan durchflutet, um dann erste Hochspannungstests durchführen zu können. Die empfohlene Durchflußmenge vor dem erstmaligen Anlegen der Hochspannung liegt bei 10 Kammervolumina [Zag 92], was bei einem Gasfluß von 20 l/h nach einer Flutungszeit von etwa drei bis vier Tagen erreicht ist.

Die erforderlichen Hochspannungen liefert ein CAEN Hochspannungsgerät (Model SY127) mit entsprechenden Einschubteilen. Um verschiedene Kammern in ihrem Verhalten vergleichen zu können, wird das Hochfahren der Hochspannung in allen Fällen auf die gleiche Weise (gleichzeitiges Hochfahren der positiven und negativen Hochspannung) mit den gleichen Einstellungen vorgenommen (Tabelle 2).

Die Erfahrungen haben bis dato gezeigt, daß Anfangsströme von 4-5 μA und Werte von 1 μA nach Erreichung der Sollspannung als oberste Grenze anzusehen sind. Werden diese Werte überschritten, ist eine Kammer für den Dauerbetrieb nicht geeignet. Es ist daher erforderlich die Betriebsparameter, wie Gasfluß und Isopropanolkonzentration so einzustellen, daß keine Spannungsüberschläge oder Kriechströme in der Kammer auftreten. Der Gasfluß wurde in Voruntersuchungen mit 10 l/h als optimale Einstellung für den Dauerbetrieb ermittelt [Mas 92], was einen Verbrauch von knapp 15 g Argon und 1,6 g Methan in der Stunde bedeutet. Der Isopropanoldampfgehalt im Detektor wirkt sich empfindlich auf die Kriechströme in der Kammer aus, bei zuviel Alkoholdampf steigt der Strom ebenso an, wie bei zu wenig. Es wurden mehrere Alkoholkonzentrationen getestet, woraus sich als Optimum eine Zufuhr von Isopropanol zwischen 0,5 und 1 g/h ergab. Diese Angaben sind jedoch nur Richtwerte und erweisen sich von Kammer zu Kammer als unterschiedlich. Auch andere Faktoren (siehe Kapitel 4.3) können zu erhöhten Werten des Leckstroms in der Kammer führen.

Steigt der Strom im Detektor innerhalb einer Woche nicht an, so ist erfahrungswise die Hochspannungsfestigkeit dauerhaft gewährleistet. Die Kammer wird nun mit den Mutterkarten, den dazugehörigen Anoden- und Kathodenmodulen, sowie dem Ebenenmultiplexer bestückt und an die Niederspannungsversorgung angeschlossen. Die Abstände der Mutterkarten zwischen den drei Ebenen sind sehr gering, so daß es zu

Kurzschlüssen kommen kann. Die zum Schutz vorgesehenen Abstandshalter der alten Mutterkarten sind nicht ausreichend, weshalb auf allen Anoden-Mutterkarten zusätzliche Abstandsstücke aus Kunststoff geklebt wurden.

Die verwendeten Niederspannungsversorgungen für die Ausleseelektronik werden von kurzschlußfesten Schaltnetzteilen geliefert, die bei Überschreiten des Stromlimits abschalten, aber bei Unterschreiten dieses Limits wieder anfahren. Dies hat zur Folge, daß es bei einem Kurzschluß zu ständigen Funkenüberschlägen, sowie Beschädigungen an elektrischen Bauteilen kommen kann. Für die Zukunft wird der Einbau von elektrischen Sicherungen empfohlen.

Kammer	positive Hochspannung RampUp: 5 V/s			negative Hochspannung RampUp: 2 V/s		
	HV-Bereich [V]	I_{\max} [μ A]	I_e [μ A]	HV-Bereich [V]	I_{\max} [μ A]	I_e [μ A]
CH 206	0 - 1000	0,1	0,0	0 - 200	0,2	0,0
	1000 - 1300	0,0	0,0	200 - 260	0,2	0,0
	1300 - 1700	0,2	0,1	260 - 300	0,3	0,1
CH 207	0 - 1000	0,3	0,2	0 - 200	0,1	0,0
	1000 - 1300	0,4	0,3	200 - 260	0,2	0,2
	1300 - 1700	0,5	0,4	260 - 300	0,2	0,2
CH 210	0 - 1000	0,1	0,0	0 - 200	0,2	0,0
	1000 - 1300	0,0	0,0	200 - 260	0,2	0,0
	1300 - 1700	0,2	0,1	260 - 300	0,3	0,1
CH 212	0 - 1000	0,0	0,0	0 - 200	0,2	0,1
	1000 - 1300	0,0	0,0	200 - 260	0,2	0,1
	1300 - 1700	0,1	0,1	260 - 300	0,3	0,2

HV-Bereich: Hochspannungsbereich (Anfangsspannung - Endspannung)

I_{\max} : maximal gemessener Anfahrstrom

I_e : Strom nach erreichter Endspannung

Tabelle 2: Gemessene Ströme der getesteten Vieldraht-Proportionalkammern

4.3 Reparatur

Weist eine Kammer zu viele unterbrochene Kontakte zu Kathodenstreifen (siehe Kapitel 4.1) oder gerissene Anodendrähte auf, so läßt sich eine Öffnung nicht vermeiden. Da die Vieldraht-Proportionalkammern mit Drähten von 20 μm und 100 μm Durchmesser bespannt sind und sich an diesen leicht Staubteilchen festsetzen, die später Spannungsüberschläge verursachen können, ist es notwendig die Kammer in einer staubarmen Umgebung zu öffnen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Reinzelt mit einer Grundfläche von 54 m^2 und einer Höhe von 4 m aufgebaut (Abbildung 4.3).

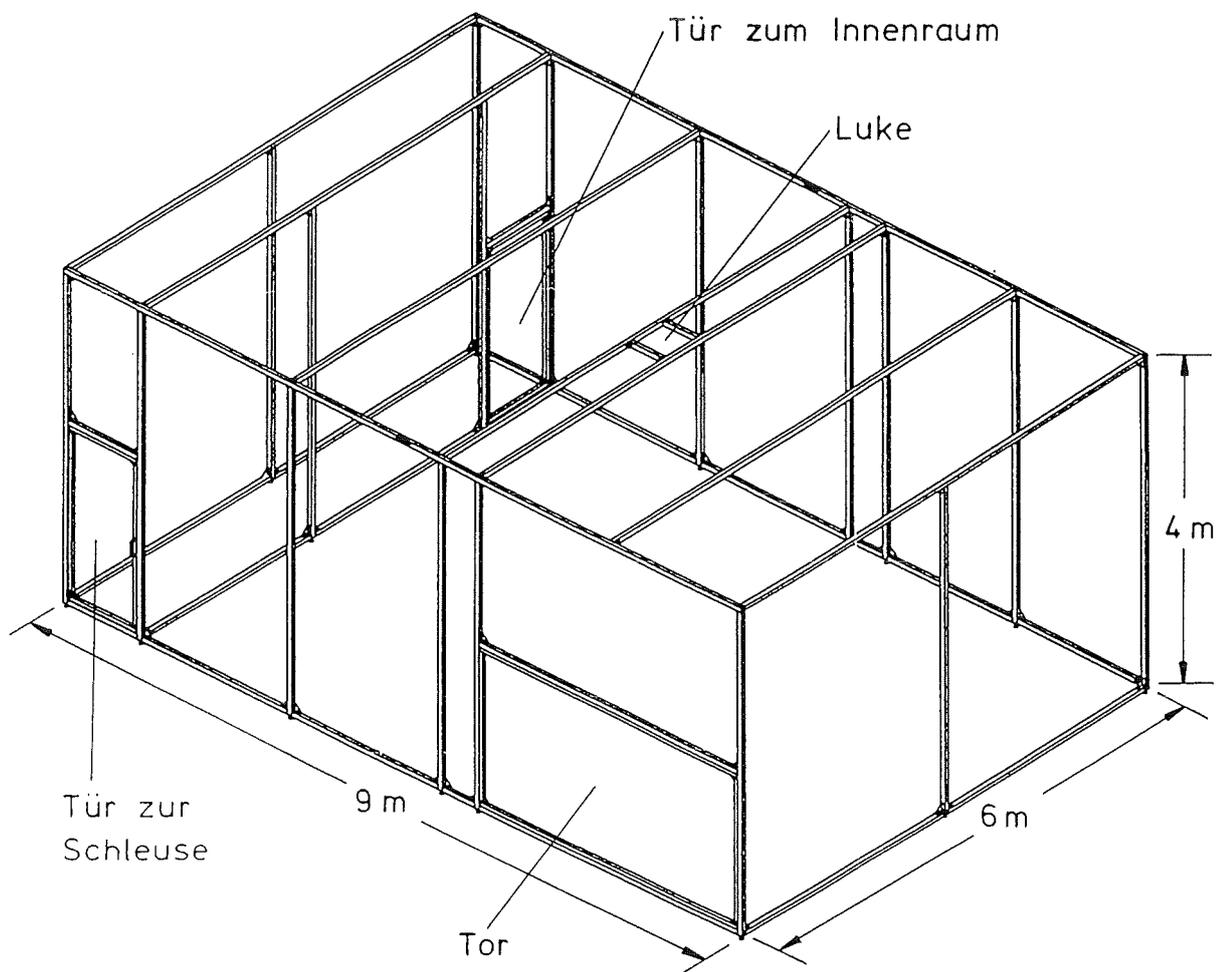


Abbildung 4.3: Reinzelt zur Wartung und Reparatur der Myonkammern; über die verschließbare Luke kann der Kranhaken zum Abnehmen von Kammerdeckel und Drahtrahmen eingeführt werden.

Das Zeltgerüst besteht aus Aluminiumprofilen, die mit Profalnuten versehen sind. In diese Nuten werden Kunststoffleisten eingesetzt, mit denen die Zeltwände (Polyethylen-Folien) eingeklemmt werden. Das Zelt ist somit nach allen Seiten relativ luftdicht verschlossen und erhält seine Luftzufuhr über acht Ventilatoren, die an der Zeltwand hinter einem Staubfilter angebracht sind. An der Zeltdecke ist eine kleine verschließbare Luke angebracht, durch die der Kranhaken, des sich in der Halle befindlichen Kranes durchgeführt werden kann. Die Luft wird von den Ventilatoren angesaugt, so daß im Innenraum ein leichter Überdruck herrscht. Dies hat den Vorteil, daß die Staubteilchen durch Ritze nach außen gedrückt werden. Betreten wird das Zelt über eine Schleuse, in der man vor dem Eintritt in den Reinraum Überschuhe und Schutzkleidung überzieht. Vor Öffnung einer Kammer werden Boden und Zeltwände feucht aufgewischt, um den Staub, der sich seit den letzten Wartungsarbeiten angesammelt hat zu entfernen.

Das Verfahren, das bei einer Öffnung der Kammer (CH 207) zur Erneuerung der Leitsilberkontaktierungen entwickelt wurde ist folgendes:

Der Detektor wird auf einem Rolltisch in das Zelt hineingefahren, wo der Kammerdeckel, der ein Gewicht von etwa 150 kg hat, mittels einer speziellen Traverse durch einen Kran angehoben und in ein dafür vorgesehenes rollbares Gestell eingehängt (Abbildung 4.4).

Zum Abnehmen des Drahtrahmens wird dieser zunächst aus Stabilisierungsgründen mit einem Aluminiumrahmen versteift, um dann ebenfalls in ein rollbares Gestell eingehängt zu werden. An den Rändern der unteren Kathodenebene sind größere Mengen grobkörnigen Schmutzes verteilt, welcher bevorzugt in der Nähe der Bolzenlöcher vorkommt. Die Bolzen, welche mit den U-Profilen verbunden sind, halten die Kammer zusammen. Der grobe Schmutz wird zunächst mit dem Staubsauger entfernt.

Die schwarzen und rostigen Partikel, legen die Vermutung nahe, daß durch das Herausschlagen angerosteter Bolzen erst ein Großteil des Schmutzes in den Detektor gelangte. Bei zukünftigen Reparaturen ist darauf zu achten, daß die Bolzen nicht mit dem Hammer herausgeschlagen werden, sondern mittels eines Drehgestänges herausgedreht werden. Ferner sollten die Bolzen vor dem Schließen einer Kammer entrostet werden, damit nicht wieder beim Einschieben der Bolzen durch Abrieb Partikel in den sensitiven Bereich eindringen können.

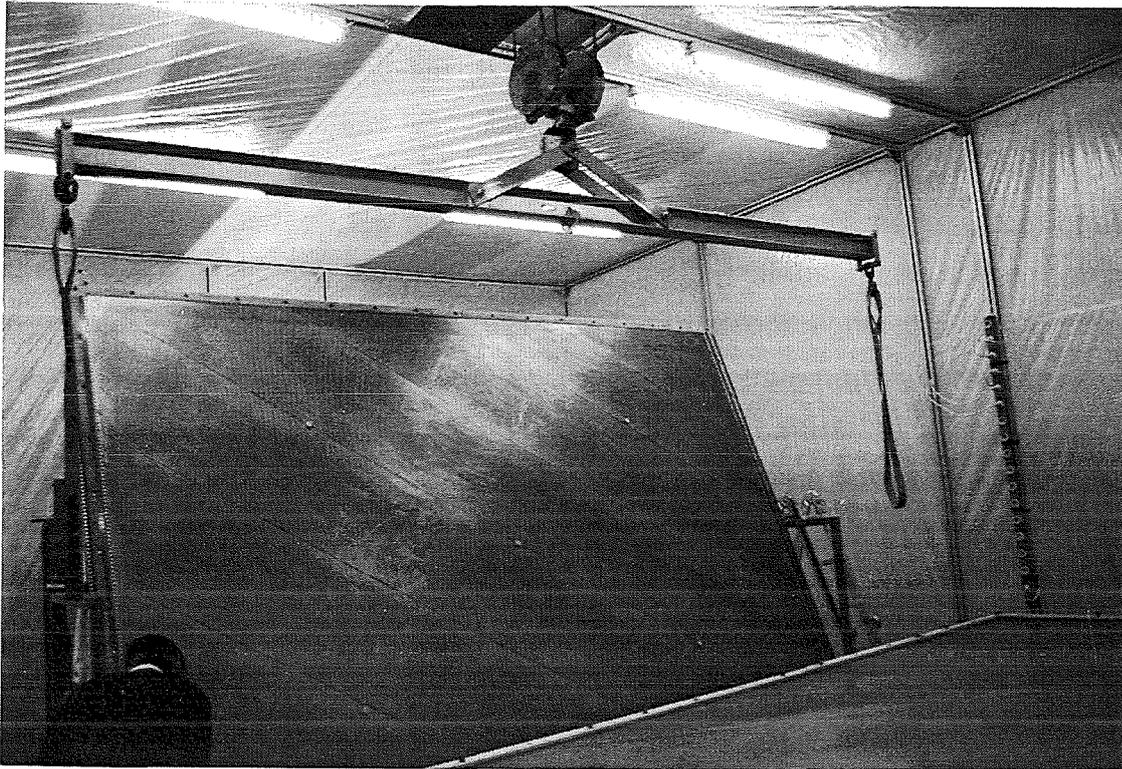


Abbildung 4.4: Innenraum des Zelt; der Detektor liegt geöffnet auf einem Rolltisch, der Kammerdeckel auf deren Unterseite die obere Kathodenebene angebracht ist hängt in einem rollbaren Gestell.

An den nun freiliegenden Kathodenstreifen werden mit einem Ohmmeter die Widerstände zwischen den Kathoden und den Leiterbahnen gemessen, um die durch Kapazitätsmessungen nachgewiesenen unterbrochenen Kontakte direkt zu prüfen, und eventuell weitere Streifen zu finden bei denen schlechte Kontakte vorliegen. Man findet somit zwei weitere Kathoden, deren Kontaktierungen erneuert werden müssen; die Kontakte zu den Leiterbahnen sind zwar nicht komplett unterbrochen, weisen jedoch Widerstände von 81 Ohm bzw. 96 Ohm auf. Die betroffenen Stellen werden mit Leitsilberflüssigkeit eingepinselt. Anschließende Messungen mit dem Ohmmeter ergeben, daß die Kontakte wieder vollständig hergestellt sind. Nachdem die Kathodenebenen mit ethanolbenetzten Zellstofftüchern gereinigt sind, werden die Anoden- und Potentialdrähte untersucht. Kleine Fussel und Härchen werden vorsichtig mit einer Pinzette entfernt. Betrachtet man die Drähte mit einer Lupe, sind an manchen Stellen auf den Potentialdrähten Verkrustungen zu erkennen (siehe Abbildung 4.5), an den Anoden hingegen nicht. Diese Verkrustungen werden behutsam mit einem Glasradierer abgerieben. Jetzt werden noch die drei Gummidichtungen der einzelnen Ebenen, welche rundherum das Gasvolumen der Kammer abdichten, ausgetauscht.

