

KfK 4815
Dezember 1990

**Aufbau eines Teststandes
— einschließlich Trigger-
system, Gasversorgung-
system und Elektronik —
zur Untersuchung von
Vieldraht-Proportional-
kammern mit kosmischen
Myonen**

J. Horzel
Institut für Kernphysik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Kernphysik

KfK 4815

**Aufbau eines Teststandes - einschließlich Triggersystem,
Gasversorgungssystem und Elektronik - zur Untersuchung von
Viendraht-Proportionalkammern mit kosmischen Myonen**

J. Horzel

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Vieldraht-Proportionalkammern auf ihre Einsatzmöglichkeit im KASCADE-Projekt untersucht. Die zum Betrieb der Kammer notwendige Gasversorgung, Versorgungs-, Frontend- und Auslese-Elektronik wurde detailliert untersucht und verbessert. Für alle Detektorteile wurden weitere Verbesserungsvorschläge gemacht. Die Entwicklung eines Triggersystems ermöglichte die Auswahl kosmischer Myonen als Teststrahlung. Zur Analyse der Meßdaten wurde Auslese-, Rekonstruktions- und Auswerte-Software geschrieben. Die Funktionstüchtigkeit der Kammern wurde durch Messung der Myon-Winkelverteilung demonstriert. Die Ansprechwahrscheinlichkeit der Kammern liegt deutlich über 90%. Die Halbwertsbreite (FWHM) der Ortsauflösung beträgt bei günstiger Einstellung weniger als ± 3 mm.

Abstract

Development of a Test Set Up - Including Trigger System, HV- and Power Supplies, Frontend and Readout Electronics - for the Investigation of Multiwire Proportional Chambers with Cosmic Muons.

All components of the complex detector system were studied in detail and improved. Further improvements concerning the operation of the chambers in the KASCADE-project were proposed. Software for the readout, reconstruction and analysis of the data were developed. The angular distribution of cosmic muons was measured to demonstrate the operation of the chambers. The detection efficiency of the chambers is more than 90%. The precision in reconstructing events is better than ± 3 mm (FWHM) if the chamber electronics are well adjusted.

Inhalt	Seite
1. Einleitung	1
2. Physikalische Motivation für den Einsatz von Vieldraht-Proportionalkammern im KASCADE-Projekt	2
2.1 Primäre kosmische Strahlung	2
2.2 Hochenergetische Luftschauer	4
2.3 Das KASCADE-Experiment	8
2.4 Physikalische Eigenschaften von Myonen	14
3. Funktionsweise der Myonkammern	17
3.1 Prinzipielle Funktionsweise von Vieldraht-Proportionalkammern	17
3.2 Aufbau der Saclay-Kammern	25
4. Beschreibung der verwendeten Elektronik	29
4.1 Einsatz im Testaufbau	30
4.1.1 Versorgungselektronik	30
4.1.2 Frontend- und Auslese- Elektronik	32
4.2 Test und Abgleich	39
4.3 Modifikationen für den Einsatz bei KASCADE	44
5. Beschreibung des aufgebauten Gasversorgungssystems	47
5.1 Gasversorgung	47
5.2 Sicherheitssystem zur Gasversorgung	51
6. Beschreibung des Testaufbaus und Perspektiven für den KASCADE-Einsatz	53
7. Rekonstruktion von Ereignissen im Versuchsaufbau	62

8.	Meßergebnisse und Interpretation	67
8.1	Einstellung der Koinzidenzbedingung der Triggerzähler	67
8.2	Messung der Feuchtigkeit innerhalb der Kammer	74
8.3	Überwachung weiterer Betriebsparameter der Kammer	75
8.4	Messungen mit den Kammern	77
9.	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Referenzen	104
	Danksagung	107
	Anhang	108

1. Einleitung

Die Element-Zusammensetzung der kosmischen Primärstrahlung ist ein wichtiger Hinweis auf ihren Ursprung und die Beschleunigungsmechanismen, die zu Teilchenenergien oberhalb 10^{15} eV führen. Da der Energiebereich oberhalb 10^{14} eV direkten Messungen in Ballon- und Satelliten-Experimenten nicht mehr zugänglich ist, gibt es bis jetzt nur wenig und nur kontrovers diskutierte Informationen zu dieser Frage im Energiebereich oberhalb 10^{15} eV.

Im KASCADE-Projekt (KARlsruhe Shower Core and Array DETektor [Dol90]) wird deshalb sowohl das Energie-Spektrum, als auch die chemische Zusammensetzung der kosmischen Primärstrahlung im Energie-Intervall von $3 \cdot 10^{14}$ eV bis 10^{18} eV untersucht. Hierzu wird ein großflächiges Detektorsystem zum Nachweis der von hochenergetischen Primärteilchen in der Atmosphäre ausgelösten Luftschauer errichtet. Es wird die elektromagnetische, die hadronische und die myonische Komponente der im Schauer entstandenen Sekundärstrahlung gemessen werden. In der Mitte des großflächigen Detektorfeldes wird ein Hadronkalorimeter errichtet werden, unter dessen Abschirmung 32 von C.E.N./Saclay übernommene Vieldraht-Proportionalkammern dem Nachweis und der Ortsbestimmung von Myonen dienen sollen.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Testaufbau zu errichten, mit dessen Hilfe die Funktionsfähigkeit und Funktionsweise der in Saclay gebauten Vieldraht-Proportionalkammern untersucht werden kann. Solche Untersuchungen erwiesen sich als notwendig, da die Saclay-Kammern nach ihrem Einsatz im CELLO-Experiment [Ale81] nicht mehr betrieben und gewartet, sondern lediglich weiterhin mit Argon durchspült wurden. Da außerdem nur spärliche Dokumentationen über das komplexe Detektorsystem (Gasversorgungssystem, Triggersystem, Versorgungs-, Frontend- und Auslese-Elektronik) vorlagen und in den Gruppen des KASCADE-Projekts wenig Erfahrung im Umgang mit Kammern dieses Typs vorhanden war, galt es die Funktionstüchtigkeit von vier Testkammern wiederherzustellen, sämtliche Detektorteile detailliert zu untersuchen und möglichst viel Erfahrung im Umgang mit den Kammern im Hinblick auf ihre Einsatzmöglichkeiten im KASCADE-Projekt zu sammeln.

Nach Aufbau und Untersuchung des Detektorsystems wurden Testmessungen mit kosmischen Myonen durchgeführt. Durch Erstellung von Auswerte-Software konnten Myonspuren durch den Versuchsaufbau rekonstruiert werden.

2. Physikalische Motivation für den Einsatz von Vieldraht-Proportionalkammern im KASCADE-Projekt

2.1. Primäre kosmische Strahlung

Es ist bekannt [Hes12], daß ständig Strahlung aus dem Weltall auf die Erde bzw. deren Atmosphäre auftrifft. Man spricht von kosmischer Strahlung oder Höhenstrahlung. Es handelt sich dabei sowohl um geladene Teilchen (p, He, ..., C, N, O, ... , Fe, ...), als auch um ungeladene Strahlung (elektromagnetische Strahlung über sehr großen Energiebereich, Neutrinos, ...). Während man bei ungeladener Strahlung aus der Einfallrichtung auf den Entstehungsort und aus dem Intensitäts - bzw. Energiespektrum auf die Intensität der Quelle schließen kann, ist dies bei geladenen Teilchen nicht möglich. Die geladenen Teilchen werden durch elektromagnetische Felder im Weltraum so stark beeinflusst, daß mit Ausnahme von Beeinflussungen durch das Erdmagnetfeld (bei kleinen Teilchenenergien) aus allen Richtungen das gleiche Strahlungsspektrum auf die Erde auftrifft. Die chemische Zusammensetzung der Höhenstrahlung entspricht, wenn man auf Spallationseffekte im interstellaren Medium korrigiert, im wesentlichen der Elementzusammensetzung des Sonnensystems [Dol90]. Die am häufigsten auftretenden Elemente werden üblicherweise in drei Gruppen unterteilt (p, α , ... , CNO-Gruppe, ... , Fe). Das Verhältnis dieser Elemente zueinander scheint sich mit wachsender Energie dieser Primärteilchen zu verändern [Gru88]. Die Energie der Primärteilchen reicht bis zu sehr hohen Energien (10^{20} eV), wobei bis heute noch keine Gewißheit über die Entstehungsmechanismen dieser Strahlung besteht. Die Änderung der Elementzusammensetzung könnte Ursache für den in bisherigen Messungen der Primärstrahlung beobachteten Knick in der Energie-Intensitätskurve (siehe Abb. 2.1) bei ca. $5 \cdot 10^{15}$ eV sein.

Zunächst wurde die kosmische Sekundärstrahlung in Experimenten auf der Erde und bei Freiballon-Fahrten [Hes12] untersucht. In Experimenten auf hohen Bergen wurden zahlreiche neue Elementarteilchen entdeckt. In der Folgezeit wurde versucht die primäre kosmische Strahlung möglichst direkt zu messen. Mit

Satelliten- und Ballon-Experimenten wurde das Energie-Intensitätsspektrum bis zu Primärteilchenenergien von einigen 10^{12} eV untersucht.

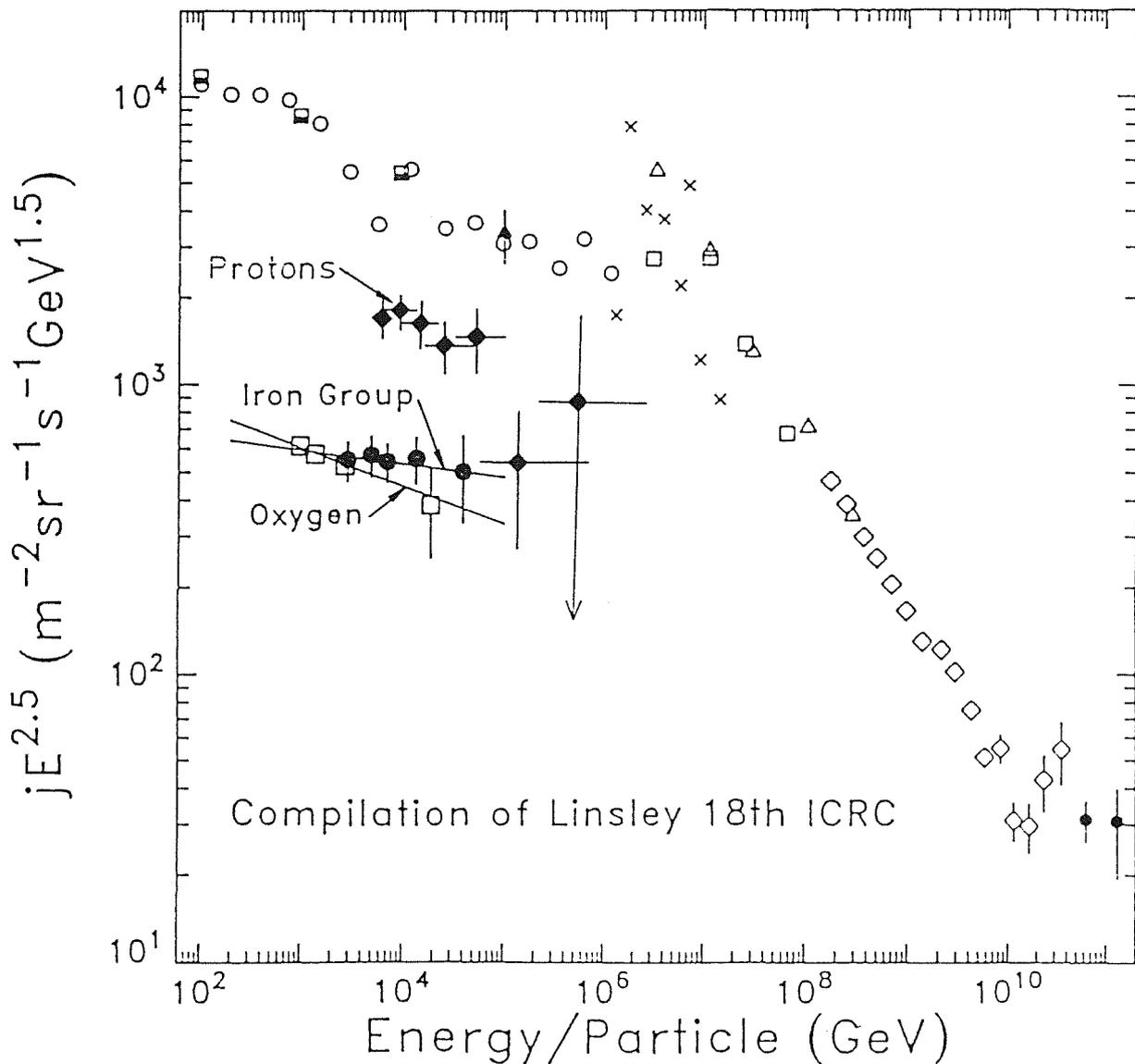


Abb. 2.1: Energiespektrum hochenergetischer Primärteilchen.

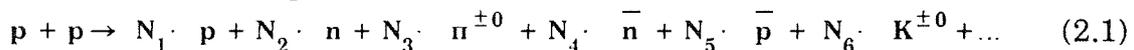
Primärteilchen höherer Energie sind direkten Messungen nicht mehr zugänglich, da nur ein sehr geringer Fluß (Teilchenzahl pro Zeit- und Flächeneinheit) vorhanden ist, und somit die benötigte Meßzeit bzw. Detektorfläche zu kostspielig wären. Zur Erforschung der kosmischen Strahlung im Energiebereich oberhalb von 10^{13} eV ist man deshalb wieder auf Messungen auf dem Erdboden angewiesen. In großflächigen Detektoranordnungen werden die von Primärteilchen in der Atmosphäre ausgelösten Luftschauer gemessen und daraus Rückschlüsse auf die Primärteilchen gewonnen.

2.2. Hochenergetische Luftschauer

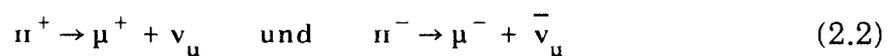
Sowohl geladene Teilchen, als auch γ -Teilchen der primären kosmischen Strahlung wechselwirken beim Auftreffen auf die Atmosphäre mit deren Atomen und erzeugen dabei weitere Teilchen, die wiederum wechselwirken und weitere Teilchen erzeugen, so daß eine kaskadenartige Schauerentwicklung (Sekundärstrahlung) einsetzt. Während der Schauer zu Beginn seiner Entwicklung ein exponentielles Ansteigen der Anzahl der Sekundärteilchen aufweist, nimmt die Anzahl der Sekundärteilchen im unteren Teil der Atmosphäre wieder exponentiell ab, da hier die Energie des Primärteilchens auf sehr viele Sekundärteilchen verteilt ist, und deren Einzelenergien oft nicht mehr ausreichen, weitere Teilchen zu erzeugen.

Zur Charakterisierung der Schauerentwicklung eignet sich die Größe S - das Schaueralter. Dieser formale Parameter beschreibt die Entwicklung der elektromagnetischen Komponente. Diese dominiert den Schauer bereits nach wenigen Wechselwirkungen, da der Wirkungsquerschnitt größer ist, als für hadronische Wechselwirkungen. Zu Beginn dieser Schauerentwicklung ist $S=0$. Im Maximum der Schauerentwicklung ist das Schaueralter $S=1$ und nimmt dann weiter zu.

Dringt ein hochenergetisches Proton ($E_0 = 10^{15}$ eV) in die Atmosphäre ein, so trifft es mit großer Wahrscheinlichkeit in einer Höhe von 20-50 km zum ersten Mal auf den Kern eines Sauerstoff- oder Stickstoffatoms und macht eine hadronische Wechselwirkung. Bei dieser und den darauf folgenden Wechselwirkungen entstehen Mesonen, hauptsächlich Pionen. Trifft beispielsweise das primäre Proton auf ein Nukleon des Targetatoms, so kommt es zu den Wechselwirkungen :



Die Faktoren N_i sind die Multiplizitäten, mit denen die Sekundärteilchen entstehen. Sie sind von der Energie des Projektils abhängig und unterliegen bei hohen Energien großen Fluktuationen. Die geladenen Pionen, Kaonen und "charm"-Mesonen können, sofern sie nicht während ihrer kurzen Lebensdauer ($\tau_{(\pi^\pm)} : 2,6 \cdot 10^{-8}$ s) weiter wechselwirken (z. B. $\pi^+ + n \rightarrow K^+ + \Sigma^0$ oder $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$), bei ihrem Zerfall Myonen erzeugen :



Eine schematische Darstellung der Schauerentwicklung zeigt Abb. 2.2. Die drei Komponenten der Sekundärstrahlung besitzen sehr unterschiedliche Lateralverteilungen, Energiespektren und Teilchenanzahlen.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung des Schauers in der Atmosphäre, so bewegt sich eine pfannkuchenförmige Teilchenfront entlang einer zur ursprünglichen Einfallsrichtung des Primärteilchens gedachten Geraden - der Schauerachse - durch die Atmosphäre (siehe Abb. 2.3). Die Dicke und der Radius

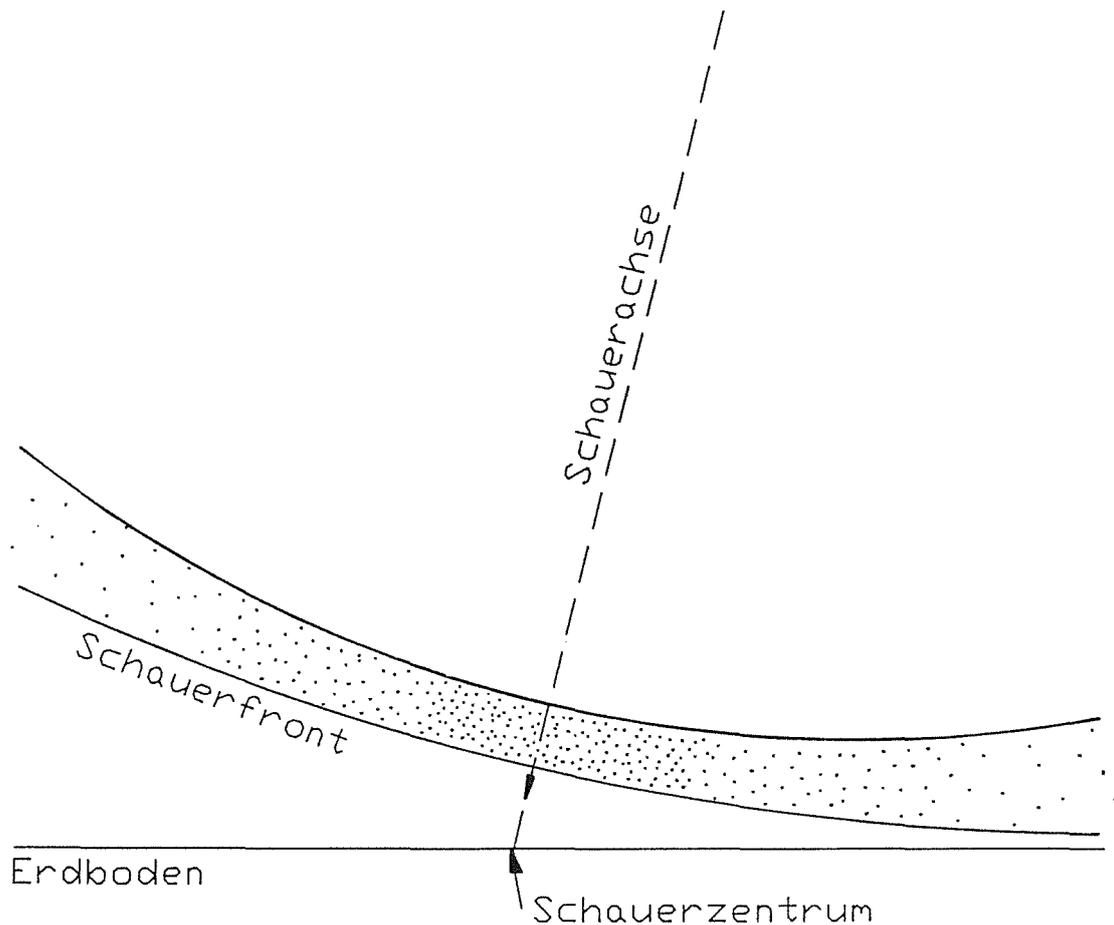


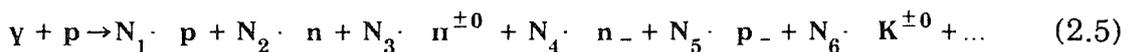
Abb. 2.3: Ausbreitung des Schauers in der Atmosphäre - schematische Darstellung der Schauerfront.

des "Pfannkuchens" nehmen mit zunehmender Eindringtiefe in die Atmosphäre zu. Außerdem ist die Dicke im äußeren Bereich (großer Abstand zur Schauerachse) größer als im Zentrum des Schauers. Möchte man durch Messung von Luftschauern Auskunft über die primäre kosmische Strahlung gewinnen, so gilt es ein geeignetes Detektorsystem zu entwickeln, das möglichst einen signifikanten Teil der Sekundärstrahlung messen kann. Dies wurde bisher mit

großen Detektorfeldern aus e/γ- und μ-Detektoren bzw. mit kalorimeterartigen Anordnungen versucht.

Trifft ein Sauerstoff- oder Eisenkern hoher Energie ($E_0 \approx 10^{15}$ eV) anstatt eines Protons auf die Atmosphäre, so können die Kernbindungskräfte der Primärteilchen wegen der sehr hohen Energie des Primärteilchens vernachlässigt werden, so daß ein Primärteilchen mit A Nukleonen als "Gebilde" aus A "quasifreien Primärnukleonen" der Energie E_0/A angesehen werden kann [Dol90]. Beim Auftreffen dieses Gebildes auf einen Sauerstoff- oder Stickstoffkern der Atmosphäre wird es zertrümmert und man kann für jedes Primärnukleon - wie bereits für das Primärproton beschrieben - die weiteren Wechselwirkungen unabhängig von den anderen Primärnukleonen weiterverfolgen. Eine Überlagerung von A Schauern der Energie E_0/A bewirkt gegenüber einem Schauer der Energie E_0 ein schnelleres Altern des Schauers, so daß breitere Lateralverteilungen und zu kleinen Energien hin verschobene Energiespektren gegenüber Protonschauern die Folge sind. Mißt man Schauer verschiedener Primärteilchen der gleichen Energie E_0 ($\approx 10^{15}$ eV) auf Seehöhe (oder etwas darüber), so ist das Schaueralter S bereits größer als eins, so daß für die Schauer von Primärteilchen mit mehr Nukleonen aufgrund ihres vergleichsweise höheren Alters eine kleinere Teilchenzahl in der elektromagnetischen Komponente des Schauers aufweisen.

In γ-induzierten Schauern ist das Verhältnis der drei Schauerkomponenten von Beginn an anders als in den hadroninduzierten Schauern. Diese Schauer werden bereits im oberen Teil von der elektromagnetischen Komponente bestimmt. Die hadronische und damit auch die myonische Komponente beginnen erst vergleichsweise (zu hadronischen Schauern) spät zu wachsen und sollten auf Meeresebene wesentlich geringer als bei hadroninduzierten Schauern ausgeprägt sein. Für das Entstehen von hadronischer und myonischer Kaskade in γ-induzierten Schauern sind Prozesse der Form



verantwortlich (jedoch andere Wechselwirkungs-Wahrscheinlichkeiten als in (2.1)).

Bisherige Messungen ([Kif86], [Mor87], [Wee88]) lieferten kontroverse Ergebnisse bei der Bestimmung des Myongehalts in γ-induzierten Schauern. Nach Simulationen sollten sich diese Schauer durch Myonarmut (etwa eine Größenordnung weniger Myonen als bei Protonschauern gleicher Energie) auszeichnen. Im KASCADE-Projekt werden hierzu Messungen mit guter Statistik (Myonzahl) erfolgen. Plausibel ist, daß die in den Beziehungen 2.1 bis

2.5 zum Ausdruck kommende enge Verknüpfung der einzelnen Komponenten der Sekundärstrahlung mehr oder weniger starke Änderungen in allen meßbaren Parametern der Schauer bei Änderung der Energie und der Art des Primärteilchens bewirkt. Hat man die Möglichkeit viele Schauer-Parameter gleichzeitig zu messen, sollte dadurch die Rekonstruktion des Primärteilchens möglich sein. Im KASCADE-Projekt werden deshalb mehr Parameter gemessen werden, als das in bisherigen Messungen der Fall war.

2.3 Das KASCADE-Experiment

Primäres Ziel des KASCADE-Experiments ist es, sowohl über das Energie-Intensitäts-Spektrum, als auch über die chemische Zusammensetzung der Primärteilchen im Energiebereich von $3 \cdot 10^{14}$ eV bis 10^{18} eV Auskunft zu geben. Hierzu wird in Karlsruhe (110 m ü. N.N.) ein großflächiges Detektorfeld (Array) mit 316 Detektorhütten (siehe Abb. 2.4) aufgebaut werden. Jede dieser

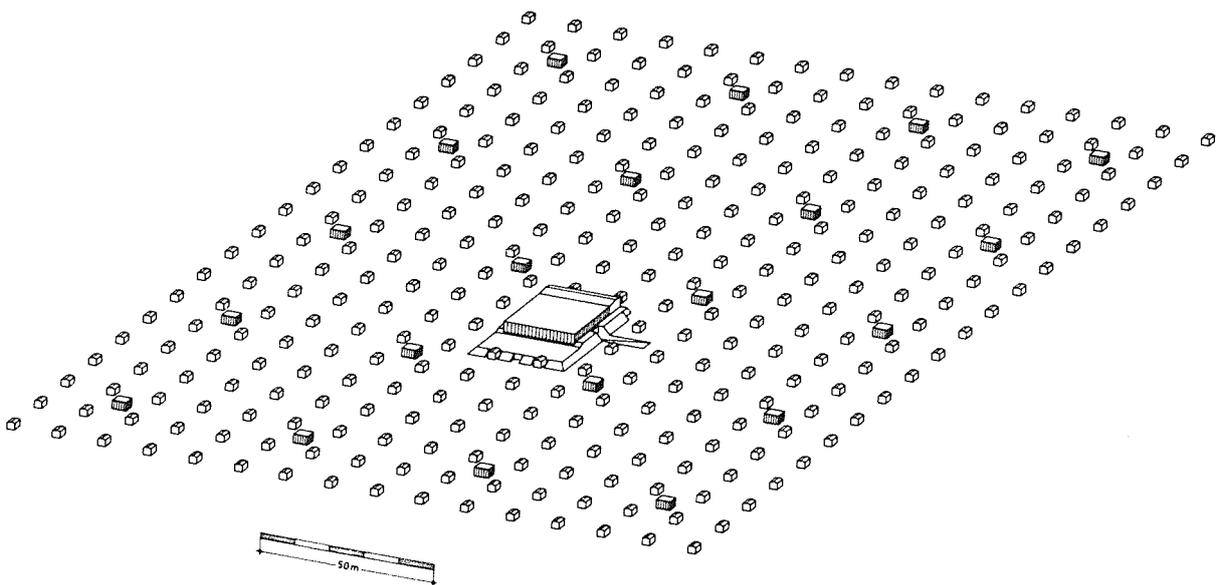


Abb. 2.4 : Schematische Darstellung des KASCADE-Detektorfeldes.

Detektorhütten (siehe Abb. 2.5) enthält vier kegelförmige Detektoren mit einer 4 cm dicken Flüssigszintillator-Schicht zum Nachweis der elektromagnetischen

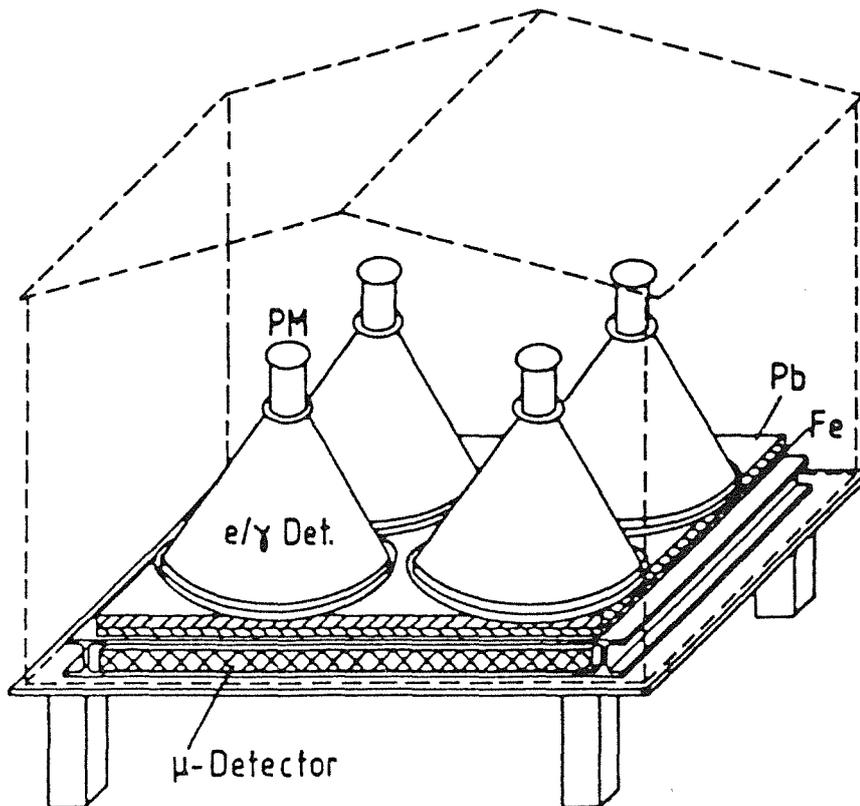


Abb. 2.5 : Aufbau einer Detektorhütte des KASCADE-Arrays.

Komponente, sowie unter einer etwa 20 Strahlungslängen dicken Absorberschicht vier 2 cm dicke Szintillatoren, die über Wellenlängenschieber ausgelesen werden. Diese Detektoren dienen dem Nachweis der Myonkomponente. Insgesamt stehen somit im Array fast 1000 m² aktive Detektorfläche zum Nachweis der elektromagnetischen und myonischen Komponente zur Verfügung. Die gleichmäßige Rasterung des Detektorfeldes dient dazu, unabhängig davon wo der Schauerkern das Array trifft, einen repräsentativen Teil der Sekundärstrahlung zu messen. Die Größe des Arrays genügt, um sowohl für Elektronen als auch für Myonen die Lateralverteilungen messen zu können. Da weiterhin ein exakter, relativer Zeitvergleich (im ns-Bereich) zwischen den einzelnen Stationen möglich sein wird, kann das Array durch Messung der Ankunftszeiten der Schauerfront in den einzelnen Stationen die Richtung und den Ort der Schauerachse messen (siehe Abb. 2.6). Dies ist sehr wichtig um Lateralverteilungen richtig interpretieren zu können.

Die meßbaren Parameter eines Luftschauers unterliegen zum Teil recht großen Fluktuationen. Dies ist von großer Bedeutung für die Rekonstruktion der Schauer. Will man sowohl über die Energie, als auch über die Art des Primärteilchens Auskunft erhalten, so müssen die gemessenen Daten mit

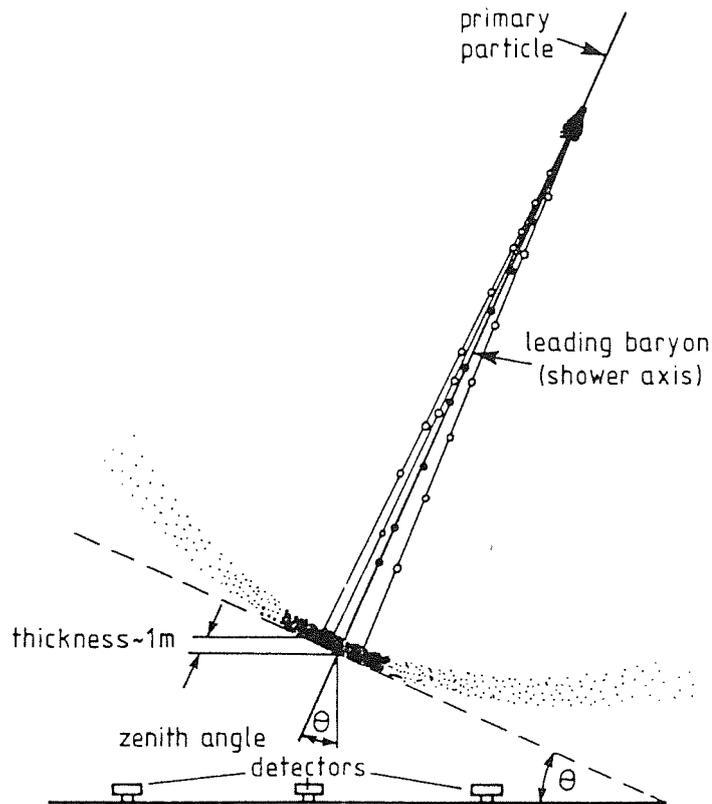


Abb. 2.6 : Möglichkeit der Schauerachsenbestimmung durch Messung der Ankunftszeiten der Schauerfront und der Teilchendichten.

simulierten Schauerdaten verglichen werden. Für das Cascade-Projekt werden Monte-Carlo-Simulationen mit dem für das KASCADE-Projekt entwickelten Programm-Code CORSIKA (siehe [Dol90]) durchgeführt.

Die Simulationen beruhen zum überwiegenden Teil auf bekannten Prozessen, für die Meßdaten aus Beschleuniger-Experimenten vorhanden sind. Die Prozesse bei den ersten Wechselwirkungen sind allerdings in einem so hochenergetischen Bereich, daß Meßdaten extrapoliert bzw. theoretische Modelle in die Simulation eingebaut werden müssen. Es ist daher von größter Bedeutung, möglichst viele Parameter der Luftschauer zu messen, um die Simulationen (unter extremen Schauerbedingungen) zumindest grob prüfen zu können. Fehler in den Simulationen würden selbst bei größter Meßgenauigkeit im Array - bei KASCADE werden die Fluktuationen in den Array-Meßwerten von den schauereigenen Fluktuationen dominiert werden - zur Fehlinterpretation der Daten führen. Mißt man jedoch alle zugänglichen Parameter, so sollte durch die Korrelation der einzelnen Komponenten (siehe Gleichungen 2.1 - 2.5) möglich sein, aus den Schauerdaten die Art und Energie des Primärteilchens bestimmen zu können.

Aus diesem Grund besitzt das KASCADE-Experiment im Innern des Arrays zusätzlich einen Zentraldetektor (siehe Abb. 2.7). Es handelt sich dabei um ein

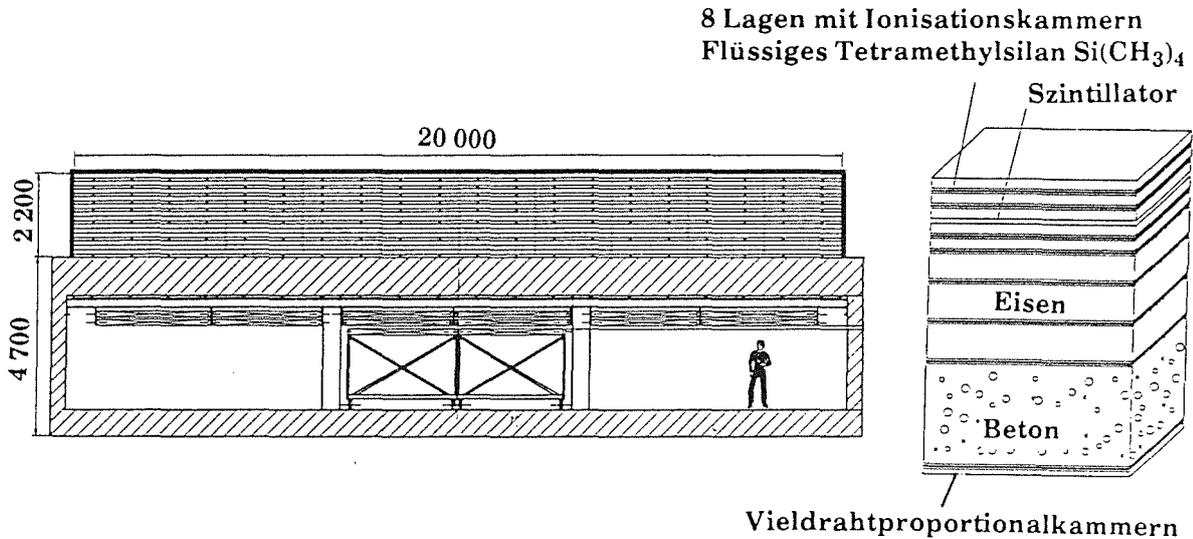


Abb. 2.7: Zentraldetektor: Unter einem Hadron-Kalorimeter aus Eisenplatten und Flüssig-Ionisationskammern befinden sich Violdraht-Proportionalkammern zum Myon-Nachweis.

Kalorimeter aus sich abwechselnden Schichten aus Eisenplatten und Flüssig-Ionisationskammern (zur Energiemessung), zur Messung des Hadronenspektrums im Schauerkerne. Zusätzlich soll unterhalb der des Hadronkalorimeters eine Ebene aus den Violdraht-Proportionalkammern, die Gegenstand dieser Arbeit sind, installiert werden. Durch die Abschirmwirkung des Hadronkalorimeters ergibt sich ein Energieschwelle von 2 GeV für Myonen.

Die Identifizierung von Myonen unterhalb des Kalorimeters ist möglich, da die elektromagnetische Komponente des Schauers die über 95 Strahlungslängen dicke Absorberschicht des Kalorimeters nicht durchdringen kann. Für die hadronische Schauerkomponente besteht bei höchsten Schauerenergien im Falle, daß der Schauerkerne direkt den Zentraldetektor trifft, eine geringe Wahrscheinlichkeit, daß einige Teilchen das Kalorimeter durchdringen. Dies sollte jedoch dadurch erkannt werden, daß in der direkt oberhalb der Myonkammern installierten Detektorschicht (Flüssig-Ionisationskammern) des Kalorimeter die Energie dieser Teilchen gemessen wird. Wie Abbildungen 2.8 bis 2.10 und Tabelle 2.1 zeigen, sollte im KASCADE-Experiment die Unterscheidung von Schauern verschiedener Energien und Primärteilchen anhand der vielen gemessenen Parameter möglich sein.

E_0 [eV]	Prim.	$\log_{10} N_e$	$\log_{10} N_\mu^a$	$\log_{10} \Sigma E_h^{5m}$
$2.5 \cdot 10^{14}$	p	4.47 ± 0.25	2.87 ± 0.15	3.56 ± 0.69
	^{16}O	4.07 ± 0.15	2.85 ± 0.08	2.88 ± 0.54
	^{56}Fe	3.73 ± 0.14	2.75 ± 0.06	2.18 ± 0.62
$5 \cdot 10^{14}$	p	4.82 ± 0.21	3.15 ± 0.17	4.04 ± 0.49
	^{16}O	4.49 ± 0.13	3.16 ± 0.06	3.50 ± 0.33
	^{56}Fe	4.24 ± 0.10	3.12 ± 0.04	2.93 ± 0.44
10^{15}	p	5.21 ± 0.22	3.45 ± 0.15	4.49 ± 0.45
	^{16}O	4.92 ± 0.11	3.48 ± 0.06	4.07 ± 0.28
	^{56}Fe	4.70 ± 0.07	3.45 ± 0.04	3.66 ± 0.27
$2 \cdot 10^{15}$	p	5.59 ± 0.19	3.75 ± 0.12	4.87 ± 0.34
	^{16}O	5.29 ± 0.11	3.78 ± 0.05	4.51 ± 0.20
	^{56}Fe	5.12 ± 0.07	3.76 ± 0.04	4.24 ± 0.15

Tab. 2.1 : Abhängigkeit verschiedener Observablen von Art und Energie des Primärteilchens.

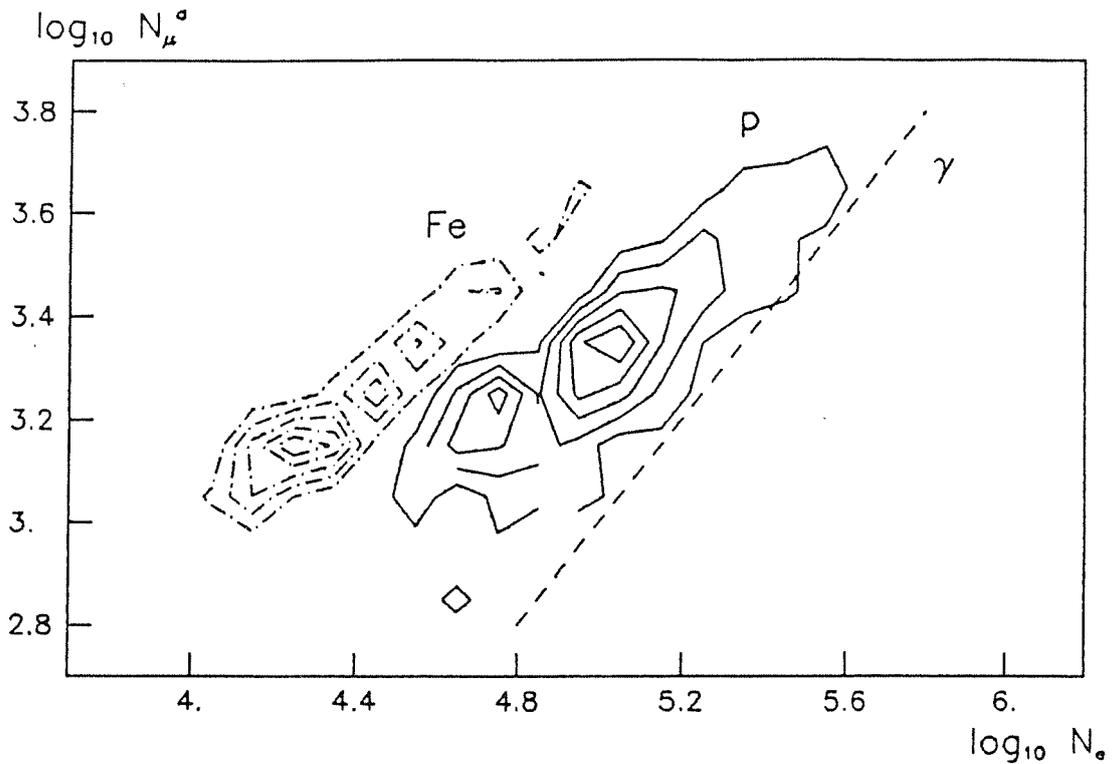


Abb. 2.8 : N_μ - N_e -Korrelation für p- und Fe-Schauer der Primärenergien $2.5 \cdot 10^{14}$ - $2.8 \cdot 10^{15}$ eV.

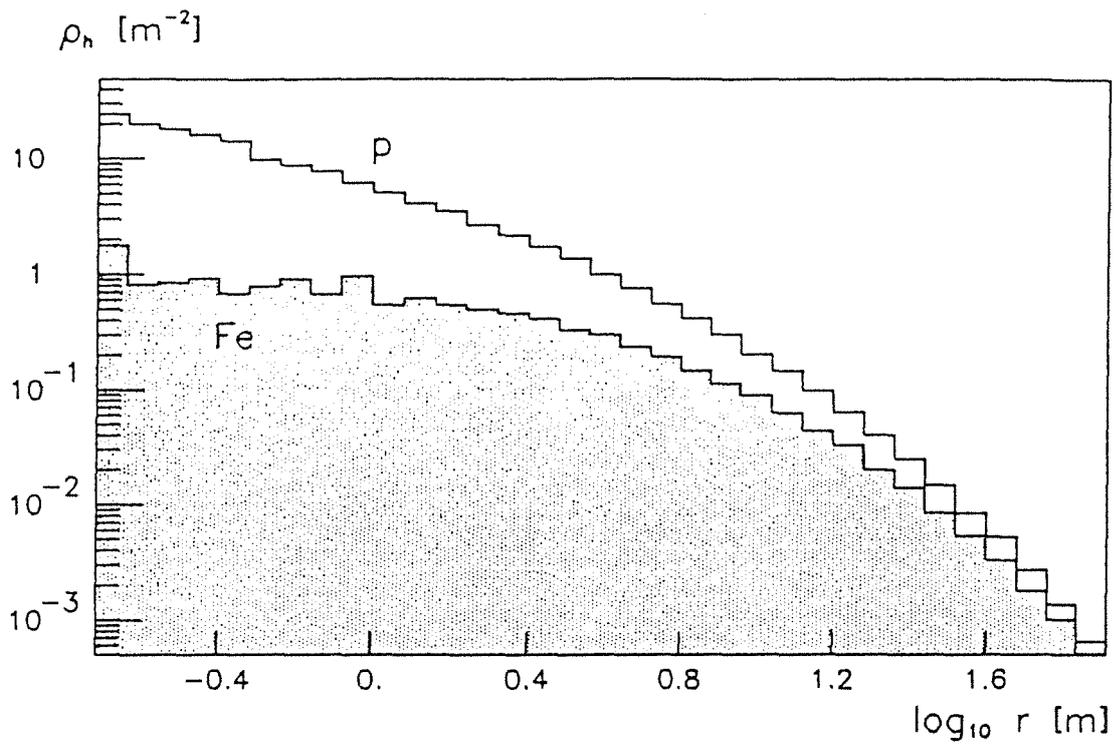


Abb. 2.9: Mittlere Hadronendichte ($E_h \geq 10$ GeV) für 10^{15} eV - Schauer.

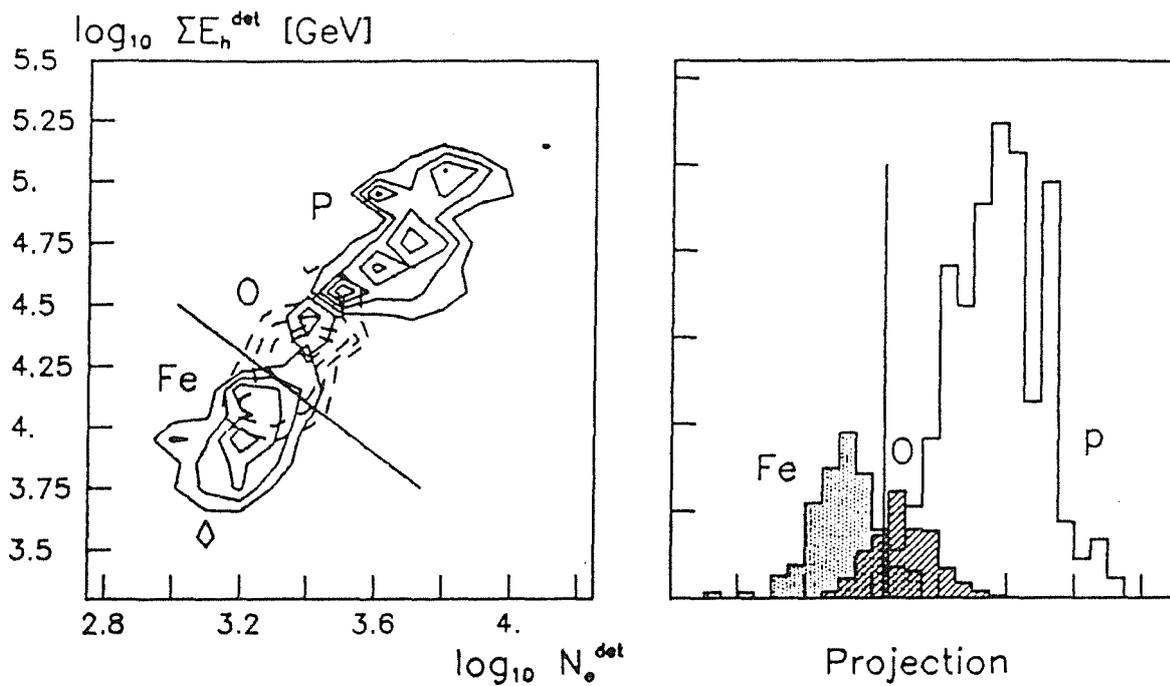


Abb. 2.10: Separationsmöglichkeit verschiedener Primärteilchen durch N_e^{det} (ausgewähltes N_μ -Band) und Hadron-Energiesumme.

2.4 Wesentliche Eigenschaften von Myonen für ihren Nachweis im KASCADE-Projekt

Die auf der Erde nachzuweisenden Myonen der kosmischen Sekundärstrahlung stammen hauptsächlich aus dem Zerfall geladener Pionen (vgl. Gleichung 3.2) und entstehen zumeist in großer Höhe. Das Energiespektrum der Myonen in einem ausgedehnten hochenergetischen Luftschauer ($E_0 \geq 10^{15}$ eV) reicht bis weit in den TeV-Bereich (siehe Abb. 7.5) hinein. Besitzt man nicht die Möglichkeit auf Schauer zu triggern, so mißt man Myonen, deren Energiespektrum dem in Abb. 2.11 dargestellten integralen Energiespektrum entspricht.

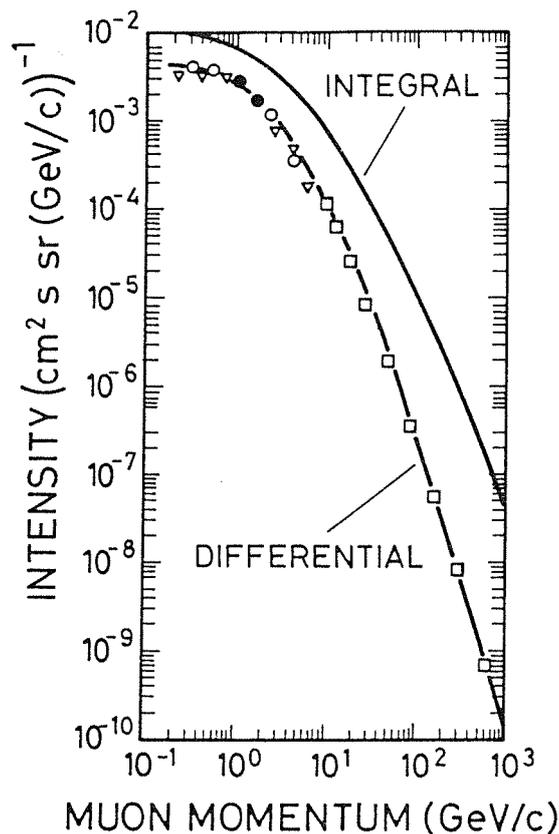


Abb. 2.11 : Energiespektrum vertikaler kosmischer Myonen [All84].

Der Energieverlust der Myonen in Materie wird über einen sehr großen Energiebereich durch Ionisationsverluste dominiert (siehe Abb. 2.12). Dies bedeutet, daß Myonen entlang ihres Weges durch Materie kontinuierlich (makroskopische betrachtet) geringe Mengen an Energie durch elastische "Stöße" mit Elektronen der Materieatome verlieren. Durch die etwa 207 mal größere Masse der Myonen gegenüber Elektronen, verändern die Myonen ihre geradlinige Flugbahn jedoch kaum (geringes Winkel-Straggling). Der entstehende integrale

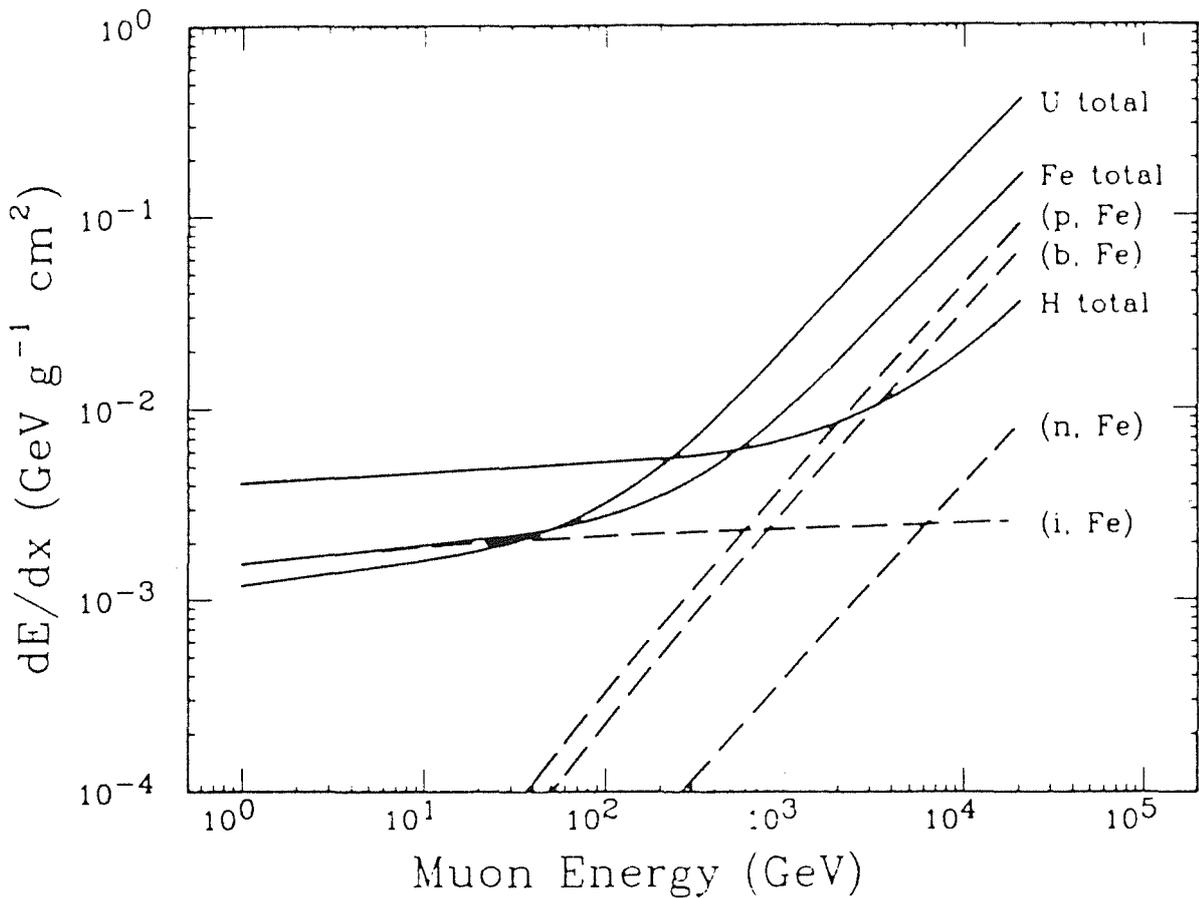
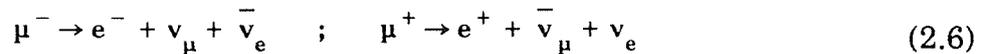


Abb. 2.12: Integraler Energieverlust von Myonen in Materie in Abhängigkeit ihrer Energie. (i)=Ionisation,(p)=Paarbildung, (b)=Bremsstrahlung (n)=Photonukleare Wechselwirkung.

Energieverlust in Materie steigt für Energien zwischen etwa 300 MeV und einigen 100 GeV geringfügig exponentiell an. Dies bedeutet, daß für alle Myonen dieses Energieintervalls (fast alle kosmischen Myonen) in etwa das gleiche Signal in einem zum Nachweis geeigneten Detektor zu erwarten ist, und somit die Bestimmung der Myonenergie anhand von Energieverlusten mit herkömmlichen Detektoren (dünner Szintillator, gasgefüllter Zähler) ausgeschlossen ist. Erst oberhalb einiger 100 GeV beginnen Paarbildung, Bremsstrahlung und photonukleare Wechselwirkung den totalen integralen Energieverlust zu dominieren (siehe Abb. 2.11). Diese Prozesse haben jedoch sehr kleine Wirkungsquerschnitte. Es handelt sich also um keine kontinuierlichen Energieverluste mehr, sondern um relativ seltene Prozesse (sehr kleiner Wirkungsquerschnitt), bei denen das Myon sehr große Energiebeträge verliert. Die Höhe dieser Energieverluste unterliegt zudem sehr großen Fluktuationen. Möchte man also Auskunft über Myonenergien oberhalb einiger 100 GeV gewinnen, so gilt es zwischen dünnen Schichten eines Absorbermaterials hoher

Dichte (Pb oder U zur Erhöhung der Wechselwirkungswahrscheinlichkeit) Detektorschichten zur Messung der Aufschauierungen zu installieren. Eine weitere Möglichkeit der Energiemessung von Myonen sind Spektrometer-Anordnungen mit großem Hebelarm, wie sie in [Mit83] zur systematischen Untersuchung von Energieverlusten in einer Kalorimeter-Anordnung verwendet wurde. Mit herkömmlichen Anordnungen muß man sich jedoch auf die Identifizierung, den Ortsnachweis bzw. die Messung der Flugrichtung (Impulsrichtung) der Myonen beschränken. Die Identifizierung von Myonen ist bereits problematisch, da sie sich praktisch in jeder Hinsicht wie relativistische Elektronen (beides Leptonen) verhalten und somit die gleichen Signale in einem Detektor liefern. Da Elektronen jedoch aufgrund ihrer geringeren Masse ($207 \cdot m_e \approx m_\mu$) schneller ihre Energie an Materie abgeben und von ihr absorbiert werden, ist es möglich, durch eine Absorberschicht Elektronen zu diskriminieren. Relativistische Myonen ($E \gg$ Ruheenergie = 105,7 MeV) durchdringen sehr starke Absorberschichten, ohne wesentlich an Energie zu verlieren (nur Ionisationsverluste).

Da Myonen nach einer mittleren freien Lebensdauer von 2,2 μ s zerfallen



erreichen niederenergetische Myonen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit den Erdboden. Hochenergetische Myonen haben jedoch aufgrund ihres stark relativistischen Verhaltens selbst aus großen Höhen in der Atmosphäre eine große Wahrscheinlichkeit den Erdboden zu erreichen. Da die Energie pro Teilchen mit zunehmender Eindringtiefe des Schauers in die Atmosphäre immer kleiner wird, ist verständlich, daß die meisten Myonen der kosmischen Strahlung, die den Erdboden erreichen aus großen Höhen stammen. Ihre Einfallrichtung stimmt somit recht gut mit der Richtung der Schauerachse überein. Man hat hiermit die Möglichkeit eine Bestimmung der Schauerachse unabhängig von den Array-Detektoren durchzuführen. Allerdings wäre hierzu die Bestimmung von Koordinaten (x, y) eines Myons in mindestens drei Detektorebenen notwendig um Myonspuren eindeutig auffinden zu können.

Im KASCADE-Experiment ist bisher nur eine Detektorebene unterhalb des Kalorimeters zum Nachweis von Myonen vorgesehen. Mit den Vieldraht-Proportionalkammern, die in dieser Arbeit diskutiert werden, soll die Identifizierung von Myonen und deren Ortsbestimmung auf einer aktiven Detektorfläche von ca. 200·250 m² erfolgen. Mit der Information über die Lage der Schauerachse, ist somit die Bestimmung der Myonlateralverteilung in einem bestimmten Radiusbereich (je nach Lage der Schauerachse zum Kalorimeter) mit

sehr guter Statistik möglich. Dieser wertvolle Parameter zur Bestimmung der Art und Energie des Schauers ist besonders dann von Interesse, wenn der Schauerkern eines "niederenergetischen" Schauers (10^{14} eV) am Rande des Arrays liegt, so daß die Myondetektoren des Array im äußeren Radiusbereich (Kalorimeter) nur wenige Teilchen nachweisen können (schlechte Statistik) bzw. im umgekehrten Fall, in dem der Schauerkern eines hochenergetischen Schauers ($> 10^{16}$ eV) direkt auf den Zentraldetektor fällt, so daß die umliegenden Felddetektoren aufgrund zu hoher Teilchenzahlen "blind" sind.

3. Funktionsweise der Myonkammern

3.1 Prinzipielle Funktionsweise von Vieldraht-Proportionalkammern

Nach Charpak et al. [Cha68] kann in einer Vieldraht-Proportionalkammer jeder Signaldraht näherungsweise als unabhängiger Proportionalzähler angesehen werden. Da weiterhin die meisten Kammern so konstruiert wurden, daß der Feldverlauf um die Anodendrähte, dem eines Proportionalzählers gleicht, ist es sinnvoll sich zunächst die Funktionsweise eines Proportionalzählers zu verdeutlichen.

Bei konventionellen Proportionalzählern handelt es sich um eine zylindrische Anordnung (siehe Abb. 3.1). Der Zylindermantel ist eine auf Masse liegende

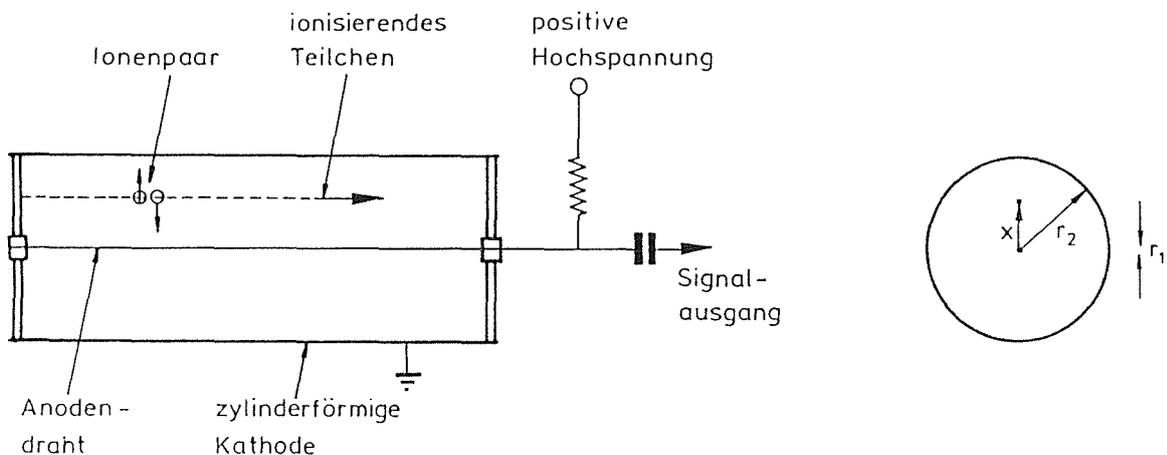


Abb. 3.1 : Aufbau eines Proportional-Zählrohres.

Kathode. Durch die Zylinderachse ist ein auf Hochspannung liegender, sehr dünner Anodendraht gespannt, der an den Zylinderböden an einer isolierenden Platte befestigt ist. An einer Seite des Zylinders befinden sich die Hochspannungszuführung und die kapazitive Signalauskopplung des Anodendrahtes. Das Zylindervolumen ist üblicherweise mit einem Gasgemisch aus Argon und (meist einem) Löschgas (Quenching) gefüllt. Passiert z.B. ein minimal ionisierendes Teilchen (z. B. Myonen der Höhenstrahlung) das Zählervolumen, so stößt es kontinuierlich auf Elektronen der Gasatome und -moleküle. Dabei gibt es nur sehr kleine Bruchteile seiner Energie an die Elektronen ab. Diese Energie genügt jedoch, um gelegentlich Elektronen aus den Atomen herauszuschlagen und so Elektron-Ion-Paare zu bilden. Diese primären Ionen-Paare gilt es nun nachzuweisen, bevor sie rekombinieren können. Dabei sei von Photoemission bzw. Photoionisation abgesehen, da diese Effekte bei herkömmlichen Proportionalzählern keine wesentliche Rolle spielen. Entscheidend für das korrekte Funktionieren eines Proportionalzählers ist die Höhe der angelegten Hochspannung und das daraus resultierende elektrische Feld.

Trägt man in einer Kurve die resultierende Pulshöhe eines den Zähler passierenden Teilchens gegenüber der angelegten Hochspannung auf, so sind die Kurven quantitativ für Zähler verschiedener Geometrien (Drahtdurchmesser, Zylinderradius) bzw. verschiedene Gasmischungen unterschiedlich [Pal74]. Qualitativ ergibt sich jedoch immer dasselbe Bild (siehe Abb. 3.2).

Im unteren Spannungsbereich arbeitet der Zähler zunächst wie eine **Ionisationskammer**. Die an der Anode gesammelte Ladung entspricht der Anzahl der Elektronen, die durch Ionisation von ihren Atomen befreit wurden. Bei sehr kleinen Spannungen genügt das Feld zunächst nicht, um zu gewährleisten, daß alle Elektronen die Anode erreichen, ohne zu rekombinieren. Erhöht man die Spannung bis in den **Proportionalitätsbereich**, so erreichen die Elektronen im erhöhten elektrischen Feld so viel Energie, daß sie selbst weitere Atome ionisieren können (Sekundärionisation). Dies führt zu einer Vervielfachung der Anzahl der Ladungsträger (Ladungslawine), die den Anodendraht erreicht. Somit kommt es zu einer spannungsabhängigen Verstärkung des Ausgangssignals. Das Ausgangssignal ist jedoch weiterhin proportional zur primär durch das Teilchen deponierten Energie. Erhöht man die Spannung weiter, so gelangt man in den **Bereich begrenzter Proportionalität**, in dem das Ausgangssignal zwar nicht mehr proportional mit der angelegten Spannung anwächst, jedoch weiterhin zwischen verschiedenen primär deponierten Energien unterschieden werden kann. Allerdings rücken die Ausgangssignale verschiedener deponierter Energien mit weiter steigender Spannung immer näher zusammen, bis

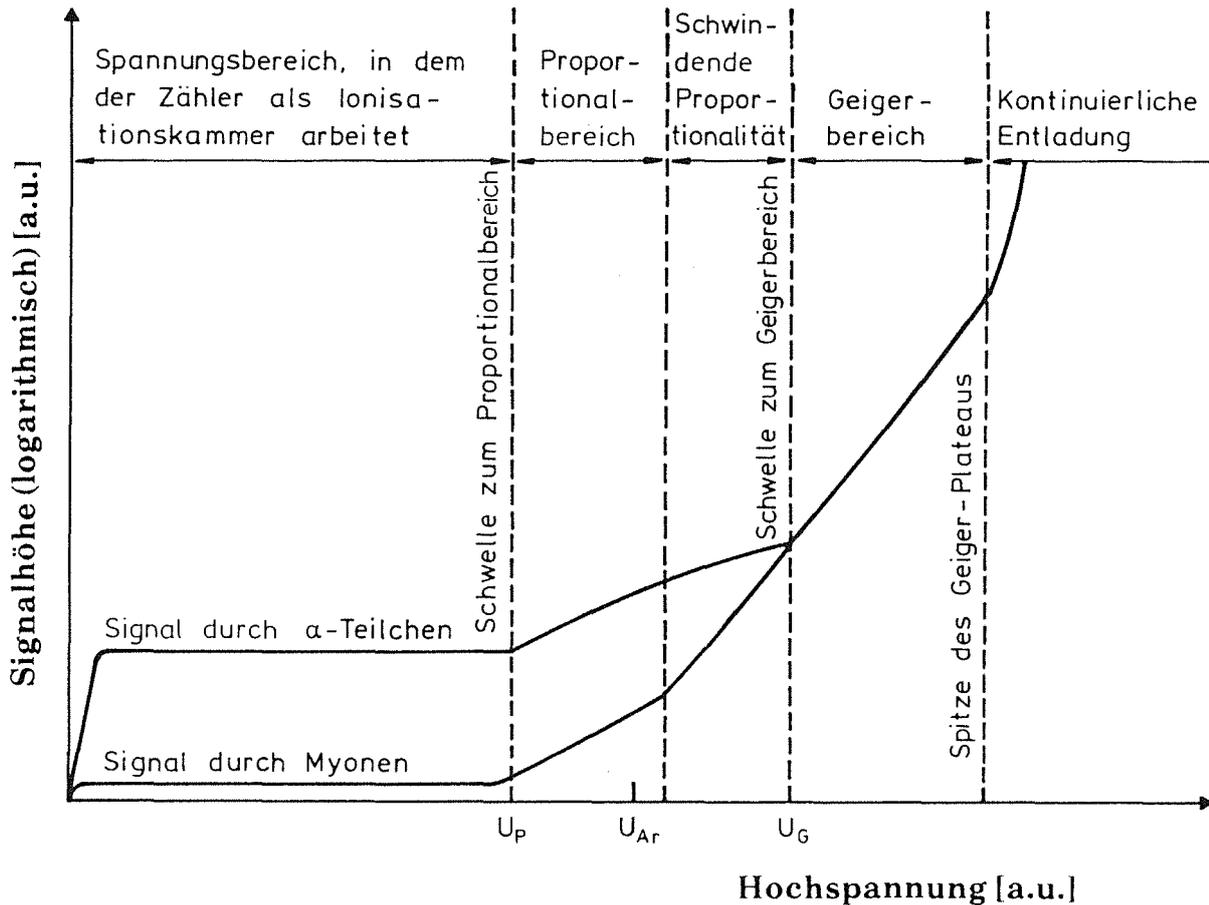


Abb. 3.2: Signalabhängigkeit bei gasgefüllten Zählern von der angelegten Hochspannung.

schließlich der **Geigerbereich** erreicht ist, in dem verschiedene Teilchen (und somit verschiedene Energiedepositionen) nicht mehr unterschieden werden können. Im Geigerbereich löst jede ursprünglich erzeugte Lawine auf beiden Seiten des Anodendrahtes durch Photoionisation sukzessiv weitere Lawinen aus, bis schließlich Entladung entlang des gesamten Anodendrahtes stattfindet.

Die Ausbreitung der Entladung entlang des Drahtes kann eine gemessene Geschwindigkeit [Ric74] von etwa 10^7 cm/s haben. Man kann somit wegen der mittleren Lebensdauer der angeregten Zustände von etwa 10^{-8} s abschätzen, daß bei einer mittleren freien Weglänge der Photonen von etwa 1 mm, ungefähr zehn Ionisationen pro cm stattfinden. Die Photoionisation bedingt eine Gasmischung (im allgemeinen ein Edelgas und Alkoholdampf), in der die Strahlung aus angeregten Zuständen des einen Gases das andere ionisieren kann. Da eine Entladung jedesmal entlang des gesamten Drahtes stattfindet, hat der Ausgangsimpuls konstante Größe.