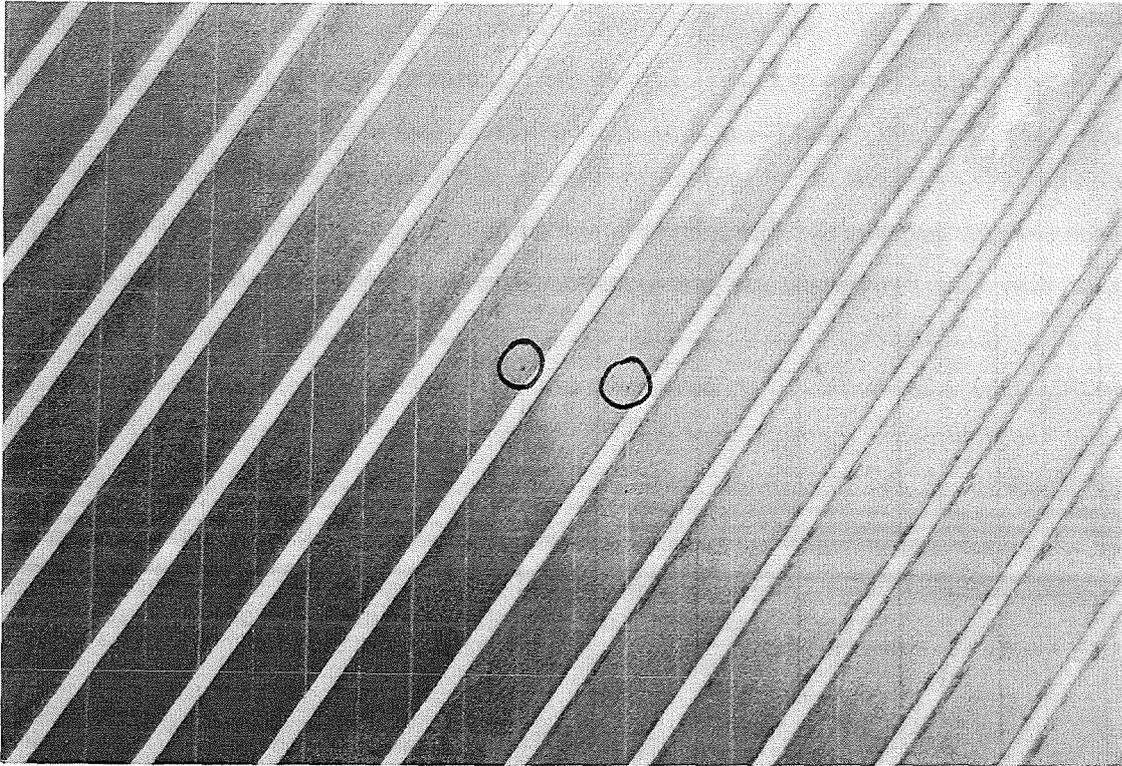


Abbildung 4.5: Teilausschnitt der Kammer bei Draufsicht: Zu sehen sind einige untere Kathodenstreifen, sowie Anoden- und Potentialdrähte. Mit Kreisen markiert sind die Ablagerungen, die bei den Potentialdrähten entdeckt wurden.

Die Erklärung für das Zustandekommen der Verkrustungen ist, daß bei angelegter Hochspannung Staubteilchen, die sich auf einem Draht oder in der Nähe eines Drahtes befinden, einen Spannungsüberschlag verursachen können und sich ionisierte Kohlenstoffteilchen an den negativen Potentialdrähten ablagern.

Anschließend wird der Detektor wieder geschlossen und mit Argon-Methan durchflutet, um wenige Tage später die reparierte Kammer auf Hochspannungsfestigkeit zu überprüfen. Der Hochspannungstest ergibt, daß bei einer Spannung von 200 V ein Strom von über 4,4 μA fließt, der von den Anoden über die Potentialdrähte abfließt. Weitere Messungen ergeben, daß ein ohmscher Widerstand von ungefähr 35 $\text{M}\Omega$ zwischen den Anoden- und Potentialdrähten die Ursache für den erhöhten Kammerstrom ist (bei positiven und bei der negativen Hochspannungsversorgung ist jeweils ein 5 $\text{M}\Omega$ Widerstand in Reihe geschaltet).

Da der Detektor vor der Reparatur hochspannungsfest war (siehe Tabelle 2), wird vermutet, daß die Ursache bei der Prozedur des Öffnens und Schließens der Kammer zu suchen ist. Ein weiteres Problem, das sich nach der Reparatur und der anschließenden Inbetriebnahme ergab, ist, daß die Gasbläschen aus dem Glasröhrchen E anstatt aus dem Glasröhrchen A des Bubblers austraten (siehe Abbildung 3.5). Dies bedeutet, daß das Gasversorgungssystem an irgendeiner Stelle verstopft ist. Nachdem die Ventile der Kammeranschlüsse überprüft wurden, stellte sich heraus, daß der Gasschlauch vom Kammerausgang zum Bubbler mit Paraffinöl gefüllt war. Das Paraffinöl, das als Kriechöl bekannt ist, ist offensichtlich in der Lage nicht nur an den Glasröhrchen hochzusteigen, sondern sich im gesamten Gasversorgungssystem auszubreiten. Man sollte daher, wenn man die Gaszufuhr einer Kammer zeitweise unterbricht, die Gasschläuche solange vom Bubbler entfernen, da der entstehende Unterdruck sonst die Ausbreitung des Paraffinöls begünstigt. Nach Auswechslung der betreffenden Gasleitung wurde die Gasspülung fortgesetzt. Möglicherweise ist auch Paraffinöl in den Detektor eingedrungen, was dann aber keinen direkten Einfluß auf den erhöhten Strom haben sollte, da Paraffinöl ein guter Nichtleiter ist.

Der Detektor wird erneut geöffnet, und nachdem Kammerdeckel und Drahtrahmen abgehoben wurden, erkennt man, daß rundherum auf den Kunststoffrahmen der einzelnen Ebenen und den Kontaktstellen von den Leiterbahnen zu den Kathodenstreifen und Anoden- und Potentialdrähten Paraffinöl, zum Teil in größeren Tropfen, verteilt ist. Außer dem Ölfilm besteht kein Kontakt zwischen den Anoden und den Potentialdrähten; das Öl wird mit Zellstofftüchern und Ethanol entfernt. Die Kathodenstreifen werden wieder mit Ethanol gereinigt und die Anoden- und Potentialdrähte werden auf Härchen und Fussel untersucht, anschließend wird der Detektor geschlossen. Um einen eventuellen Einfluß des Paraffinöls auf das Stromverhalten der Kammer zu überprüfen, wird das Öl im Bubbler durch Isopropanol ersetzt. Damit ist sichergestellt, daß kein Paraffinöl mehr in die Kammer eindringen kann, und da man Isopropanol sowieso dem Argon-Methan-Gemisch beimengt, stellt das Eindringen von Alkoholdampf in die Kammer kein Problem dar.

Der Nachteil des Isopropanols liegt darin, daß es aufgrund seines hohen Sättigungsdampfdrucks mit der Zeit verbraucht wird und somit ständig nachgefüllt werden muß.

Etwa eine Woche später wird erneut ein Hochspannungstest durchgeführt, mit dem gleichen Ergebnis eines erhöhten Kammerstroms. Schließlich ergeben Widerstandsmessungen der nach dem erstmaligen Öffnen der Kammer ausgetauschten Gummi-

dichtungsringe, daß diese leitend sind und die Widerstandswerte im Bereich des gemessenen ohmschen Widerstand der Kammer liegen [Zag 93].

Da der mittlere Dichtungsring nur durch einen dünnen Folienstreifen von den Kontaktstellen der Anoden- und Potentialdrähten getrennt ist, wird vermutet, daß durch feine Risse in der Folie Ströme von den Anoden über den Dichtungsring zu den Potentialdrähten fließen können.

Der Detektor wird ein drittes Mal geöffnet. Bei genauerem Betrachten des Folienstreifens ist zumindest ein feiner Haarriß zu erkennen, was die oben erläuterte Vermutung bestätigt. Der entsprechende Gummidichtungsring wird gegen einen nichtleitenden ausgetauscht und anschließend wird der Detektor geschlossen. Wenige Tage später läßt sich die Hochspannung problemlos auf 1700 V / 0,1 μ A einstellen und die weiteren Wochen zeigen, daß die Hochspannungsfestigkeit nun dauerhaft gegeben ist.

5. Messungen mit Vieldraht- Proportionalkammern

5.1 Gesamtspektren der Anodenebene und Kathodenebenen

Nachdem die Hochspannungstests einer Kammer erfolgreich beendet sind und der Detektor mit der gesamten Elektronik bestückt ist, werden zunächst Messungen durchgeführt, bei denen festgestellt werden soll, ob die einzelnen Drähte und Streifen, beim Durchgang eines minimal ionisierenden Teilchens, ansprechen. Der Trigger wird wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, positioniert.

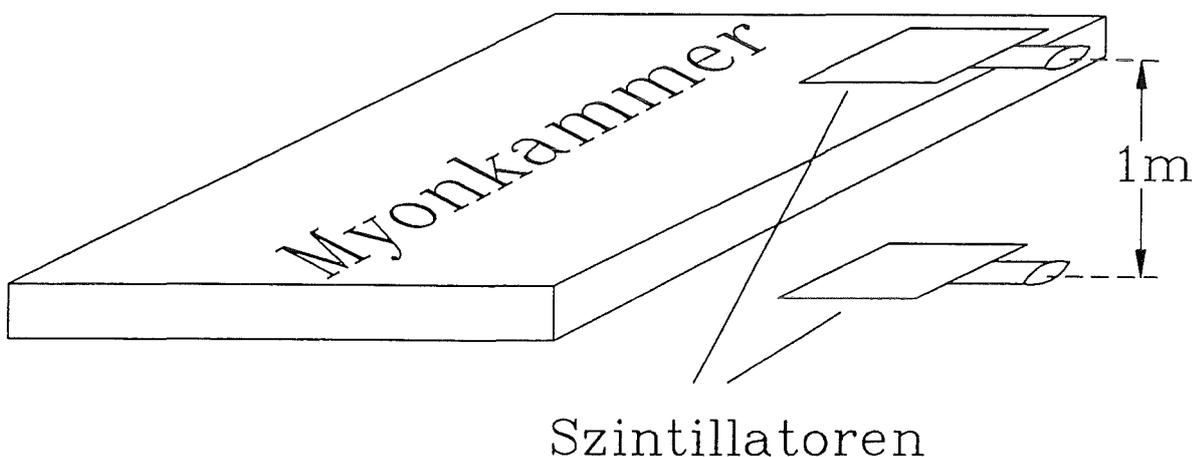


Abbildung 5.1: Aufbau des Triggerteleskops

Wenn die Koinzidenzlogik der beiden Szintillationszähler einen Treffer registriert, wird die gesamte Kammer ausgelesen. In den Abbildungen 5.2a/b sind die Trefferverteilungen der Anodendrähte, sowie in den Abbildungen 5.3a-d die Trefferverteilungen der Kathodenstreifen für zwei verschiedene Kammern dargestellt. Auch Drähte und Streifen, die nicht von der Triggerfläche abgedeckt werden, weisen eine relativ hohe Anzahl von Treffern auf. Diese Untergrundrate ist hauptsächlich die Folge von Koinzidenzen korrelierter Myonen und Elektronen aus Luftschauern, begünstigt durch die fehlende Abschirmung. Dies hat hier jedoch den Vorteil, daß auch Kanäle außerhalb der relativ kleinen Triggerfläche mitgetestet werden können. Die Gesamtspektren der Anoden (siehe Abbildungen 5.2a/b) zeigen, daß es keine gerissene Anodendrähte beziehungsweise defekte Kanäle in den beiden Kammern gibt.

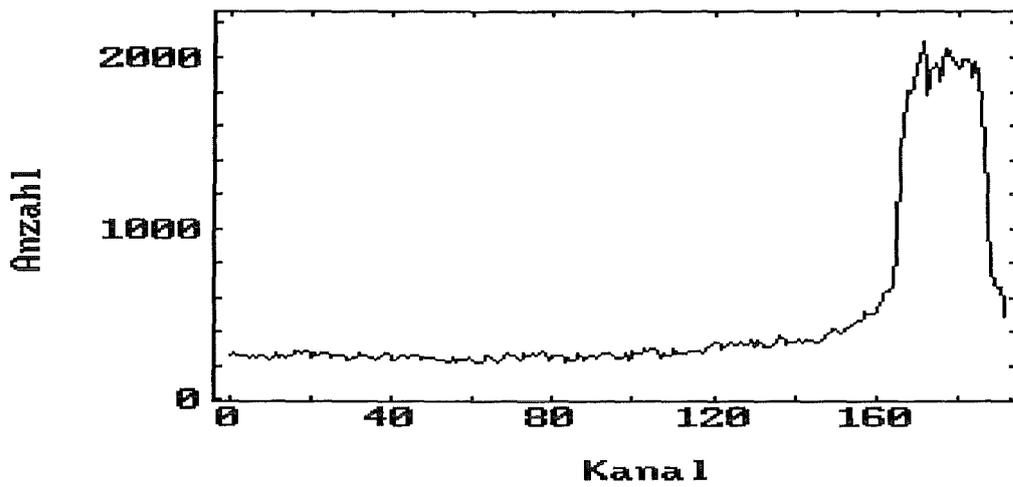


Abbildung 5.2a: Gesamtspektrum der Anoden von Kammer 210

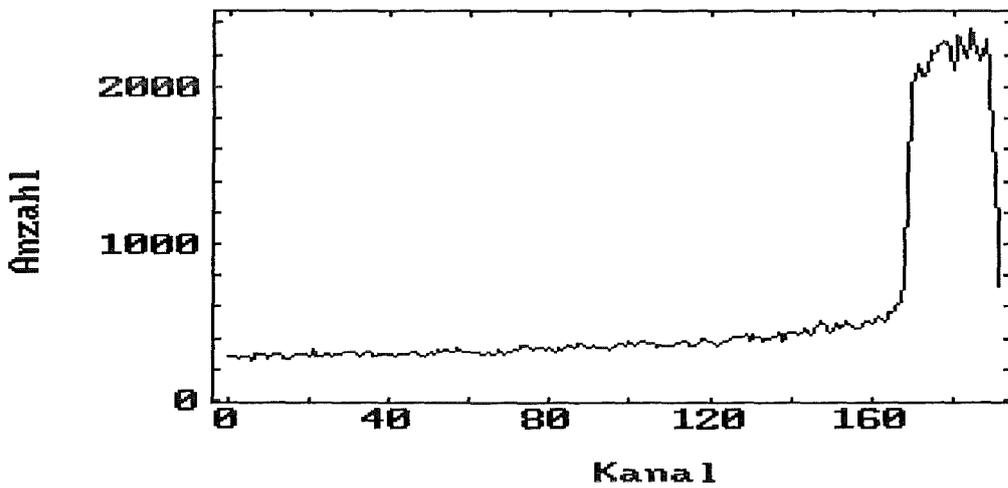


Abbildung 5.2b: Gesamtspektrum der Anoden von Kammer 206

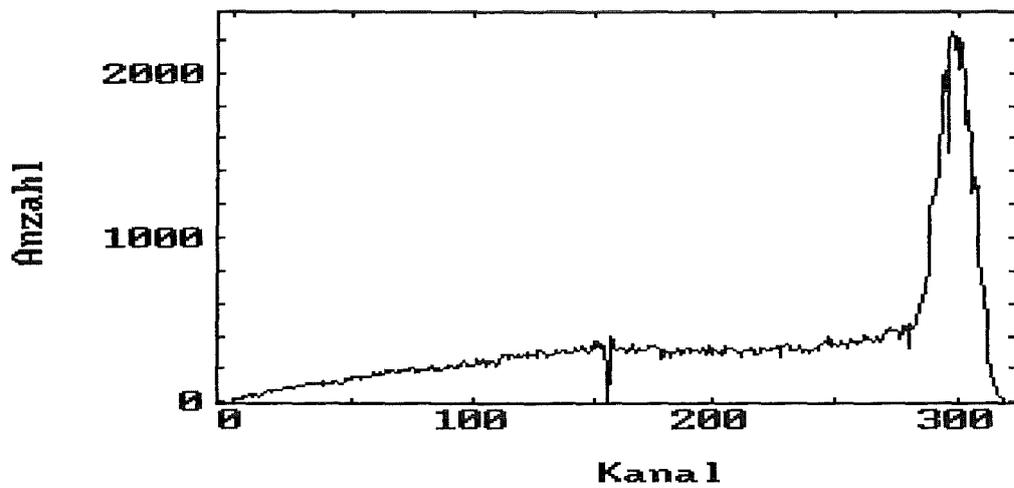


Abbildung 5.3a: Gesamtspektrum der oberen Kathoden von Kammer 210

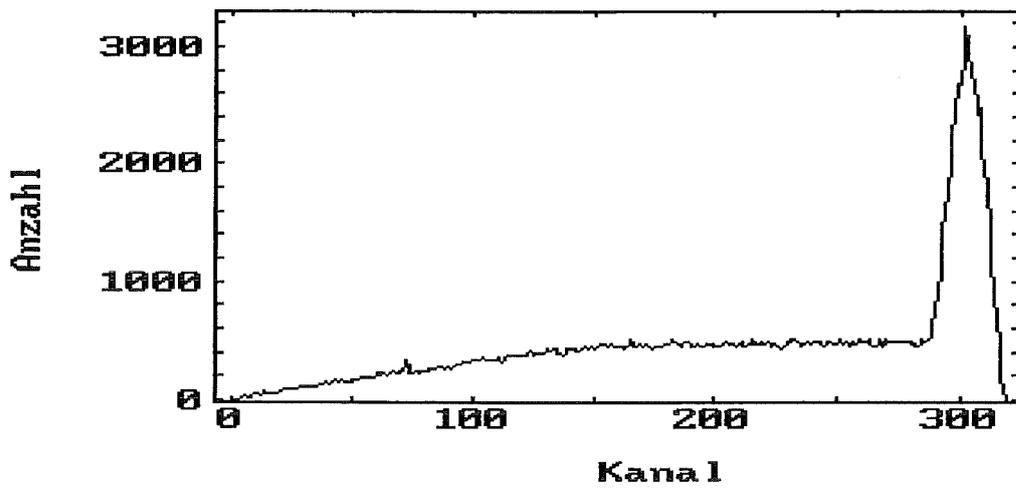


Abbildung 5.3b: Gesamtspektrum der oberen Kathoden von Kammer 206

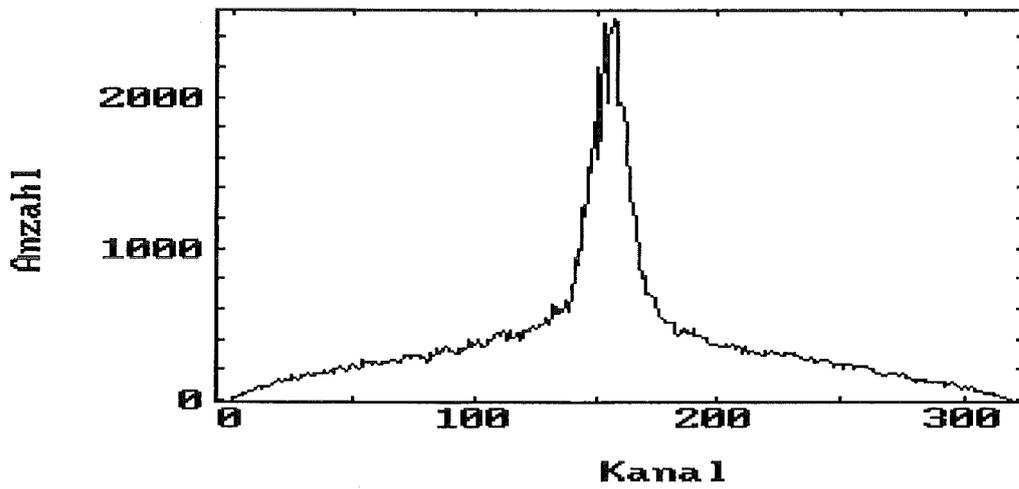


Abbildung 5.3c: Gesamtspektrum der unteren Kathoden von Kammer 210

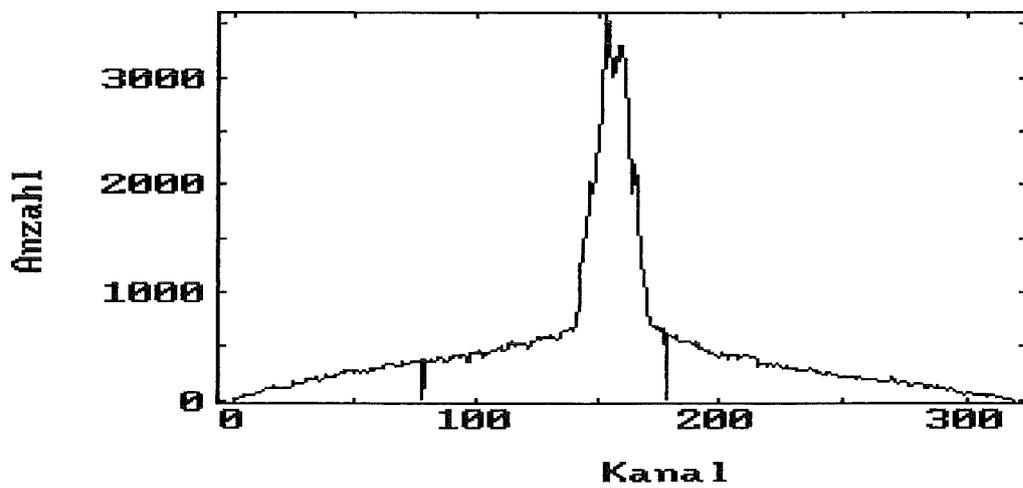


Abbildung 5.3d: Gesamtspektrum der unteren Kathoden von Kammer 206

Leichte Unebenheiten in den Spektren sind zum einen die Folge von Statistik und zum anderen auf die nicht genau gleich verstärkenden Vorverstärker der Ausleseelektronik zurückzuführen. Dies läßt sich jedoch dadurch ausgleichen, daß man die Schwelle der einzelnen Kanäle individuell einstellen kann. Beim Betrachten der Kathodenspektren (siehe Abbildungen 5.3a-d) fällt auf, daß bei der Kammer 210 der Kanal 190 (obere Kathoden), sowie bei der Kammer 206 die Kanäle 78 und 178 keine Treffer registrieren. Bei Kanal 190 ist ein Wackelkontakt zwischen Leiterbahn und Kathodenstreifen die Ursache, bei Kanal 78 ist der Kontakt ganz unterbrochen und bei Kanal 178 ist ein defekter Vorverstärker die Ursache, nach Auswechseln des entsprechenden Vorverstärkermoduls spricht der Kanal wieder an.

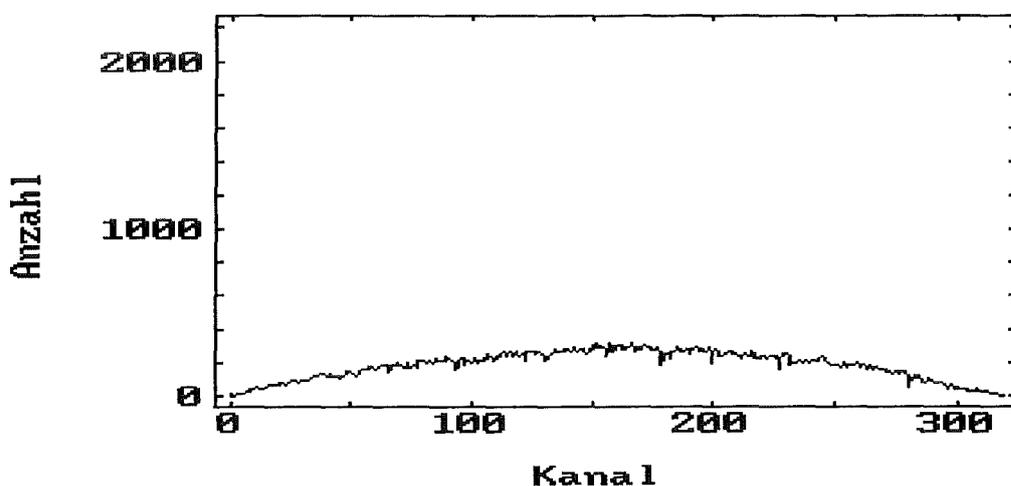


Abbildung 5.4a: Untergrundspektrum der oberen Kathoden von Kammer 210

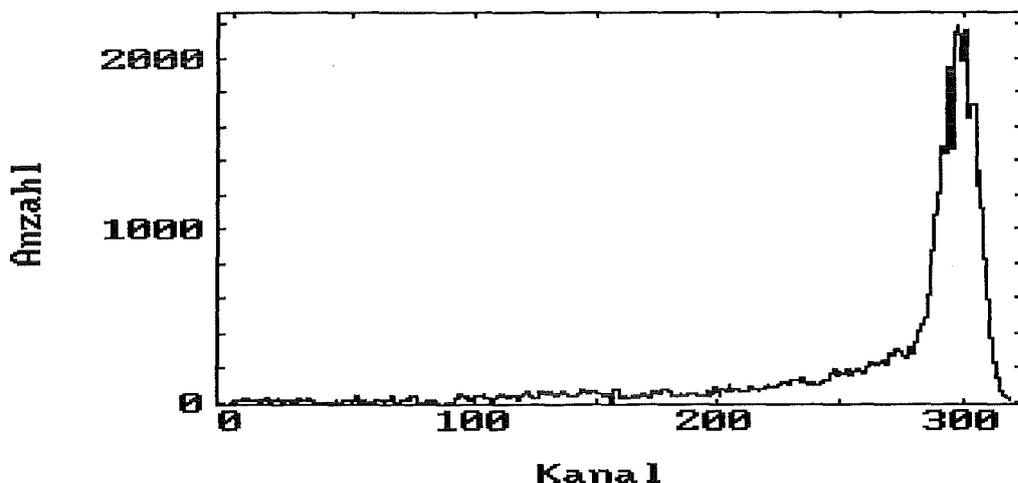


Abbildung 5.4b: Differenzspektrum der oberen Kathoden von Kammer 210

Um das Untergrundspektrum zu messen, wurde die Triggeranordnung in etwa 6 m Entfernung neben der Kammer aufgebaut. In Abbildung 5.4a ist das so gemessene Untergrundspektrum der oberen Kathodenebene (Kammer 210) dargestellt. Bildet man nun die Differenz des Gesamtspektrums aus Abbildung 5.3a und dem Untergrundspektrum aus Abbildung 5.4a, so erhält man das resultierende Differenzspektrum (Abbildung 5.4b), welches die Trefferverteilung derjenigen Streifen wiedergibt, die durch das Triggerteleskop (siehe Abbildung 5.1) abgedeckt werden. Die Form des Untergrundspektrums erklärt sich aus der diagonalen Anordnung der Kathodenstreifen, so daß die Trefferrate bei den längeren Streifen natürlich größer ist.

5.2 Multiplizitäten

Da man mit Vieldraht-Proportionalkammern gute Ortsauflösungen erzielen will, sind die Multiplizitäten von Anoden und Kathoden wichtige Parameter des Detektors. Als Multiplizität wird die Gesamtzahl der angesprochenen Drähte und Streifen der jeweiligen Ebene des Detektors pro Ereignis bezeichnet. Sie besteht zum einen aus der Anzahl der Kanäle, die beim Durchgang eines einzigen minimal ionisierenden Teilchens durch die Kammer zustande kommt und wird erhöht, wenn gleichzeitig weitere Teilchen die Kammer treffen. Da die Vieldraht-Proportionalkammern in diesem Teststand nicht, wie später im KASCADE-Experiment, auf Schauer getriggert werden, weist man in den allermeisten Fällen (siehe Kapitel 5.3) Einzeltreffer nach. Unter dieser Voraussetzung läßt sich sagen, je größer die Multiplizität, desto geringer die Ortsauflösung, wie man in Abbildung 5.5 sehen kann.

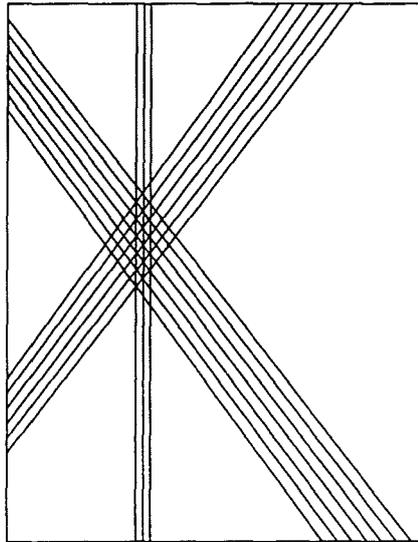


Abbildung 5.5: Darstellung eines Einzeltreffers mit hoher Multiplizität

Da die Myondichte im Zentrum eines 10^{15} eV Schauers im Mittel etwa 1 pro Quadratmeter beträgt [Gab 92] und die Dichte bei 10^{16} eV Schauern schon auf etwa 10 Myonen pro Quadratmeter ansteigt [Gab 93], ist es wichtig auch noch relativ eng beieinanderliegende Treffer als solche zu erkennen, und dies ist nur dann möglich, wenn die zugehörigen Multiplizitäten nicht zu groß sind. Werden andererseits durch Senken von Hochspannung und Erhöhung der Schwellenwerte die Multiplizitäten zu stark

heruntergesetzt, so nimmt auch die Nachweiswahrscheinlichkeit deutlich ab, da es dann häufiger vorkommt, daß eine der drei Nachweisebenen keine Treffer registriert und somit ergeben sich insbesondere bei Mehrfachtreffern Mehrdeutigkeiten. Für KASCADE ist die Effizienz wichtiger als die Ortsauflösung, so daß die Detektoren letztendlich auf ihre Nachweiswahrscheinlichkeit optimiert werden (siehe Kapitel 5.3).

5.2.1 Einstellung der Ansprechschwellen

Die Schwellen sind aufgrund des 6Bit DACs in 64 Stufen eingeteilt, wobei der Wert Null einer Schwellenspannung von etwa 300 mV und einer Ladung von 0,3 pC entspricht [Koe 91B]. Dem Höchstwert 63 wird eine maximale Schwellenspannung von 2,5 V zugeordnet. Somit entspricht der Schrittweite Eins einer Spannungsänderung von 34 mV.

Die Schwellen der DACs werden bei den Kathodenebenen so eingestellt, daß nur selten fünf oder mehr Streifen einer Ebene ansprechen (siehe Abbildungen 5.7c/d und Abbildungen 5.8c/d). Die Anoden hingegen zeigen keine signifikanten Abhängigkeiten gegenüber Schwelleneinstellungen, da sie durch Potentialdrähte (negative Hochspannung) gegeneinander abgeschirmt werden. Somit driften die durch Ionisation und Gasverstärkung entstandenen Elektronen zumeist zu der ihnen am nächsten gelegenen Anode, in deren unmittelbarer Nähe sie dann beschleunigt und durch weitere Ionisationen vervielfacht werden. Somit erklärt sich die mittlere Multiplizität von ungefähr Eins (siehe Abbildungen 5.6c-e). Die Ereignisse mit Anodenmultiplizität 2 sind im wesentlichen auf Doppelmyonen, deren Anteil bei ungefähr 10-12% (siehe Kapitel 5.3) liegt, zurückzuführen. Werden die Schwellen allerdings sehr niedrig gewählt (<10), steigt, wie in den Abbildungen 5.6a/b zu sehen ist, die Anzahl der Ereignisse mit Anodenmultiplizität 2 leicht an. Dies ist zum einen die Folge, daß ein paar Elektronen zu einer benachbarten Anode driften und aufgrund der niedrigen Schwelle nachgewiesen werden, und zum anderen die Folge von Störimpulsen, welche durch das Schalten der Komparatoren ausgelöst werden und benachbarte Vorverstärker ansprechen lassen. Bei den Kathoden wirken sich die Störimpulse bei zu niedrigen Schwellenwerten drastischer aus (hohe Anzahl an Kathodenmultiplizität ≥ 5), da die Vorverstärker auf den Kathodenmodulen etwa fünfmal empfindlicher sind als die der Anoden (siehe Abbildungen 5.7a/b und 5.8a/b). Zudem hat sich die positive Ionenwolke bei Erreichen der Kathodenstreifen relativ weit ausgedehnt und ist somit auf mehrere Kathoden verteilt. Werden andererseits die Schwellenwerte bei den Kathoden zu hoch gesetzt, reicht die deponierte Energie der minimal ionisierenden Teilchen nicht mehr aus, um von der Ausleseelektronik nachgewiesen zu werden. In den Spektren 5.7e/f und 5.8e/f ist zu erkennen, daß für Kathodenschwellen von 50 sehr häufig keine Kathoden angesprochen haben. Bei den Anoden ist ein etwas häufigeres Nichtansprechen der Drähte erst bei Schwellenwerten größer als 55 zu beobachten.