Ein Proportionalzähler wird - ebenso wie Vieldraht-Proportionalkammern - im Proportionalbereich bei einer bestimmten Arbeitsspannung U_{Ar} betrieben. Man liest leider immer wieder, daß das im Proportionalzähler entstehende Signal und sein zeitliches Verhalten nur von den positiven Ionen bzw. manchmal sogar, daß es nur von den Elektronen bestimmt würde. Es ist daher wichtig sich einmal die Entstehungsgeschichte eines Signals am Anodendraht einer Proportionalkammer zu verdeutlichen:

Ist zum Zeitpunkt $t=0$ im Zählrohr ein Elektron-Ion-Paar erzeugt worden, so driftet das Elektron zur Anode, während das positive Ion zur Kathode zu driften beginnt; die Driftgeschwindigkeit hängt von der Stärke des elektrischen Feldes am jeweiligen Ort ab. Es wäre falsch anzunehmen, daß auf den Elektroden erst dann ein Signal zu messen ist, wenn Ladungsträger dort aufgesammelt sind. Bereits die Bewegung der Ladungsträger im elektrischen Feld influenziert auf den Elektroden Ladungen. Auf dem Anodendraht werden die Ladungen $-q_+(t)$ und $q_-(t)$ influenziert. Damit ist das Potential der Anode gegeben mit

$$P_{(t)} = \frac{q_+(t) + q_-(t)}{C}$$

wobei C = Kapazität des Proportionalzählers ist.

Zum Zeitpunkt $t=0$ der Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares gilt

$$q_-(0) = -q_+(0) \quad \text{und damit} \quad P_{(0)} = 0$$

Zum Zeitpunkt t_1 , an dem das Elektron an der Anode ankommt, muß seine gesamte Ladung $-e$ influenziert sein, so daß in diesem Augenblick gilt:

$$P(t_1) = \frac{-e + q_+(t_1)}{C}$$

und nicht bereits $-e/C$. Erst zur Zeit t_2 , wenn auch das positive Ion an der Kathode eingetroffen ist, gilt:

$$q_+(t_2) = 0 \quad \text{und somit} \quad P_{(t > t_2)} = -e/C.$$

Die gesamte Signalhöhe ist also erst nach der Zeit t_2 , wenn beide Ladungen gesammelt wurden, vorhanden. Hierbei ist die Driftzeit t_2 der positiven Ionen sehr viel größer als die Driftzeit t_1 der Elektronen.

Mit den gleichen Überlegungen gelangt man zum Signalverlauf an der Kathode, der dem der Anode invers ist. Daß es zu einem Abfall des Anodenpotentials und einem Anstieg des Kathodenpotentials kommen muß, ist auch unmittelbar aus Energiebetrachtungen zu verstehen. Ist das Elektron-Ion-Paar erst einmal erzeugt, so erhält es kinetische Energie aus dem elektrischen Feld der Anordnung und verringert somit die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden. Da die Elektronen und Ionen ihre kinetische Energie praktisch ständig wieder verlieren, indem sie auf Elektronen der Gasmoleküle stoßen, ist der Energieverlust des elektrischen Feldes und somit der Signalanstieg (bzw. -abfall) an den Elektroden nur eine Funktion der jeweiligen lokalen Feldstärke. Da es sich beim Proportionalzähler um ein inhomogenes Feld mit Zylindergeometrie handelt, kann man die Signalhöhe als Funktion des Abstandes r zur Zylinderachse angeben.

Es gilt:

$$E(r) = \frac{V}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

und für die durch Drift der positiven Ionen influenzierte Ladung:

$$q_+(r) = \frac{e}{V} \int_r^{r_2} E dr = e \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Hierbei sind r_1 der Drahtdurchmesser und r_2 der Radius des zylindrischen Proportionalzählers. Zur zeitlichen Entwicklung des Signals

$$P(t) = \frac{-e + q_+(t)}{C}$$

gelangt man über die Driftgeschwindigkeit

$$\frac{dr}{dt} = K \cdot E(r) = \frac{K \cdot V}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)},$$

wobei K die Mobilität der Ionen ist.

Durch Integration

$$\int_{r_1}^r r \, dr = \frac{K \cdot V}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \int_0^t dt$$

kommt man zum Ergebnis :

$$P(t) = \frac{-e}{C} \cdot \frac{\ln\left(\frac{2 \cdot K \cdot V \cdot t}{r_1^2 \cdot \ln(r_2/r_1)} + 1\right)}{2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Die bisherige Diskussion behandelte die Signalentwicklung eines einzelnen Elektron-Ion-Paares. Diese war im wesentlichen von der Drift der Ionen im elektrischen Feld abhängig, da die Elektronen unmittelbar nach ihrer Freisetzung, an der Anode eingesammelt werden. Betreibt man jedoch den Zähler im Proportionalbereich, so kommt es in unmittelbarer Drahtnähe (typischer Abstand : 1 Drahtdurchmesser) zur Ausbildung einer Lawine (siehe Abb. 3.3 und 3.4). Das primär erzeugte Elektron driftet sehr schnell in den Bereich sehr hoher

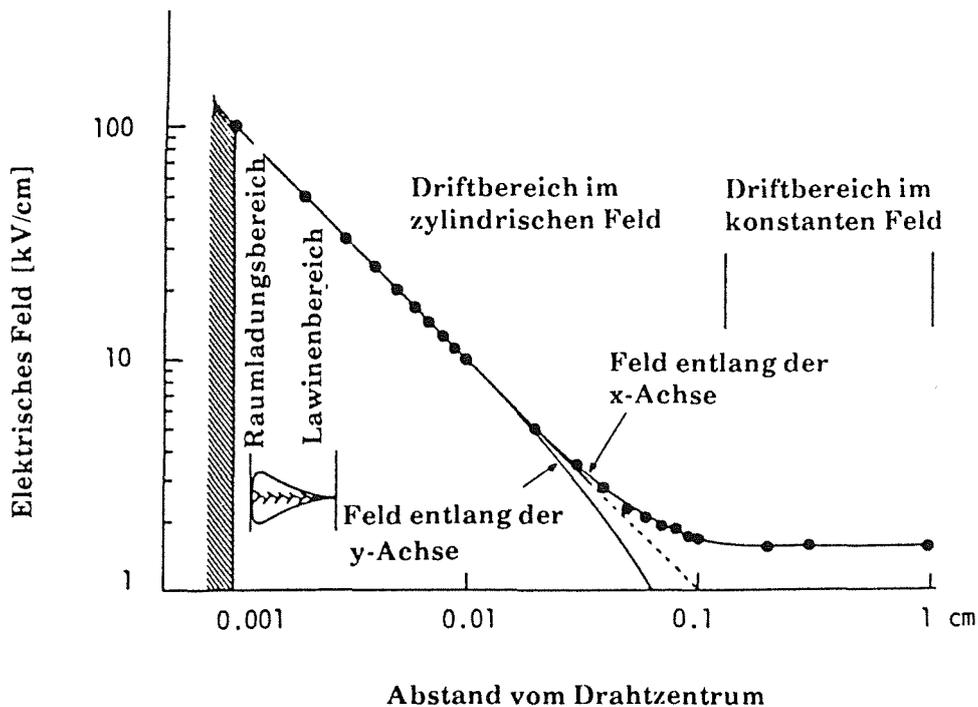


Abb. 3.3 : Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke einer Proportional-kammer vom Drahtabstand.

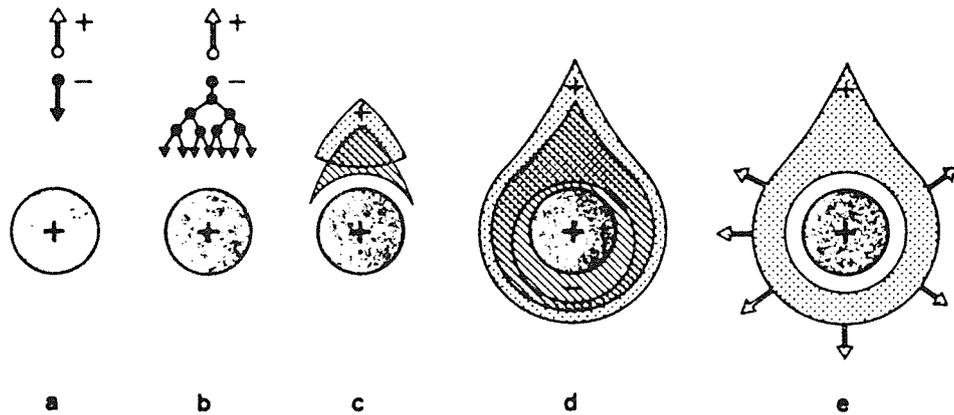


Abb. 3.4 : Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Lawinenbildung um den Anodendraht [Sau76].

Feldstärken (unmittelbare Drahtnähe). Hier erhält es zwischen zwei Stößen so viel Energie, daß es weitere Gasmoleküle ionisieren kann. Während die so entstandenen Ionen zur Kathode zu driften beginnen, können die Elektronen auf ihrem restlichen Weg zur Anode noch weitere Moleküle ionisieren. Diese Lawine setzt sich fort, bis alle Elektronen die Anode erreicht haben. Die Anzahl, der von einem primär ausgelösten Elektron erzeugten Elektron-Ion-Paare, ist gleich dem Verstärkungsfaktor des Proportionalzählers. Dieser Verstärkungsfaktor ist abhängig von der angelegten Hochspannung, nicht jedoch vom Ort des Energieverlustes des nachgewiesenen Teilchens, da die Lawinenbildung erst in unmittelbarer Drahtnähe einsetzt.

Das Entstehen des Signals unmittelbar nach Durchgang eines Teilchens durch den Zähler ist auf die sehr kurze Elektronendriftzeit ($t_1 < 1 \text{ ns}$) zurückzuführen. Der Signalverlauf wird von der Drift der Ionen bestimmt, da die Ladungslawine in unmittelbarer Drahtnähe entsteht. Die Elektronen erreichen sofort den Anodendraht, während die Ionen, da sie zu diesem Augenblick immer noch in unmittelbarer Drahtnähe sind, die entgegengesetzte Ladung auf dem Draht influenzieren, so daß erst die Drift der Ionen einen Signalanstieg hervorruft. Der zunächst schnelle Anstieg des Signals und das mit der Zeit immer langsamere Ansteigen rühren daher, daß die positiven Ionen zunächst im hohen elektrischen Feld (Anodendrahtnähe) große Driftgeschwindigkeiten haben und mit abnehmendem Feld (zur Kathode hin) immer langsamer werden (siehe Abb. 3.5).

Oft werden die Signale über ein Differenzierglied (RC-Glied) ausgekoppelt. Dies verringert die Abklingzeit der Impulse und verringert somit die Totzeit des

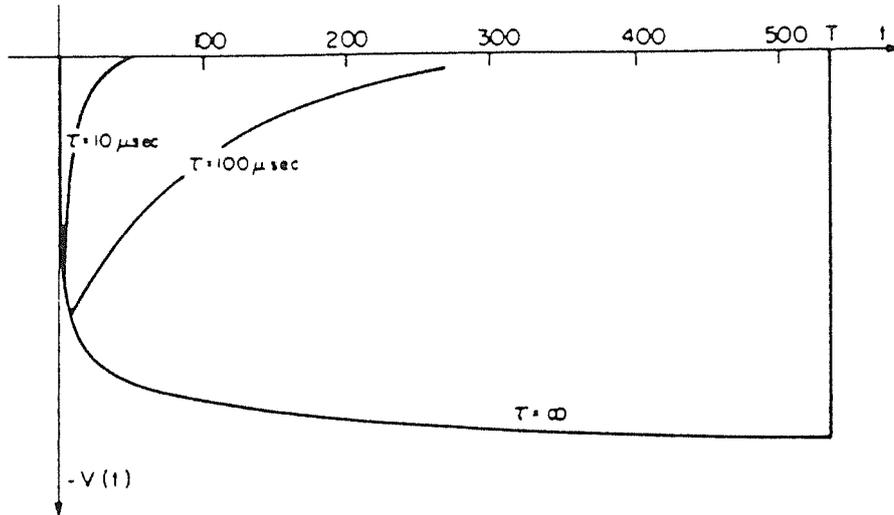


Abb. 3.5 : Signalentwicklung in einem Proportionalzähler für verschiedene RC-Zeiten. T = totale Driftzeit der positiven Ionen.

Zählers. Das Signal verliert dabei wegen seines sehr steilen Anstiegs kaum an Amplitude. Schon nach einem kleinen Bruchteil der gesamten Ionendriftzeit ist mehr als die Hälfte der maximalen Signalthöhe erreicht.

Die Geometrie von Vieldraht-Proportionalkammern wird so gewählt, daß die elektrische Feldverteilung im wesentlichen der eines Proportionalzählers entspricht. Um den Anodendraht herrscht ein starkes zylindrisches Feld (siehe Abb. 3.6). Erst in Kathodennähe ist die Zylindergeometrie nicht mehr gegeben.

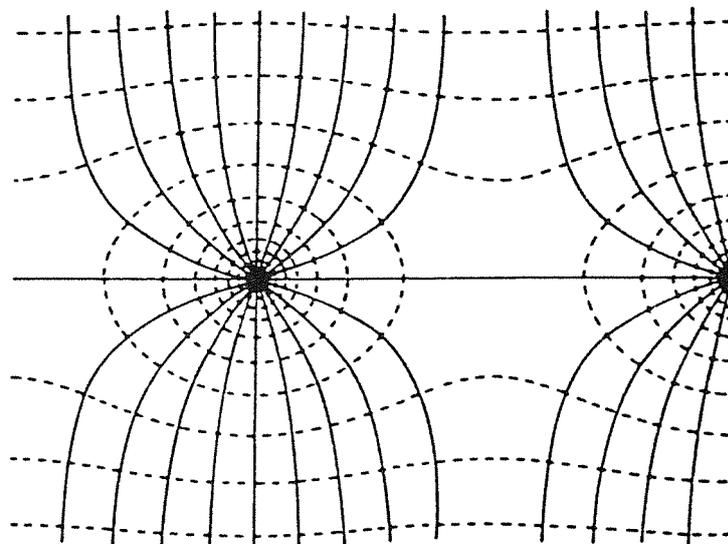


Abb. 3.6 : Feldverteilung in Anodendraht-Nähe.

Dies stört jedoch nicht, da die Drift, der in Drahtnähe in einer Lawine entstandenen positiven Ionen, in diesem Bereich niedriger Feldstärke keine

wesentliche Rolle in der Signalentwicklung mehr spielt, zumal ohnehin in der Regel über ein Differenzierglied ausgekoppelt wird.

3.2 Aufbau der Saclay-Kammern

Die in Saclay entwickelten Vieldraht-Proportionalkammern besitzen drei aktive Detektorlagen. Eine Drahtebene mit Potential- und Anodendrähten befindet sich in der Mitte zwischen zwei Kathodenebenen (siehe Abb. 3.7). Der Abstand von der

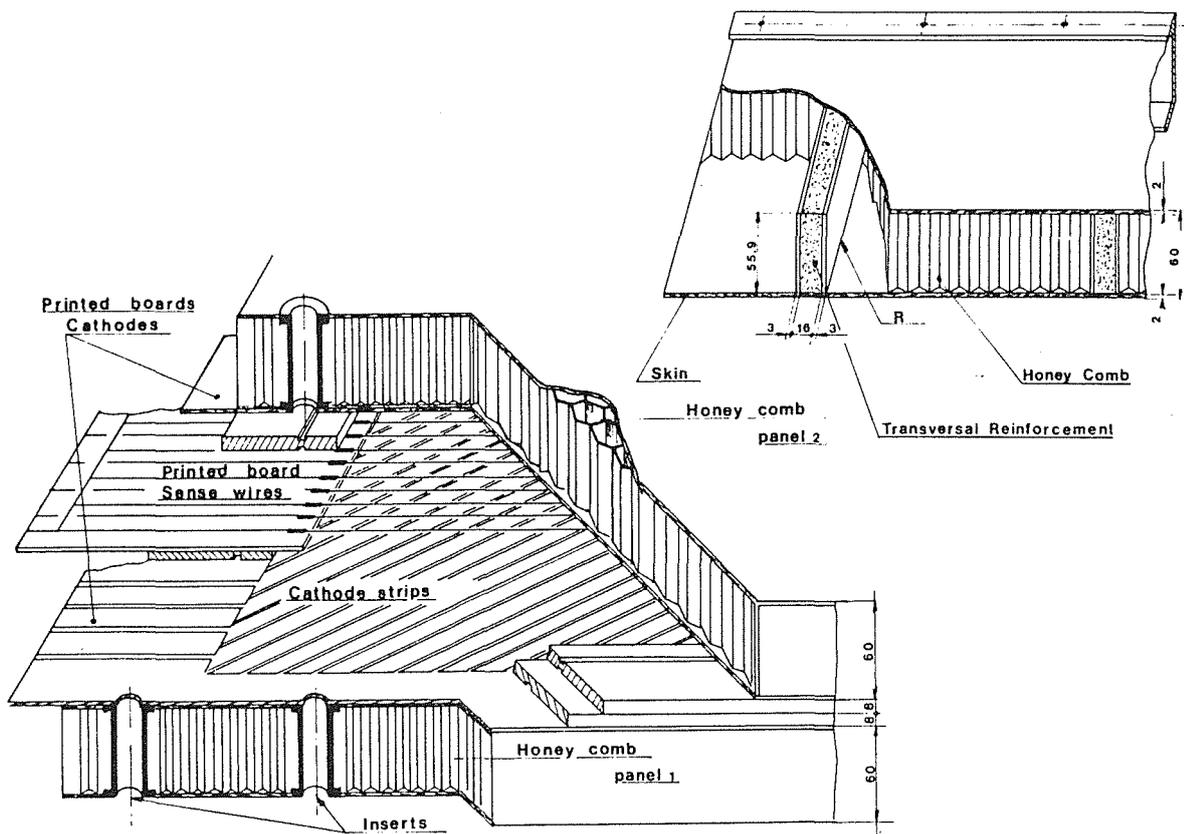
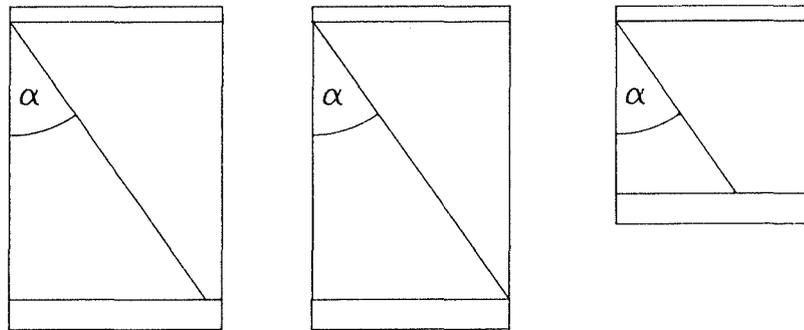


Abb. 3.7: Mechanischer Aufbau der Saclay-Kammern.

Drahtebene zu einer Kathodenebene beträgt jeweils 8 mm. In der Drahtebene wechseln sich 100 μm dicke vergoldete Kupfer-Beryllium-Drähte (Potentialdrähte) mit 20 μm dicken Anodendrähten aus vergoldetem Wolfram ab. Die Goldbeschichtung dient dazu, Oxidation zu vermeiden. Um den korrekten Abstand der Drähte zu den Kathoden zu gewährleisten, werden die Potentialdrähte mit 400 g und die Anodendrähte mit 53 g gespannt. Die Drähte

sind an beiden Seiten auf gedruckte Kontakte aufgelötet und mit etwas Klebstoff fixiert. Die Kathodenebene besteht aus 10,6 mm breiten aufgedruckten Leiterbahnen (35 μm Kupfer auf einer 75 μm dicken Mylar-Folie), zwischen denen jeweils 2 mm Abstand sind.

Während die Drähte parallel zu einer Kammerseite verlaufen, sind die Kathodenstreifen um $34^\circ 16'$, bzw. die der anderen Kathode um $-34^\circ 16'$ dazu geneigt (siehe Tab. 3.1). Dieser Neigungswinkel entspricht gerade dem der



Kammertyp:	1	2	3
Anzahl:	10 Stück	14 Stück	8 Stück
Drähte(Anode):	208 Stück	192 Stück	192 Stück
Kathodenstreifen:	2x336 Stück	2x320 Stück	2x256 Stück
Kammergröße in mm			
empfindliche Fläche:	3568x2629	3568x2426	2196x2426
Rahmen:	3708x2793	3708x2565	2336x2565
Gesamtgröße:	4033x2888	4033x2660	2661x2660
Neigungswinkel der Kathodenstreifen α :	$34^\circ 16'$	$34^\circ 16'$	$34^\circ 16'$

Tab. 3.1: Beschreibung der drei Kammertypen.

Diagonalen einer Kammer vom Typ 2 (mittlere Größe der drei vorhandenen Kammertypen). Die Geometrie wurde gewählt, um die Ausleseelektronik nur an zwei gegenüberliegenden Kammerseiten anbringen zu müssen. Der Ort eines Ereignisses läßt sich als Schnittpunkt von angesprochenen Drähten bzw. Kathodenstreifen bestimmen, wobei alle drei aktiven Detektorebenen jeweils gleichzeitig ein Signal liefern müssen.

Die Kathodenstreifenebenen sind auf sogenannte "Sandwichplatten" aufgeklebt (Tragekonstruktion). Die Platten bestehen aus einer wabenförmigen Struktur aus Phenolpapier. Eine Waben-Zelle hat 1 cm Durchmesser und ist $56 \pm 0,3$ mm hoch. Die Wandstärke beträgt 0,15 mm. Diese Wabenstruktur ist zwischen zwei 2 mm dicke Fiberglasplatten geklebt (vgl. Abb. 3.7). Um Verschiebungen zu vermeiden, wurden zusätzlich transversal Verstärkungen angebracht (22 mm · 55,9 mm). Die großen Kräfte auf den Drahtrahmen (> 850 N Drahtspannung) werden dadurch aufgefangen, daß dieser mit den Sandwichplatten und den Fiberglasrahmen, die den Abstand zwischen Draht- und Kathodenebene definieren, durch Stahlbolzen verbunden wird. In den Stahlbolzen sind Gewinde angebracht, so daß die verschiedenen Ebenen gegeneinander festgeschraubt werden können. Diese Stahlbolzen sind an den Kammerseiten ohne Auslese-Elektronik, zusätzlich noch mit Aluminium-U-Schienen verbunden, um die Starrheit in Drahtichtung zu gewährleisten. Im mittleren Teil der Kammer werden die beiden Sandwich-Platten gegeneinander festgehalten, indem sie durch einen Stahldraht durch das Kammerinnere gegeneinander festgespannt werden (etwa 850 N). Somit wird ein Aufblähen der Kammer durch den Gasdruck (etwas höher als Atmosphärendruck) vermieden.

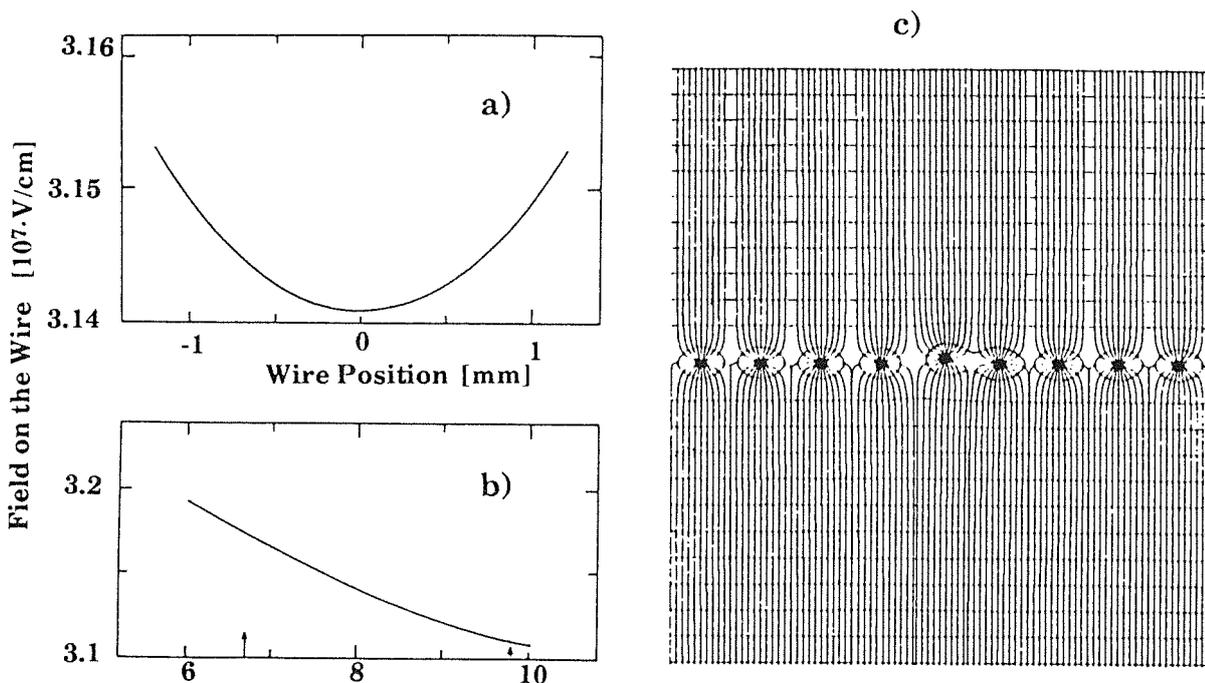


Abb. 3.8: Änderungen der Feldverteilung bei Abweichungen der Drahtposition : a) in der Drahtebene, b) senkrecht dazu, c) schematisch.

Die große Starrheit der Anordnung und die großen Drahtspannungen sind notwendig, um für jeden Anodendraht die gleichen symmetrischen elektrischen Feldverteilungen zu garantieren. Schon geringe Abweichungen in der Drahtposition bringen große Abweichungen in der elektrischen Feldstärke auf dem Draht mit sich (siehe Abb. 3.8).

Die Anodendrähte liegen auf +2100 V, während die Potentialdrähte in 6 mm Abstand dazu auf -500 V liegen. Die Kathoden liegen auf 0 V und haben 8 mm Abstand zur Drahtebene. Die verwendete Kammergeometrie bewirkt eine zylindrische Feldverteilung um die Anodendraht-Achsen (siehe Abb. 3.9) und ein

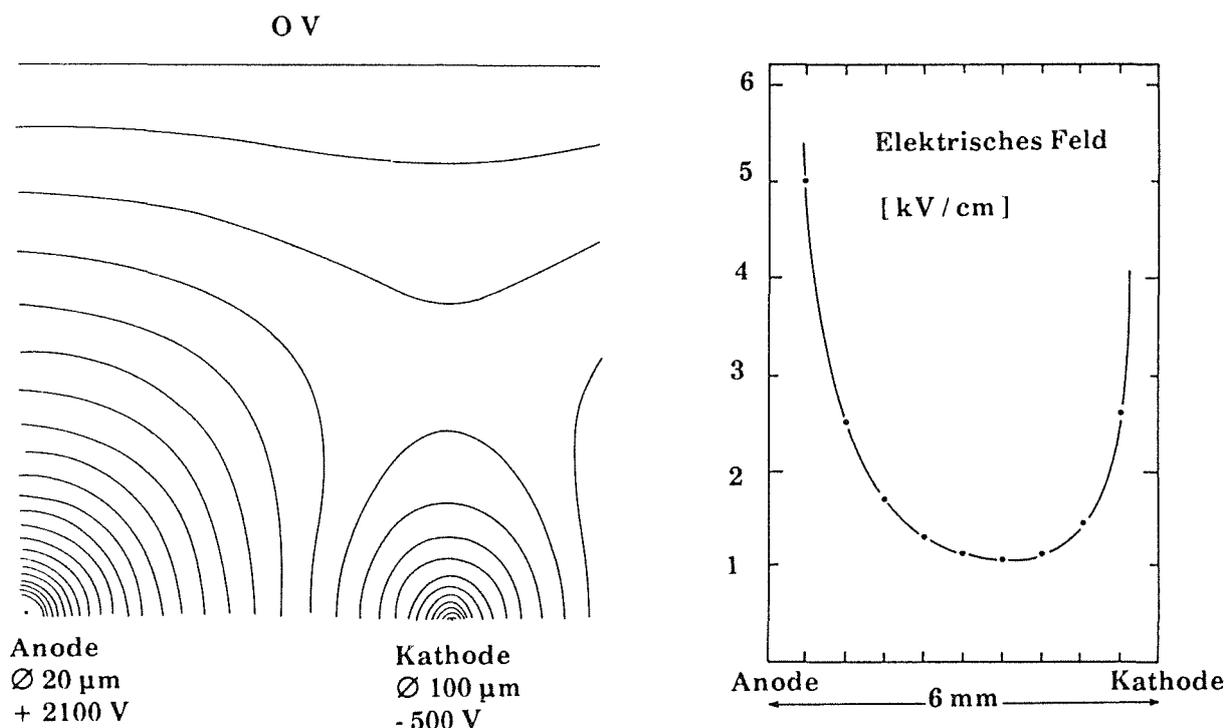


Abb. 3.9 : Feld- und Potentialverlauf bei den Saclay-Kammern.

relativ schwaches, homogenes Feld in Nähe der Kathodenstreifen. Die Potentialdrähte bewirken außerdem, daß sich benachbarte Anodendrähte kaum beeinflussen. Somit sind optimale Bedingungen für den Betrieb im Proportionalbereich gegeben.

Die Kammern werden permanent (um Entmischungen des schwereren Isobutan zu vermeiden) mit einem Argon-Isobutan-Isopropanoldampf-Gemisch gespült. Das Argon perlt durch einen Tank mit 15°C kühlen Isopropylalkohol, bevor es im Verhältnis 2:1 mit Isobutan gemischt wird. Man verwendet Argon, da es ein hohes spezifisches Ionisationsvermögen aufweist [Ric74] und relativ preisgünstig im Vergleich zu Xenon oder Krypton ist. Edelgase sind notwendig, da sie bei weitaus

niedrigeren Feldstärken Lawinenbildung ermöglichen (nur geringe Elektro-negativität), als komplexere Gasmoleküle (viele nicht ionisierende Anregungszustände). Mit reinem Argon gelangt man jedoch in den Bereich stän-diger Entladung, bevor Verstärkungsfaktoren von 10^3 bis 10^4 erreicht sind. Dies ist Folge der Tatsache, daß angeregte Edelgase nur durch Emission von Photonen in den Grundzustand übergehen können : Die Photonenergie (11,6 eV für Argon) liegt in jedem Fall über dem Ionisationspotential des Kathodenmaterials (7,7 eV für Kupfer), so daß Photoelektronen herausgeschlagen werden können und sekundäre Lawinen schon kurz nach der primären Lawine auslösen können. Positiv geladene Argon-Ionen wandern hingegen zur Kathode und werden dort neutralisiert, indem sie ein Elektron herauslösen. Das Energiegleichgewicht wird auch hier durch Emission eines Photons oder durch das Herauslösen eines weiteren Elektrons aus der Metalloberfläche hergestellt. Beides führt zu einer Nachlawine, so daß schon bei kleinen Verstärkungsfaktoren kontinuierliche Entladung induziert wird.

Deshalb ist es sinnvoll, Argon mit einem weiteren Gas - einem sogenannten Löschgas - zu mischen. Hierzu eignen sich besonders mehratomige Gase mit mehr als vier Atomen. Die große Anzahl "strahlungsloser Anregungszustände" (Schwingungen, Rotationen) ermöglichen die Absorption von Photonen in einem weiten Energiebereich.

Als besonders geeignet hat sich Isobutan erwiesen. Durch seine vielen Atome (C_4H_{10}) und seine starke Symmetrie ist die "Löschfähigkeit" besonders hoch. Die Beimischung einer sehr geringen Menge Alkoholdampf dient dazu, die Drähte davor zu schützen, daß sich Crack-Reste anlagern, da durch dieses zweite "Lösch-gas" der Alterungseffekt bei höheren Intensitäten unterdrückt wird. Die Kammern wurden in Saclay mit verschiedensten Gasmischungen getestet, bevor sich die beschriebene Mischung als geeignet erwiesen hat.

4. Beschreibung der verwendeten Elektronik

Da der Aufbau bzw. das Verstehen der Elektronik aufgrund fehlender bzw. spärlicher Dokumentation Probleme ergab, wurde hier eine detaillierte Beschreibung für sinnvoll erachtet, um für nachfolgende Arbeiten eine fundierte Grundlage zu bieten.

4.1 Einsatz im Testaufbau

4.1.1 Versorgungselektronik

Zum ordnungsgemäßen Betrieb der Kammern benötigt man eine Einheit, die alle weiteren Versorgungsgeräte mit Spannungen versorgt und somit als Hauptschalter für das gesamte Versorgungssystem dient. Weiterhin erfüllt diese Einheit verschiedene Überwachungsfunktionen, so daß im Störfall das Versorgungssystem bzw. Teile davon automatisch abgeschaltet werden können.

Weiterhin steht für jeweils 8 Kammern ein Stromversorgungsgerät ($-22\text{ V} / 40\text{ A}$), sowie ein weiteres Stromversorgungsgerät mit vier verschiedenen Spannungen ($6\text{ V} / 20\text{ A}$, $-6\text{ V} / 5\text{ A}$, $12\text{ V} / 20\text{ A}$, $-12\text{ V} / 25\text{ A}$) zur Versorgung der Kammerelektronik zur Verfügung. Ebenfalls für jeweils 8 Kammern wird ein weiteres Gerät mit 4 regelbaren Spannungen benötigt. Diese Spannungen werden zur Einstellung der Betriebsparameter (Verzögerung, Schwelle, Polarisation, FILAS-Spannung) der FILAS-Module (siehe Kap. 4.1.2) verwendet.

Sämtliche Versorgungs- bzw. Regelspannungen werden auf einen Verteiler geführt, der diese Spannungen auf 8 Ausgänge verteilt (siehe Abb. 4.1). An der

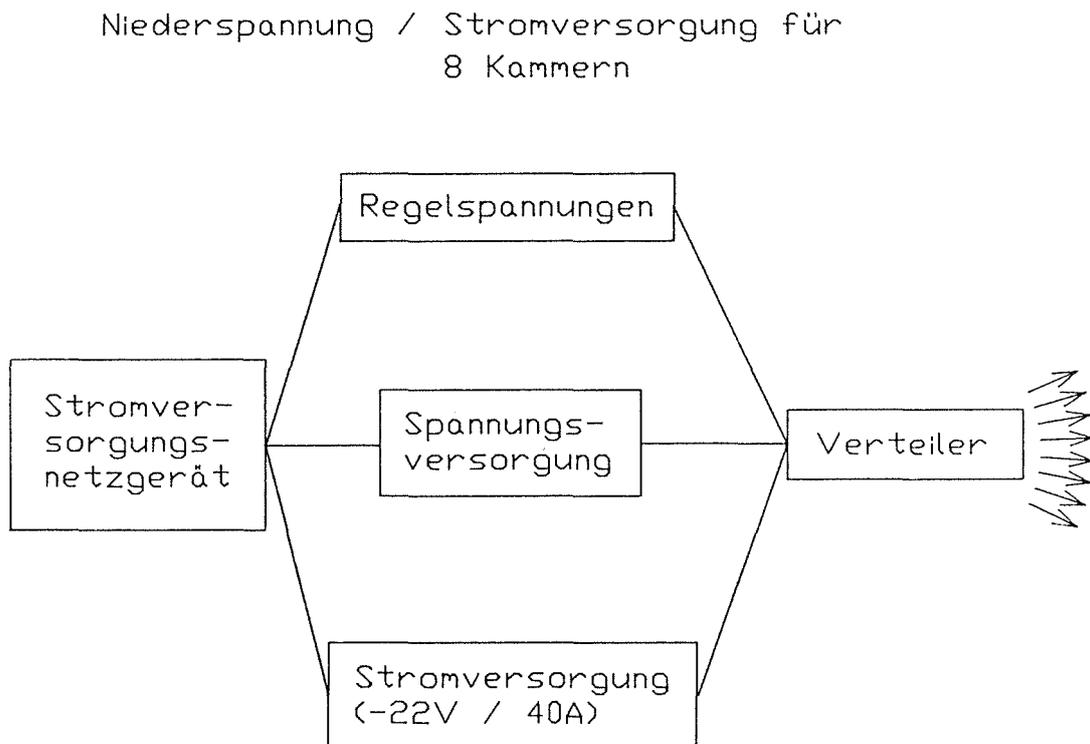


Abb. 4.1 : Schematische Darstellung des Stromversorgungs-Systems.

Frontplatte dieses Verteilers befinden sich zusätzlich zwei Buchsen, an denen alle Spannungen über einen Drehschalter angelegt und nachgemessen werden können.

Zur Versorgung der Kammern mit Hochspannung gibt es für alle Kammern gemeinsam ein Hochspannungsnetzgerät, das zwei regelbare Hochspannungen liefert (0 - 6 kV bzw. 0 - -2 kV). Diese Spannungen sind langsam anzulegen - es dürfen dabei maximal Ströme von 5 μ A fließen. Auch dieses Gerät läßt sich im Störfall von Überwachungseinheiten automatisch abschalten. Beide Hochspannungen werden von der Rückseite des Gerätes auf jeweils einen Verteiler für je 8 Kammern geführt. Die kleinere und negative Spannung dient zur Versorgung der Potentialdrähte und sollte auf -500 V eingestellt werden. Der Gesamtstrom für jeweils 8 Kammern wird am Verteilergerät angezeigt. Hier kann auch eine Strombegrenzungsschwelle eingestellt werden, bei deren Überschreitung das HV-Netzgerät abgeschaltet wird. Somit können Hochspannungs-Überschläge sofort automatisch unterbunden werden.

Hochspannungsversorgung 8 Kammern

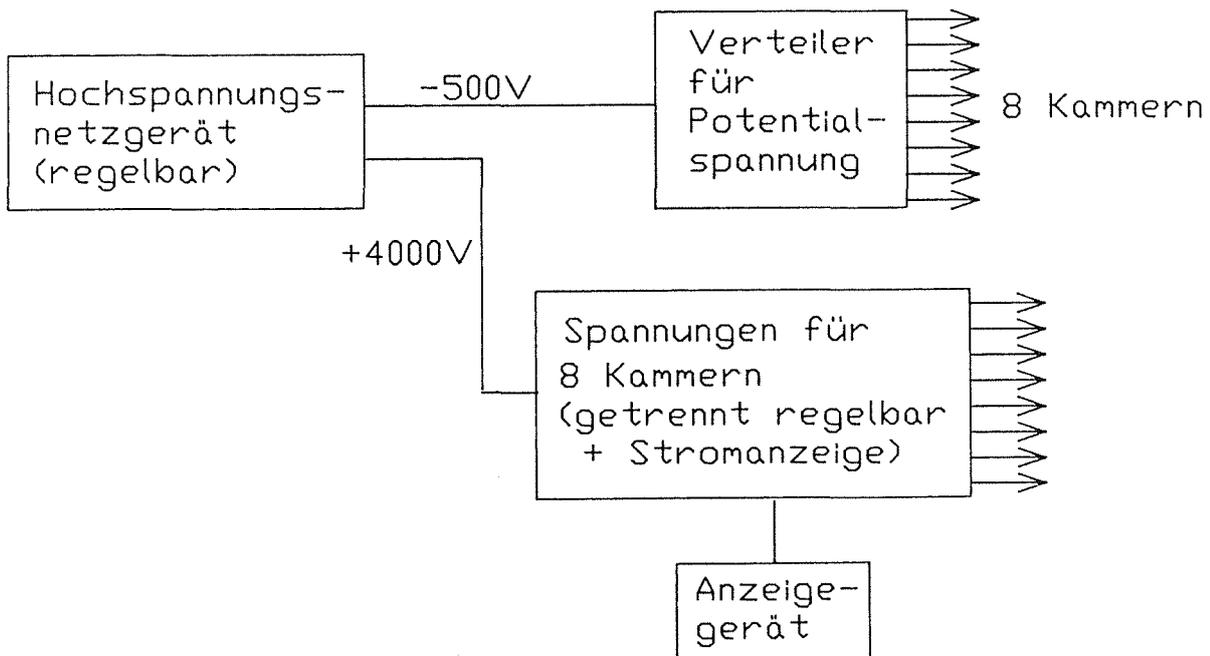


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Hochspannungs-Versorgung.

Am Hochspannungs-Verteiler für die Anodendrähte befinden sich für jeden der 8 Kanäle ein Grobdrehschalter, ein Feindrehschalter und ein Strom-

Anzeigeelement. Mit den Drehschaltern lassen sich über Zenerdioden-Kaskaden die Hochspannungen für jede Kammer individuell stufenweise (grob: in 20 Stufen 0 bis +2400 V; fein: in 22 Stufen 0 bis +480 V) einstellen. Am Verteiler selbst sollte jeweils eine höhere Spannung anliegen, um Beeinflussungen bei Schaltvorgängen auf Nachbarkanäle auszuschließen und einen niedrigen Stromfluß zu gewährleisten. Die Hochspannung wird am Versorgungsgerät auf fast +4000 V eingestellt. Die Hochspannungen für die Kammern sollten individuell - je nach Stromfluß - auf etwa +2100 V eingestellt werden. Die Hochspannungswerte können an einer Kontrolleinheit, die nach Auswahl über Tastschalter die Hochspannung jedes Kanals bzw. jedes Verteilers digital anzeigt, abgelesen werden (siehe Abb. 4.2).

Weiterhin gibt es drei Statusdisplays, die bei Störung auf die Ursache hinweisen. Eine Einheit überwacht die Lüftung der Kammern. Fällt sie aus, so registriert dies ein Sensor, der den Kompressionsdruck der Lüftung überwacht und dies der Überwachungseinheit meldet. Diese schaltet daraufhin die 22 V / 40 A-Versorgung der Kammer aus, um Überhitzung der Auslese-Elektronik in den Kammern zu vermeiden. Ein weiteres Display zeigt an, falls eines der 22 V / 40 A-Stromversorgungsgeräte ausfällt. Das dritte Display zeigt an, ob einer der -500 V-Hochspannungsverteiler die Strombegrenzung überschritten hat und somit die Hochspannung ausgeschaltet hat. Außerdem wird hier noch angezeigt, ob die Gassensoren am Boden der Halle angesprochen und daraufhin die Gaszufuhr abgeschaltet haben bzw. ob die Permanentabsaugung der Gasauffangwanne ausgefallen ist (siehe Kap. 5).

Im Dauerbetrieb erwies sich die Versorgungselektronik als solide und zuverlässig.

4.1.2 Frontend- und Auslese-Elektronik im Testaufbau

Wie bereits erwähnt befindet sich die Kammerelektronik an zwei gegenüberliegenden Seiten der Kammern (siehe Abb. 4.3). Während die Anodendrähte nur von einer Seite ausgelesen werden, werden die Kathodenebenen aus geometrischen Gründen von zwei Seiten ausgelesen (siehe Abb. 4.4). Die Anodensignale werden kapazitiv ausgekoppelt. Die Signale der Drähte und Streifen werden über gedruckte Leiterbahnen nach außen auf Platinen mit vergoldeten Kontakten (Oxidationsschutz) geführt.

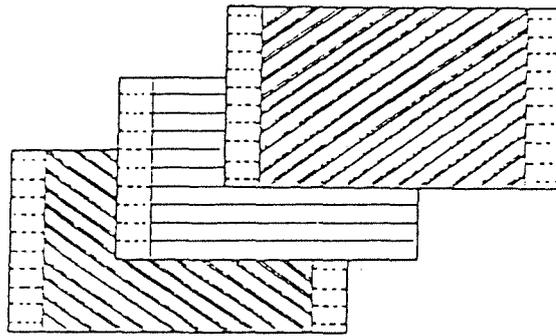


Abb. 4.3 : Anordnung der Auslese-Elektronik : Beide Kathodenebenen werden jeweils von zwei Seiten ausgelesen.

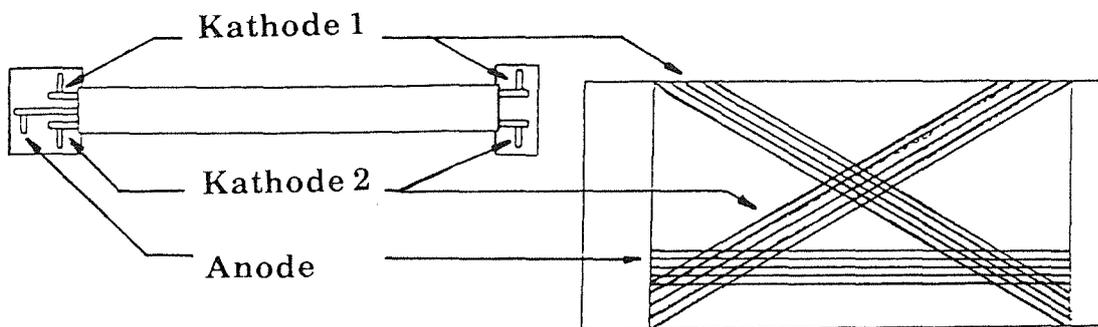


Abb. 4.4 : Prinzip-Darstellung der drei Ausleseebenen.

Auf die Kontakte der Platinen werden Modulträgerplatinen für jeweils 32 (bzw. 16) Kanäle aufgesteckt (Abb. 4.5). Die Kontaktierung erfolgt über Sockel mit Klemmkontakten. Jeweils 8 benachbarte Signalleitungen (8 benachbarte Streifen oder Drähte) werden auf dieser Modulträgerplatine auf einen weiteren Sockel mit Klemmkontakten geführt. Bei den Anoden geschieht dies direkt, während auf den Kathoden-Modulträgerplatinen noch Hybridvorverstärker aufgelötet sind. Für jeweils zwei Kanäle existiert hier ein Vorverstärkerkarte der Firma CIT-ALCATEL. Dieser ladungsempfindliche Vorverstärker ($250 \text{ mV} / 10^{-12} \text{ C}$; Zeitkonstante: 80 ns ; Rauschen: $4 \cdot 10^{-15} \text{ C}$) dient der Signalanpassung für die weitere Verarbeitung der Signale, so daß für Anode und Kathode von da an die gleichen Module verwendet werden können. Auf die bereits erwähnten Sockel für jeweils 8 Kanäle werden FILAS-Module [Ale81] gesteckt. Es handelt sich dabei um von der

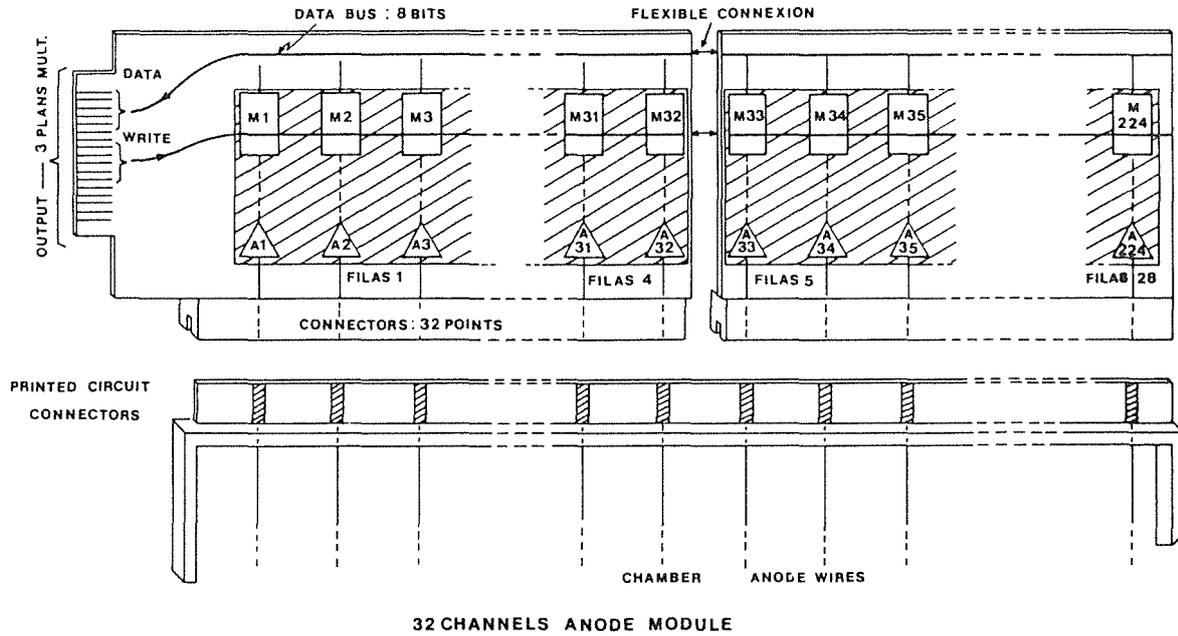


Abb. 4.5 : Anordnung der Modulträger-Platinen.

Firma EFCIS (Frankreich) hergestellte Spezialplatinen, die im wesentlichen eine hochintegrierte Schaltung und zwei Potentiometer enthalten (siehe Abb. 4.6).

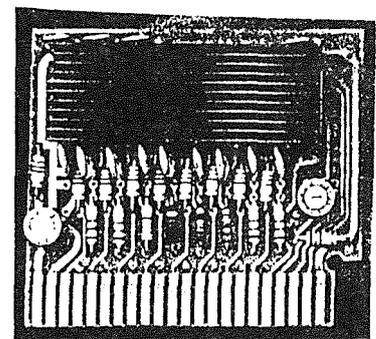
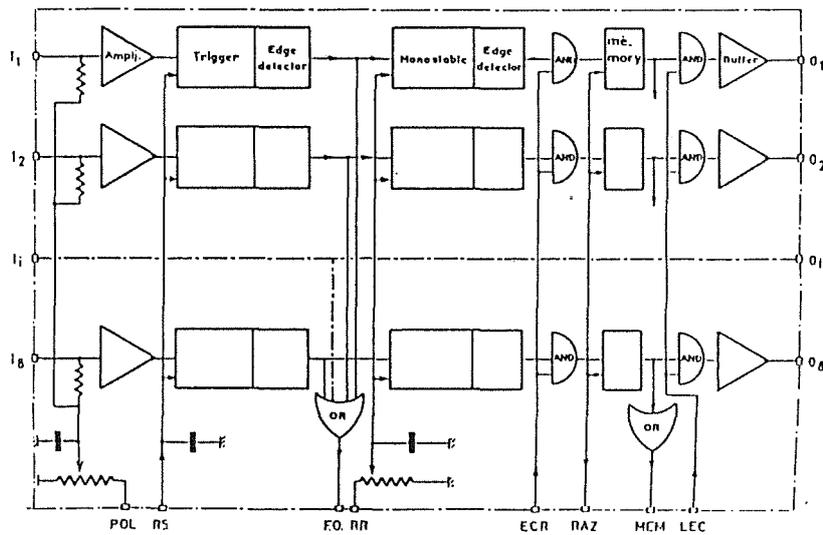


Abb. 4.6 : Schematischer Aufbau und Photo eines FILAS-Moduls.

Jeder der 8 FILAS-Kanäle enthält einen Vorverstärker mit einer Empfindlichkeit (V_{pol}) bis hinab zu 3 mV an 3 k Ω . Dies entspricht einer Ladung von 10^{-13} C. Die Empfindlichkeit lässt sich für die 8 Kanäle des FILAS gemeinsam über ein

Potentiometer auf der Platine regeln, bzw. für alle FILAS von 8 Kammern gemeinsam über die Spannung V_{pol} am Versorgungsgerät.

Die Vorverstärker sind gegen Hochspannungs-Überschläge geschützt. An den Vorverstärkerausgang schließt sich jeweils ein Diskriminator mit Impulsformer an. Für die Diskriminatoren aller FILAS gemeinsam läßt sich eine Schwelle und damit auch die Impulsform der Signale einstellen. Signale, die die Schwelle dieser Anordnung überschritten haben, werden durchgelassen und verzweigt. Ein Signalzweig wird mit allen anderen Diskriminatorausgängen des FILAS zusammengeführt (F.OR-Signal) und über den FILAS-Stecksockel mit den F.OR-Signalen der anderen FILAS der Modulträgerplatine zusammen auf einen Stecker geleitet.

Der zweite Signalzweig geht in ein Verzögerungsglied, das das Eingangssignal um 300 - 800 ns (Nominalwert; jedoch Toleranzen) verzögern kann. Die Verzögerung läßt sich durch ein weiteres Potentiometer für alle 8 Kanäle des FILAS gemeinsam einstellen. Zusätzlich besteht auch hier die Möglichkeit alle FILAS von acht Kammern gemeinsam über eine regelbare Spannung an dem Versorgungsgerät zu verzögern. Das so verzögerte Signal trifft dann auf eine Koinzidenzbedingung, bei deren Erfüllung ein 1-Bit-Speicher (Flipflop) gesetzt wird. Die Koinzidenz ist erfüllt, wenn zur Zeit, in der das Signal eintrifft, ein "Write-Gate" (Triggersignal) anliegt. Bei Nichterfüllung einer eventuellen weiteren Triggerbedingung (z.B. Schauertrigger) können alle Speicher einer Kammer durch ein Rücksetzsignal gemeinsam gelöscht werden.

Der Ausgang des 1-Bit-Speichers ist wiederum verzweigt. Der erste Signalzweig wird mit allen anderen Ausgängen des FILAS und anschließend mit denen der anderen FILAS über Leiterbahnen auf den Modulträgerplatten zusammengeführt. Dieses Memory-Or-Signal (M.OR) zeigt an, daß eine Kammer abholbereite Daten hat. Wird daraufhin ein Lesesignal zu den FILAS dieser Kammer geschickt, so erzeugt dieses bei den Signalausgängen am zweiten Signalzweig der Speicherausgänge, bei denen der Speicher gesetzt war, eine Koinzidenz. Bei anliegendem Koinzidenzsignal, gibt ein Leitungstreiber ein Signal auf den Ausgang des FILAS. Die jeweils 8 Signalausgänge eines FILAS werden über den Stecksockel des FILAS auf einen 8-Kanal-Datenbus entlang der Längsseite der Modulträgerplatten geführt. Parallel dazu laufen auch die M.OR-, Write- und Read-Signale sowie verschiedene Versorgungsspannungen. Es handelt sich auch hier jeweils um gedruckte Leiterbahnen.

In Abb. 4.7 sind ein Kanal der FILAS-Module und die zugehörigen Signalformen (zeitlicher Verlauf) dargestellt. Jedes FILAS-Modul ist im Dialog mit der

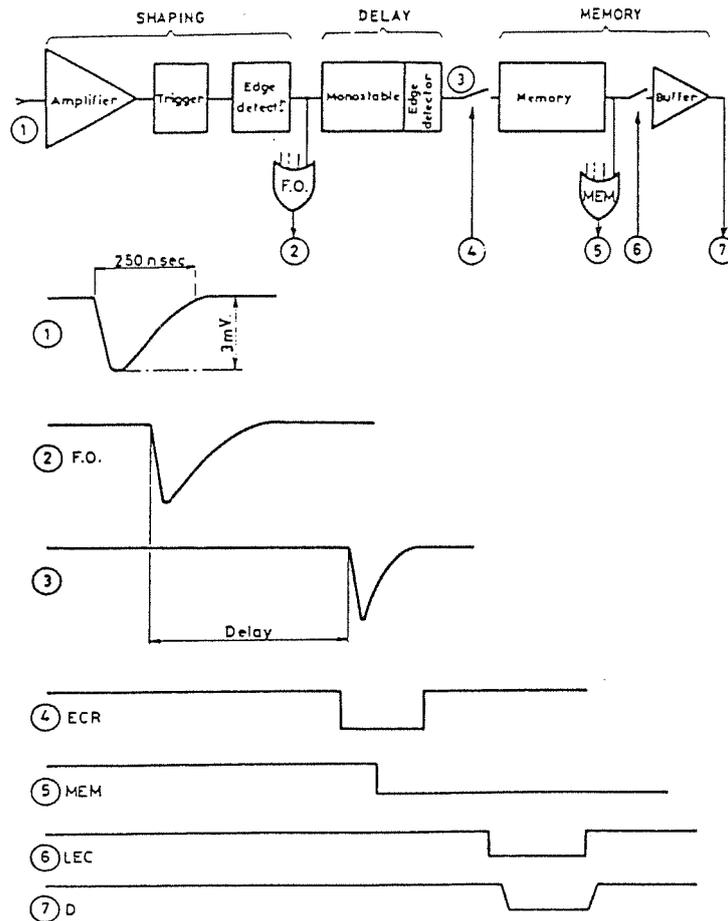


Abb. 4.7 : Aufbau eines Filas-Kanals und zugehörige Signalformen.

Elektronik außerhalb der Kammer : Das F.OR-Signal (Fast OR) dient zu einem sehr frühen Zeitpunkt als Informationsquelle, daß ein Ereignis in den Kammern stattgefunden hat. Da für jedes auszuwertende Ereignis mindestens ein Anodendraht ein Signal oberhalb der FILAS-Schwellen haben muß (Kammereinstellung; siehe Kap. 5.2 und 8), genügt es, alle Anoden-F.OR-Signale einer Kammer zu verknüpfen, so daß jede Kammer sehr schnell anzeigen kann, ob ein Ereignis stattgefunden hat. Die F.OR-Signale von jeweils 8 Kammern werden auf die Eingänge einer Koinzidenz-Einheit (Filtrages Memoires), die für alle 8 Kanäle ein gemeinsames Koinzidenz-Gate besitzt, gegeben. Das Koinzidenz-Gate wird von einem Trigger geliefert. Im Testaufbau ist das Triggersignal eine Koinzidenz zweier Ebenen von Szintillatorsegmenten (siehe Kap. 6).

Ist an der Einheit 'Filtrages Memoires' die Koinzidenzbedingung für einen Kanal gegeben, so gelangt das Ausgangssignal dieser Einheit zu einer weiteren Einheit (Pre-Trigger). Diese (ebenfalls 8 Kanäle) formt die Signale in Dauer und Amplitude (regelbar), so daß die passenden Gate-Signale (WRITE) an die

Kammer zurückgegeben werden können (→ Einschreiben der Signale in die FILAS-Speicher). Sind die Daten erst einmal abgespeichert, können sich weitere Triggerbedingungen anschließen. Der Hardware steht für diese zweite Entscheidung beliebig viel Zeit zur Verfügung (jedoch ist die Totzeit zu beachten), da die in den Speicher geschriebenen Daten, beliebig lange dort verweilen können.

Im hier beschriebenen Testaufbau wird diese Zeit bei Messungen genutzt, um zu überprüfen, ob bestimmte Triggersegment-Kombinationen erfüllt sind. Fällt die Entscheidung, daß die Daten nicht ausgelesen werden sollen, so werden die FILAS-Speicher durch ein Rücksetzsignal wieder gelöscht. Im anderen Falle wird vom Meßrechner (PDP 11 - Starburst) ein Lesebefehl an die CAMAC-Einheit 'Codeur Letis' (Auslesemodul) gegeben. Diese Einheit beginnt daraufhin die Kammern auszulesen.

Der Codeur Letis ist mit einem Multiplexer mit 8 Kammereingängen verbunden. Die Abarbeitung einer Kammer erfolgt nur, wenn hier ein M.OR-Signal (Daten sind vorhanden) der jeweiligen Kammer vorliegt. Die Reihenfolge der Abarbeitung von Kammern richtet sich nach der Reihenfolge, nach welcher die Kammer-Stecker in die 8 Eingänge des Multiplexers gesteckt sind. Falls also alle 8 Kammern ein M.OR-Signal haben, wird zunächst Eingangskanal 1 abgearbeitet und daraufhin dessen Priorität zurückgesetzt. Damit wird mit der Abarbeitung von Eingangskanal 2 begonnen, usw. bis schließlich alle Kanäle ausgelesen sind und damit auch keine M.OR-Signale mehr vorliegen.

Jede Kammer besitzt einen weiteren Multiplexer, den Ebenenmultiplexer. Er arbeitet die drei Ebenen einer Kammer nach festgelegter Reihenfolge ab. Dabei ist zu beachten, daß sich die Kathodenebenen aus geometrischen Gründen jeweils in zwei Halbebenen (gegenüberliegende Kammerseiten) unterteilen, so daß eigentlich 5 Ebenen abgearbeitet werden müssen (siehe Abb. 4.3). Die Kanäle einer Ebene sind nach zunehmender Entfernung vom Ebenenmultiplexer (vordere Kammerecke; Ursprung des Koordinatensystems einer Kammer) aufsteigend nummeriert. Die Abarbeitung der Kanäle erfolgt in dieser Reihenfolge. Zunächst wird die obere Kathode, dann die untere Kathode und schließlich die Anode abgearbeitet, bevor die Kammer ihr M.OR-Signal zurücksetzt.

Es werden jeweils alle 8 Kanäle eines FILAS gleichzeitig eingelesen. Die Anwahl der FILAS einer Halbebene erfolgt über ein Steuermodul, das sich auf der jeweils ersten Modulträgerplatine befindet und durch einen IC auf den Modulträgerplatten. Die eigentliche Steuerung in den Halbebenen übernimmt jedoch der Codeur Letis (Encodermodul). Er sendet zu jedem Lesevorgang eine Adresse aus und zählt

diese anschließend um eins hoch. Diese Adresse bestimmt dann, welcher FILAS ausgelesen wird. Der Codeur erhält bei jedem Lesevorgang parallel die Daten eines FILAS (8 bit), die FILAS-Nummer (6 bit), die Ebenen-Nummer (2 bit) und die Kammer-Nummer (5 bit) der jeweiligen Adresse. In Abb. 4.8 ist das Auslesesystem schematisch dargestellt.

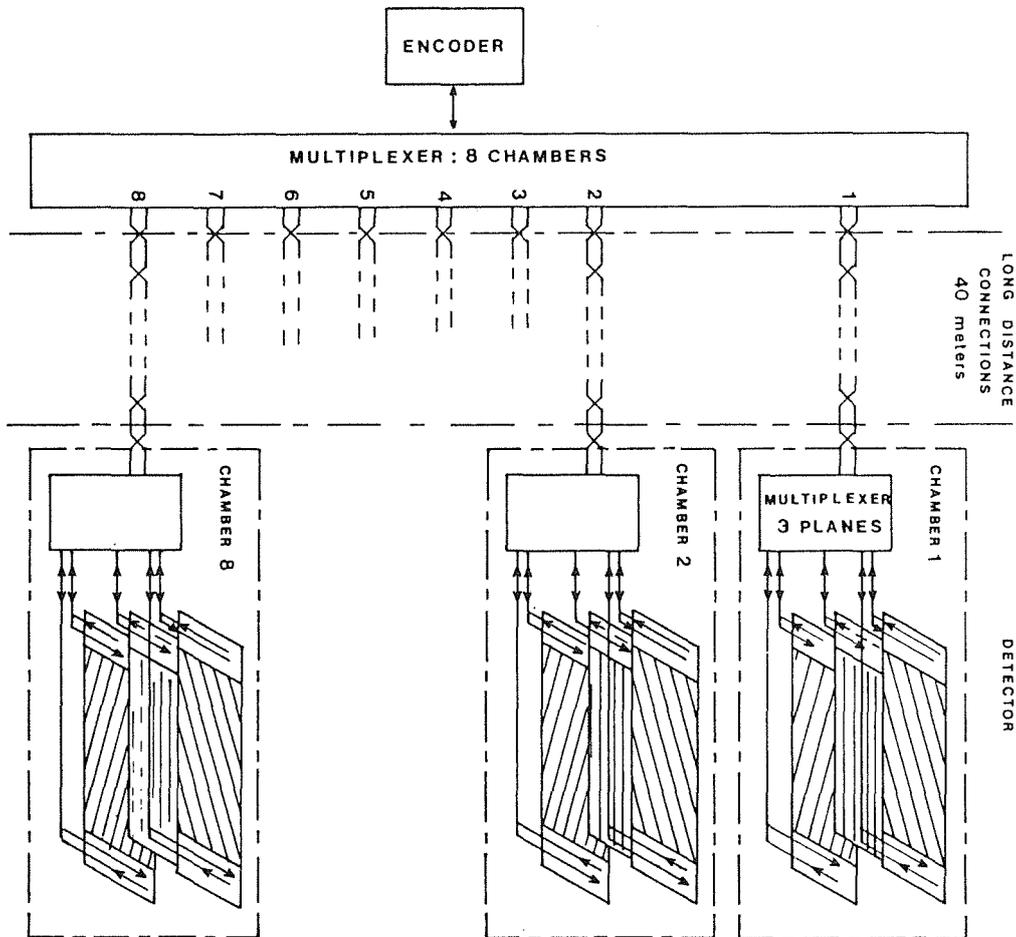


Abb. 4.8: Schematischer Aufbau des Kammer-Auslesesystems.

Aus den eingelesenen Daten bildet der Codeur-Letis nun jeweils 16-bit- Worte folgenden Formates (Abb. 4.9):

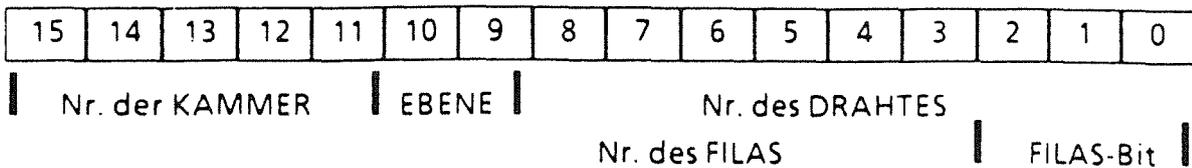


Abb. 4.9: 16 - Bit - Wortformat des Encoders Codeur Letis.

Diese Datenworte werden in einem FIFO-Puffer zwischengespeichert, bis dieser gefüllt (64 Worte dieser Form) bzw. der Auslesevorgang beendet ist. Dem Rechner wird dabei der jeweilige Status der Auslese über den CAMAC-Bus mitgeteilt. Zusätzlich zeigt eine Reihe von Leuchtdioden auf dem Codeur Letis den jeweiligen Status an (siehe Anhang).

Der schematische Ablauf von der Entstehung des Signals bis zur Beendigung der Auslese ist auf der nächsten Seite in einem Flußdiagramm (Abb. 4.10) dargestellt.

Die Inbetriebnahme der Auslese-Elektronik wurde durch Probleme mit Wackelkontakten und schlechten Steckverbindungen erschwert. Die Fehlersuche bewirkte oft das Auftreten neuer Wackelkontakte, so daß kein systematisches Vorgehen mehr möglich war. Deshalb wurde die gesamte Kammerelektronik (Modulträgerplatinen, FILAS) in Ultraschallbädern gereinigt. Die Grobreinigung erfolgte in einer Lauge. Daran schlossen sich Bäder in hochdestilliertem Wasser und Alkohol an. Danach waren alle Kontakte gesäubert und Kriechströme über Schmutzschichten ausgeschlossen. Die als Fehlerquelle entdeckten großen Lemostecker (Wackelkontakte) wurden sämtlich gegen BNC-Verbindungen ausgetauscht.

4.2 Test und Abgleich

Während der Inbetriebnahme der Auslese-Elektronik wurden permanent neue Module eingesetzt und getestet, Testmöglichkeiten für eventuelle Fehlerquellen erarbeitet und Programme hierfür und für die Auslese entwickelt. Die verschiedenen Programme, die sich mit zunehmendem Verständnis der Elektronik als sinnvoll herausstellten, wurden in einem modular aufgebauten Programm zusammengefaßt.

Für jeden Kanal der Kammerelektronik besteht die Möglichkeit Testpuls-Signale einzukoppeln. Bei den Kathoden werden die Signale vor den Vorverstärkern und bei den Anoden direkt vor den FILAS-Modulen eingekoppelt. Über den von der Kammer her kommenden Signalleitungen verlaufen für Anoden und Kathoden unterschiedlich breite Leiterbahnen. Dies bewirkt ein kapazitives Einkoppeln (sehr kleine Kapazität), eines durch einen Testpulsgenerator erzeugten und auf die Leiterbahnen geführten Signals. Das Einkoppeln ist somit nur für alle angeschlossenen Kanäle einer Halbebene gemeinsam möglich.