Vergleicht man die Multiplizitätsverteilungen der Argon-Isobutan und Argon-Methan Messungen so gilt für die Kathoden, unabhängig der gewählten Gassorte, daß sich für Schwellenwerte zwischen 10 und 20 die besten Verteilungen ergeben, was bedeutet, daß etwa 80-85 % aller Ereignisse die Multiplizitäten 1 bis 4 haben. Bei betrachten aller Kathodenspektren 5.7a-e und 5.8a-e fällt auf, daß bei Argon-Isobutan die Mutliplizitäten Null verglichen mit Argon-Methan häufiger vorkommen und umgekehrt bei Argon-Methan die Multiplizitäten ≥ 5 verstärkt auftreten. Dieser Effekt beruht nicht auf der Tatsache unterschiedlicher Gasgemische, sondern hat seine Ursache in der hier beliebig gewählten Hochspannung (für Argon-Isobutan 2040 V und für Argon-Methan 1660 V). Wie sich später beim Optimieren der Nachweiswahrscheinlichkeiten ergibt, sind die 2040 V bei Argon-Isobutan etwas zu niedrig und die 1660 V bei Argon-Methan etwas zu hoch gewählt.

Bei den Anoden liegt der Bereich für die Schwellenwerte ungefähr zwischen 15 und 50 und die mittlere Multiplizität bei ungefähr eins. Allerdings registriert man bei den Ar-CH₄-Spektren ein etwas häufigeres auftreten der Anodenmultiplizität 2. Dies ist die Ursache einer größeren mittleren freien Weglänge in Argon-Methan als in Argon-Isobutan, was bedeutet, daß auch die transversale Weglänge größer ist und somit mehr Elektronen zur benachbarten Anode driften können, bevor sie in unmittelbarer Nähe des Drahtes durch das starke elektrische Feld nur noch zur einer Anode hin beschleunigt werden. Diese Beschleunigung findet zudem bei Argon-Methan, aufgrund der niedrigeren Hochspannung näher am Draht statt als bei Argon-Isobutan, womit sich die Weglänge, in der die Elektron-Ion-Paare driften können ohne zur einer bestimmten Anode hin beschleunigt zu werden, erhöht.

Dies bedeutet, daß es zwischen Ar-C₄H₁₀ und Ar-CH₄ bezüglich der Multiplizitäten und somit der Ortsauflösung, abgesehen von der etwas höheren durchschnittlichen Anodenmultiplizität keine signifikanten Unterschiede gibt.

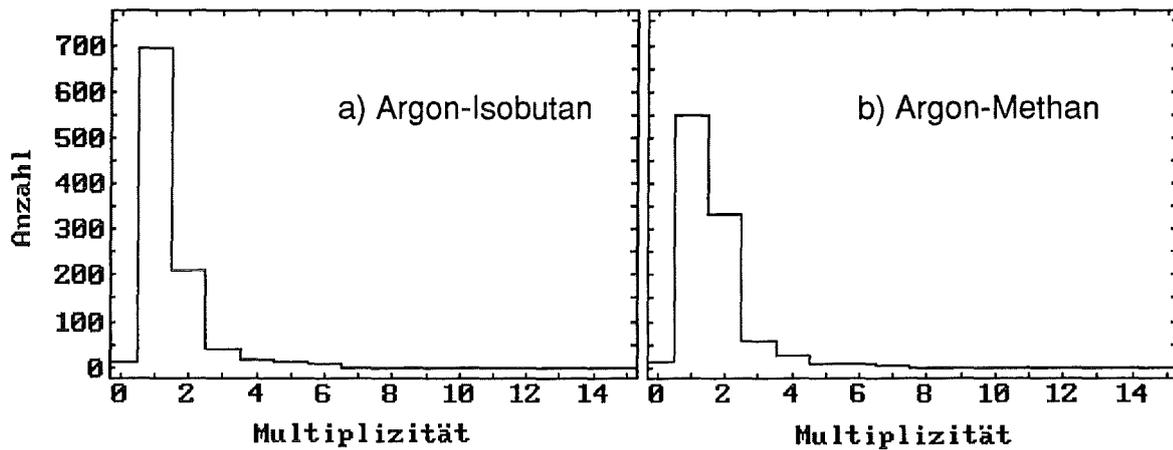


Abbildung 5.6a/b: Multiplizitätsspektren der Anoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 5 (1000 Ereignisse)

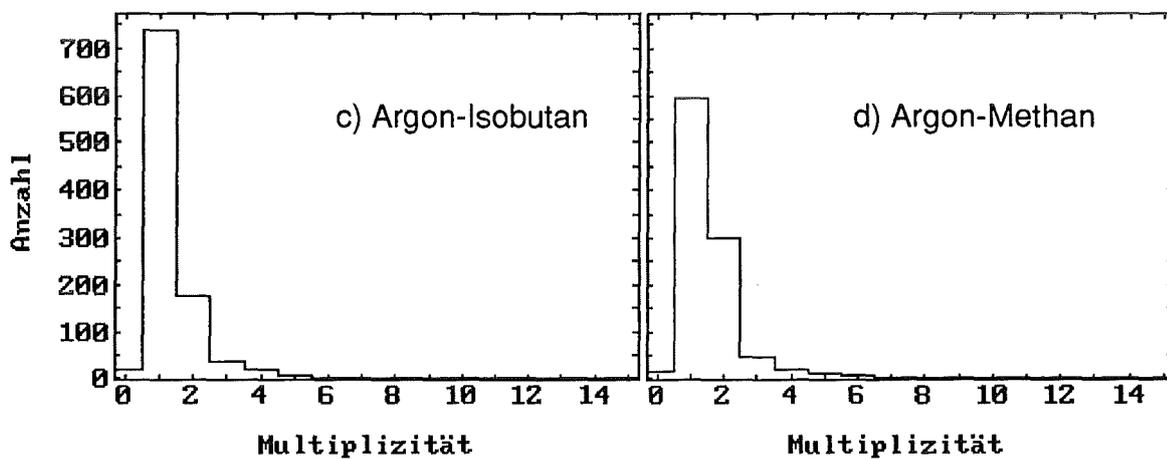


Abbildung 5.6c/d: Multiplizitätsspektren der Anoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 15 (1000 Ereignisse)

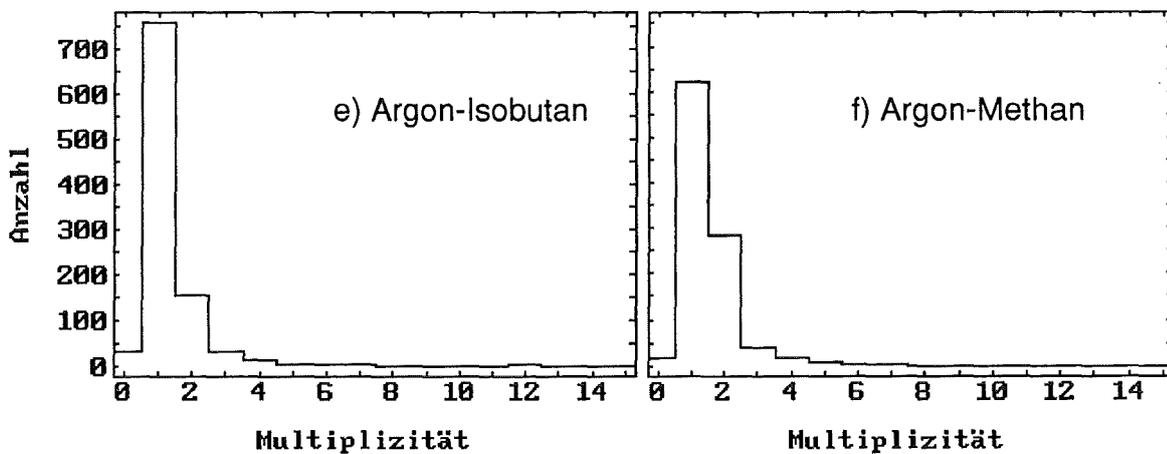


Abbildung 5.6e/f: Multiplizitätsspektren der Anoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 50 (1000 Ereignisse)

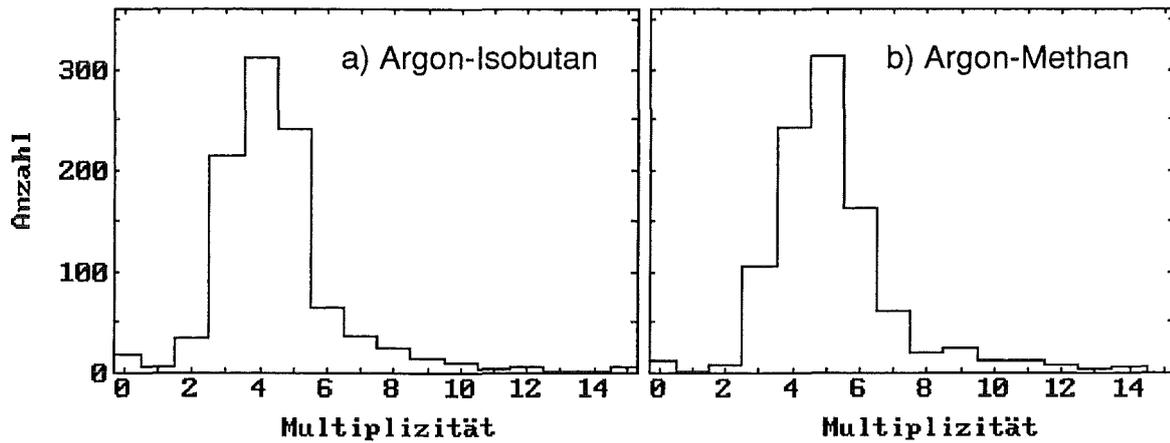


Abbildung 5.7a/b: Multiplizitätsspektren der oberen Kathoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 5 (1000 Ereignisse)

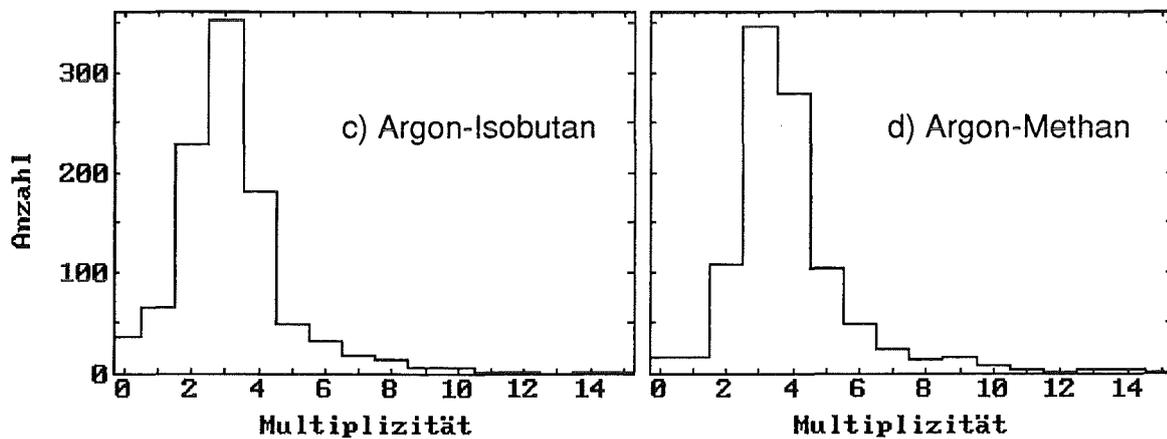


Abbildung 5.7c/d: Multiplizitätsspektren der oberen Kathoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 15 (1000 Ereignisse)

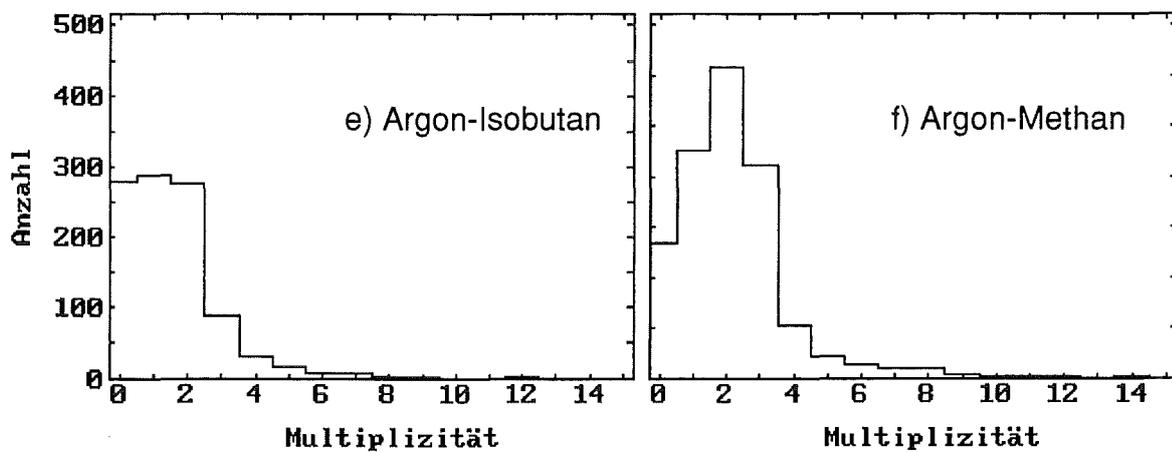


Abbildung 5.7e/f: Multiplizitätsspektren der oberen Kathoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 50 (1000 Ereignisse)

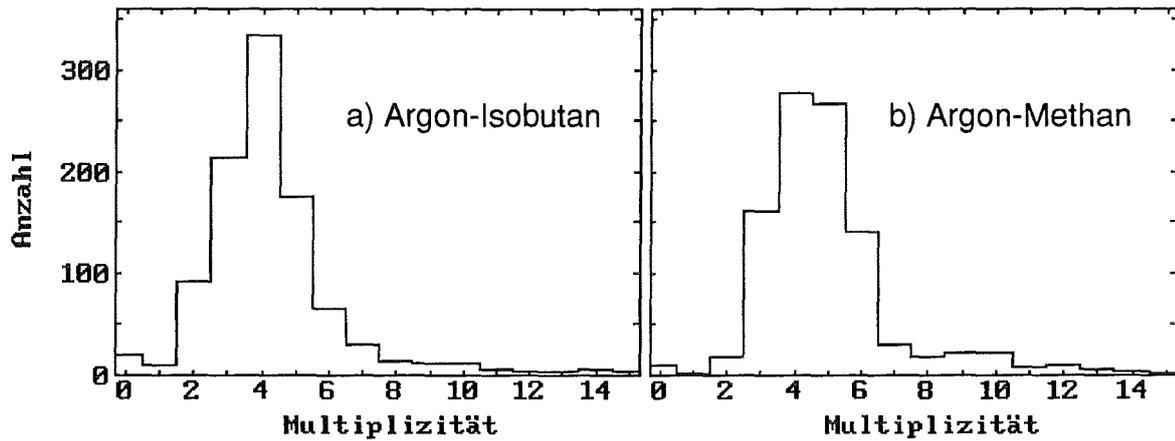


Abbildung 5.8a/b: Multiplizitätsspektren der unteren Kathoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 5 (1000 Ereignisse)