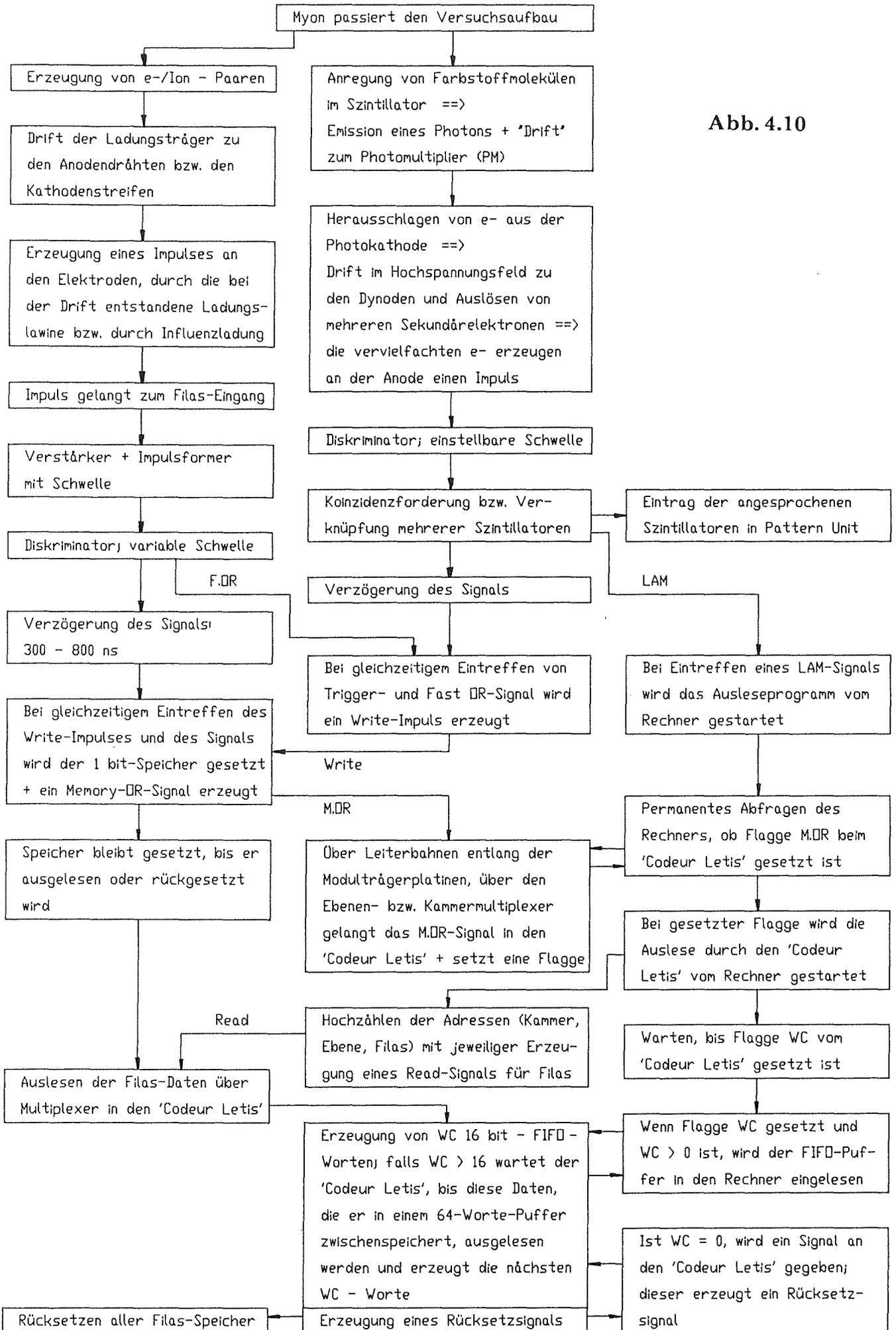


Abb. 4.10

Zunächst wurde das zeitliche Zusammenspiel und die Dauer bzw. Amplituden aller Signale Punkt für Punkt entlang der beschriebenen Elektronik überprüft und eingestellt. Am geeignetsten erwies sich hierbei der Einsatz eines Speicheroszillographen, da die tatsächlichen Signale nicht häufig und regelmäßig genug auftreten, um mit einem herkömmlichen Oszillographen zu arbeiten und die Testpuls-Signale in ihrer Form nicht unbedingt den tatsächlichen Signalen entsprechen. Probleme ergaben sich vor allem mit den F.OR-Signalen.

Nachdem ein erster prinzipieller Abgleich der Elektronik erfolgt war, galt es Testpulse auf alle Kammerkanäle zu geben und diese anschließend auszulesen. Es mußte allerdings festgestellt werden, daß bei weitem nicht alle Kanäle ein Ereignis registriert hatten. Falsch eingestellte Diskriminatorschwellen bzw. Verzögerungszeiten an den FILAS, defekte FILAS bzw FILAS-Kanäle, defekte Vorverstärker und Kondensatoren auf den Kathodenboards und defekte Steuerelektronikmodule ("Cartes d'oreilles") auf den Modulträgerplatinen, sowie Störungen auf dem Ebenenmultiplexer wurden als mögliche Fehlerquellen vermutet. Leider erwiesen sich alle Vermutungen als richtig. Das Zusammenwirken mehrerer Fehlerquellen an manchen Stellen der Kammerelektronik erschwerte die Beseitigung jedoch sehr und machte sie sehr zeitaufwendig.

Um die Verzögerungszeiten und Schwellen der FILAS an den jeweiligen Potentiometern besser einstellen zu können empfahl es sich ein weiteres Modul (CAF 20), das speziell dem Abgleich der FILAS dient, zu erproben. Der CAF 20 sendet ständig Testpulse (regelbare Amplitude) zu den Kammern und zeitversetzt (regelbarer Verzögerung) wird dazu ein WRITE- Signal in die Kammer geschickt. Daraufhin wird jeweils ein ebenfalls zeitverzögerter Lesebefehl (READ) an eine einstellbare FILAS-Adresse geschickt. Der CAF 20 verschiebt sukzessiv ein 60 ns langes Write-Gate um 5 ns mehr gegenüber dem Testpulssignal bis hin zur eingestellten Verzögerung und wieder zurück. Damit läßt sich die Koinzidenz der diskriminierten Signale mit dem WRITE-Gate überwachen.

Der CAF 20 besitzt zwei Reihen von Leuchtdioden, die diese Koinzidenz in 5 ns-Schritten über einen Bereich von 250 ns darstellen können. Bei Koinzidenz eines oder mehrerer Kanäle eines FILAS mit dem WRITE-Gate leuchtet eine rote Leuchtdiode in der ersten Reihe an den Verzögerungspositionen auf, an denen die Koinzidenz gegeben ist. Für den zeitlichen Bereich, in dem alle 8 Kanäle des FILAS in Koinzidenz mit dem WRITE-Signal sind, leuchten nur in der zweiten Reihe grüne Leuchtdioden auf. Außerdem wird angezeigt, welche Kanäle überhaupt Koinzidenzen im jeweils dargestellten zeitlichen Bereich besitzen. Die

kleinste/größte rot angezeigte Verzögerungszeit entspricht somit der kleinst / größt-möglichen Verzögerung, die am schnellsten / langsamsten FILAS-Kanal zur Koinzidenz führt.

Man besitzt somit ein geeignetes Hilfsmittel, um sowohl die Schwellen (alle 8 Kanäle müssen gleichzeitig Koinzidenzen liefern), als auch die Verzögerungszeiten (die Koinzidenz aller 8 Kanäle sollte für alle FILAS gleich verzögert sein) geeignet abzugleichen. Auch der Defekt von FILAS-Kanälen oder Bauteilen auf der Modulträgerplatine kann festgestellt werden, falls für keine Schwellen- bzw. Verzögerungseinstellung der jeweilige Kanal in Koinzidenz mit dem WRITE-Gate gebracht werden kann.

In diesem Falle ist systematisch vorzugehen. Zunächst sollte überprüft werden, ob der Defekt auf dem FILAS liegt, indem dieser gegen einen funktionsfähigen ausgetauscht wird. Ist dies nicht der Fall, liegt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit der Fehler an den Bauteilen der Modulträgerplatine für diesen Kanal. Es sollten deshalb zunächst die jeweiligen Signal- und Versorgungsleiterbahnen auf Beschädigungen untersucht werden. Ist kein Fehler zu sehen, sollten die Elektrolytkondensatoren für den jeweiligen Kanal bzw. bei keinem Erfolg der jeweilige Vorverstärker ausgetauscht werden. Sollte weiterhin ein Defekt vorhanden sein, kommt als nächstes das IC auf der Modulträgerplatine in Frage.

Alle anderen Fehlerquellen sollten sich systematisch auf die gesamte Halbebene auswirken. Das Stecken einer falschen 'Carte d'oreille' könnte z.B. die Anwahlreihenfolge der FILAS gegenüber der eingestellten verändern. Bei den cartes d'oreilles handelt es sich um drei Steckplatinen, die sich auf der jeweils ersten Modulträgerplatine befinden. Sie dienen der Signalanpassung bzw. der Steuerung der Auslese. Der Defekt von Dioden auf der Modulkarte 'transfert des niveaux' (Leitungstreiber) bewirkt z.B. den Ausfall einer gewissen Kanal-Nummer bei jedem FILAS der Halbebene. Ein defekter Transistor bzw. ein defektes Steckkärtchen-IC auf der ersten Modulträgerplatine bewirkt den Ausfall der gesamten Halbebene.

Hilft ein Nachmessen der Versorgungsspannungen (z.B. defekter Elektrolytkondensator) und der Testpulssignale immer noch nicht bei der Fehlerfindung, kommt nur noch eine Unterbrechung des Datenbuses (falsch gesteckte Kabelbrücke, Kabelanschluß bzw. Abschlußwiderstand) in Frage. Im Falle, daß die Auslese mit CAF 20 funktioniert, die rechnergesteuerte Auslese jedoch nicht, ist ein defektes Datenkabel oder ein defekter Ebenenmultiplexer mögliche Ursache. Aber auch eine Carte d'oreille bzw. ein FILAS, der sein M.OR-Signal nicht zurücksetzt, kommen in Frage.

Trotz der vielen aufgetretenen Fehler hat sich herausgestellt, daß die Elektronik nach Beseitigung aller Defekte im Dauerbetrieb recht zuverlässig arbeitet. Problematisch ist jedoch beim Abgleich der FILAS, daß die Verzögerungszeit temperaturabhängig ist ($-3 \text{ ns}/^\circ\text{C}$). Während die Temperatur der FILAS im Normalbetrieb durch das Anblasen der aufgeklebten Kühlkörper durch ein Lüftungsleitungssystem (einschließlich Gebläse) relativ konstant ist (siehe Kap.8), steigt sie durch das ständige Aussenden von Test- und Lesesignalen beim Abgleich der Elektronik anfangs stark an. Deshalb ist es notwendig, vor Beginn mit dem Abgleich, alle FILAS "warmlaufen" zu lassen. Damit wird verhindert, daß die FILAS die zuerst eingestellt werden, kleinere Verzögerungszeiten aufweisen, als die später eingestellten Module.

Wichtig bei der Inbetriebnahme einer Kammer ist, daß beim ersten Anlegen der Hochspannung an eine noch nicht getestete Kammer die Kammerelektronik abgezogen wird, bzw. beim Wiederhochfahren der Hochspannungen eine Strombegrenzung eingestellt ist und die Hochspannung nur sehr langsam erhöht wird (es dürfen keine großen Ströme fließen). Dadurch wird vermieden, daß die Kammerelektronik durch Hochspannungs-Überschläge beschädigt wird. Nach dem ersten Abgleich der Kammern konnte damit begonnen werden, tatsächliche Ereignisse zu messen und diese zu rekonstruieren (siehe Kap. 7 und 8). Dennoch ist es notwendig die Elektronik zwischen den Messungen ständig zu kontrollieren. Hierzu dient das bereits angesprochene modulare Programm, das folgende Optionen besitzt:

- Erzeugen eines Einzel-Testpulses
- Lesen des FIFO-Puffers des Codeur Letis (max. 64 Worte)
- Gesamtauslese einer Kammer mit Kurzstatistik
- 50-maliges Erzeugen von Testpuls und anschließende Gesamtauslese. Die Ansprechhäufigkeiten der Drähte/Streifen werden als Histogramm dargestellt.
- Fortwährendes Erzeugen von Testpuls und Gesamtauslese (wichtig für die Arbeit mit dem Oszilloskop).
- Rücksetzen der Auslese-Elektronik

Im Auslese-Betrieb der Kammern für kosmische Strahlung erwies es sich bald als sinnvoll, zwei weitere rechnergesteuerte CAMAC-Module einzusetzen. Eine 'Pattern-Unit' dient zur Erkennung des Triggermusters, indem die diskriminierten Signale der 12 Triggersegmente (siehe Abb. 6.1 und 6.2) in ein

Register eingetragen werden, sofern die Koinzidenz der oberen und unteren Triggerebene als Gate-Signal an dieser Einheit anliegt. Das Register kann anschliessend vom Rechner ausgelesen und zurückgesetzt werden. Somit ist es möglich, bei der Datenaufnahme nur bestimmte Triggermuster zuzulassen, also verschiedene Triggerbedingungen optional anzubieten.

Das Modul 'Porte Rapide' hat die Aufgabe, nur dann die Triggerung der Kammern zuzulassen (WRITE-Signal), wenn diese meßbereit sind. Deshalb ist es möglich vom Rechner aus ein Gate freizuschalten und zu verriegeln. Während dem Einlesevorgang des Codeur Letis muß die Triggerung unterbunden werden. Zunächst wurde eine eigene Verriegelungslogik entwickelt, die jedoch gelegentlich ungewollte Triggerung zuließ. Deshalb wurde das von Saclay verwendete Modul (Porte Rapide) zu günstigem Preis nachbestellt. Es enthält eine dreifache Verriegelung und weitere CAMAC-Funktionen. Beim Einsatz dieses Modules ist bisher noch keine Fehltriggerung erfolgt.

4.3 Modifikationen für den Einsatz bei KASCADE

Im KASCADE-Projekt ist der Einsatz eines Transputernetzes für den gesamten Detektor vorgesehen. Diese Transputer sollen in VME-Crates als Meßrechner eingesetzt werden. Deshalb ist es notwendig die Meßdaten der Kammern, die bisher von einem CAMAC-Modul ausgelesen wurden, auf den VME-Bus zu bekommen. Es wurden hierfür zwei Möglichkeiten in Erwägung gezogen:

- a) Die Auslese-Elektronik bleibt wie bisher in CAMAC. Der VME-Rechner kommuniziert mit dem CAMAC-Rechner über eine Branch-Verbindung über ein zusätzliches Controller-Modul im VME-Crate.
- b) Die Encoder-Module (Codeur Letis) werden für den KASCADE Einsatz umkonstruiert, so daß sie in einem VME-Crate ausgelesen werden können.

Möglichkeit a) hat den Vorteil, daß keine Neuentwicklung notwendig ist und die bereits geschriebenen Meßprogramme verwendet werden können. Nachteil dieser Lösung ist, daß man mit der Auslesegeschwindigkeit an die CAMAC-Geschwindigkeit gebunden bleibt, sowie daß die Kommunikation der beiden Systeme nicht erprobt ist.

Möglichkeit b) bietet mehrere Vorteile: Man kann die Schnelligkeit des VME-Systems nutzen. Bereits erkannte Schwachpunkte des bisherigen Auslesesystems

können bei der Neuentwicklung beseitigt werden. Die Auslese-Software braucht nur auf einem System zu laufen (weniger Fehlerquellen).

Da erkannt wurde (Testphase der Kammern), daß beim Ausfall einer Kammer die Auslese für alle 8 Kammern des Codeur Letis blockiert wird, wurde Möglichkeit b) gewählt. In Zusammenarbeit mit der HDI (Hauptabteilung Datenverarbeitung und Instrumentierung, KfK) wurde ein neues VME-Auslese-Konzept entwickelt. Die Entwicklung des HDI ist ein Modul, das für jeweils zwei Kammern zuständig ist. Diese beiden Kammern können unabhängig voneinander ausgelesen werden. Hierdurch ist sichergestellt, daß bei Störungen in einer Kammer die übrigen Kammern unbeeinflußt weiter ausgelesen werden können. Somit benötigt man 16 dieser Module, die in einem VME-Crate Platz finden. Man spart mit dieser Lösung die 8-Kammer-Multiplexer völlig ein, die bereits alleine mehr als ein CAMAC-Crate belegen, und hat eine weitere Fehlerquelle umgangen. Der Prototyp der HDI-Entwicklung für das neue Auslese-Modul hat bereits im Mai 1990 in einem ersten Test an den Kammern seine Funktionstüchtigkeit bewiesen.

Eine dritte Möglichkeit wurde zu spät erkannt. Prinzipiell wäre auch der Einsatz eines Billig-Transputers für jede Kammer möglich gewesen. Diese Transputer hätten durch eine netzförmige Link-Struktur mit einem VME-Transputer verbunden werden können, der alle Daten zusammenfassen und weiterleiten würde. Die Kammer-Transputer hätten so unabhängig von einem Crate bereits erste Vorauswertungen vornehmen können. Die Datenübertragung wäre nicht mehr an den VME-Bus gebunden gewesen. Allerdings hätte dieses System wohl mehr Entwicklungsarbeit benötigt.

Weiterhin ist auch im KASCADE-Einsatz eine geeignete Triggerung der Kammern notwendig. Es wurde schon sehr früh erkannt, daß im KASCADE-Betrieb etwa 500 ns nach dem Eintreffen eines möglicherweise interessanten Ereignisses ein erstes Triggersignal für die Kammern verfügbar sein muß. Eine Selbsttriggerung der Kammern (F.OR Signal erzeugt direkt das WRITE-Signal) würde nicht zuletzt wegen des γ -Untergrundes (siehe Kap. 7), der leicht radioaktiven Fe-Platten und des Betons des Kalorimeters, zu sehr hohen Totzeiten der Kammern führen, so daß sie bei interessanten Ereignissen eventuell nicht meßbereit wären. Es wurde vorgeschlagen, eine Triggerschicht aus Szintillatoren im Kalorimeter zu installieren, die Myonen identifizieren kann. Eine Schicht geeigneter Dicke (≈ 3 cm), die Koinzidenzen zweier dünner Schichten oder die Koinzidenz mehrerer Segmente einer Szintillatorebene wären dafür geeignet. Die Triggerung durch die um den Zentraldetektor liegenden Cluster über das Transputer-Netz käme für die Kammern zu spät (> 500 ns). Das

Legen von Direktverbindungen zu diesen Clustern würde wohl gerade noch zeitlich richtiges Triggern ermöglichen. Allerdings würde dadurch nicht bei jedem Schauer die Triggerung gewährleistet, da bei geringen Teilchendichten (Energie des Primärteilchens $< 10^{15}$ eV; Schauerkernel am Rande des Arrays) diese Cluster nicht unbedingt ansprechen.

In jedem Fall ist jedoch für den KASCADE-Einsatz die Entwicklung eines Triggermoduls notwendig, das während der Auslese weitere Triggerung unterbindet (wie 'Porte Rapide') und nach erfolgter Triggerung dem Ereignis einen Zeitstempel oder Namen liefert (zusätzliches Register), um die Verknüpfung mit anderen Schauerdaten im Zentralrechner zu ermöglichen. Die endgültige Abspeicherung der Kammer-Daten sollte nach der erfolgten Zwischenspeicherung (im Transputer) erst dann erfolgen, wenn das jeweilige Ereignis vom Transputernetzwerk (Array) als Schauer des interessierenden Energiebereiches identifiziert wurde. Im anderen Falle sollten die Daten verworfen und die Kammern zurückgesetzt werden.

Die Hochspannungsversorgung der Kammern hat sich zwar als zuverlässig herausgestellt, allerdings ist keine Steuerung vom Rechner her möglich. Bei Verwendung eines modular aufgebauten Hochspannungs-Systems (z.B. Firma C.A.E.N.; wird bereits von mehreren KASCADE-Gruppen verwendet) wäre die Kontrolle und Steuerung der Kammern auch von VME aus möglich. Die Kammerbetriebsparameter könnten in die Auswertung mit einfließen, bzw. korrigiert werden. Das bisher verwendete Lüftungssystem ist zwar bei weitem nicht optimal, es erfüllt jedoch seine Funktion. Besser wäre ein Lüftungssystem, das die Betriebstemperatur der Kammerelektronik regeln kann. Daß die geplante Klimaanlage im Keller des Kalorimeters diese Aufgabe erfüllen kann, muß angezweifelt werden, da Messungen auf den FILAS-Modulen bei abgeschaltetem Gebläse Temperaturen über $+60$ °C anzeigten.

Auch für die gut funktionierenden Stromversorgungsgeräte wurden Verbesserungsvorschläge gemacht. Durch Verwendung von getakteten Netzgeräten könnte man den Stromverbrauch der Anordnung drastisch senken (≈ 50 % Energie-Einsparung). Damit hätte sich die Anschaffung solcher Geräte schon nach wenigen Jahren amortisiert. Positiv wäre auch die dadurch reduzierte Wärmeentwicklung (weniger Verluste, die Joule'sche Wärme erzeugen), um das Kalorimeter (TMS-Kammern sind temperaturempfindlich) nicht unnötig aufzuheizen.

Sehr wichtig im KASCADE-Projekt ist, für alle Module der Kammerelektronik Ersatz zu besitzen (FILAS, Modulträgerplatten einschließlich Steckkärtchen,

Vorversärker). Von CEN/Saclay wurden 2200 Reserve-FILAS-Module zu sehr günstigem Preis bezogen. Diese Module waren jedoch noch ungetestet. So wurde ein Testaufbau zum Test dieser Module entwickelt. Dieser Aufbau enthält noch weitere Module, die einen Test der übrigen Kammerelektronik ebenfalls zulassen. Der Aufbau ist im wesentlichen in einem fahrbaren Elektronik-Rack untergebracht. Vorgesehen ist, diesen mobilen Testaufbau zusammen mit einigen Austauschmodulen zu verwenden, um beim KASCADE-Einsatz möglichst schnell eventuell auftretende Defekte beseitigen zu können. Das Auftreten von Fehlern könnte vom jeweiligen Transputer erkannt und der Rechnerzentrale weitergemeldet werden. Die Funktionstüchtigkeit dieses Testaufbaus wurde bereits mehrfach unter Beweis gestellt: Der Test und Abgleich der Reserve-FILAS erfolgte an diesem Testaufbau. Weiterhin war der Testaufbau bei der Reparatur defekter Elektronikmodule und -platinen eine große Hilfe. Für den Test der 'cartes d'oreilles' sollte jedoch Software geschrieben werden, um diese Module rechnergesteuert und damit zeitsparender testen zu können.

5. Beschreibung des aufgebauten Gasversorgungssystems

5.1 Gasversorgung

Mit den Kammern wurde auch ein Gasversorgungssystem von CEN Saclay übernommen. Aufgrund erhöhter Sicherheitsauflagen, geringerer Durchflußmengen (4 anstatt 32 Kammern im Betrieb) und teilweise fehlender Verbindungsstecker mußte es jedoch verändert und ausgebaut werden.

Wie bereits erwähnt (vgl. Kap. 4) ist die Gasmischung ein wesentlicher Betriebsparameter für Vieldraht-Proportionalkammern. Nur ein gleichmäßiges Spülen der Kammern mit konstanter Gasmischung gewährleistet konstante Kammereigenschaften über längere Zeiträume. Um die Kammern in einem optimalen Arbeitsbereich betreiben zu können wird ein Gemisch aus mit Isopropanoldampf benetztem Argon (67 %) und Isobutan (33 %) verwendet. Beide Gase werden jeweils über mehrere manuelle Druckregler und ein ansteuerbares Absperr-Ventil (Relais) in getrennten Leitungen der Gasmischeinheit zugeführt. Das Isobutan muß durch einen wasserabsorbierenden Filter strömen, um den schädlichen Feuchtigkeitsgehalt in der Kammer so gering wie möglich zu halten. Das Argon strömt durch einen Isopropanol-Tank und wird dadurch mit dem

Alkoholdampf gemischt (siehe Abb. 5.1). Um konstante Beimischungen zu gewährleisten, wird das Isopropanol ständig auf +15 °C gekühlt.

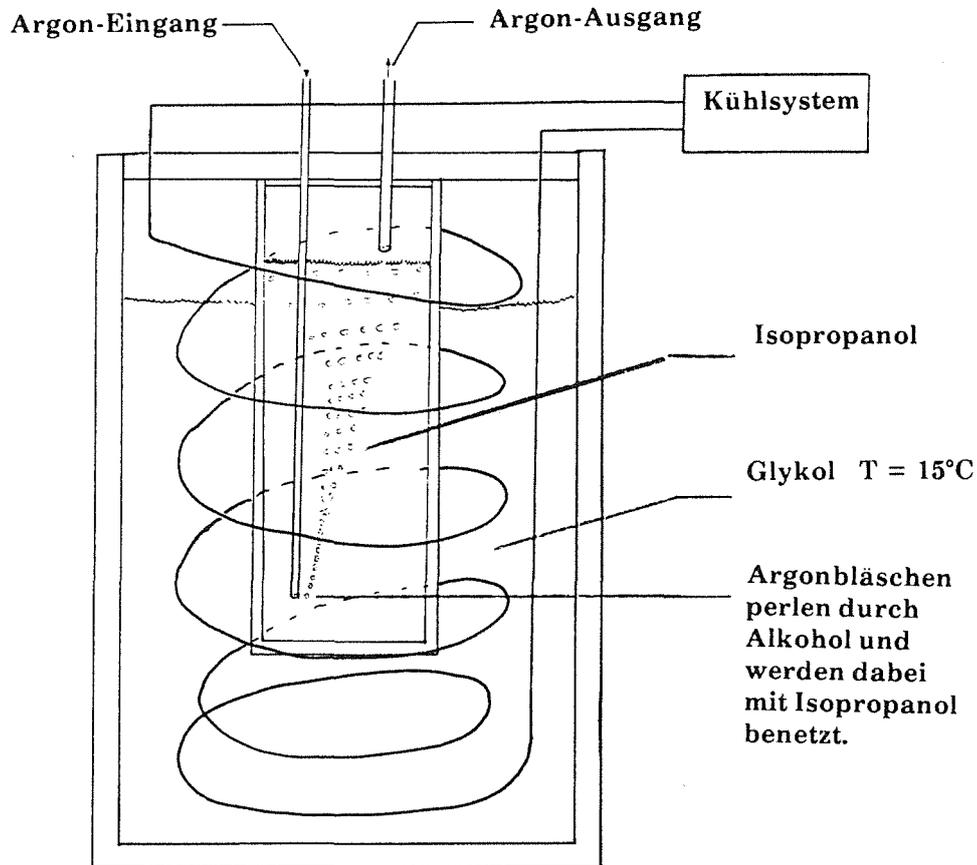


Abb. 5.1 : Argon-Isopropanol-Mischsystem.

Das Mischen von Argon mit Isobutan übernimmt eine Regeleinheit. Diese Einheit mußte für den Testaufbau neu zusammengestellt werden, da durch die geringeren Durchflusssmengen die alte Mischeinheit nicht betrieben werden konnte. Vor beide Eingänge der Regeleinheit wurde jeweils ein Filter (auf das jeweilige Gas abgestimmt) montiert, um die Meßinstrumente vor eventuellen Verunreinigungen zu schützen. Darauf folgt beim Argonzweig ein Durchflußmeßinstrument, das seine Meßsignale an eine Steuereinheit weitermeldet. Im Isobutananzweig befindet sich ein ansteuerbarer Durchflußregler und ebenfalls ein Durchflußmeßinstrument. Durch die Steuereinheit kann der Isobutanfluß auf Bruchteile des Argondurchflusses geregelt werden. Dieser Bruchteil (in diesem Fall 50 %) kann durch eine Potentiometereinstellung festgelegt werden. Die Steuereinheit regelt den Isobutanfluß also jeweils auf den

momentanen Argondurchfluß. Um korrektes Arbeiten dieser Anordnung zu gewährleisten, ist darauf zu achten, daß an beiden Eingängen jeweils ein Druck von etwa 500 mbar über Atmosphärendruck herrscht.

Das so erhaltene Gasgemisch wird auf ein sehr trickreich aufgebautes Verteilersystem geführt (siehe Abb. 5.2), welches für jede Kammer einen

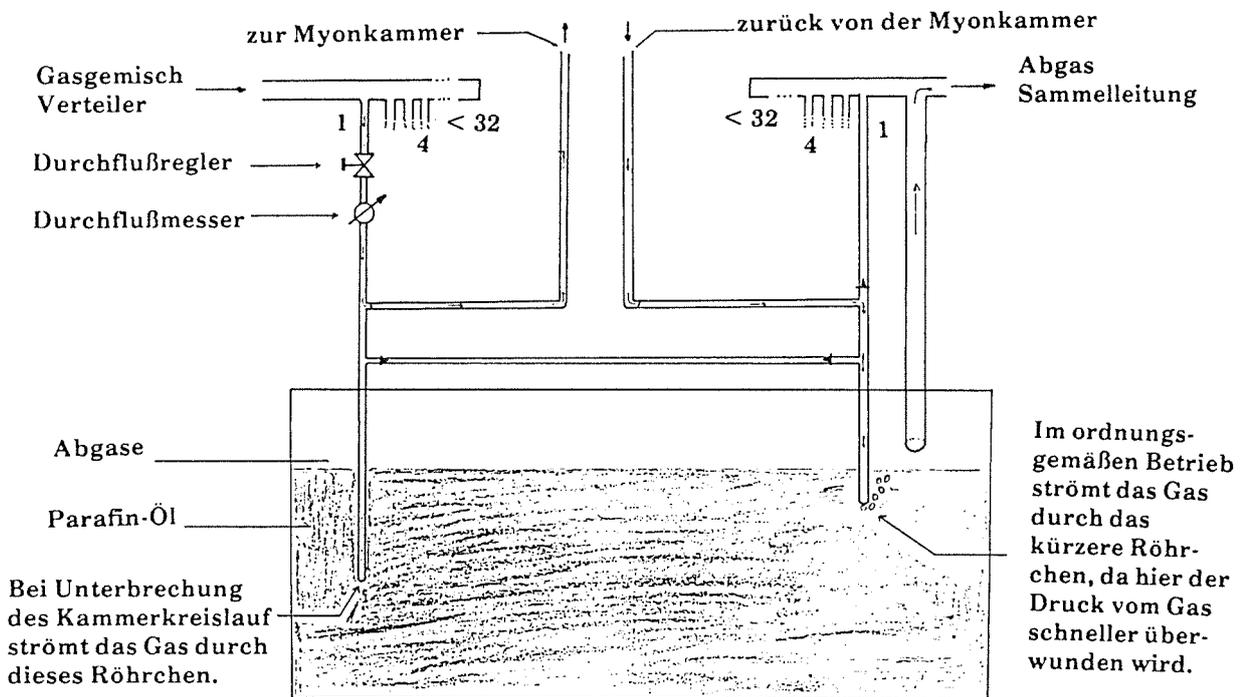


Abb. 5.2: Prinzipdarstellung des Gas-Verteilersystems.

Durchflußregler, einen Durchflußmesser und je eine Zu- und Rückführleitung besitzt. Beide Leitungen werden verzweigt (T-Stück) und auf ein Röhrchen geführt wird, das in einen mit Paraffinöl gefüllten Plexiglastank ragt. Zu- und Rückführung sind außerdem über eine weitere Verzweigung (T-Stück) miteinander verbunden. Allerdings sind die Eingänge dieser Verbindungsleitungen mit Düsen (an den T-Stücken) versehen, so daß das Gas bei korrekt funktionierendem Kammerdurchfluß nicht diesen Weg sucht (erhöhter Widerstand). Das Röhrchen der Kammerrückführung ragt nicht so tief in das Paraffinöl wie das der Kammerzuleitung. Somit ist gewährleistet, daß im Normalbetrieb das Gas nur durch das Rückleitungsröhrchen in das Paraffinöl austreten kann, da hier der Druck der Flüssigkeitsschicht zuerst überwunden wird. Es bilden sich Gasperlen, die im Tank aufsteigen. Das Gas sammelt sich oberhalb der Ölschicht und wird dort in einer allen Kanälen gemeinsamen Abgas-

Sammelleitung abgeführt. Durch dieses System stellt sich eine gleichmäßige Druckdifferenz zwischen Kammerinnerem und der Umgebung ein.

Der durchsichtige Öltank (Plexiglas) erfüllt noch weitere Aufgaben: Er verhindert, daß bei eventuellem Nachlassen des Gasdrucks bzw. bei Abschalten der Gaszufuhr (z.B. durch das Sicherheitssystem) Luft- und somit auch Feuchtigkeit über die Ausgangsleitung in die Kammer gelangen kann. Die Anzahl der aufsteigenden Gasperlen pro Zeiteinheit, verglichen mit dem eingestellten Einlaßdurchfluß (Durchflußregler für jede Kammer), ist ein Maß für die Undichtigkeit der Kammer bzw. des zugehörigen Leitungssystems. Ist der Gaskreislauf einer Kammer unterbrochen bzw. verstopft, so beginnt das Gas durch das andere Röhrchen (Eingangsleitung) in den Öltank zu perlen. Im Falle eines Lecks in der Kammer, ist es möglich, daß der gesamte Gasfluß durch dieses Leck fließt. Dies bewirkt, daß sich in den Gasröhrchen kein Gasdruck mehr bemerkbar macht und das Paraffinöl in diesen Röhrchen aufsteigt. Die Verbindungsleitung zwischen Ein- und Ausgang (mit Düsen) hat einen leichten Unterdruck in den Röhrchen zur Folge, so daß das Öl in diesem Fall über die Flüssigkeitsoberfläche des Tanks aufsteigen kann. Das beschriebene Verteilersystem bietet somit hervorragende Überwachungsmöglichkeiten für die Gaskreisläufe der einzelnen Kammern. Zudem schützt es die Kammern vor Drucküberhöhungen und Einflüssen der umgebenden Atmosphäre.

Es muß in jedem Fall gewährleistet sein, daß der Abgasschlauch, der über das Hallendach geführt wird, das Gas ungehindert an die Atmosphäre abgeben kann. Nach einiger Betriebszeit der Anordnung hatte sich nach einem Unwetter Wasser im unteren Teil des Abgasschlauches gesammelt. Dies hatte einen Druckanstieg im Paraffinöltank und damit im gesamten Leitungssystem zur Folge. Der Druck genügte, um die Kammern aufzublähen, so daß sie undicht wurden. Nach der Beseitigung des angestauten Wassers arbeitete das ganze System wieder problemlos. Ähnlich ungünstig wirkt es sich aus, wenn Windböen ungeschützt auf den Abgasschlauch einwirken können, so daß sich die Druckverhältnisse im Ölbehälter ändern. Um den beschriebenen Einwirkungen auf das Gasversorgungssystem vorzubeugen, wurde an das Ende des Abgasschlauches eine selbstentwickelte Schutzvorrichtung montiert. Ein ähnlicher Wetterschutz sollte auch für den Einsatz im KASCADE-Experiment vorgesehen werden.

Das Gas wird bisher aus einem Argonflaschenbündel (12·50l; Reinheit: 99,996 %) bzw. einer Isobutanflasche (50 l; Reinheit: 99,95 %), die sich in einer Gashütte außerhalb der Experimentierhalle befinden, dem Versuchsaufbau zugeführt. Für den KASCADE-Einsatz sollte der Flaschenwechsel automatisch

erfolgen, indem auf eine zweite Versorgungsquelle umgestellt wird, sowie der Flaschendruck oder das Gewicht der Gasflasche eine gewisse Schwelle unterschreitet. Das Umstellen sollte in einer zentralen Überwachungsstelle angezeigt werden, bis die leeren Flaschen gegen volle ersetzt wurden und somit das erneute Umstellen wieder möglich wäre. Außerdem ist darauf zu achten, daß das Isobutan nicht zu tiefen Temperaturen ausgesetzt wird, da mit sinkender Temperatur der Gasdruck nachläßt, bis bei $-11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ Isobutan (bei Atmosphärendruck) flüssig wird.

5.2 Sicherheitssystem zur Gasversorgung

Da Isobutan ein leicht entflammbares Gas der Gefahrengruppe Y ist, mußte aufgrund zahlreicher Sicherheitsauflagen ein umfangreiches Sicherheitssystem aufgebaut werden. Im Falle eines größeren Lecks der Kammern wäre es möglich, daß nach längerem unbemerktem Weiterströmen des Gases sich das Isobutan am Boden der Halle ansammelt - es ist schwerer als Luft - und dort ein explosives Gemisch bildet. Um dies zu verhindern, wurde um den Teststand eine 20 cm hohe Auffangwanne aufgebaut. Diese Wanne kann mehr als das gesamte Gasvolumen aller 4 Kammern auffangen. Um sicherzustellen, daß das Gas nicht durch Luftströmungen fortgetragen wird und neben die Wanne fällt, wurde rings um den Versuchsaufbau ein Vorhang angebracht, der mit Stahlstücken so beschwert ist, daß er immer in die Wanne hängt. Zusätzlich wurde an einem Ende der Auffangwanne eine Absaugpumpe installiert, die permanent ein Vielfaches des Gasdurchflusses absaugt. Die Pumpe enthält einen Windfahnen-Schalter, der sofort anspricht, sobald der Absaugdurchfluß abnimmt. Sein Ansprechen unterbricht über ein Relais den Stromkreis, der die elektromagnetischen Ventile der Gasleitungen offen hält und stoppt somit die Gaszufuhr. Es ist also gewährleistet, daß nur bei korrekt arbeitendem Absaugsystem Gas zugeführt wird (siehe Abb. 5.3). Der Ausfall der Absaugung und somit des Gasflusses wird durch eine Signallampe angezeigt, bis die Absaugung durch Betätigung eines Schalters wieder aktiviert wird.

Zusätzlich wurden innerhalb der Auffangwanne vier auf Isobutan geeichte Gassensoren am Boden befestigt. Drei Sensoren besitzen eine sehr sensible Schwelle, die auf 30 % der unteren Explosionsgrenze eingestellt ist, während die andere Sensor-Schwelle auf 50 % der unteren Explosionsgrenze eingestellt ist. Bei Ansprechen eines der Sensoren schaltet automatisch die Gaszufuhr ab, was am Versuchsaufbau optisch angezeigt wird. Zwei Warnleuchten - eine innerhalb der

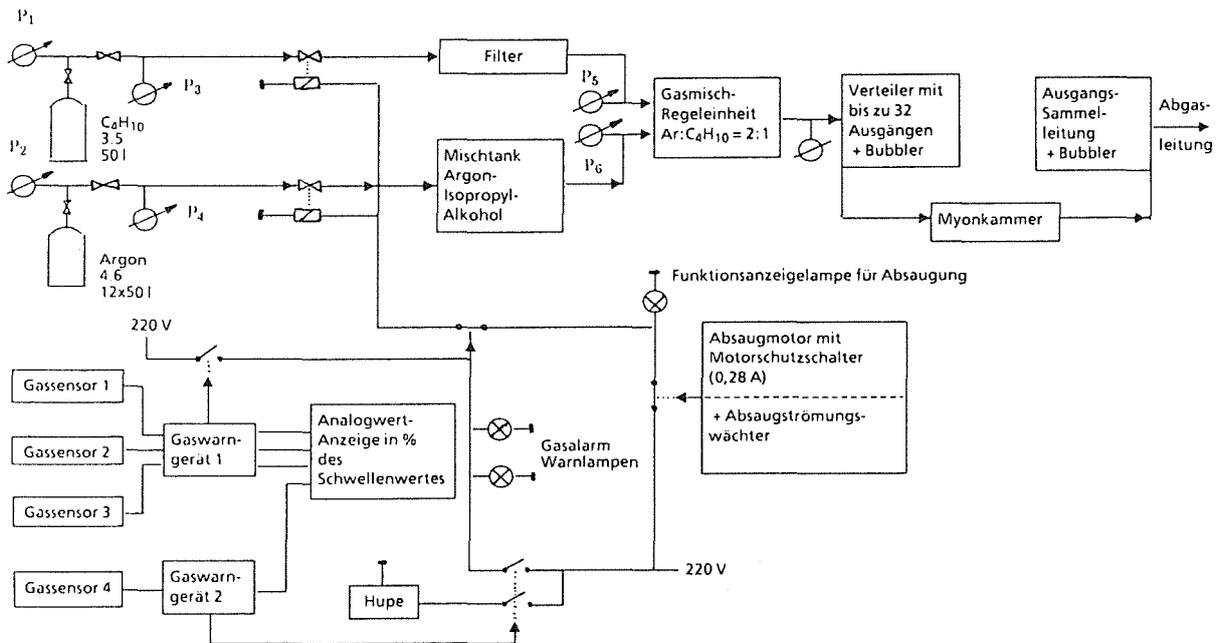


Abb. 5.3: Gasversorgungs- und Sicherheitssystem.

Experimentierhalle und eine im Vorraum - machen durch Blinken darauf aufmerksam, daß das Gaswarnsystem angesprochen hat. Zusätzlich soll eine Hupe bei Ansprechen der höheren Schwelle akustisch auf den Gasalarm hinweisen.

Die Gasalarmanzeigen können erst dann durch Schalterbetätigung zurückgesetzt werden, wenn die Absaugpumpe genügend Gas abgesaugt hat, so daß die Gaskonzentration wieder unterhalb der Schwelle liegt. Dieser Schalter befindet sich am Steuergerät im Vorraum zur Experimentierhalle. Zusätzlich befinden sich dort noch vier Analoganzeigen, welche die Meßspannungen der Sensoren anzeigen und einen Hinweis auf die tatsächliche Gaskonzentration geben können. Somit ist es bei einem Gasalarm möglich, von außerhalb der Halle festzustellen, in welchem Zustand sich der Versuchsaufbau befindet.

Schließlich wird die Hochspannung der Kammer abgeschaltet, sofern durch irgendeine Sicherheitseinrichtung die Gaszufuhr unterbrochen wurde. Damit ist sichergestellt, daß bei sich ändernder Gasmischung innerhalb der Kammer keine Schäden durch Hochspannungsüberschläge entstehen.

6. Beschreibung des Testaufbaus

Der Aufgabe, einen Detektor aufzubauen, der zum Test der Funktionstüchtigkeit der Saclay-Vieldraht-Proportionalkammern dient, lag von Beginn an das Konzept zugrunde, kosmische Myonen als "Teststrahlung" zu verwenden. Für diesen Zweck wurde ein Gerüst aufgebaut, in dem 4 Kammern und zwei Ebenen von Szintillationszählern übereinander Platz finden (siehe Abb. 6.1). Da die

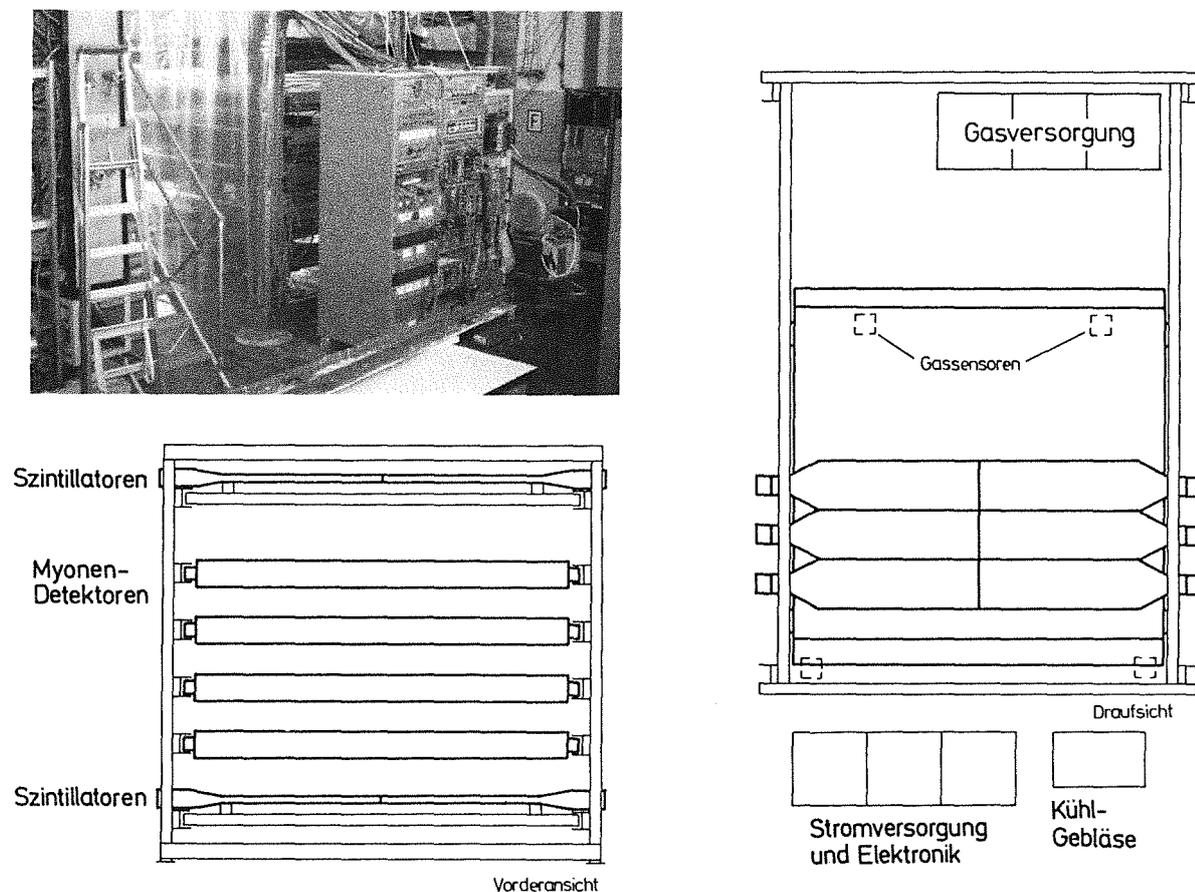
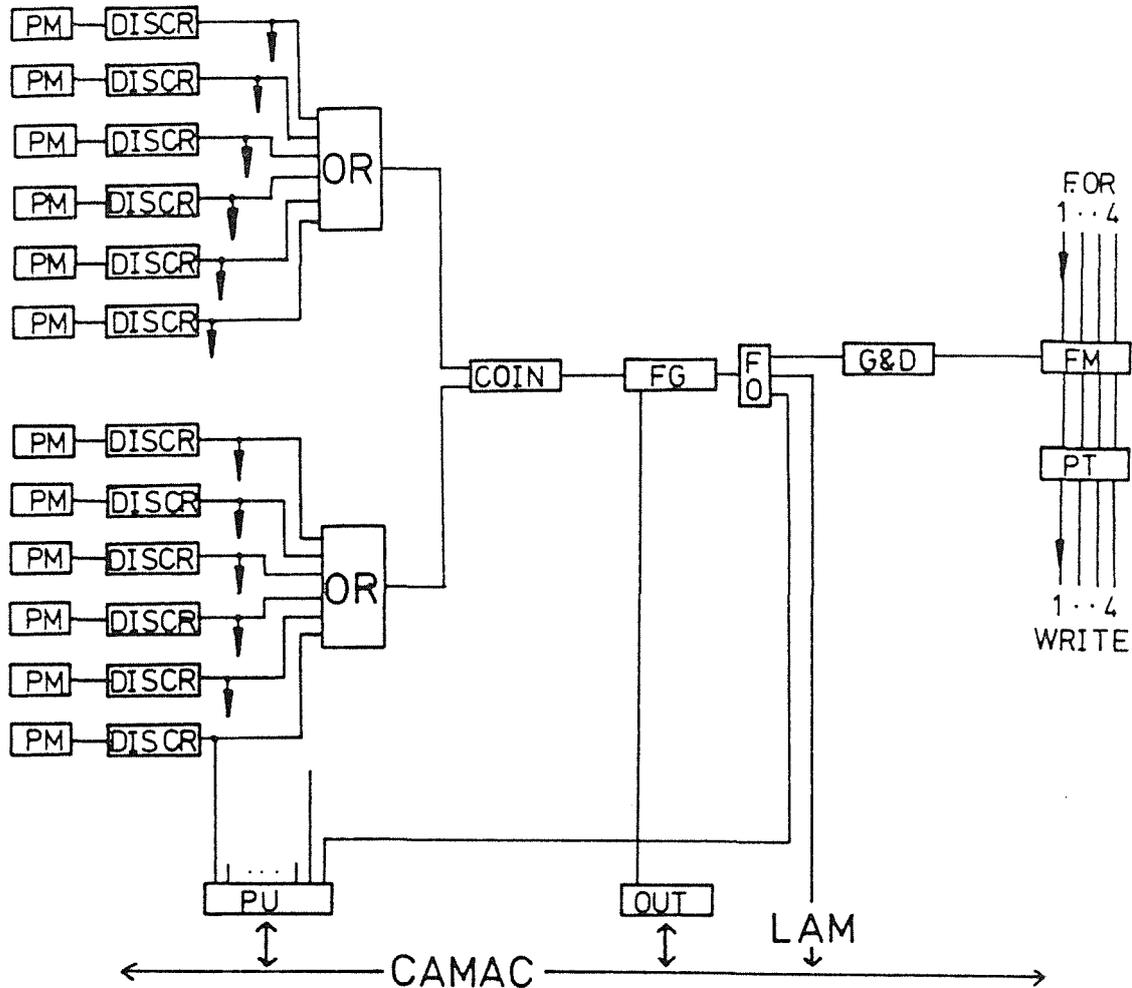


Abb. 6.1 : Grundriß, Seitenansicht und Photo des Teststandes.

Szintillationsebenen ober- und unterhalb der Kammern mit jeweils sechs Szintillator-Paddeln ($100 \cdot 30 \cdot 1,5 \text{ cm}^3$) nur einen Teil der Kammerfläche abdecken, wurden sie auf einen im Gerüst verschiebbaren Wagen montiert. Die Kammern sind ebenfalls im Gerüst in eine Richtung beweglich. Sie wurden allerdings aus Rekonstruktionsgründen immer senkrecht übereinander betrieben. Die Auswahl von Ereignissen mit kosmischen Myonen sollte dadurch geschehen, daß die Kammern nur bei einer Koinzidenz beider Szintillatorebenen getriggert werden. Durch Auslese, des im Falle der Koinzidenz in einer Pattern-Unit gespeicherten Triggermusters der einzelnen Szintillator-Segmente, wurde

eine weitere Triggerauswahl geschaffen. Abb. 6.2 zeigt das Prinzip der über CAMAC gesteuerten Triggerelektronik.



- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| PM = Photomultiplier | OUT = Ausgaberegister |
| DISCR = Diskriminator | FO = Fan - Out |
| PU = Pattern - Unit | G & D = Gate - and - Delay |
| COIN = Koinzidenz | FM = Filtrage Memoire |
| FG = Fast Gate | PT = Pretrigger |

Abb. 6.2: Blockschaltbild der Triggerelektronik mit Rechnerankopplung.

Daß die beschriebene Anordnung nicht genügt, um Myonen eindeutig zu identifizieren, wurde schnell erkannt. Zum einen verhalten sich hochenergetische Elektronen (minimal ionisierende Teilchen) fast in jeder Hinsicht wie

minimal ionisierende Myonen. Es entstehen so in der Detektoranordnung Spuren, die nicht von denen der Myonen zu unterscheiden sind. Zum anderen können auch niederenergetische Elektronen oder γ 's eines Schauers oder einer Aufschauering an der Hallendecke bzw. -wand zur Triggerung und zu Signalen in den einzelnen Detektorebenen führen. Diese Signale müssen nicht notwendiger Weise zu einer Teilchenspur gehören. Das erschwert die Auswertung beträchtlich.

Im ersten Fall würde eine dicke (> 10 cm) Bleischicht sicherstellen, daß im Bereich der Triggerzähler ausschließlich Myonen zu Spuren führen. Will man aber in der gesamten Kammerfläche nur Signale von Myonen erhalten, so empfiehlt es sich über den 4 Kammern und der zweiten Szintillatorebene eine dicke Absorberschicht (> 10 cm Pb) zu installieren.

Da im Rahmen einer weiterführenden Arbeit das Zeitverhalten eines Schauers untersucht werden soll (e- γ -Komponente gegenüber Myonen; verzögerte Myonen?) muß eine grobe Bestimmung von Lage und Richtung der Schauerachse erfolgen. Die hierzu zu erstellende Triggeranordnung sollte auch den Kammeraufbau triggern, um so Auskunft über die Myonverteilung in der Nähe des Schauerkerens zu bekommen. Bei ausreichender Dicke der Absorberschicht hätte man eine ähnliche Situation wie im KASCADE-Kalorimeter und könnte damit die Kammern für ihren Einsatz optimieren. Zum anderen könnte gezeigt werden, daß mit der Spurbestimmung von Myonen in Nähe des Schauerkerens eine (zumindest grobe) Bestimmung der Schauerrichtung möglich ist.

E_γ	1 GeV	10 GeV	100 GeV
12 cm Fe + 1 cm Pb	0,94	16,12	213,43
12 cm Fe + 6 cm Pb	0,08	1,70	31,69
12 cm Fe + 12 cm Pb	0,00	0,05	1,06

Tab. 6.1 a : Mittlere Anzahl an Elektronen ($E' \geq 1$ MeV), die nach senkrechtem Auftreffen sekundärer γ -Teilchen der Energien E_γ auf eine kombinierte Fe-Pb-Absorberschicht diese verlassen.

Da die Notwendigkeit einer derart dicken Absorberschicht (um die 10 cm Pb zu tragen, wurden Eisenplatten, wie sie im Kalorimeter eingesetzt werden, vorgeschlagen) zur Unterdrückung der elektromagnetischen Komponente

E_γ	1 GeV	10 GeV	100 GeV
12 cm Fe + 1 cm Pb	13,85	176,94	1696,06
12 cm Fe + 6 cm Pb	1,90	40,28	639,21
12 cm Fe + 12 cm Pb	0,15	2,99	49,83

Tab. 6.1 b : Mittlere Anzahl an tertiären γ -Teilchen ($E' \geq 1$ MeV), die nach senkrechtem Auftreffen sekundärer γ -Teilchen der Energien E_γ auf eine kombinierte Fe-Pb-Absorberschicht diese verlassen.

E_μ	1 GeV	10 GeV	100 GeV	1 TeV
12 cm Fe + 1 cm Pb	0,04	0,14	0,24	1,62
12 cm Fe + 6 cm Pb	0,03	0,10	0,33	3,61
12 cm Fe + 12 cm Pb	0,03	0,13	0,29	2,69

Tab. 6.1 c : Mittlere Anzahl an Elektronen ($E' \geq 1$ MeV), die nach senkrechtem Auftreffen eines Myons auf eine kombinierte Fe-Pb-Absorberschicht diese verlassen.

E_μ	1 GeV	10 GeV	100 GeV	1 TeV
12 cm Fe + 1 cm Pb	0,13	0,90	1,74	13,05
12 cm Fe + 6 cm Pb	0,12	0,71	2,42	32,35
12 cm Fe + 12 cm Pb	0,09	0,79	2,56	27,75

Tab. 6.1 d : Mittlere Anzahl an γ -Teilchen ($E' \geq 1$ MeV), die nach senkrechtem Auftreffen eines Myons auf eine kombinierte Fe-Pb-Absorberschicht diese verlassen.

bezweifelt wurde, wurde mit Simulationen für verschiedene Absorberdicken begonnen. Untersucht wurden jeweils für verschiedene Energien der auf den Absorber auftreffenden Sekundärteilchen (Myonen, γ 's), wieviele Tertiärteilchen oberhalb einer gewissen Schwellenenergie den Absorber verlassen. Einige Ergebnisse dieser Simulationen sind in den Tabellen 6.1a-d dargestellt.

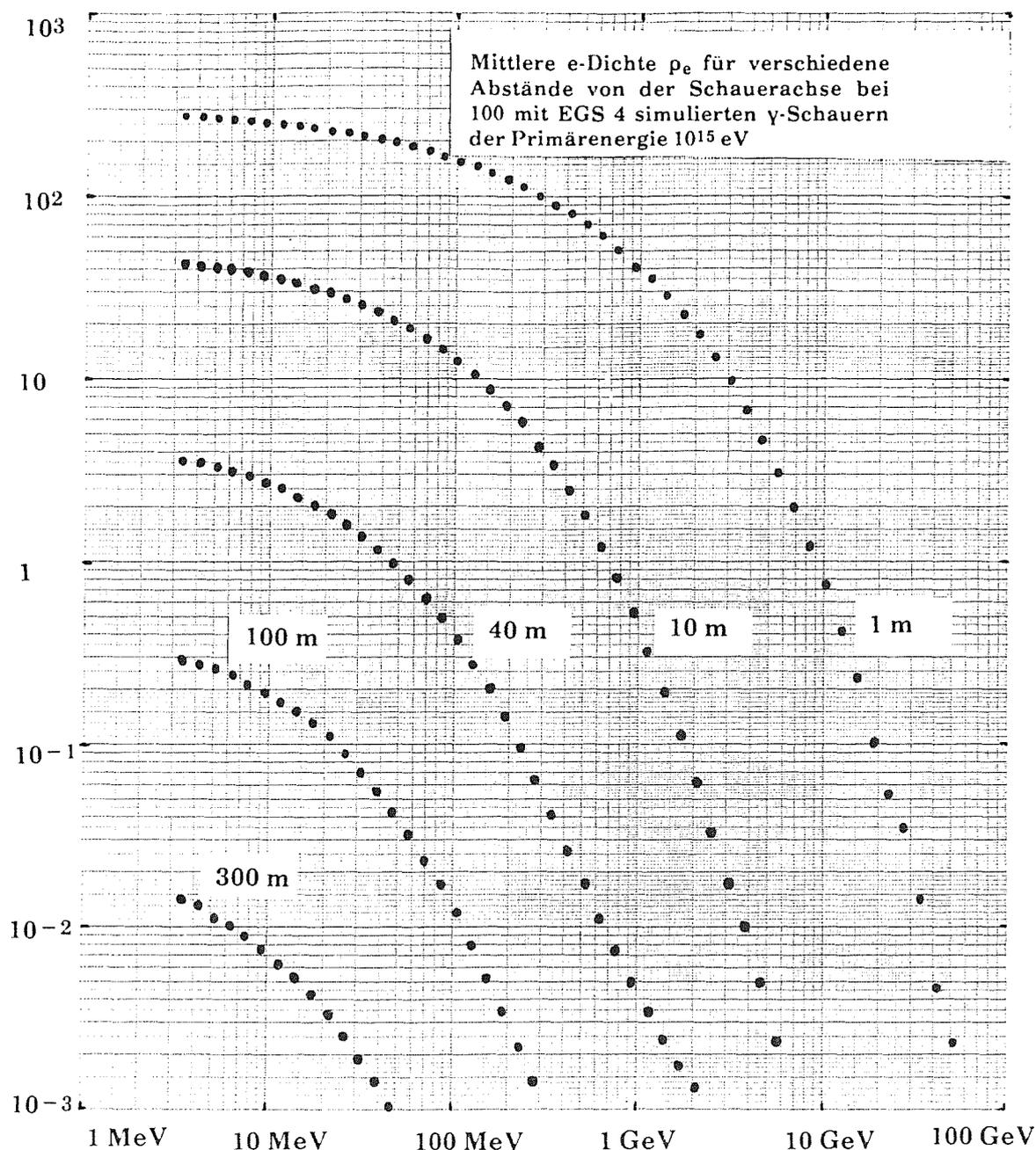


Abb. 6.3: Mittlere Elektronendichte in einem 10^{15} eV - γ -Schauer in Abhängigkeit von Energie und Abstand zur Schauerachse.

Um sich ein Bild machen zu können, in welchem Umfang Sekundärteilchen bestimmter Energien auftreten, wurden simulierte Schauerdaten in

Dichteverteilungen umgerechnet (siehe Abb. 6.3 bis 6.5). Um im unteren Teil des

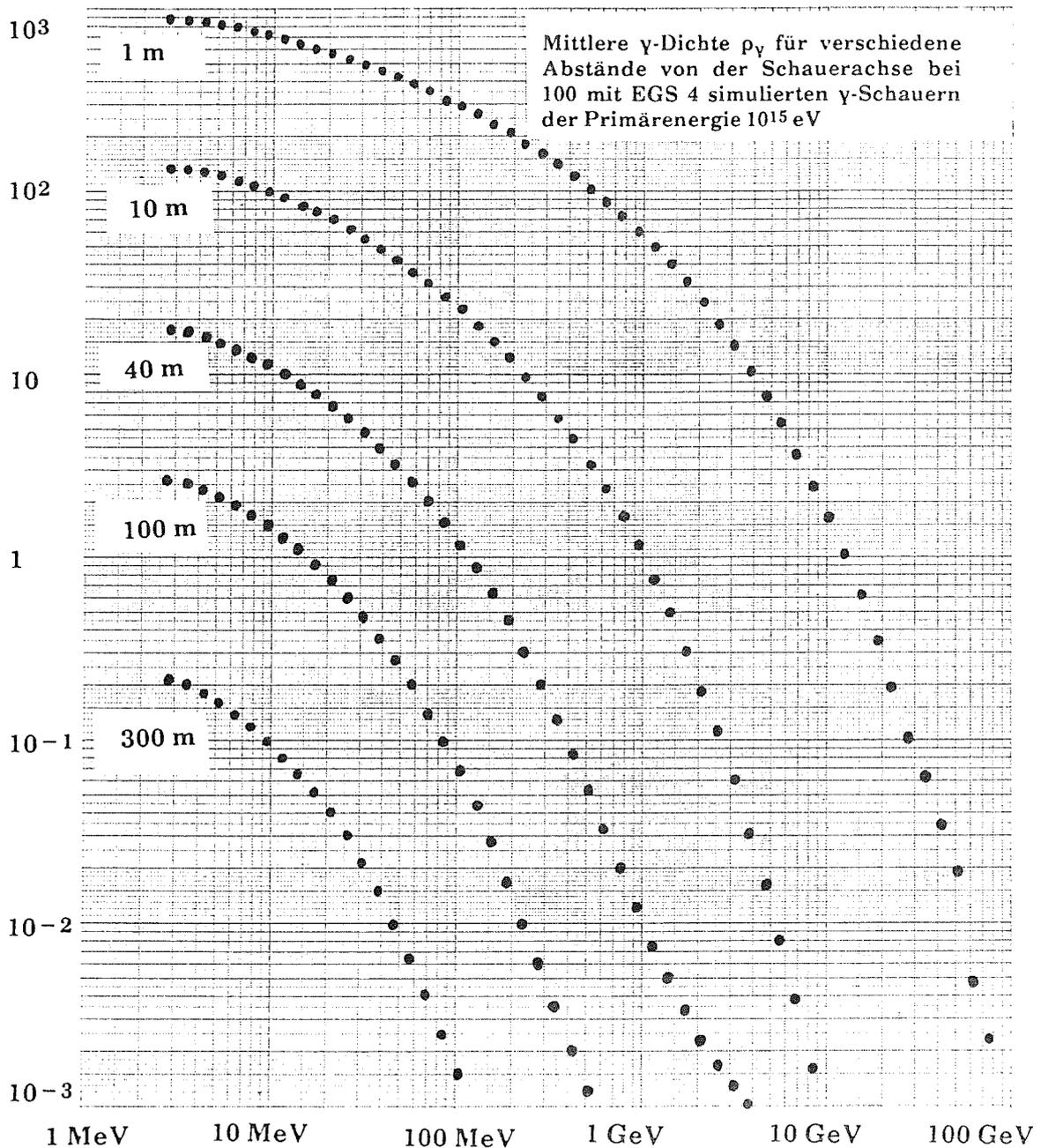


Abb. 6.4 : Mittlere γ -Dichte in einem 10^{15} eV - γ -Schauer in Abhängigkeit von Energie und Abstand zur Schauerachse.

für KASCADE interessanten Energiebereiches in der Nähe des Schauerkerns messen zu können, ist eine Absorberschicht von mindestens 12 cm Fe und 10 cm Pb unbedingt notwendig, wenn man Aufschauern weitgehend vermeiden will.

Diese Absorberdicken wurden aus praktischen Gründen gewählt, da damit die Verwendung der für das Kalorimeter notwendigen Fe- Platten möglich ist, auf

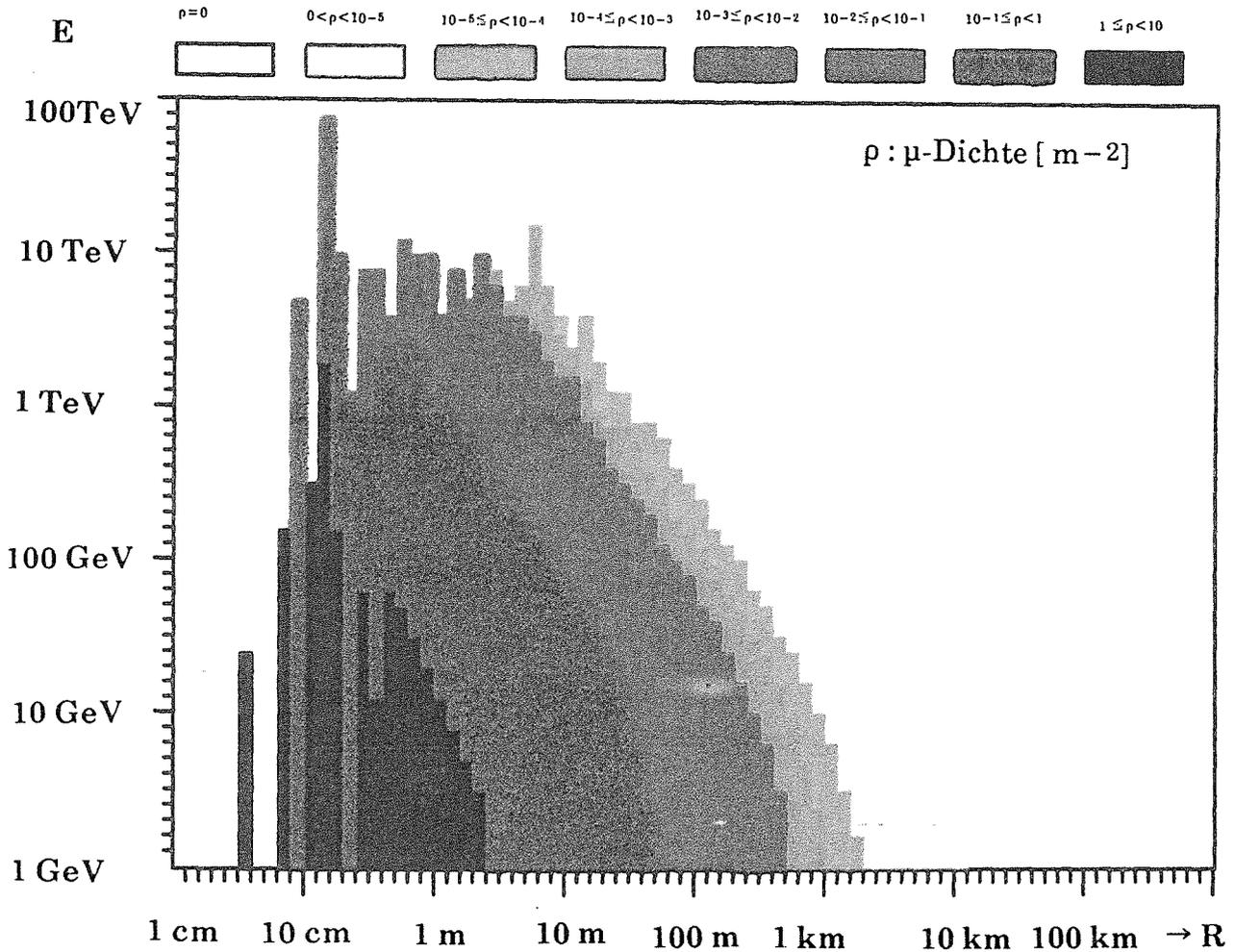


Abb. 6.5: Mittlere Myondichte in 10^{15} eV - Protonenschauern als Funktion von Energie und Abstand zur Schauerachse.

denen zwei Lagen von Pb-Steinen gestapelt werden können. Es wurde ein Stahlträger-Gestell konzipiert, das das entsprechende Absorbergewicht oberhalb der Kammern tragen kann. Aus Sicherheitsüberlegungen wurde jedoch beschlossen, links und rechts des Testaufbaus Betonsteine zu stapeln und darauf die Stahlplatten auf Stahlträgern zu installieren. Da für diese Lösung zusätzlich benötigter Platz im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr zur Verfügung stand, sollten die vorgeschlagenen Studien in einer weiterführenden Arbeit durchgeführt werden.

Als weitere Ausbaumöglichkeit des Testaufbaus wurde vorgeschlagen, daß die von einem zu installierenden Schauertrigger erkannten Ereignisse auch eine Triggerung des Prototyp-Kalorimeters (ebenfalls in der Experimentierhalle geplant) hervorrufen sollten. Es sollte der Einsatz von mindestens zwei Kammern

unterhalb des Prototyp-Kalorimeters angestrebt werden, da so erstmals unter Bedingungen, die denen bei KASCADE entsprechen, gemessen werden könnte. Es könnten damit Abschätzungen über den zu erwartenden Untergrund (siehe unten) erstmals mit Messungen überprüft werden. Außerdem gilt es die Rekonstruktions-Software auf ihre Effektivität im Originalbetrieb zu testen bzw. sie zu optimieren.

Um ein grobes Bild zu bekommen, ob die natürliche Radioaktivität im Eisen (^{60}Co) und Beton (^{40}K) des KASCADE-Kalorimeters eine Gefahr für den Einsatz der Myon-Kammern unterhalb des Kalorimeters bilden, wurde eine grobe Abschätzung der Untergrundzählrate vorgenommen. Zu diesem Zweck wurde vereinfachend ein Aufbau aus drei unendlich ausgedehnten Platten - dem 70 cm dicken Betonfundament, der 70 cm dicken Kellerdecke und der 200 cm dicken Eisenschicht des Kalorimeters - angenommen (vgl. Abb. 2.3).