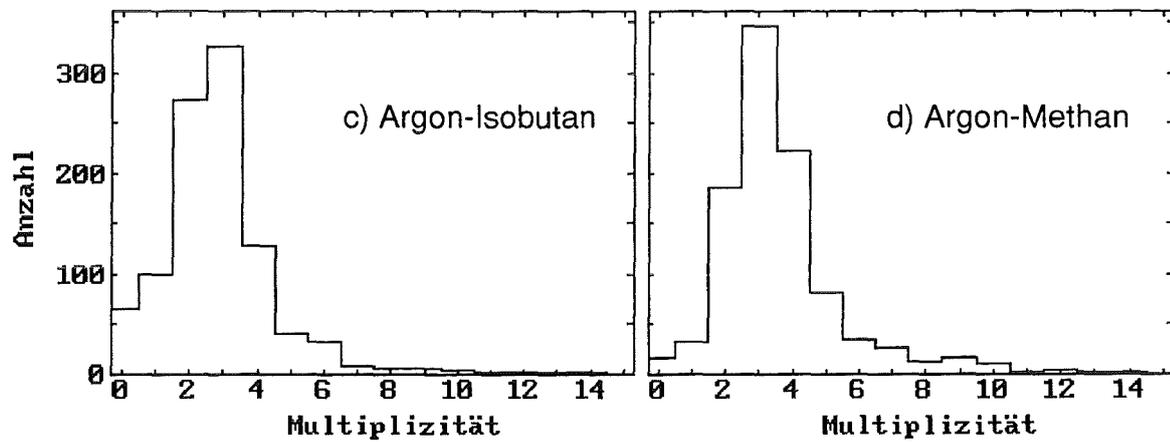


Abbildung 5.8c/d: Multiplizitätsspektren der unteren Kathoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 15 (1000 Ereignisse)

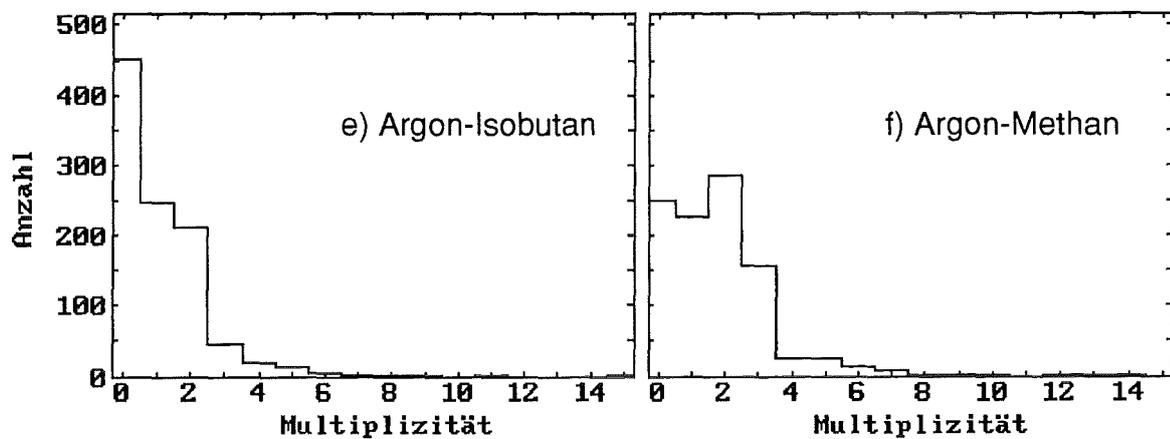


Abbildung 5.8e/f: Multiplizitätsspektren der unteren Kathoden von Kammer 206 mit dem DAC-Schwellenwert 50 (1000 Ereignisse)

5.2.2 Einstellung der Hochspannung

Da die Gasverstärkung eine von der angelegten Hochspannung abhängige Größe ist, ändern sich mit dieser auch die Multiplizitäten. Die Kurven in den Abbildungen 5.9a/b zeigen die Abhängigkeiten der mittleren Multiplizitäten von der Hochspannung für zwei unterschiedliche Gasgemische.

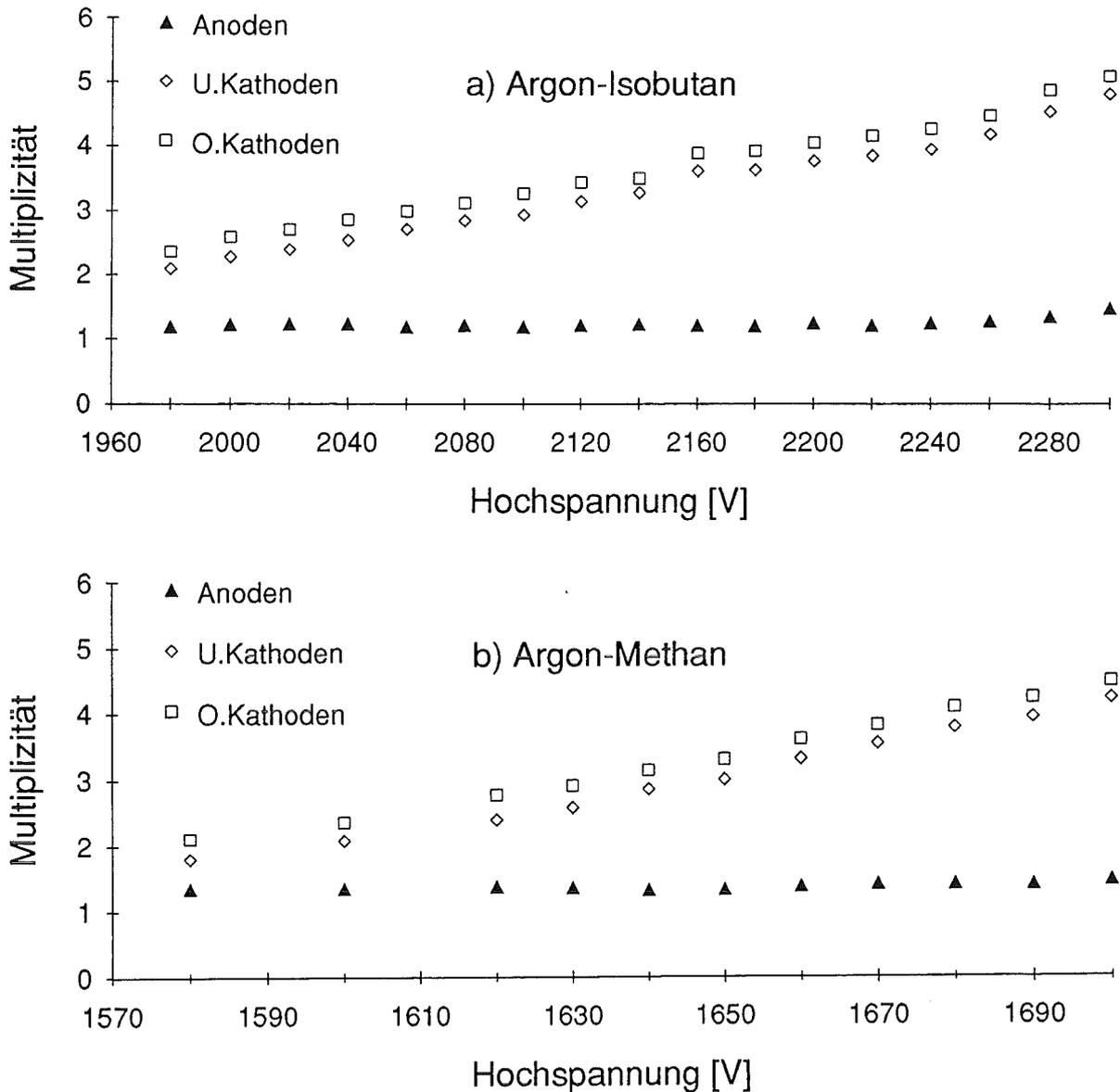
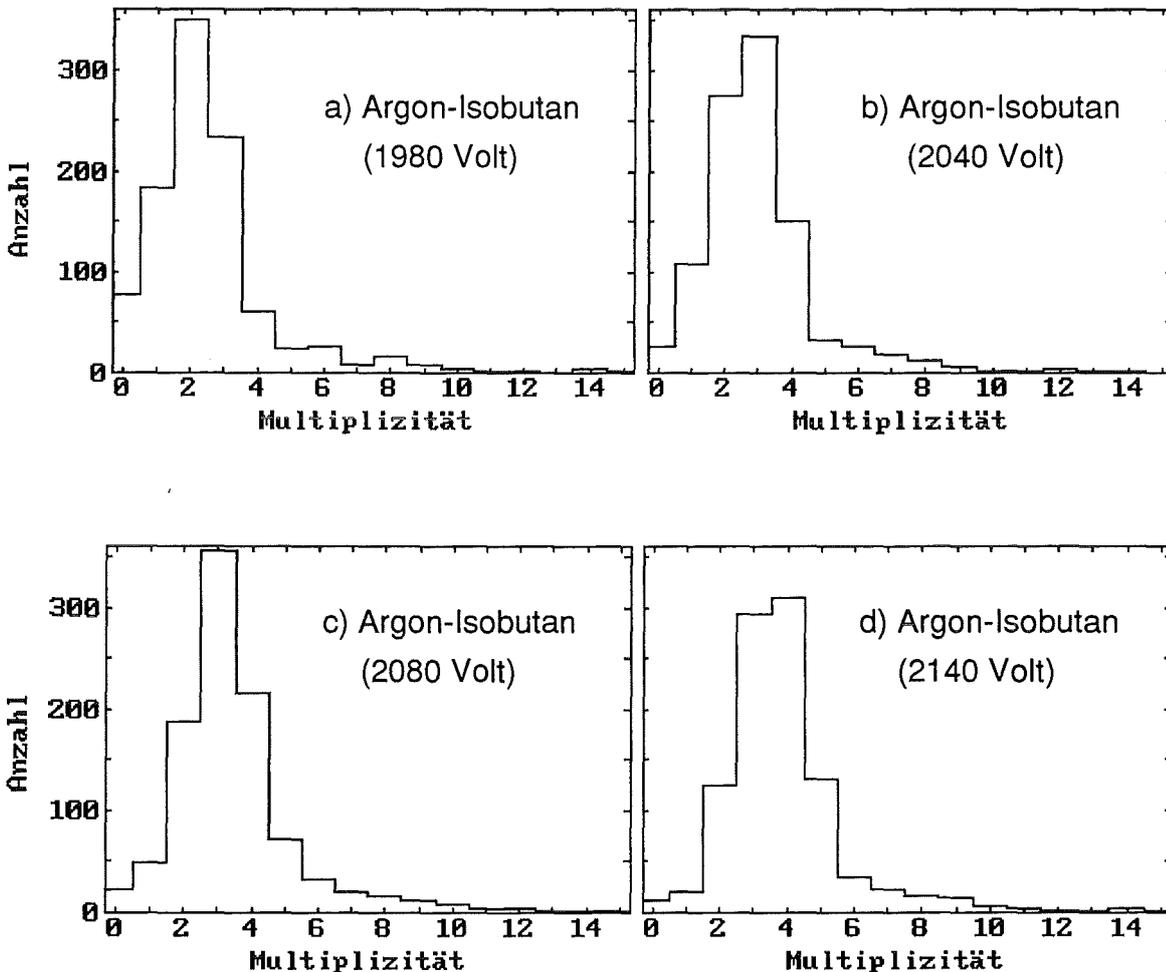


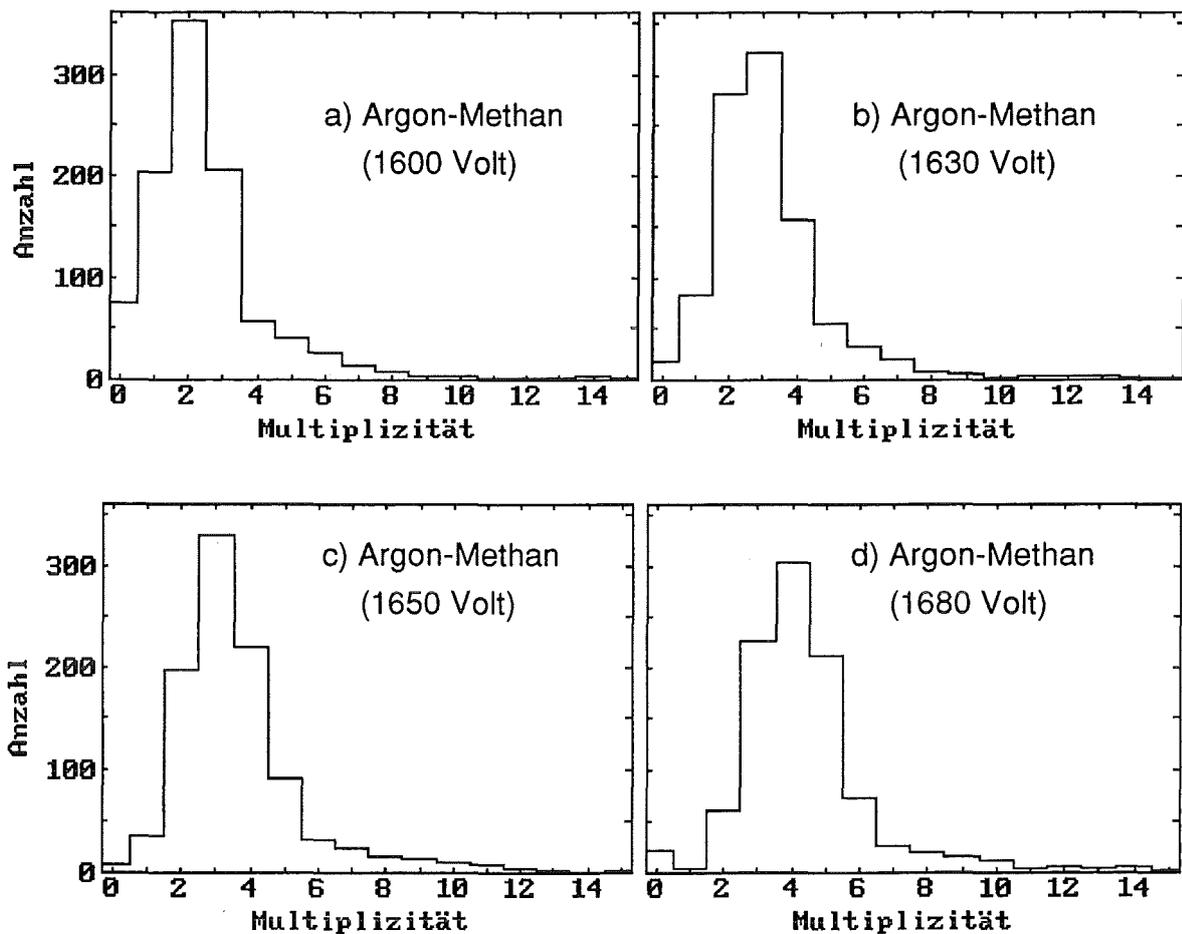
Abbildung 5.9a/b: Mittlere Multiplizitäten mit den Gasgemischen Argon-Isobutan und Argon-Methan in Abhängigkeit der Hochspannung (Kammer 206)

Zur Bestimmung des optimalen Hochspannungsbereichs bezüglich einer guten Ortsauflösung ist es jedoch notwendig die einzelnen Multiplizitätsverteilungen zu betrachten (siehe Abbildungen 5.10a-d, 5.11a-d).

Die Kriterien hierfür sind die gleichen wie beim Einstellen der Schwellenspannungen, die Hochspannung sollte deshalb so gewählt werden, daß die Anzahl der Treffer mit Anodenmultiplizität Eins maximal wird und die Kathodenmultiplizitäten Null und größer vier, minimal werden. Man erkennt, daß die jeweiligen Hochspannungen in den Abbildungen 5.10a und 5.11a zu niedrig gewählt sind, hingegen in den Abbildungen 5.10d und 5.11d zu hoch. Der optimale Hochspannungsbereich der untersuchten Argon-Isobutan betriebenen Myonkammern liegt zwischen 2020 und 2120 Volt. Für die mit Argon-Methan betriebenen Detektoren liegt dieser Bereich zwischen 1620 und 1660 Volt.



Abbildungen 5.10a-d: Multiplizitätsspektren der oberen Kathoden (CH 206) bei unterschiedlichen Hochspannungen mit $\text{Ar-C}_4\text{H}_{10}$



Abbildungen 5.11a-d: Multiplizitätsspektren der oberen Kathoden (CH 206) bei unterschiedlichen Hochspannungen mit Ar-CH₄

Eine gute Ortsauflösung nützt aber nur dann etwas, wenn die Nachweiswahrscheinlichkeit für kosmische Myonen ebenfalls optimiert wird. Somit muß mit einem entsprechenden Trefferrekonstruktionsalgorithmus [Wen 93] ermittelt werden, bei welcher Hochspannung die meisten gültigen Treffer registriert werden, um dann den günstigsten Hochspannungsbereich mit einer vernünftigen Ortsauflösung und einer hohen Nachweiswahrscheinlichkeit zu bestimmen.