Zur Berechnung des γ -Flusses durch eine Detektorebene zwischen Fundament und Kellerdecke wurden folgende Beziehung verwendet [Sch74]:

Unendlich ausgedehnte plattenförmige Quelle mit Selbstabsorption und zusätzlicher externer Abschirmung:

$$\Phi = \frac{S_V}{2} \int_0^D E_1(\mu_e \cdot z + \mu \cdot t) dz = \frac{S_V}{2 \cdot \mu_e} \cdot \left[E_2(\mu \cdot t) - E_2(\mu_e \cdot D + \mu \cdot t) \right]$$

mit Φ : γ -Fluß in $[\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$

S_V : Volumenquellstärke in Zerfälle pro cm^3 und s \cdot Anzahl der Quanten pro Zerfall

μ_e : Energieabsorptionskoeffizient der Quelle in cm^{-1}

μ : Energieabsorptionskoeffizient der Abschirmung in cm^{-1}

D : Plattendicke der Quelle in cm

t : Plattendicke der Abschirmung in cm

$$E_n(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-x \cdot t}}{t^n} dt \equiv x^{n-1} \cdot \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t^n} dt$$

sind die Exponential-Integralfunktionen (nicht geschlossen integrierbar)

Der gesamte Fluß durch den Detektor setzt sich zusammen aus :

- a) Φ_1 , dem Fluß von der Eisenquelle (200 cm) durch 100 cm Betonabschirmung
- b) Φ_2 , dem Fluß von der Betonquellen (70 cm Fundament und 70 cm Kellerdecke)

Setzt man die in [Sch74] tabellierten Energieabsorptionskoeffizienten, sowie die aus den Aktivitäten von Beton (0,2 Bq/g) und der Eisenplatten (max. 10 Bq/g) berechneten Volumenquellstärken ein, so ergeben sich folgende Flüsse:

$$\Phi_1 \approx 0,26 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad \Phi_2 \approx 2 \cdot 3,84 = 7,68 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Man sieht, daß selbst bei maximal zugelassener Aktivität der Eisenplatten, diese Strahlung durch die 70 cm dicke Betonschicht soweit absorbiert wird, daß der Gesamtfluß $\Phi_{\text{gesamt}} = 7,94 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nahezu ausschließlich von der Aktivität des Betons bestimmt wird.

Für die Abschätzung, der durch den γ -Fluß entstehenden Untergrundzählrate, ist von Bedeutung, daß für den relevanten Energiebereich der Compton- Effekt der wesentliche Prozeß ist. Setzt man voraus, daß jedes durch eine Wechselwirkung eines γ 's in der Kammer erzeugte Elektron einen Störimpuls auslöst (schlechtester Fall), Elektronen die von außerhalb auf die Kammer treffen, jedoch nicht ins Innere der Kammer dringen, so ergibt sich:

$$\frac{d^2N}{dt dA} = \Phi_{\text{gesamt}} \cdot \left(1 - e^{-\sum_i x_i \cdot \mu_i} \right)$$

- mit $d^2N/(dt \cdot dA)$: Untergrundzählrate pro Flächeneinheit
- x_i : Dicke der einzelnen Kammermaterialien i
- μ_i : linearer Schwächungskoeffizient der Kammermaterialien i

Da ständig zum schlechteren hin abgeschätzt wurde ergibt sich damit eine maximale Untergrundzählrate von $0,88 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Multipliziert man diesen Wert mit der sensitiven Fläche des größten Kammertyps, so erhält man eine Untergrundzählrate von 26 kHz je Kammer. Möchte man nun daraus die Wahrscheinlichkeit berechnen, daß eine Kammer bei erfolgter Triggerung ein Untergrundereignis aufweist, so gilt für die Wahrscheinlichkeit W :

$$W = (\tau_1 + \tau_2) \cdot f \approx (300 \text{ ns} + 200 \text{ ns}) \cdot 26 \text{ kHz} = 0,013$$

- mit τ_1 : Dauer des von Myonsignal und Trigger erzeugten Gate- Impulses
 τ_2 : Dauer des Signals eines Untergrundereignisses vor der
Koinzidenzbedingung mit dem Gate-Impuls
 f : Untergrundzählrate

Eine Wahrscheinlichkeit für Untergrundereignisse von 1,3 % pro Kammer sollte jedoch kein Problem darstellen. Würde man allerdings auf Triggerung verzichten, käme man zu einem größeren Wert, der ein Problem darstellen würde und hätte vor allem durch das ständig notwendige Rücksetzen und Auslesen der Kammern eine sehr hohe Totzeit zu erwarten.

7. Rekonstruktion von Ereignissen im Versuchsaufbau

Das Erstellen eines geeigneten Meßprogramms zur Aufnahme von Meßdateien, sowie die Rekonstruktion von Ereignissen innerhalb einer Kammer, bzw. die Rekonstruktion von Teilchenspuren im gesamten Detektorsystem sind wesentliche Voraussetzungen, um mit den Kammern sinnvoll messen zu können. Da zunächst überhaupt keine Information über die von CEN Saclay verwendete Datenaufnahme- und Auswerte-Software vorhanden war, mußten die Programme Schritt für Schritt neu entwickelt werden. Später konnten zumindest Teile der früher verwendeten Programme eingesehen werden. Es wurde jedoch selbst von den damaligen Betreibern der Kammern empfohlen, besser eigene Programme zu entwickeln. Da zunächst keine Möglichkeit gegeben war, Daten von oder zum Meßrechner (PDP 11 - Starburst) zu übertragen (kein Diskettenlaufwerk, kein Bandgerät und kein LAN-Anschluß), mußten Datenaufnahme- und Rekonstruktionsprogramme auf diesem Rechner entwickelt werden (keine komfortable Entwicklungsumgebung ; sehr zeitaufwendig!).

In einem ersten Schritt wurde ein Programm geschrieben, das jeweils Ereignis für Ereignis nacheinander für jede Kammer graphisch darstellt, welche Drähte bzw. Streifen angesprochen haben (siehe Abb. 7.1). Aus diesen Darstellungen wurden erste Erkenntnisse darüber gewonnen, wie sich ein Ereignis innerhalb einer Kammer auswirkt, welche Forderungen bei der Rekonstruktion der Daten gestellt werden müssen, wie zuverlässig die einzelnen Kammern Daten liefern, bzw. welche Probleme bei der Auswertung auftreten können. Zunächst wurde

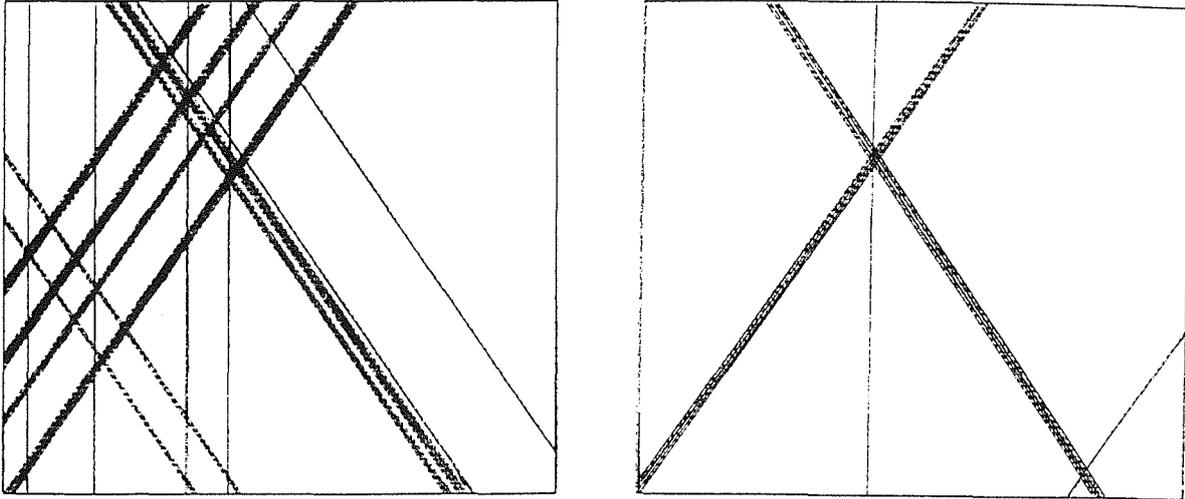


Abb. 7.1 : Darstellung zweier willkürlich ausgewählter Ereignisse einer Kammer. In beiden Fällen scheint die Rekonstruktion möglich.

festgestellt, daß ein Ereignis sich dadurch auszeichnet, daß in der Regel ein Anodendraht und von jeder Kathode etwa 3 bis 4 nebeneinanderliegende Streifen ansprechen. Der Durchstoßpunkt des Teilchens durch die als Ebene gedachte Kammer ergibt sich aus dem Schnittpunkt der durch den Anodendraht festgelegten Geraden mit den Schwerpunktsgeraden der angesprochenen Kathoden-Clustern (mittlere Gerade der nebeneinander angesprochenen Kathodenstreifen).

Die Anzahl der nebeneinander ansprechenden Kathodenstreifen ist abhängig von der jeweils angelegten Hochspannung. Diese Abhängigkeit ist bereits von CEN Saclay veröffentlicht worden [Ale81] (siehe Abb. 7.2). Allerdings ist hierzu zu bemerken, daß sich die Hochspannungsskalierung für jede Kammer individuell etwas verschieben kann. Außerdem setzen die Diagramme eine gleichförmige Schwelleneinstellung innerhalb der gesamten Kammerelektronik voraus, was in der Praxis nicht zu realisieren ist. Die Glaubwürdigkeit dieser Kurven muß demnach angezweifelt werden, zumal keine Angaben über Lage der Schwellen bzw. Entstehungsgeschichte der Schaubilder gemacht werden. Eigene Ergebnisse werden in Kapitel 8 diskutiert.

Es galt nun ein Programm zu schreiben, das die Daten aus erkannten Ereignissen einliest und möglichst platzsparend in Dateien ablegt, deren Endgröße wählbar ist. Parallel hierzu galt es ein Programm zu entwickeln, das die aufgenommenen Daten aus den Dateien liest, möglichst effizient die Koordinaten von Treffern

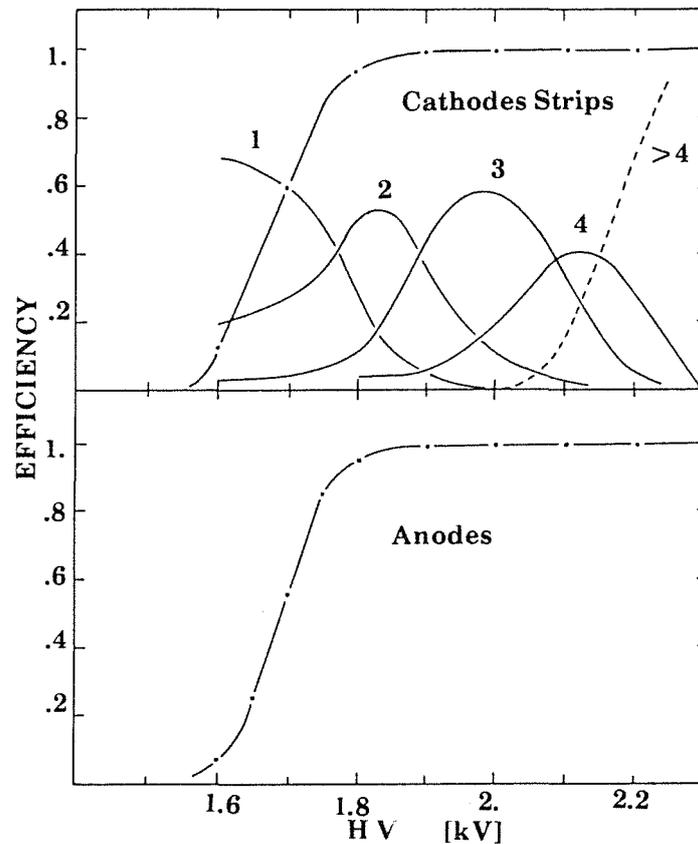


Abb. 7.2: Ansprechwahrscheinlichkeiten für Anode und Kathoden in Abhängigkeit der angelegten Hochspannung.

innerhalb einer Kammer berechnet und diese wiederum in Dateien ablegt, bzw. graphisch darstellt.

Weiterhin wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Daten auf andere Rechnersysteme zu übertragen. Über eine bereits in der Experimentierhalle existierende Datenleitung, eine zusätzliche Datenleitung und einen Communication-Server im IK-I können Daten über das LAN übertragen werden. Vom LAN (Local Area Network) werden die Daten durch einen weiteren bereits vorhandenen Communication Server empfangen und über eine weitere zusätzliche Datenleitung auf den PC gegeben. Die Daten können mittels eines Kermit-Programms übertragen werden. Um das Terminal in der Experimentierhalle, sowie den PC als Terminal zur Steuerung des Starburst verwenden zu können, mußte lediglich ein Data-Switch gekauft werden, der manuell umgeschaltet werden kann. Mittlerweile ist der dritte Ausgang des Data-Switch ebenfalls belegt: Über den PC eines Vielkanal-Analysators können die Daten auch direkt (ohne Umweg über das LAN) auf Diskette gespeichert werden (siehe Abb. 7.3).

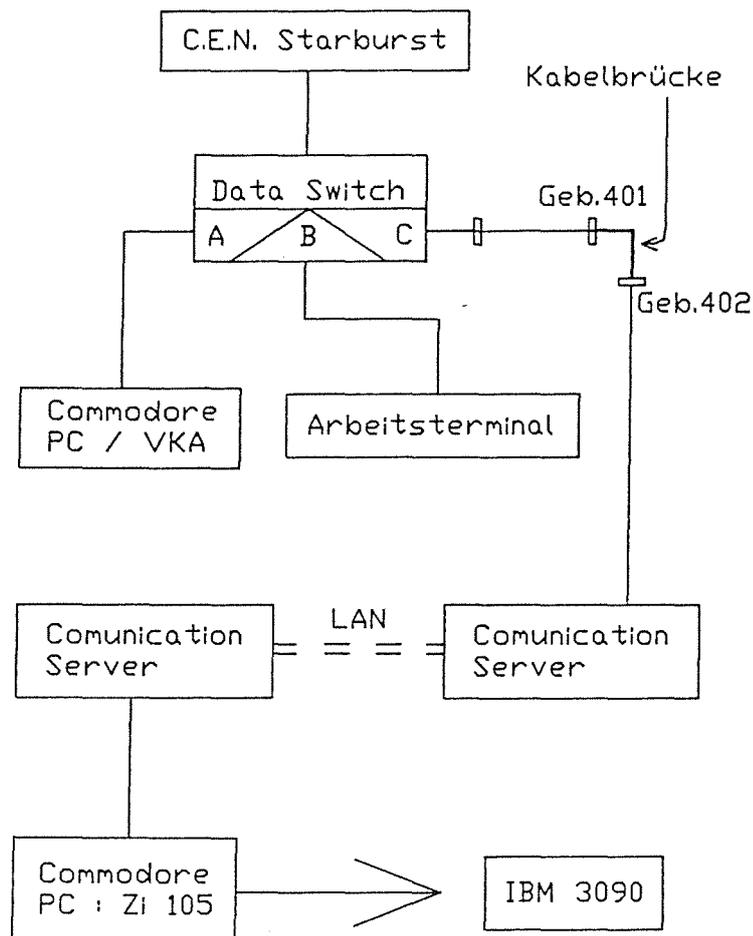


Abb. 7.3 : Geschaffene Kommunikationsmöglichkeiten zur Weiterverarbeitung der gemessenen Daten.

Die Möglichkeit, Daten auf andere Rechner zu übertragen, wurde genutzt, um die weitere Entwicklung der Auswerteprogramme auf anderen Rechnern (PC, IBM 3090) vorzunehmen. Hierbei konnten nun auch andere Programmiersprachen (Pascal, C) mit deren jeweiligen Vorteilen verwendet werden. Es wurde jedoch von jedem Programm, das sich als sinnvoll erwiesen hatte, eine zweite Version in Fortran erstellt.

Das Programm zur Rekonstruktion von Treffern geht nach einigen Entwicklungsstufen folgendermaßen vor: Es werden für alle angesprochenen Kathodenstreifen zunächst die Cluster-Schwerpunkte berechnet. Dabei kann vor Programmablauf eine maximale und minimale Clustergröße eingestellt werden. Sprechen weniger Streifen an, als der eingestellte Minimalwert vorgibt, so werden diese Daten verworfen. Sprechen mehr Streifen nebeneinander an, als der

Maximalwert vorgibt, so wird dieses Cluster nach dem Maximalwert abgetrennt und der Rest als ein weiteres Cluster betrachtet.

Nach der Berechnung der Clusterschwerpunkte (was vom Programm auch für Anoden möglich ist, aber bisher nicht als sinnvoll erachtet wird) greift das Programm jeweils auf die Anodendrähte zu und sucht zunächst nach Schnittpunkten zwischen Anodendrähten und den Cluster-Schwerpunktgeraden einer Kathode (Dubletts). Danach werden die Schnittpunkte der Anodendrähte mit den Geraden der anderen Kathode berechnet. Im nächsten Schritt wird nach Punkten gesucht, die sowohl bei der einen als auch bei der anderen Kathode Schnittpunkte mit dem Anodendraht hervorgerufen haben (Tripletts). Werden Tripletts gefunden, werden die jeweiligen Dubletts wieder verworfen.

Es kann ebenfalls vom Programm her eingestellt werden, ob nur Triplet-Daten oder auch Dublett-Daten als Koordinaten eines Treffers abgespeichert werden. Das Berücksichtigen der Dublett-Daten kann gelegentlich zu Mehrdeutigkeiten führen - es werden zu viele Treffer erkannt. Berücksichtigt man hingegen nur Triplet-Daten, so ist es möglich, daß Treffer gelegentlich nicht erkannt werden.

Das Programm erkennt typische Treffer (1 Anodendraht und pro Kathode 3-4 Streifen bilden einen Schnittpunkt) in jedem Fall. Problematisch sind jedoch Fälle, in denen sehr viele Treffer innerhalb einer Kammer auftreten, da hier (abhängig von den eingestellten Programmparametern) Mehrdeutigkeiten und damit die Berechnung zu vieler Treffer auftreten können. Problematisch ist auch der Fall, in dem Kanäle der Elektronik defekt bzw. Schwellen zu hoch eingestellt wurden. So können Fehler bei der Clusterbildung und Treffererkennung auftreten, die das eindeutige Erkennen von Treffern verhindern.

Um die Effizienz der Programme zu überprüfen wurden zunächst die angesprochenen Drähte und Streifen und anschließend die vom Programm rekonstruierten Treffer graphisch darstellen lassen (Ereignis für Ereignis). In den meisten Fällen findet das Programm genau die Treffer, die man erwarten würde. Nur in den angesprochenen Problemfällen würde eine Auswertung von Hand gelegentlich besseres Treffererkennen ermöglichen.

Leider wird im KASCADE-Betrieb der Fall, daß mehrere Myonen gleichzeitig in eine Kammer treffen, bei hochenergetischen Schauern ($> 10^{15}$ eV) in der Nähe des Schauerkerens der Regelfall sein. In diesem Fall ist die Ortsbestimmung der Myonen nicht mehr eindeutig möglich. Das Programm könnte aber dahingehend erweitert werden, daß es diese Fälle erkennt (zu definierende Maximalanzahl an Kanälen überschritten) und dann lediglich eine Angabe über die Anzahl (Anzahl der angesprochenen Anodendrähte) der registrierten Myonen macht.

Im Testaufbau konnte zusätzlich verlangt werden, daß ein Myon eine geradlinige Spur durch das Detektorsystem zeichnet. Aus diesem Grund wurden die in einer Datei abgespeicherten rekonstruierten Ortskoordinaten der einzelnen Kammern von einem weiteren Programm gelesen, das versuchte, durch mindestens drei Koordinatentripel (x,y,z) eine Ausgleichsgerade zu legen, so daß deren Abweichung vom jeweiligen Koordinatentripel in keinem Fall größer ist, als ein vorher festgelegter Parameter. Neben der Geraden wird jeweils auch der Korrelationskoeffizient der jeweiligen Ausgleichsgeraden bestimmt und abgespeichert. Es ist weiterhin möglich, für jedes so rekonstruierte Ereignis den Aufbau mit den vier Kammern, den jeweiligen Ortskoordinaten und den gefundenen Spuren dreidimensional in einer Graphik darstellen zu lassen, wobei die Beobachtungsrichtung, aus der die Anordnung dargestellt wird, frei wählbar ist. Somit war auch die Optimierung dieses Programms möglich. Anhand dieses Programms war es möglich, die Ortsauflösung der einzelnen Kammern, die Winkelverteilung der Myonen und die Zuverlässigkeit der Detektoren zu messen. Die erwähnten Programme wurden in [Föb90] veröffentlicht und in Flußdiagrammen vereinfacht dargestellt.

8. Meßergebnisse und Interpretation

8.1 Einstellung der Koinzidenzbedingung der Triggerzähler

Die nach Abb. 6.2 aufgebaute Koinzidenzschaltung der zwei Ebenen mit jeweils 6 Szintillatoren erforderte das Einstellen von Diskriminatorschwellen, da aufgrund der hohen Zählraten bei kleinen Energieverlusten der Teilchen (kleine Signale am Photomultiplier) zufällige Koinzidenzen sehr wahrscheinlich sind. Zu diesem Zweck wurde die in Abb. 8.1 dargestellte Schaltung aufgebaut, um ein Energieverlust-Spektrum aufzunehmen, wie es Abb. 8.2 zeigt. Es ist mit zunehmenden Energieverlusten ein exponentielles Abfallen der Zählrate festzustellen. Eine schwach ausgebildete Nase auf diesem Spektrum wurde der natürlichen Radioaktivität von Beton (^{40}K ; γ : 1,46 MeV) von Hallenboden und -wänden, sowie der von Eisen (^{60}Co ; γ : 1,17 MeV, 1,33 MeV) zugeschrieben. Zu sehen sind jeweils die Compton-Kanten, die ineinander übergehen. Schließlich ist bei etwa 2 MeV ein Peak zu erkennen. Es handelt sich hierbei um minimal ionisierende Teilchen (hauptsächlich Myonen), die entlang ihres Weges durch den Szintillator Energie durch Ionisationsverluste abgeben. Eine grobe Eichung der Energieverlust-Skala wurde dadurch gewonnen, daß mit dem gleichen Aufbau die Spektren zweier γ -

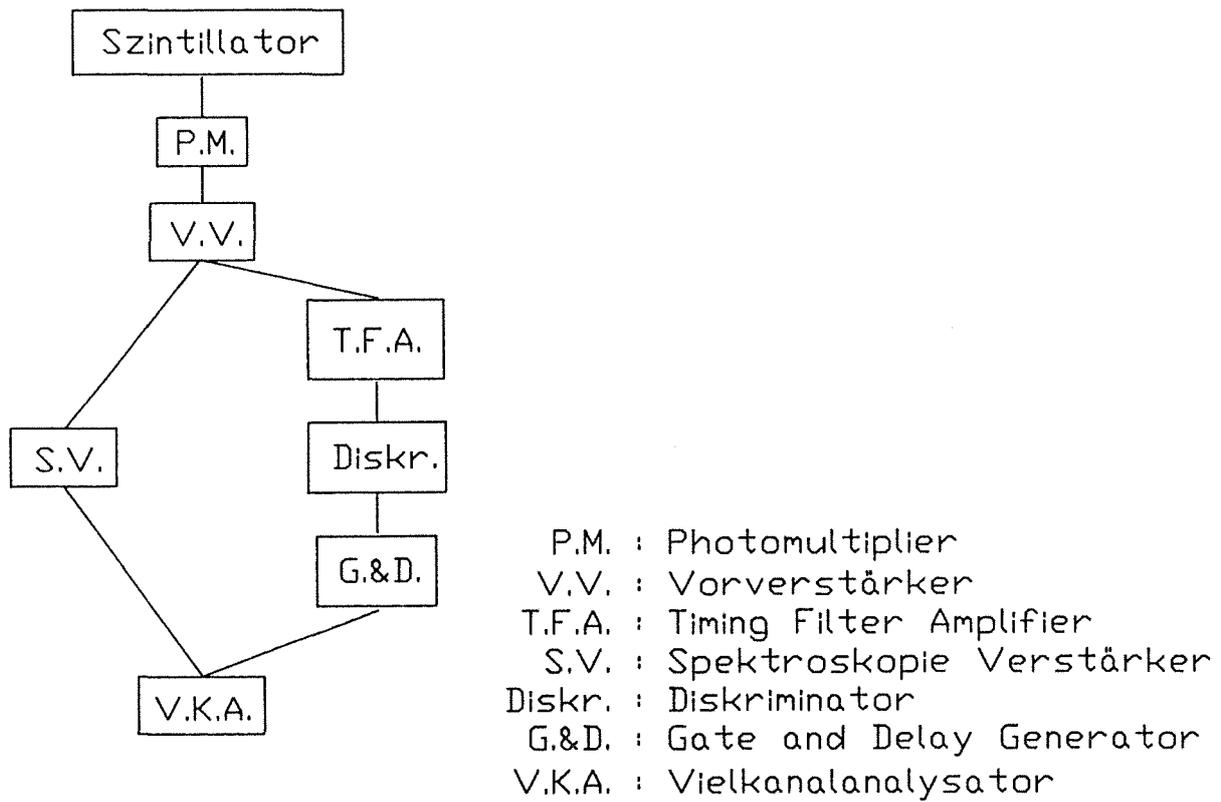


Abb. 8.1 : Schaltung zur Messung des Impulshöhen-Spektrums.

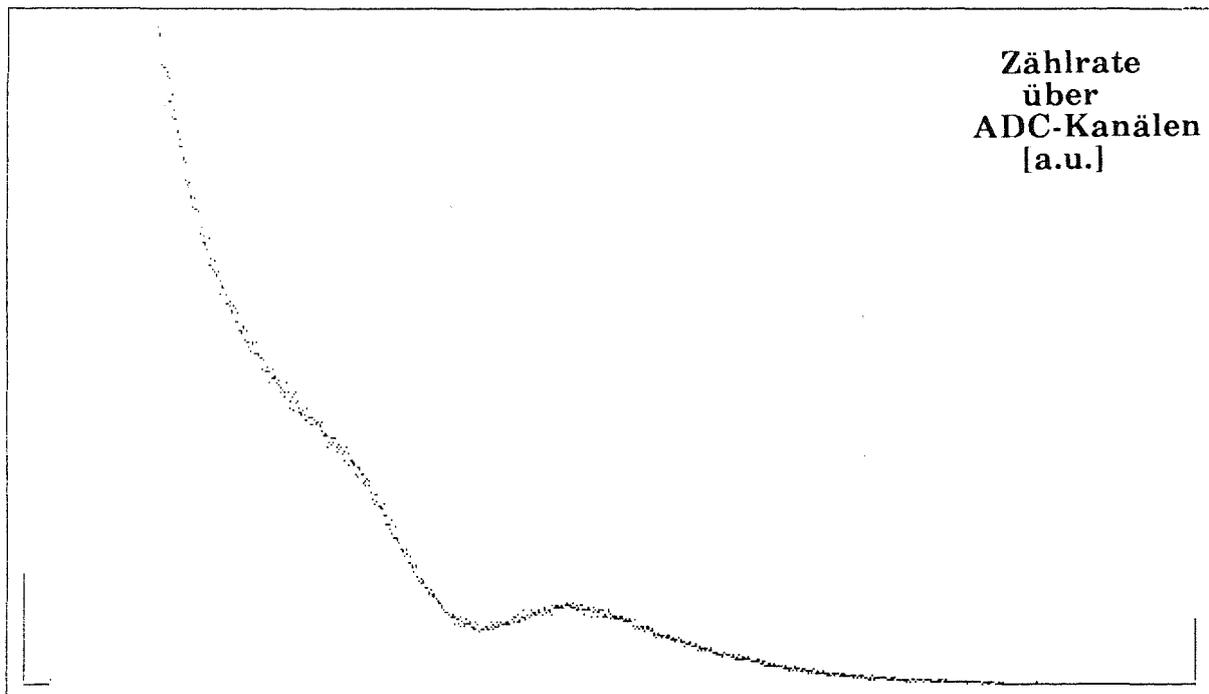


Abb. 8.2 : Signalhöhenpektrum eines 1,5 cm dicken Szintillators.

Quellen aufgenommen wurden (^{60}Co siehe oben; ^{137}Cs ; γ : 661 keV)(siehe Abb. 8.3). Das grobe Bestimmen der Compton-Kante ermöglichte die Eichung. Um das Auffinden der jeweiligen Compton-Kante zu erleichtern, wurde später jeweils der Untergrund (Messung ohne Quelle bei gleicher Meßzeit) abgezogen. Es wurde zunächst nur das Spektrum eines Szintillatord paddels aufgenommen.

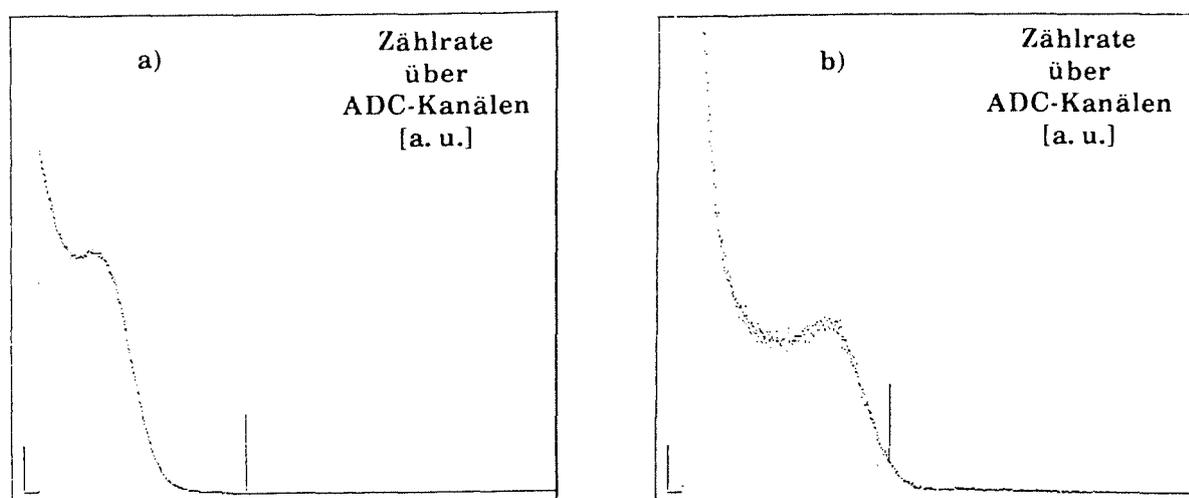


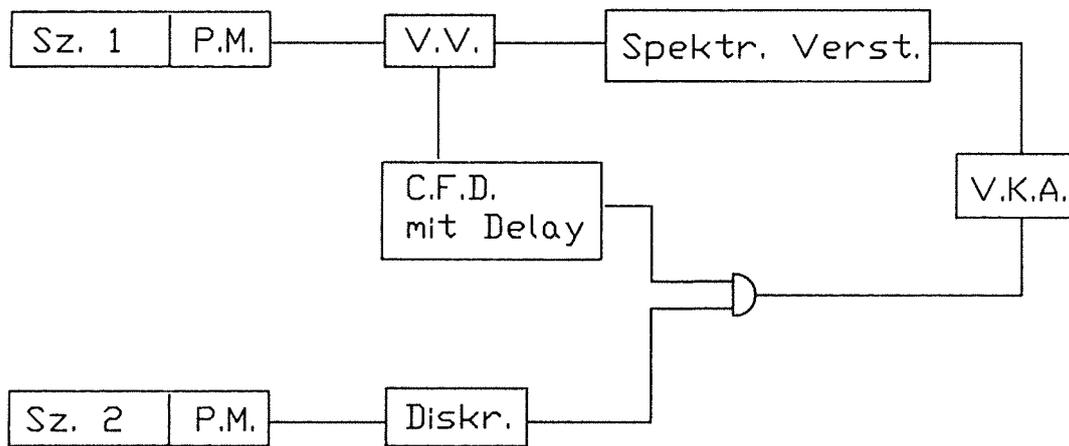
Abb. 8.3 : Szintillator-Spektren für Compton-Elektronen zweier γ -Quellen :
a) ^{137}Cs , b) ^{60}Co

Für die Einstellung der Diskriminatorschwellen stehen mehrere Möglichkeiten zur Auswahl:

- 1) Aufbau der in Abb. 8.1 dargestellten Schaltung, bei der das Photomultiplier-Signal nach dem Vorverstärker verzweigt wird und über einen 'Timing Filter Amplifier' auf einen 'Gate and Delay Generator' und von dort auf den Gate-Eingang des Vielkanal-Analysators gegeben wird. Der Nachteil dieser Anordnung liegt darin, daß das Signal, das am Diskriminator ankommt nicht mehr identisch mit dem ursprünglichen Signal des Photomultipliers ist (Eingangsimpedanzen ändern die Signalform trotz Verstärkungsfaktor 1) und sich somit die Schwelleneinstellung gegenüber dem Originalbetrieb verändern kann.
- 2) Es ist möglich sowohl auf den Vorverstärker, als auch auf den 'Timing Filter Amplifier' zu verzichten. Allerdings ist es dann notwendig die Photomultiplier-Spannung zu verändern, um geeignete Signale für einen Spektroskopie-Verstärker zu bekommen. Dies bewirkt aber wiederum, daß das Signal gegenüber dem Originalbetrieb verändert wird.

Sinnvoll ist es deshalb bei diesen Methoden jeweils die Zählrate oberhalb der gewünschten Schwelleneinstellung auszumessen (Integration des Spektrums) und diese Zählrate im Originalbetrieb einzustellen, da sich das Spektrum qualitativ nicht verändert sondern nur verzerrt wird.

3) Eine dritte Möglichkeit besteht darin, einen zweiten Szintillator auf den ersten zu legen und eine Koinzidenzmessung zu starten (Schaltung siehe Abb. 8.4). Wie Abb. 8.5 zeigt ist hier nur noch eine Landau-Verteilung für die Myonen zu erkennen. Dreht man nun die Diskriminatorschwelle auf einen Wert, so daß das Spektrum kurz vor diesem Peak abgeschnitten wird, so ist die gewünschte Einstellung erreicht.



Sz. : Szintillator
P.M. : Photomultiplier
V.V. : Vorverstärker
Spektr. Verst. : Spektroskopie Verstärker
C.F.D. : Constant Fraction Diskriminator
V.K.A. : Vielkanalanalysator
Diskr. : Diskriminator

Abb. 8.4 : Koinzidenzschaltung zweier Szintillatoren.

Der Einfachheit halber wurde zunächst mit Methode 1 die einzustellende Zählrate gemessen und an jedem Diskriminator dieser Wert eingestellt. Angenommen wurde dabei, daß alle Szintillatoren und Photomultiplier (ebenfalls aus Beständen, die aus dem CELLO-Experiment übernommen wurden) in etwa gleiches Verhalten zeigen. Zur Überprüfung der eingestellten Zählraten wurde

ein Programm geschrieben, das in regelmäßigen Abständen die Zählraten aller 12 Szintillatoren von einem 12-fach-Scaler über CAMAC ausliest.