5.2.3 Luftdruckabhängigkeit

Der Einfluß des Luftdrucks auf die mittleren Multiplizitäten ist in Abbildung 5.12 aufgezeigt. Mit fallendem Luftdruck steigen die Multiplizitäten der Kathoden stetig an. Bei den Anoden ist aus bereits erläuterten Gründen keine Abhängigkeit zu beobachten. Der Grund für die größeren Multiplizitätswerte liegt bei den etwas höheren Gasverstärkungen bei niedrigeren Gasdrücken. Sinkt der äußere Luftdruck, nimmt auch der Gasdruck in der Kammer aufgrund des Druckausgleichs (siehe Kapitel 3.2) ab.

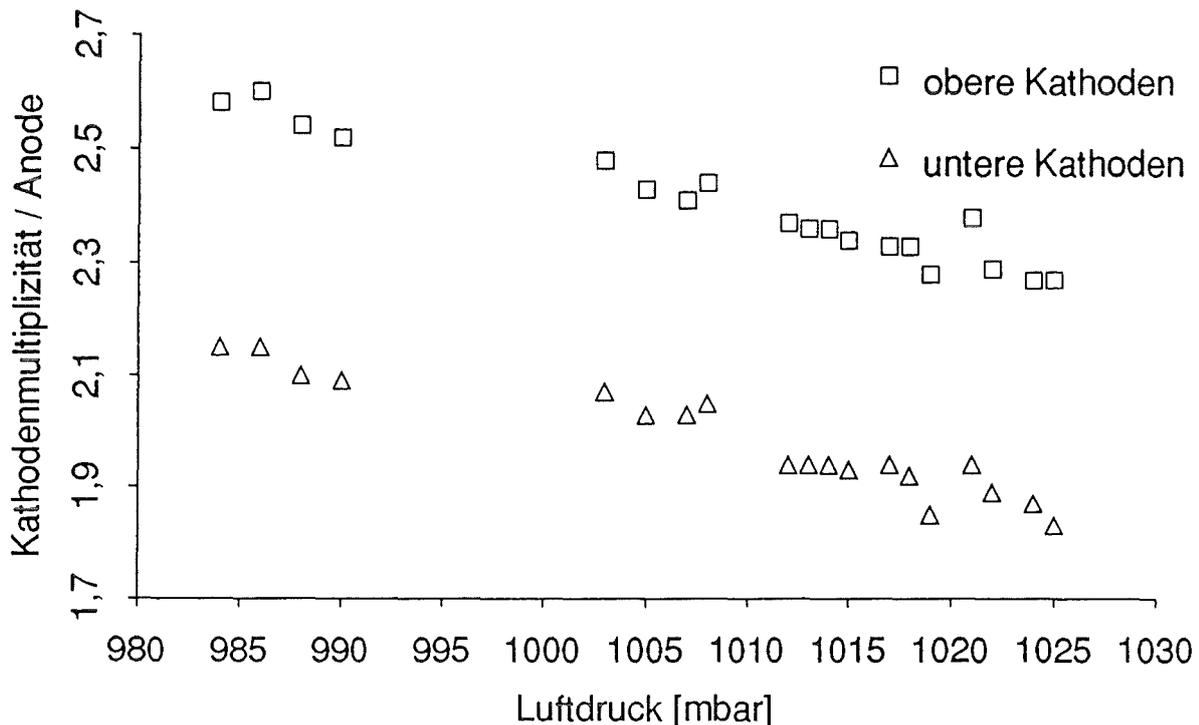


Abbildung 5.12: Die mittlere Kathodenmultiplizität pro Anode in Abhängigkeit des Luftdrucks

Es befinden sich daher weniger Gasmoleküle im gleichen Kammervolumen als zuvor. Löst nun ein minimal ionisierendes Teilchen eine Primärionisation aus, werden die erzeugten Elektronen wegen der längeren freien Weglänge zu höheren Energien hin beschleunigt, so daß bei den Sekundärionisationen mehr Elektronen freigesetzt werden als vorher. Die Folge ist eine etwas ausgedehntere Ladungswolke, so daß die Wahrscheinlichkeit eines zusätzlichen Ansprechens eines Kathodenstreifens bei Niedrigdruck geringfügig größer ist als bei Hochdruck.

5.3 Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Detektors ist diejenige Kenngröße, die angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit die nachzuweisenden Teilchen erkannt werden. Die nachzuweisenden Teilchen sind diesem Falle Myonen und werden als solche identifiziert, wenn sie koinzident die beiden Triggerebenen passieren. Würden alle Myonen, die ein Koinzidenztriggersignal auslösen in der Kammer nachgewiesen, hätte der Detektor eine Effizienz von 100%.

Um die Nachweiswahrscheinlichkeit für die Detektoren zu bestimmen, ist es notwendig Kriterien festzulegen, wann ein Myon als nachgewiesen gilt. Man teilt daher zunächst die verschiedenen Ereignisse im Detektor in unterschiedliche Ereignisklassen ein (siehe Abbildungen 5.13a-e).

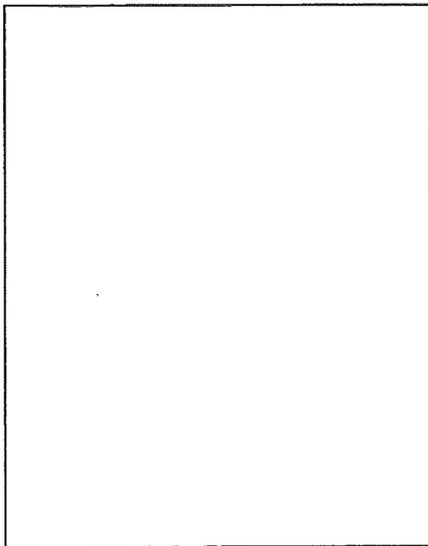


Abbildung 5.13a:

Ereignisklasse 0 (Nulltreffer):
Es haben keine Anoden und
keine Kathoden angesprochen.

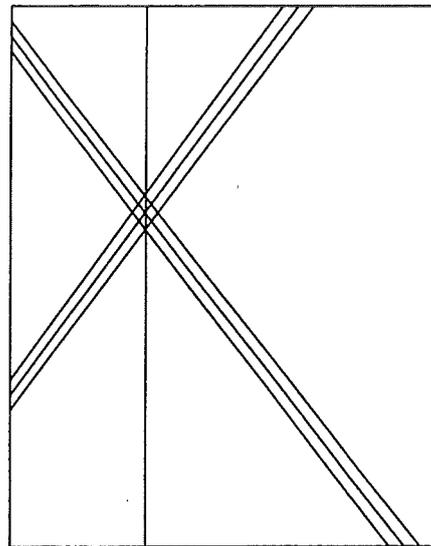


Abbildung 5.13b:

Ereignisklasse 1 (Einzeltreffer):
Es hat mindestens eine Anode,
eine untere, sowie eine obere
Kathode angesprochen und es
gibt einen Dreifachsnittpunkt.
Sprechen mehrere Anoden od-
er Kathoden in einer Ebene an,
dürfen keine Lücken dazwi-
schen liegen.

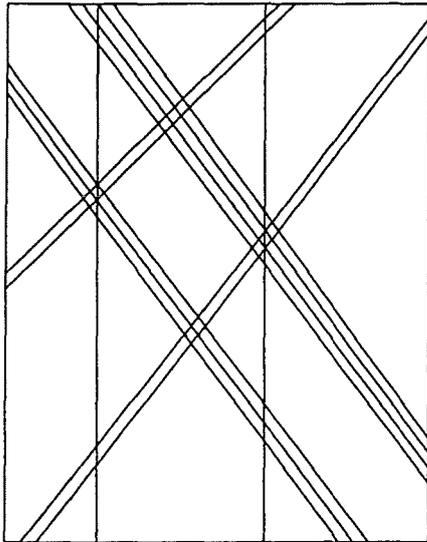


Abbildung 5.13c:

Ereignisklasse 2 (Doppel- und Mehrfachtreffer):

Es haben mindestens zwei Anoden, zwei untere und zwei obere Kathoden angesprochen und es gibt zwei oder mehr Dreifachschnittpunkte.

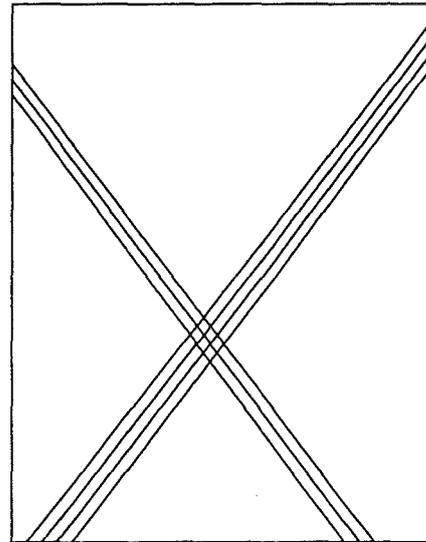


Abbildung 5.13d:

Ereignisklasse 3 ("2 von 3"-Treffer):

Es haben in zwei von drei Ebenen Drähte bzw. Streifen angesprochen. Sprechen mehrere Anoden oder Kathoden in einer Ebene an, dürfen keine Lücken dazwischen liegen.

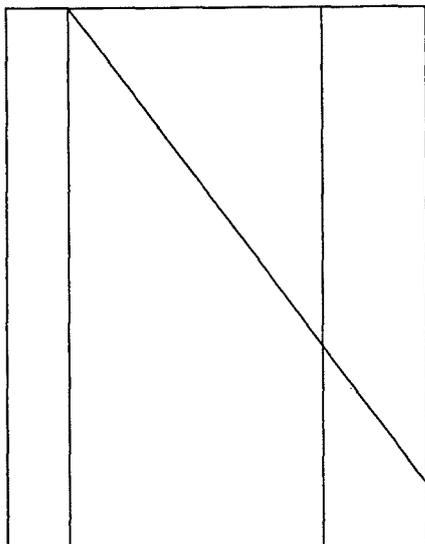


Abbildung 5.13e:

Ereignisklasse 4 (nicht rekonstruierbare Treffer):

Alle Treffer, die nicht in die Ereignisklassen 0-3 einsortiert werden können.

Läßt sich ein Treffer in die Ereignisklassen eins oder zwei einsortieren, gilt das Myon als nachgewiesen. In den Abbildungen 5.14a-c und 5.15a-c sind die Häufigkeiten für Einzeltreffer (EK1), Doppel- und Mehrfachtreffer (EK 2), sowie die Detektoreffizienz für Myonen (EK 1, EK 2), unter Verwendung der Gasgemische Argon-Methan und Argon-Isobutan, in Abhängigkeit der Hochspannung aufgetragen. Die Effizienz η des Detektors wird definiert durch:

$$\eta = \frac{N_D}{N_G}$$

N_D : Anzahl der im Detektor nachgewiesenen Treffer der Ereignisklassen 1 und 2

N_G : Gesamtanzahl der Triggerkoinzidenzen

In den Diagrammen der Einzeltreffer ist zu erkennen, daß die Häufigkeit mit zunehmender Spannung ansteigt und in einem Hochspannungsbereich von 1640 - 1660 Volt für Ar-CH₄ bzw. 2040 - 2140 Volt für Ar-C₄H₁₀ einen maximalen Wert von etwa 87 bis 88 % unabhängig des verwendeten Gasgemisches erreicht. Zu höheren Spannungen hin geht die Häufigkeit zurück. Dies läßt sich dadurch erklären, daß man bei höheren Spannungen langsam in den Bereich überproportionaler Verstärkung eintritt und die Elektronen- und Ionenwolken relativ weit ausgedehnt sind und somit viele Kathodenstreifen ansprechen. Das hat zur Folge, daß die Wahrscheinlichkeit einer Lücke in den ausgedehnten Kathodenclustern größer wird, vor allem in denjenigen Kammern, wo sich zusätzlich noch defekte Streifen befinden. Somit können einige Einzeltreffer als Doppel- oder Mehrfachtreffer mißinterpretiert werden. Dies erklärt auch, warum die Häufigkeit für Doppel- und Mehrfachtreffern bei höheren Spannungen ansteigt. Andere Effekte die bei höheren Spannungen auftreten können, wie z. B. die Zunahme nicht rekonstruierbarer Treffer oder elektronisches Übersprechverhalten spielen hier keine Rolle, sofern man die Schwellen nicht zu hoch oder zu niedrig eingestellt hat (siehe Kapitel 5.2).

Der optimale Hochspannungsbereich liegt somit in demjenigen Bereich in dem die Häufigkeit der Einzeltreffer maximal wird, hier werden die wenigsten Einzeltreffer als Doppeltreffer fehlinterpretiert. Der Anteil an Doppel- und Mehrfachtreffern liegt zwischen 10 bis 12%, wobei der Anteil an Mehrfachtreffern knapp 2% beträgt. Betrachtet man die Detektoreffizienz η für Myonen, so liegt diese ungeachtet des verwendeten Gasgemisches bei ungefähr 98 %.

Die restlichen 2% sind im wesentlichen Nulltreffer, was bedeutet, daß trotz Triggerkoinzidenz kein Ereignis in der Kammer registriert wird. Beachtet man die Rate zufälliger Koinzidenzen N_z von zwei Detektorebenen mit den Zählraten N_1 , N_2 und der Koinzidenzzeit τ , so gilt [Leo 85]:

$$N_z = 2 \cdot \tau \cdot N_1 \cdot N_2$$

Daraus läßt sich eine korrigierte Detektoreffizienz errechnen:

$$\eta_K = \frac{N_D}{N_G - N_z}$$

Mit $\tau=450$ ns, $N_1 \approx 1440$ Hz und $N_2 \approx 360$ Hz (obere Triggerebene des Detektorsystems: 8 m²; untere Triggerebene: 2 m²) ergibt sich für die Rate zufälliger Koinzidenzen N_z ungefähr 0,5 Hz. Die Koinzidenzrate der beiden Triggerebenen beträgt etwa 100 Hz. Somit lassen sich 0,5% aller Ereignisse zufälligen Koinzidenzen zuordnen, aufgrund dessen in der Kammer kein Ereignis zu registrieren war. Berücksichtigt man diese Rate, so erhält man für die bisher zwei getesteten Kammern Detektoreffizienzen η_K von über 98%, sowohl für Argon-Methan als auch für Argon-Isobutan.

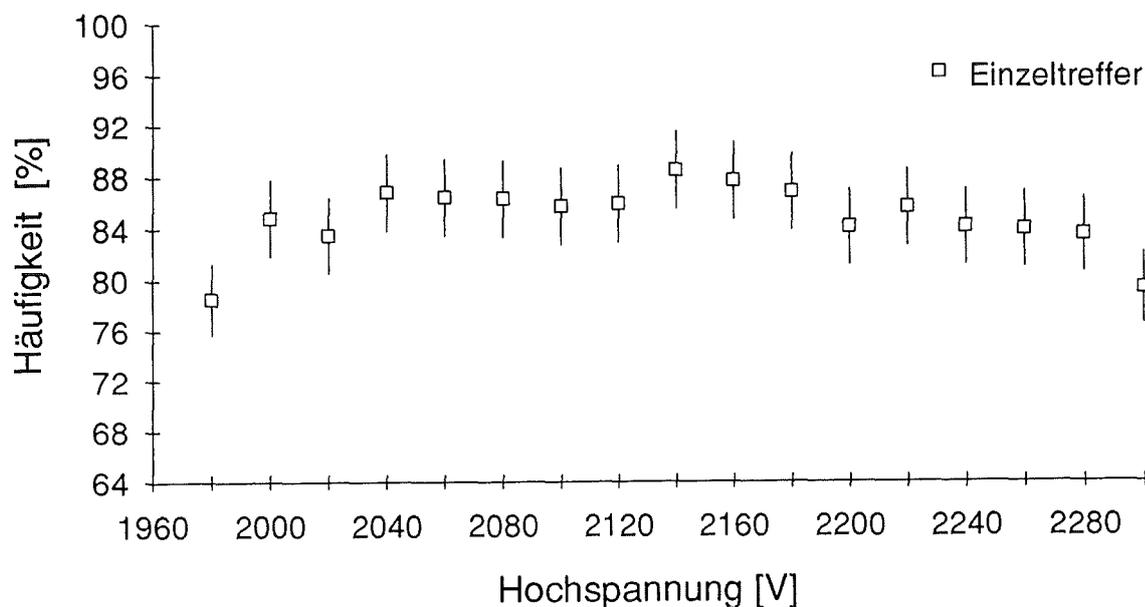


Abbildung 5.14a: Häufigkeit von Einzeltreffern in Abhängigkeit der Hochspannung mit Argon-Isobutan (1000 Ereignisse)

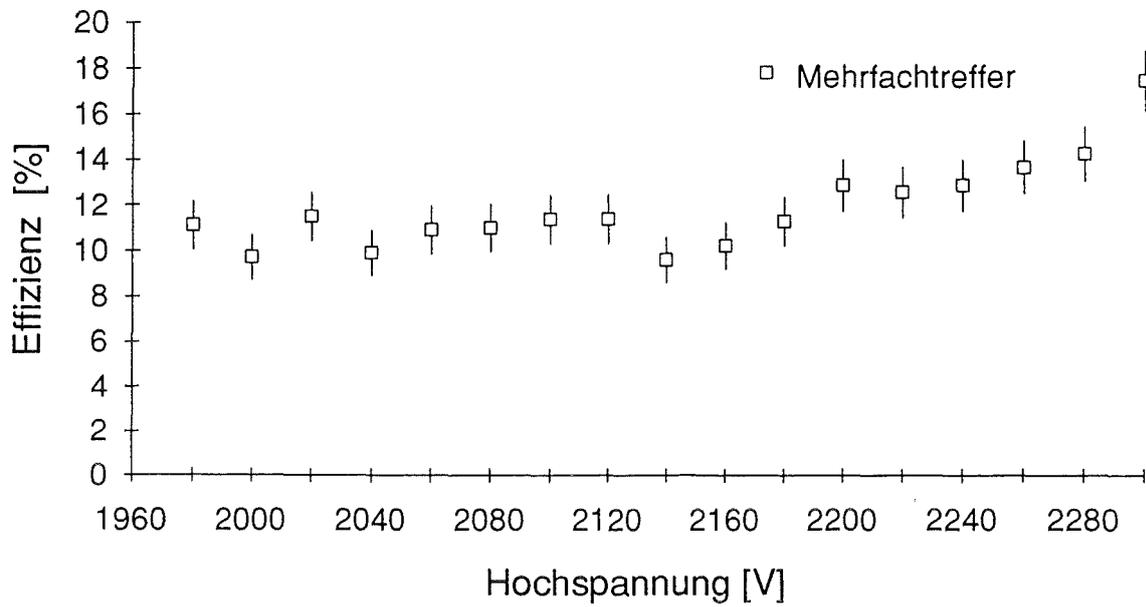


Abbildung 5.14b: Häufigkeit von Doppel- und Mehrfachtreffern in Abhängigkeit der Hochspannung mit Argon-Isobutan (1000 Ereignisse)

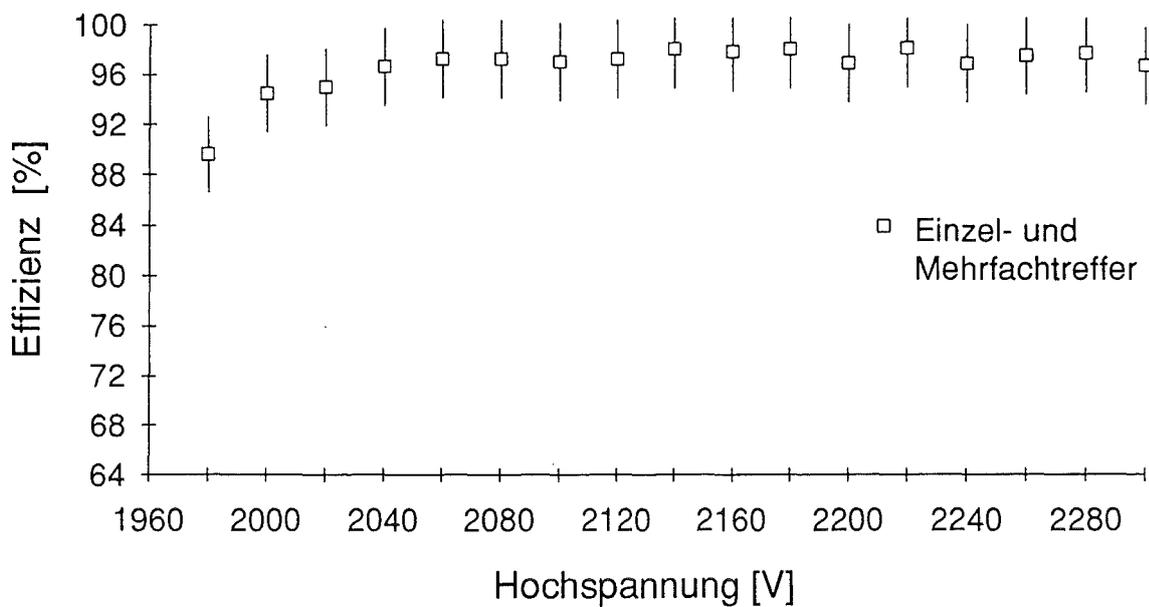


Abbildung 5.14c: Detektoreffizienz in Abhängigkeit der Hochspannung mit Argon-Isobutan (1000 Ereignisse)

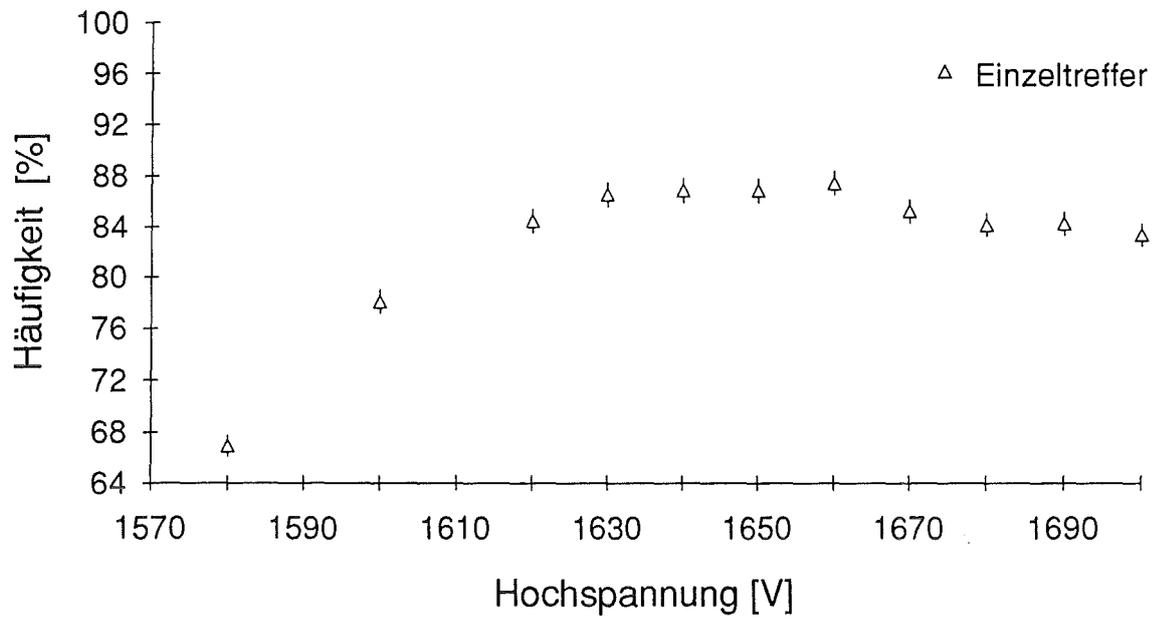


Abbildung 5.15a: Häufigkeit von Einzeltreffern in Abhängigkeit der Hochspannung mit Argon-Methan (10.000 Ereignisse)

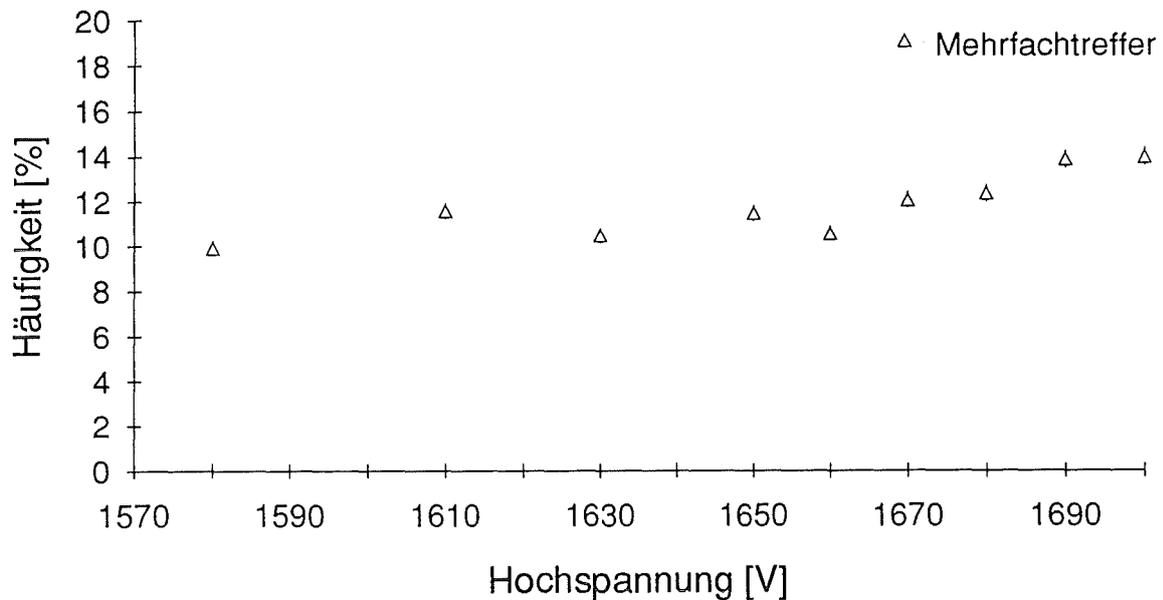


Abbildung 5.15b: Häufigkeit von Doppel- und Mehrfachtreffern in Abhängigkeit der Hochspannung mit Argon-Methan (10.000 Ereignisse)

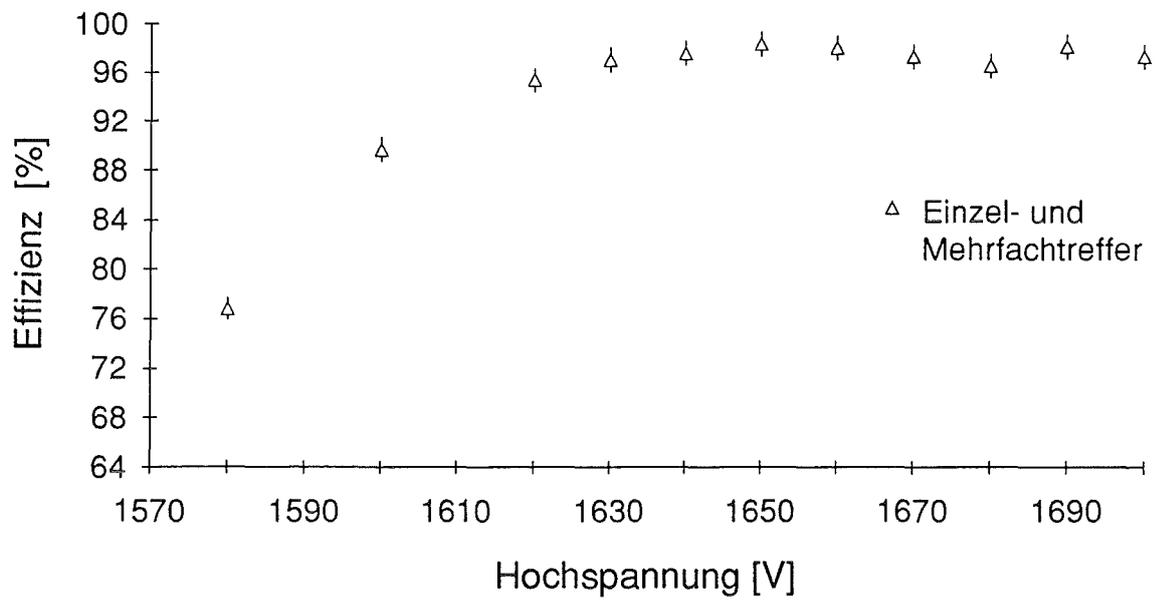


Abbildung 5.15c: Detektoreffizienz in Abhängigkeit der Hochspannung mit Argon-Methan (10.000 Ereignisse)

6. Zusammenfassende Bemerkungen

Im Rahmen des KASCADE-Experimentes wurde ein Testverfahren für großflächige Vieldraht-Proportionalkammern entwickelt und durchgeführt. Die Erfahrungen beim Betreiben der Kammern führen zu folgenden Ergebnissen:

Die hier ausgearbeitete Prozedur der Inbetriebnahme von Vieldraht-Proportionalkammern ist unkompliziert und effektiv, und läßt schon vor dem Meßbetrieb unterbrochene Kontakte zu den Kathodenstreifen bzw. gerissene Anodendrähte lokalisieren. Alle vier getesteten Kammern konnten hochspannungsfest gemacht werden und die durchgeführten Messungen zeigten, daß die Detektoren für KASCADE gut geeignet und für die vorgesehenen Zwecke einsetzbar sind. Die Datenauslese erfolgte mit einer neuentwickelten Nachweiselektronik, die sich durch Stabilität der Meßparameter und Zuverlässigkeit auszeichnet [Koe 91A, Kre 93]. Hierbei erwies sich die rechnergesteuerte Einstellung der Triggerschwellen und Verzögerungswerte als äußerst hilfreich.

Die Reparatur an einer Kammer konnte zwar erfolgreich durchgeführt werden, wenngleich ein bedeutendes Problem auftrat:

Das Eindringen von Paraffinöl aus dem "Bubbler"-Gefäß in den Detektor; das Paraffinöl wurde beim Öffnen der Kammer im Detektor entdeckt, woraufhin die Gas-schläuche sämtlicher im Betrieb befindlichen Myonkammern überprüft wurden, mit dem Ergebnis, daß diese zum Teil erheblich mit dem Öl gefüllt sind. Dies legt die Vermutung nahe, daß das Eindringen von Paraffinöl in den sensitiven Bereich der Myonkammern ein generelles Problem des Gasversorgungssystems darstellt. Es wurden jedoch bis jetzt keine negativen Auswirkungen in bezug auf erhöhte Leckströme und geringere Nachweiseffizienz der Kammern festgestellt; dies sollte man aber im Laufe der folgenden Jahre weiter beobachten. Getestet wurde eine mögliche Alternative für das Paraffinöl. Die Verwendung von Isopropanol als "Bubbler"-Flüssigkeit hat den Vorteil, daß ein Eindringen von Alkoholdampf in den Detektor kein Problem darstellt, da das Isopropanol zum Lösen der "Crack"-Reste in der Kammer erwünscht ist (siehe Kapitel 4.3). Alkohole haben jedoch den Nachteil, daß sie aufgrund ihres hohen Sättigungsdampfdruckes mit der Zeit verbraucht werden.

Die vergleichenden Untersuchungen mit den Gasgemischen Argon-Methan (90:10 Vol%) und Argon-Isobutan (75:25 Vol%) führen zu dem Ergebnis, daß beide Ge-

mische zum Nachweis von Myonen sehr gut geeignet sind. Zwei der vier getesteten Myonkammern werden seit über einem Jahr ständig mit Argon-Methan betrieben und sind seither konstant hochspannungsfest. Diejenigen Kammern, welche schon über mehrere Jahre mit Argon-Isobutan betrieben werden, zeichnen sich ebenfalls durch dauerhafte Hochspannungsfestigkeit aus. Ein Langzeitvergleich steht jedoch noch aus, wobei aber bisher keinerlei Anzeichen eines Alterungseffektes mit beiden Gassorten zu erkennen sind. Die aus den Messungen bestimmten Nachweiseffizienzen liegen zwischen 97 und 99 %. Die optimalen Einsatzspannungen sind für Argon-Methan etwa 1640-1660 V und für Argon-Isobutan etwa 2040-2140 V. Argon-Methan erweist sich als eine hervorragende Alternative zum Argon-Isobutan, da die wesentlichen Vorteile des Argon-Methans (bei gleichhohen Nachweiseffizienzen) folgende sind:

- niedrige Betriebsspannungen
- ungefährliches Gasgemisch
- reduzierte Kosten, da ein aufwendiges Sicherheitssystem sowie eine Mischanlage entfällt und es entstehen niedrigere Gaskosten

Die vorher nicht erwarteten guten Ergebnisse mit Argon-Methan werden daraufhin auf das gesamte Detektorsystem ausgedehnt. Mit den vier übereinander angeordneten Detektoren lassen sich dann die Auflösung für Einzelspuren messen und daraus die Winkelauflösung angeben. Winkelabhängige Messungen zur Nachweiseffizienz mit Argon-Methan können dann mit den bereits durchgeführten Messungen mit Argon-Isobutan [Mat 93] verglichen werden. Die daraus gewonnenen zusätzlichen Erkenntnisse können dann zur Entscheidung beitragen, welches Gasgemisch im KASCADE-Experiment verwendet werden soll.

Literatur

- [Ale 81] R.Aleksan et al., Nucl. Instr. and Meth. **185**(1981)95
- [All 84] O.C.Allkofer, P.K.F.Grieder, Physics Data 25-1, Cosmic Rays on Earth (1984) - ISSN 0344-8401
- [Ans 92] P.Anselmann et al., Physics Letters **B285**(1992)377
- [Arm 88] J.C.Armitage, S.P.Beingessner, R.K.Carnegie, E.F.Ritchie, J.Waterhouse, Nucl. Instr. and Meth. **271**(1988)588
- [Beh 80] H.-J.Behrend et al., Physica Scripta **23**(1981)610
- [Bou 70] R.Bouclier et al., Nucl. Instr. and Meth. **88**(1970)149
- [Cha 68] G.Charpak, R.Bouclier, T.Bressani, J.Fravier, C.Zupancic, Nucl. Instr. and Meth. **62**(1968)262; **65**(1968)217
- [Dol 90] P.Doll et al., KfK-Report **4686**(1990) - ISSN 0303-4003
- [Fün 59] E.Fünfer und H.Neuert, "Zählrohre und Szintillationszähler", Verlag G.Braun (1959), Karlsruhe
- [Gab 92] P.Gabriel, Dissertation, Universität Karlsruhe, KfK-Report **5012**(1992) - ISSN 0303-4003
- [Gab 93] P.Gabriel, private Mitteilung
- [Gei 28] H.Geiger und W.Müller, Phys.Z. **29**(1928)839
- [Hor 90] J.Horzel, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, KfK-Report **4815**(1990) - ISSN 0303-4003
- [Kna 92A] E.Bollmann et al. in Annual report on Nuclear Pysics Activities 1991, KfK-Report **5027**(1992) p.17, eds. J.Knapp and H.Rebel - ISSN 0303-4003

- [Kna 92B] H.Koepernik, D.Pröhl, A.Wolf, S.Zagromski, H.Rebel in Annual report on Nuclear Physics Activities 1991, KfK-Report **5027**(1992) p.26, eds. J.Knapp and H.Rebel - ISSN 0303-4003
- [Koe 91A] H.Koepernik, S.Zagromski, Interner Bericht des KfK (1991), unveröffentlicht
- [Koe 91B] H.Koepernik, Interner Bericht des KfK (1991), unveröffentlicht
- [Kre 93] M.Kretschmer, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, in Vorbereitung
M.Kretschmer, H.J.Mathes, J.Wentz, Frühjahrstagung der DPG in Mainz (1993), Beitrag HKP H.11
- [Leo 85] W.R.Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer Verlag (1985), Berlin Heidelberg New York - ISBN 3-540-17386-2
- [Lin 83] J.Linsley, Proc. 18th ICRC, Bangalore (1983) **12**, 135
- [Mas 92] V.Masuch, M.Petcu, S.Zagromski, Interner Bericht des KfK (1992), unveröffentlicht
- [Mat 90] H.-J.Mathes, J.Horzel, S.Zagromski, H.Rebel, Interner Bericht des KfK (1990), unveröffentlicht
- [Mat 93] H.-J.Mathes, Dissertation, Universität Heidelberg, KfK-Report **5173** (1993) - ISSN 0303-4003
- [Rut 08] E.Rutherford and H.Geiger, Proc. Roy. Soc. A **81**(1908)141
- [Sau 77] F.Sauli, CERN-Report 77-09, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers (1977)
- [Sok 89] P.Sokolsky, "Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics", Frontiers in Physics 76, Addison-Wesley Publishing Comp., Inc (1989)
- [Völ 92] G.Völker, Dissertation, Universität Karlsruhe, KfK-Report **4983**(1992) - ISSN 0303-4003

- [Wen 91] J.Wentz und H.J.Mathes, Interner Bericht des KfK (1991), unver-
öffentlicht
- [Wen 93] J.Wentz, Dissertation, Universität Heidelberg, in Vorbereitung
- [Zag 92] S.Zagromski, private Mitteilung
- [Zag 93] S.Zagromski, private Mitteilung

A Kammergeometrie der bei KASCADE eingesetzten Vieldraht-Proportionalkammern

Die Größenangaben beziehen sich auf das Koordinatensystem, welches durch die Kammerschrauben gegeben ist. Die 'Sensitive Fläche' der Kammern gibt das Feld an, in dem sich die Kathodenstreifen und Anodendrähte befinden. Begrenzt wird das Feld in x-Richtung durch D_x und in y-Richtung durch D_y . Es gibt drei verschiedene Kammertypen, wobei folgende Größen allgemeingültig sind:

Typ I - Typ III

$D_x = 3,128 \text{ cm}$ $D_y = 4,0 \text{ cm}$ $\Delta AN = 1,27 \text{ cm}$ $\Delta CAT = 1,524 \text{ cm}$
 $B1 = 5,0 \text{ cm}$ $B2 = 8,5 \text{ cm}$ $\alpha = \pm 34,267^\circ$

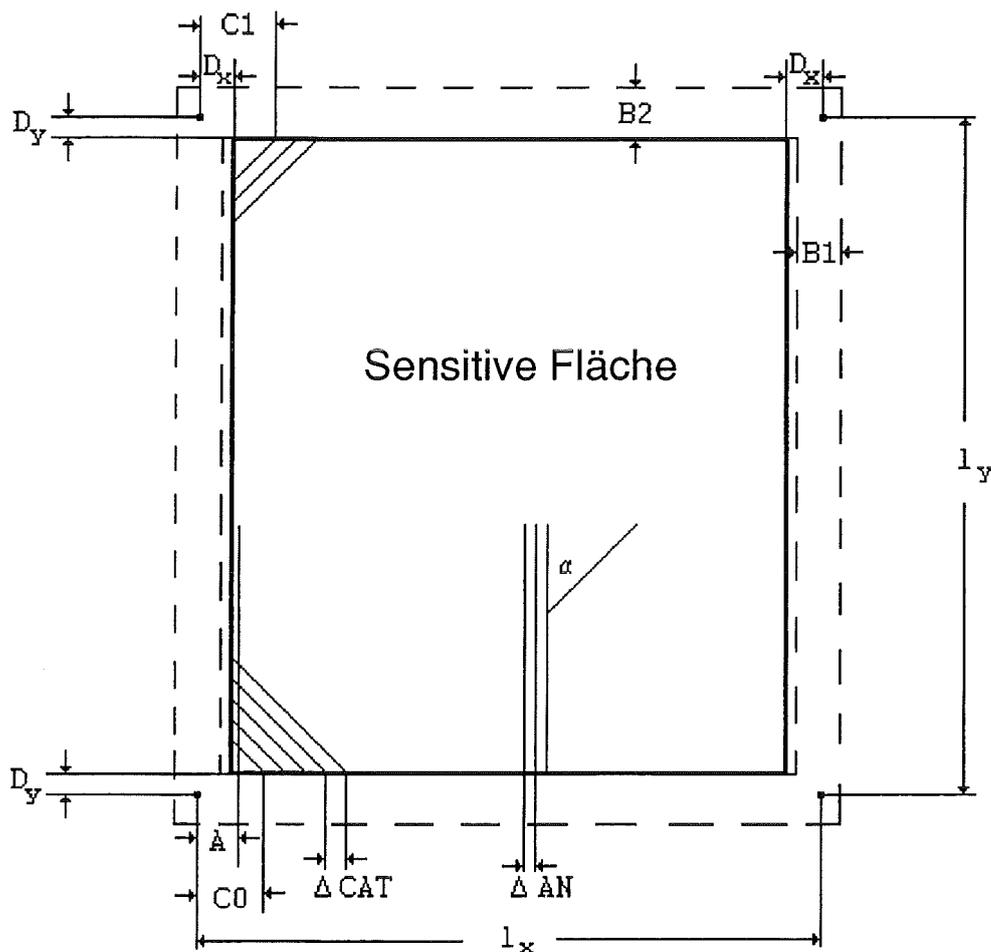


Abbildung A1: Schematische Darstellung einer Vieldraht-Proportionalkammer

Nachstehende Größen sind von dem jeweiligen Detektortyp abhängig:

Typ I				
A= 5,715 cm $n_{AN}= 208$	C0= 4,57 cm $n_{OK}= 336$	C1= 4,572 cm $n_{UK}= 336$	$l_y= 365,76$ cm	$l_x= 274,32$ cm
Typ II				
A= 4,445 cm $n_{AN}= 192$	C0= 4,57 cm $n_{OK}= 320$	C1= 4,572 cm $n_{UK}= 320$	$l_y= 365,76$ cm	$l_x= 251,46$ cm
Typ III				
A= 4,445 cm $n_{AN}= 192$	C0= 9,14 cm $n_{OK}= 256$	C1= 8,623 cm $n_{UK}= 256$	$l_y= 228,60$ cm	$l_x= 251,46$ cm

B1/B2: Dicke der Detektorwände

A: Abstand des ersten Anodendrahtes

C0/C1: Abstand des ersten oberen/unteren Kathodenstreifen

$\Delta AN/\Delta CAT$: Distanz zwischen den Anodendrähten/Kathodenstreifen

α : Winkel zwischen Kathodenstreifen und Anodendrähten

n_{AN} : Anzahl der Anodendrähte pro Kammer

n_{OK} : Anzahl der oberen Kathodenstreifen pro Kammer

n_{UK} : Anzahl der unteren Kathodenstreifen pro Kammer

Tabelle 3: Detektortyp abhängige Konstanten

B Integraler Myonfluß durch zwei quadratische Szintillatoren

Die Intensität des integralen Myonflusses $I(\Theta)$ ist im wesentlichen eine vom Zenitwinkel Θ abhängige Größe [All 84]:

$$I(\Theta) = I_0 \cdot \cos^{n(p)}\Theta$$

I_0 : vertikaler Myonfluß $I(\Theta=0^\circ)$

$n(p)$: ein vom Impuls abhängiger Parameter, dessen Mittelwert bei etwa 2 liegt

Für den integralen Myonfluß J_μ durch eine waagerechte Fläche gilt allgemein:

$$J_\mu = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta, \varphi) \cdot \cos\theta \, d\Omega$$

Θ : Zenitwinkel

φ : Azimutwinkel

Ω : Raumwinkel

Im folgenden wird für $n(p)$ der Wert 2 verwendet. Für J_μ gilt dann:

$$J_\mu = 2\pi \cdot I_0 \int_0^{\pi/2} \cos^3\theta \cdot \sin\theta \, d\theta$$

Um den Teilchenfluß, der unter einem Raumwinkel durch zwei quadratische Flächen mit den Durchmessern d und dem Abstand $2h$ hindurchgeht, zu bestimmen, ist es notwendig die Fläche eines Quadrates auf eine Kugeloberfläche zu projizieren (siehe Abbildung B1). Für die projizierte Fläche gilt:

$$A_{\text{Proj}} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{f(\varphi)} \sin \theta \, d\theta \, d\varphi = 8 \cdot \int_{\varphi=0}^{\pi/4} \int_{\theta=0}^{\arctan\left(\frac{d}{2h \cdot \cos \varphi}\right)} \sin \theta \, d\theta \, d\varphi$$

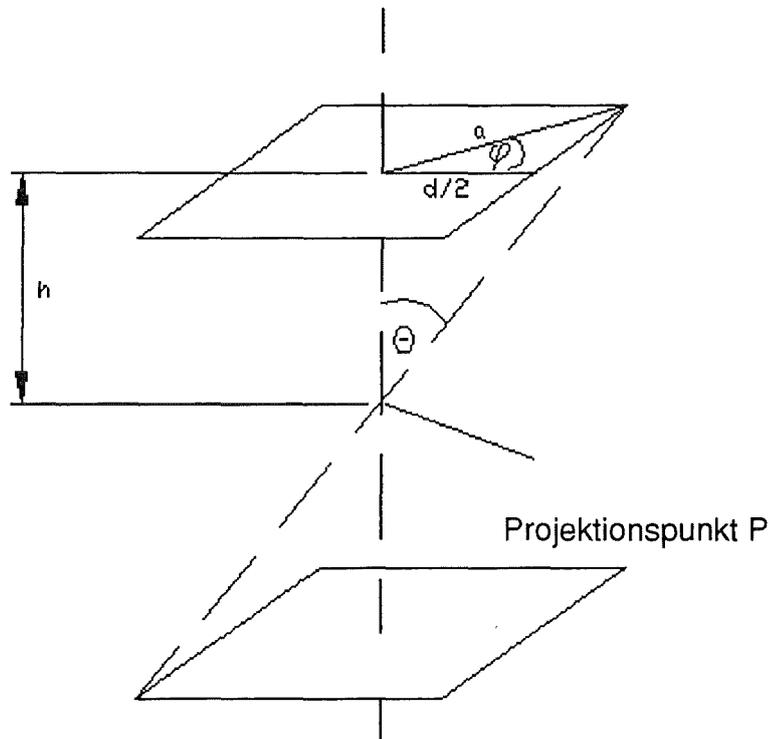


Abbildung B1: Triggerteleskop

Für den Teilchenfluß durch zwei quadratische Szintillatoren mit dem Abstand $2h$ und den Durchmessern d gilt dann:

$$J_{\text{Quad}} = 8 \cdot I_0 \int_{\varphi=0}^{\pi/4} \int_{\theta=0}^{\arctan\left(\frac{d}{2h \cdot \cos \varphi}\right)} \cos^3 \theta \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\varphi$$

Mit I_0 (0,2-1000 GeV/c) = $9,94 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$ [All 84], $d=30 \text{ cm}$ und $h=50 \text{ cm}$ ergibt sich für den Myonfluß:

$$J_\mu \approx 0,3 \cdot I_0 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$$

Dies entspricht einer Koinzidenztriggerfrequenz von 0,82 Hz für die beiden Szintillatoren (mit je 900 cm^2).

Danksagung

Diese Arbeit entstand am Institut für Kernphysik des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Herrn Prof. Dr. G. Schatz danke ich dafür, daß er mir die Durchführung dieser Arbeit an seinem Institut ermöglicht hat.

Herrn Prof. Dr. Rebel danke ich für die Anregung zu diesem Thema, seine Hilfsbereitschaft und Unterstützung sowie sein ständiges Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Herrn Dr. K. Bekk, Frau S. Burkhardt, Herrn cand. phys. E. Furler, Herrn Priv.-Doz. Dr. H.J. Gils, Herrn cand. phys. M. Kretschmer, Herrn Dipl.-Ing. D. Manger, Herrn V. Masuch, Herrn Dr. H.-J. Mathes, Herrn Dipl.-Math. J. Oehlschläger, Herrn Prof. Dr. H. Rebel, Herrn cand. phys. O. Schöps, Herrn Dr. T. Thouw, Herrn Dr. G. Völker, Herrn Dipl.-Phys. J. Wentz und Herrn Dipl.-Ing. S. Zagromski danke ich für die ständige Diskussions- und Hilfsbereitschaft sowie für das gute Arbeitsklima.

Für die zahlreichen Anregungen und die Unterstützung bei Erstellung dieser Arbeit gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. H.-J. Mathes und Herrn Dipl.-Phys. J. Wentz. Herrn Dr. T. Thouw sei an dieser Stelle besonders für seine Einführung in die physikalischen Zusammenhänge des KASCADE-Experimentes gedankt.

Stellvertretend für die Mitarbeiter in den Werkstätten des Instituts danke ich Herrn F. Deutsch und Herrn W. Hoffmann für die Unterstützung bei der Durchführung des Experimentes. Frau S. Burkhardt danke ich insbesondere für die technische Unterstützung bei Erstellung dieser Arbeit.

Bei den Mitgliedern der KASCADE-Kollaboration möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bedanken.