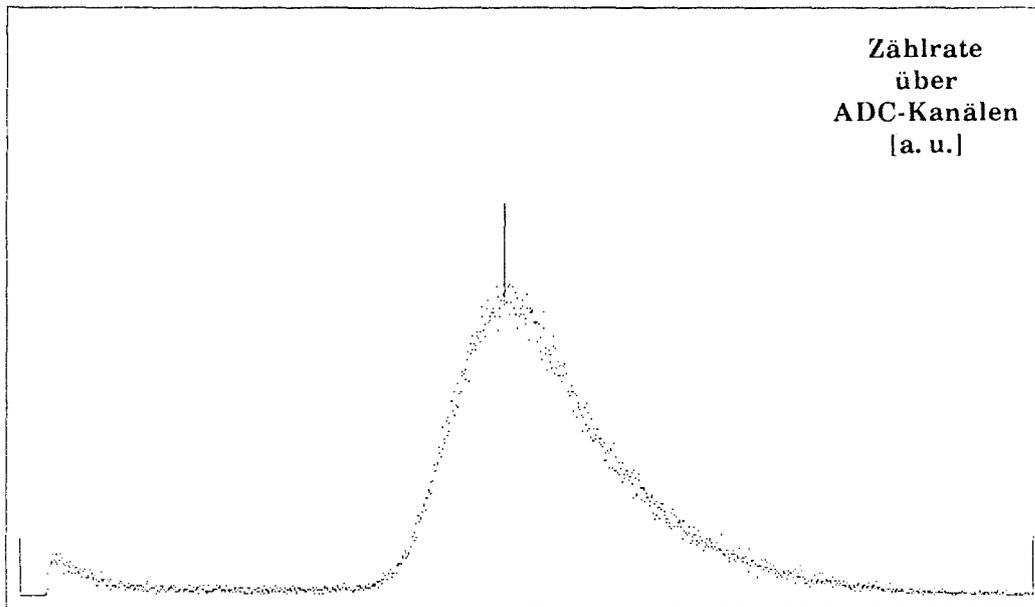


Abb. 8.5: Koinzidenzspektrum zweier Szintillatoren - Landau-Verteilung.

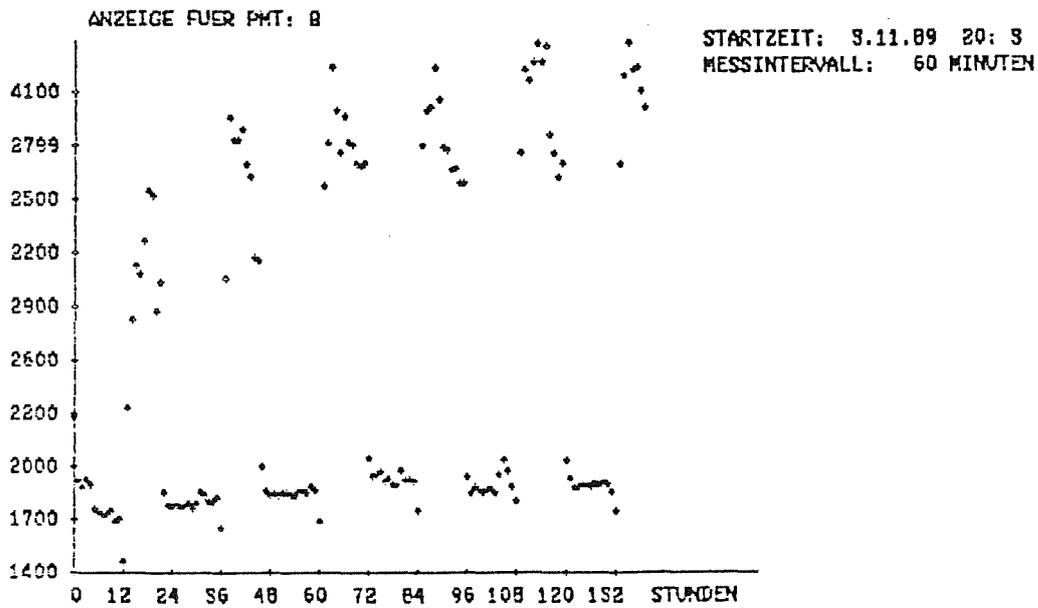


Abb. 8.6: Zählrate der Szintillatoren über der Zeit aufgetragen.

Eine Auftragung der jeweiligen Zählrate über einer entsprechenden Zeitskala gibt Auskunft über die Stabilität der Zählrateneinstellung über längere Zeiträume. Wie Abb. 8.6 zeigt, war die Annahme, daß alle Szintillatoren und Photomultiplier korrekt arbeiten, nicht berechtigt. Der 24 -Stunden-Rhythmus in den Diagrammen zeigte deutlich Lichtundichtigkeiten verschiedener Szintillatoren. Um sicher zu gehen, wurde beschlossen alle Szintillatoren neu zu bewickeln und abzudichten. Die damit erreichte Stabilität der Zählraten ist gewährleistet, wenn die Photomultiplier mehr als zwei Tage gearbeitet haben, da erst dann ein stabiler Zustand der zugehörigen Elektronik erreicht ist. Weiterhin wurden nun Energieverlust-Spektren aller Szintillatoren aufgenommen.

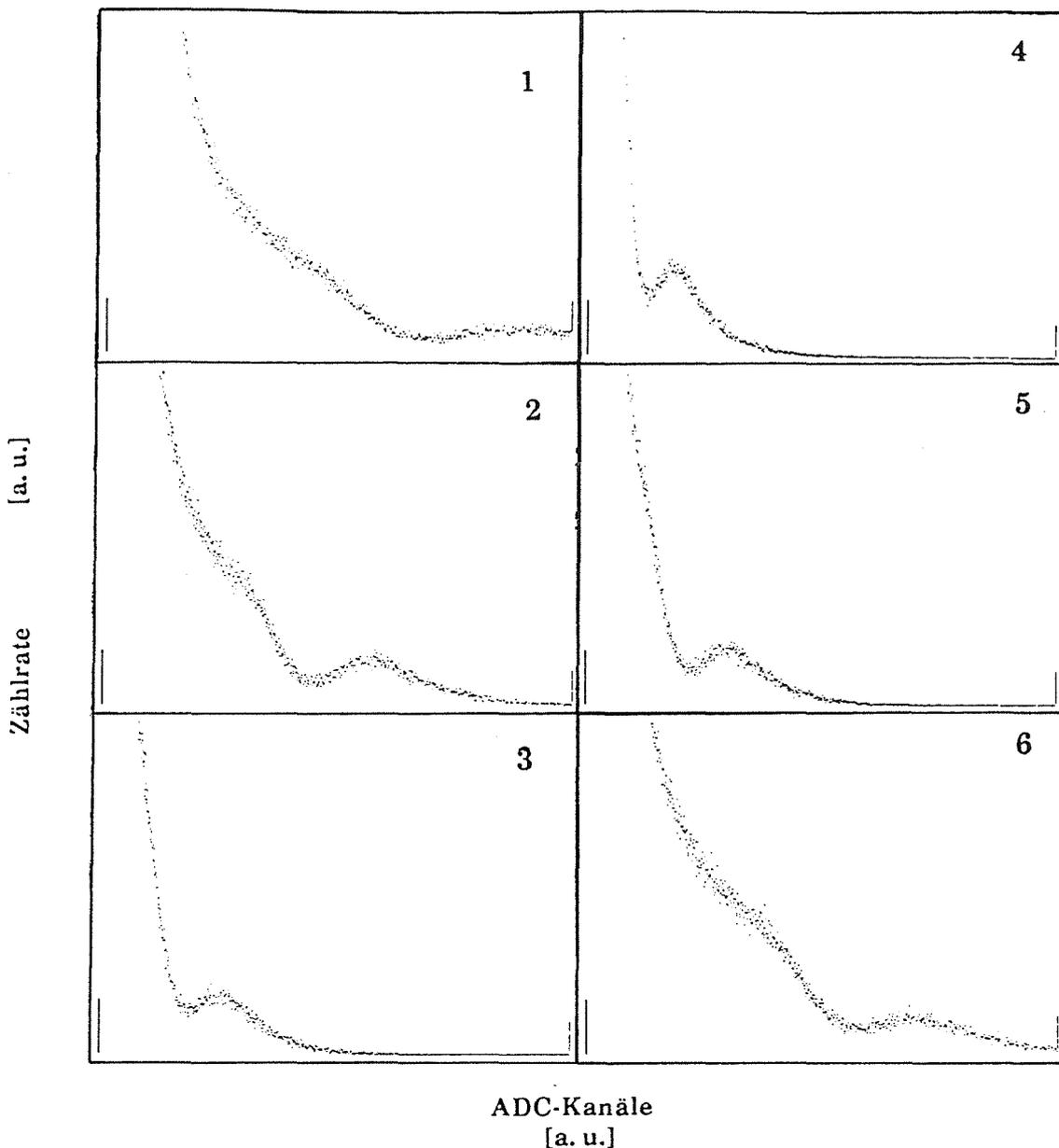


Abb. 8.7: Impulshöhenspektren der unteren sechs Szintillatorsegmente.

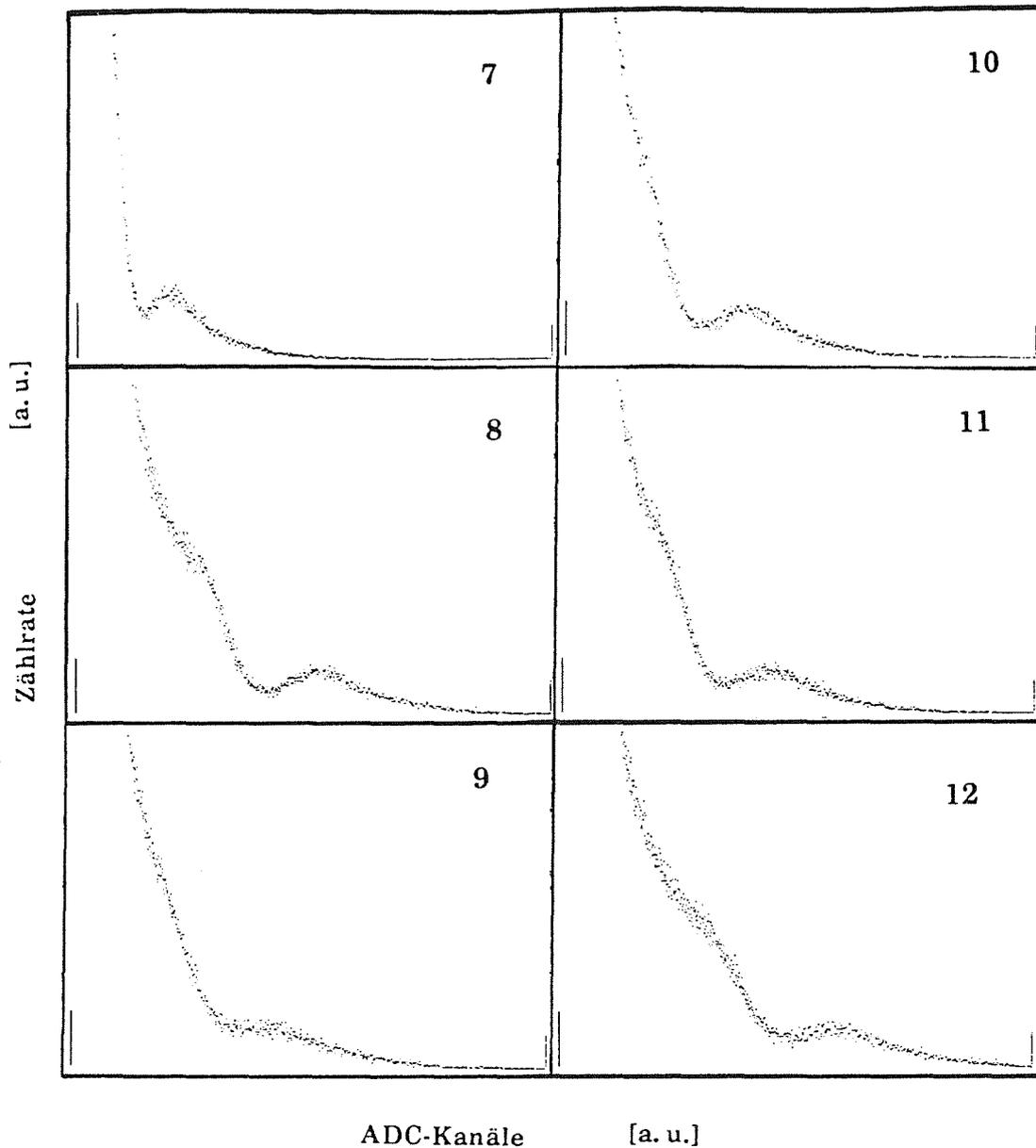


Abb. 8.8: Impulshöhenspektren der oberen sechs Szintillatorsegmente.

Auch hier waren Unterschiede festzustellen. Durch Überprüfung bzw. Erneuerung des optischen Kontaktes der Photomultiplier zu den Lichtleitern (über Kopplungsfett) der Szintillatoren, wurde erreicht, daß alle Szintillatoren qualitativ das gleiche Spektrum aufzeigten (Abb. 8.7 und 8.8). Da allerdings für alle Photomultiplier gemeinsam nur eine Hochspannungsversorgung zur Verfügung stand, waren aufgrund der Unterschiede zwischen den einzelnen Photomultipliern nicht überall gleiche Signalhöhen zu erreichen, so daß manche Spektren etwas weiter ausgedehnt waren (bei gleicher Signalhöhenskala am Vielkanal-Analysator). Dies stellt jedoch kein Problem für die Einstellung der Diskriminatorschwellen dar.

8.2 Messung der Feuchtigkeit innerhalb der Kammer

Da die Gasmischung ein wesentlicher Betriebsparameter der Kammern ist, wurde nach Installation des Gasversorgungssystems damit begonnen, die Kammerausgänge auf Verunreinigungen zu untersuchen. Da vor allem Feuchtigkeit in der Kammer zu vermeiden ist, wurde ein Meßgerät installiert, das den H₂O-Anteil im Gasgemisch anzeigt. Obwohl der Meßsensor dieses Gerätes falsch geeicht ist, war eine relative Messung der Feuchtigkeitsentwicklung in der Kammer möglich. Wie man in Abb. 8.9 sieht, fällt über einige Tage nach

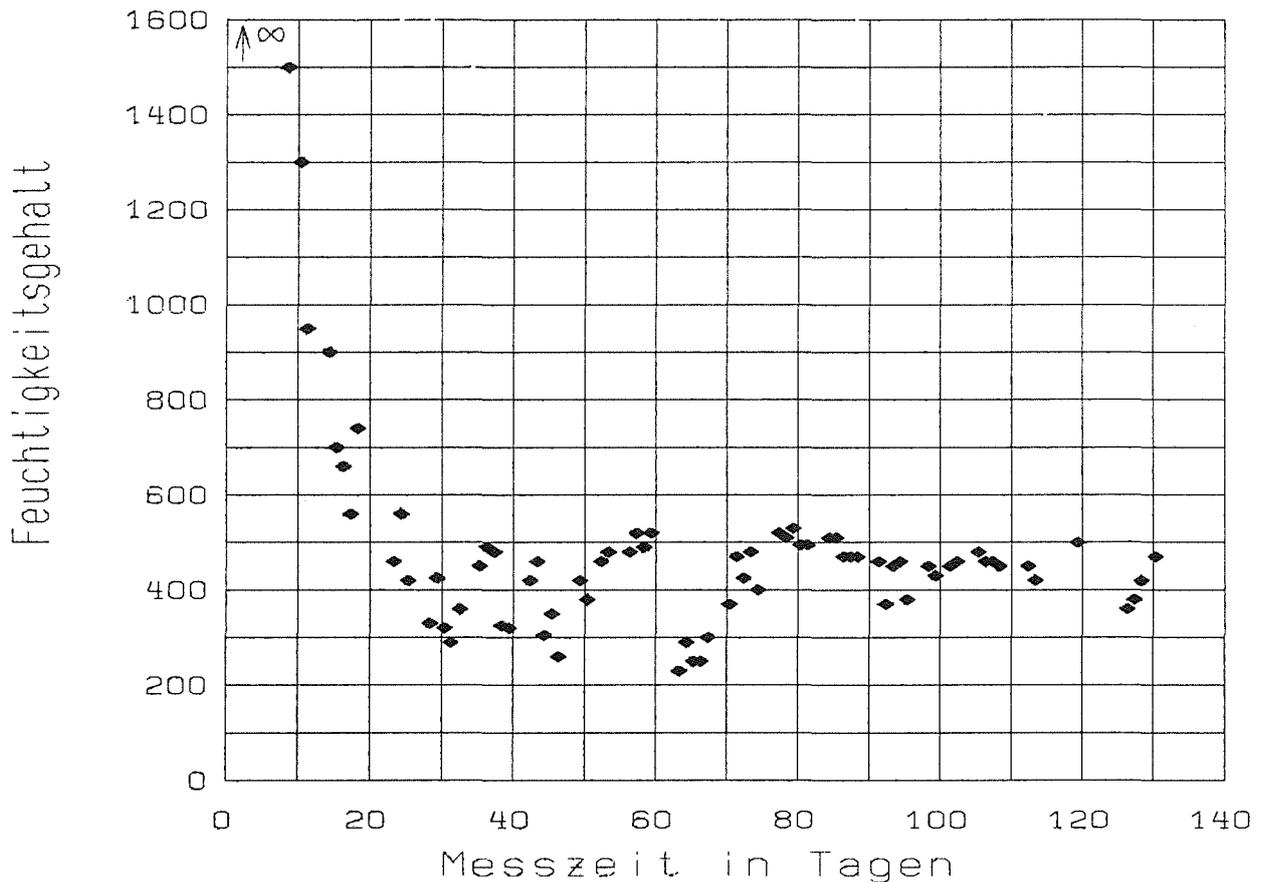


Abb. 8.9: Feuchtigkeitsentwicklung in der Kammer nach Beginn mit der Argondurchspülung.

Inbetriebnahme der Kammer der Feuchtigkeitsgehalt stark ab, während danach ständig Schwankungen um einen Wert auftreten, die auch am Kammereingang zu beobachten sind. Die Schwankungen sind vermutlich Folge der Sensibilität des Meßinstruments auf leichte Druck- bzw. Durchflußänderungen und von Änderungen in der den Meßaufbau umgebenden Atmosphäre.

Festzuhalten bleibt jedoch, daß nach ca. einem Monat nach einer eventuellen Kammeröffnung wieder ein normaler Einsatz der Kammer möglich sein sollte (wichtig für das Hochspannungsverhalten).

8.3 Überwachung weiterer Betriebsparameter der Kammer

Leichte Schwankungen im Gasdurchfluß sind der Regelfall, beeinflussen allerdings die Messung nicht, solange der Fluß dennoch im wesentlichen konstant gehalten wird (tägliche Kontrolle oder automatische Durchfluß-Regelung).

Die Hochspannungseinstellung wirkt sich stark auf die Signale an den Drähten und Streifen der Kammer, und damit auf das Ansprechverhalten einer Kammer aus. Die Hochspannung wurde während einer Messung jeweils konstant gehalten und für Testzwecke von den für die Spurrekonstruktion günstigsten Werten abweichend eingestellt. Sämtliche Parameter der Stromversorgung und Schwel-

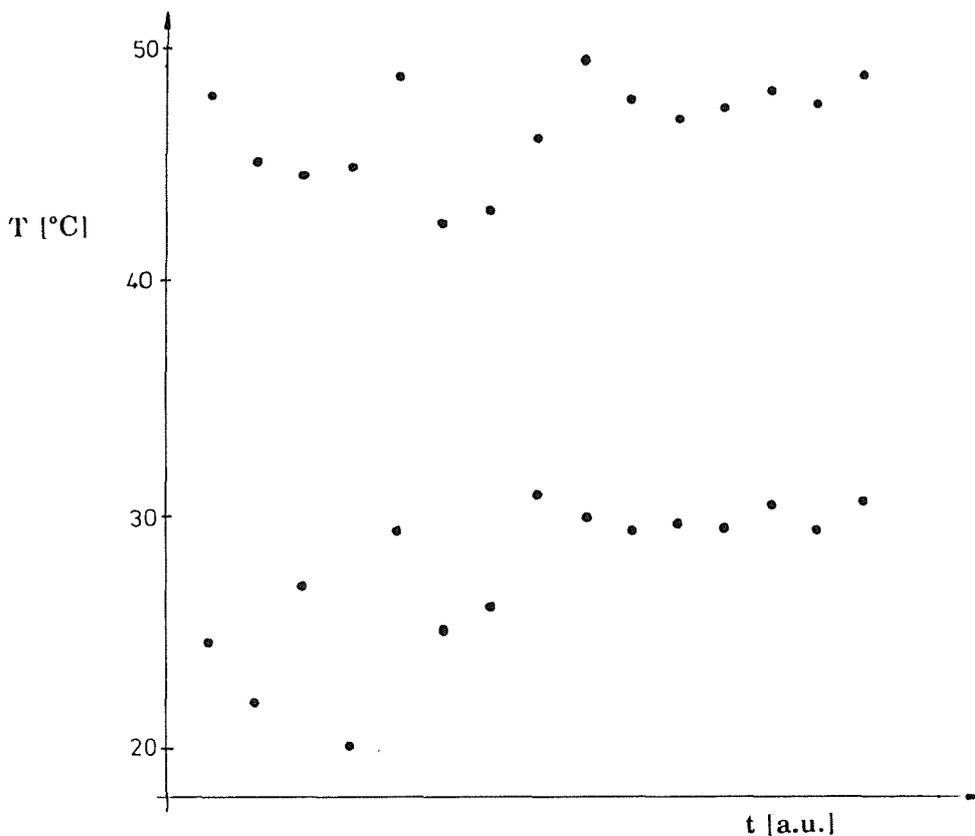


Abb. 8.10: Temperaturmessungen auf der Kammerelektronik (oben) in Abhängigkeit der Hallentemperatur (unten).

leneinstellungen wurden nach einmal durchgeführter Einstellung konstant gehalten, da sonst eventuell unterschiedliche Einstellungen an den FILAS-Modulen zu Ausfällen einzelner Kanäle führen würden. In diesem Fall müßten die Kanäle jeweils einzeln nachgeregelt werden. Dies wurde jedoch nicht für sinnvoll erachtet.

Wesentlich ist, daß die Temperatur auf den FILAS in etwa konstant gehalten wird. Abb. 8.10 zeigt, daß bei laufender Lüftung die Temperaturschwankungen sich denen der Außentemperatur anpassen, so daß bei anähernd konstanter Außentemperatur konstante Verhältnisse herrschen. Bei abgeschalteter Lüftung wurden jedoch auf einzelnen FILAS-Kühlkörpern Temperaturen über 60°C gemessen. Dies ist auf Dauer für die Elektronik schädlich.

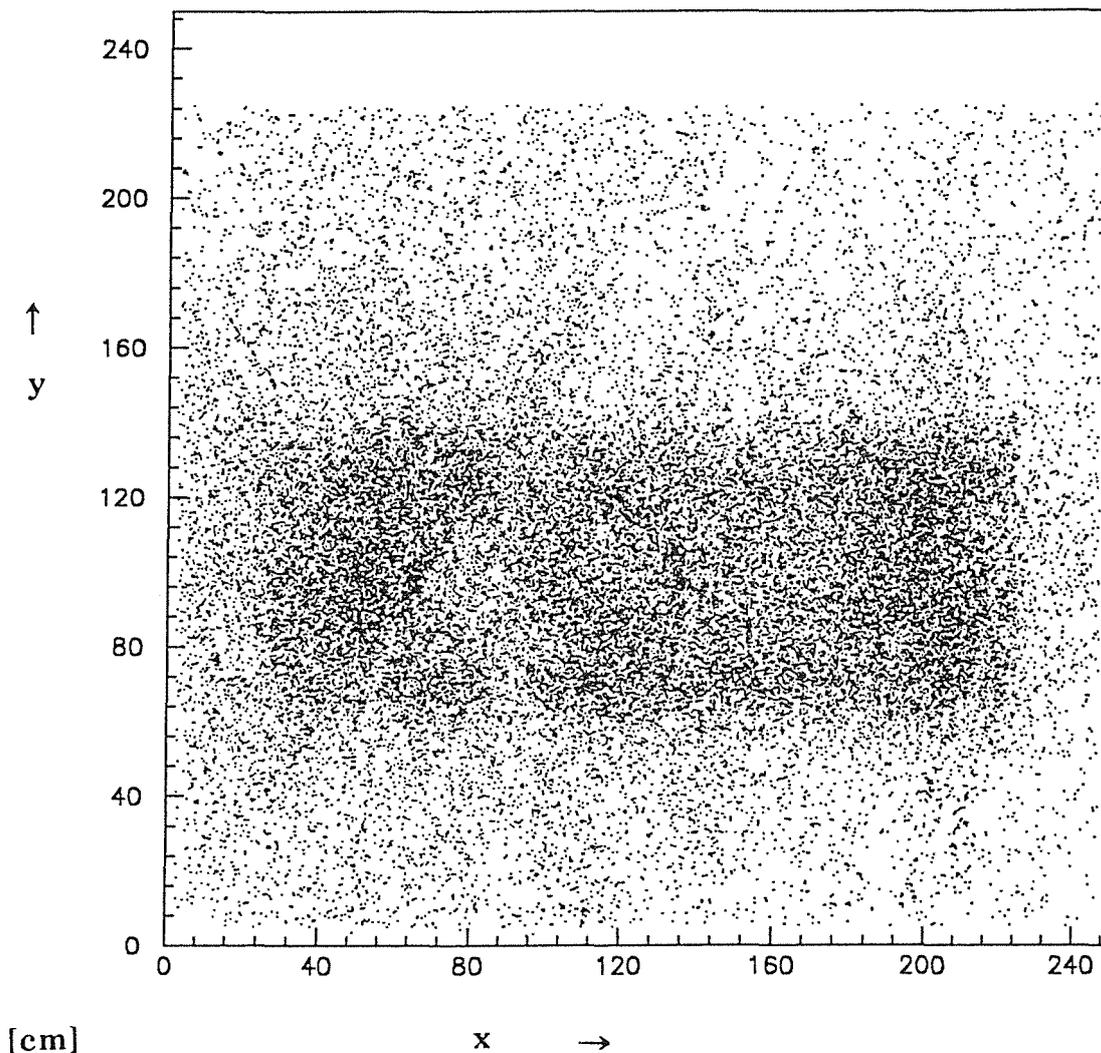


Abb. 8.11: Eventverteilung in einer Kammer.

8.4 Messungen mit den Kammern

Sowie ein Meßprogramm erstellt war, wurde damit begonnen, Meßdateien aufzunehmen. Vom Rekonstruktionsprogramm gefundene Treffer jeweils einer Kammer (aller Ereignisse einer Messung) wurden in sogenannten Scatter-Plots dargestellt (siehe Abb. 8.11). Man sieht deutlich einen durch die Triggerebenen bevorzugt ausgewählten Bereich, über einem gleichmäßig verteilten Untergrund, der durch Ereignisse zustande kommt, die mit den triggierenden Ereignissen koinzident stattfinden.

Die Triggerebenen wurden nun für verschiedene Messungen sukzessiv verschoben. So konnte durch mehrere Messungen überprüft werden, ob das Ansprechverhalten der Kammern über die gesamte sensitive Fläche homogen ist. In Abb. 8.12 sind deutlich Muster zu erkennen. Für die Entstehung solcher

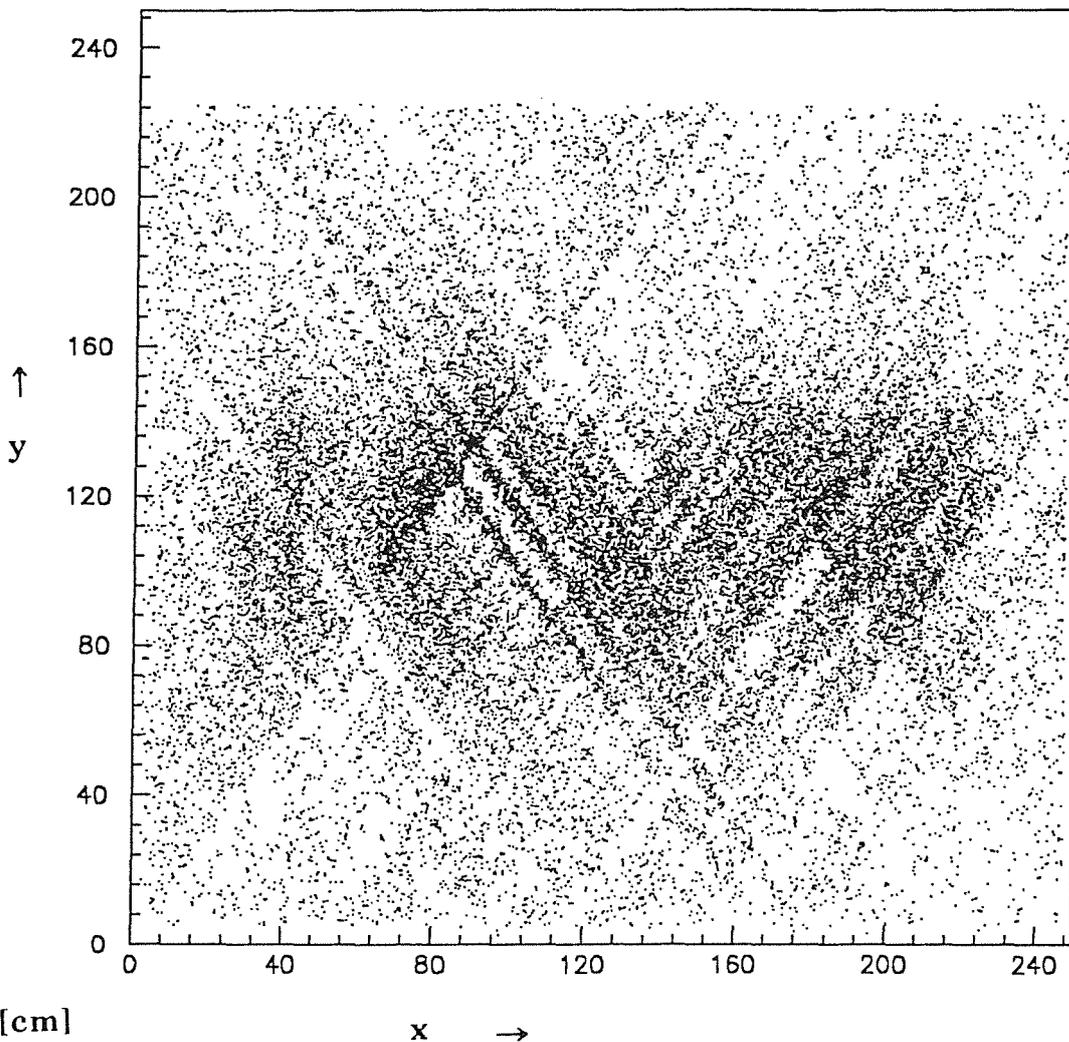


Abb. 8.12: Muster in der Eventverteilung weisen auf unterschiedlich abgegliche Elektronen-Kanäle und Defekte hin.

Muster sind unterschiedliche Einstellungen der FILAS-Schwellen, defekte Elektronikkanäle oder defekte Kontaktierungen der Kathodenstreifen mögliche Ursache. Es wurde kontinuierlich zwischen den Messungen versucht, diese Fehler zu beseitigen. Besonders beim Abgleich der FILAS ergaben sich große Probleme.

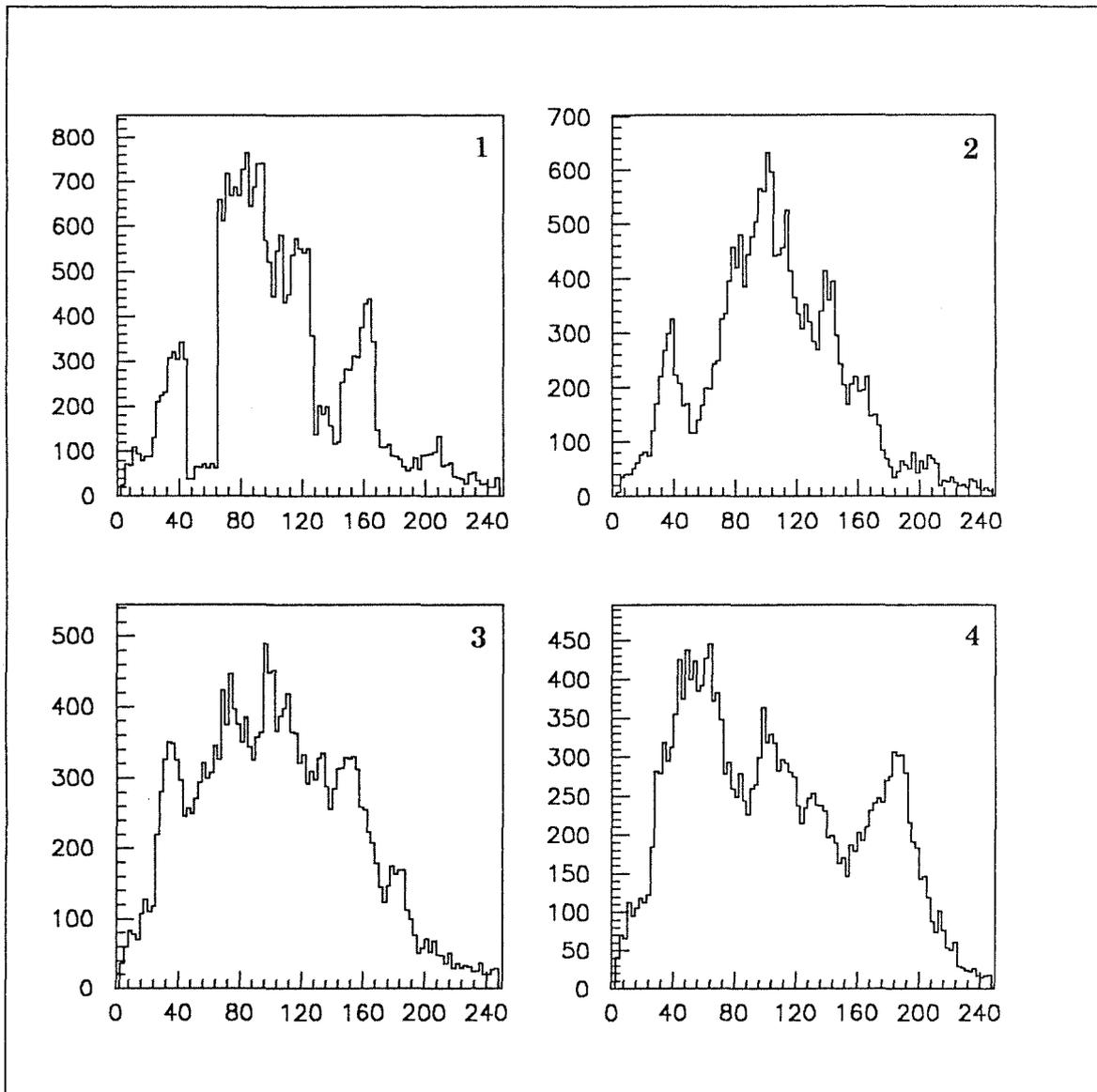


Abb. 8.13 : Projektion der Eventverteilung auf eine Achse senkrecht zu den Anodendrähten.

Um genauere Informationen darüber zu erhalten, welche Kanäle stärker bzw. schwächer ansprechen, wurden die Trefferverteilungen (Scatter-Plots) auf Geraden senkrecht zur Draht- bzw. den Streifenrichtungen projiziert. Abb. 8.13 bis 8.15 zeigen Strukturen, die von einem kontinuierlichen Verlauf der Ansprechwahrscheinlichkeiten deutlich abweichen. Zu erwarten wäre ein - nach

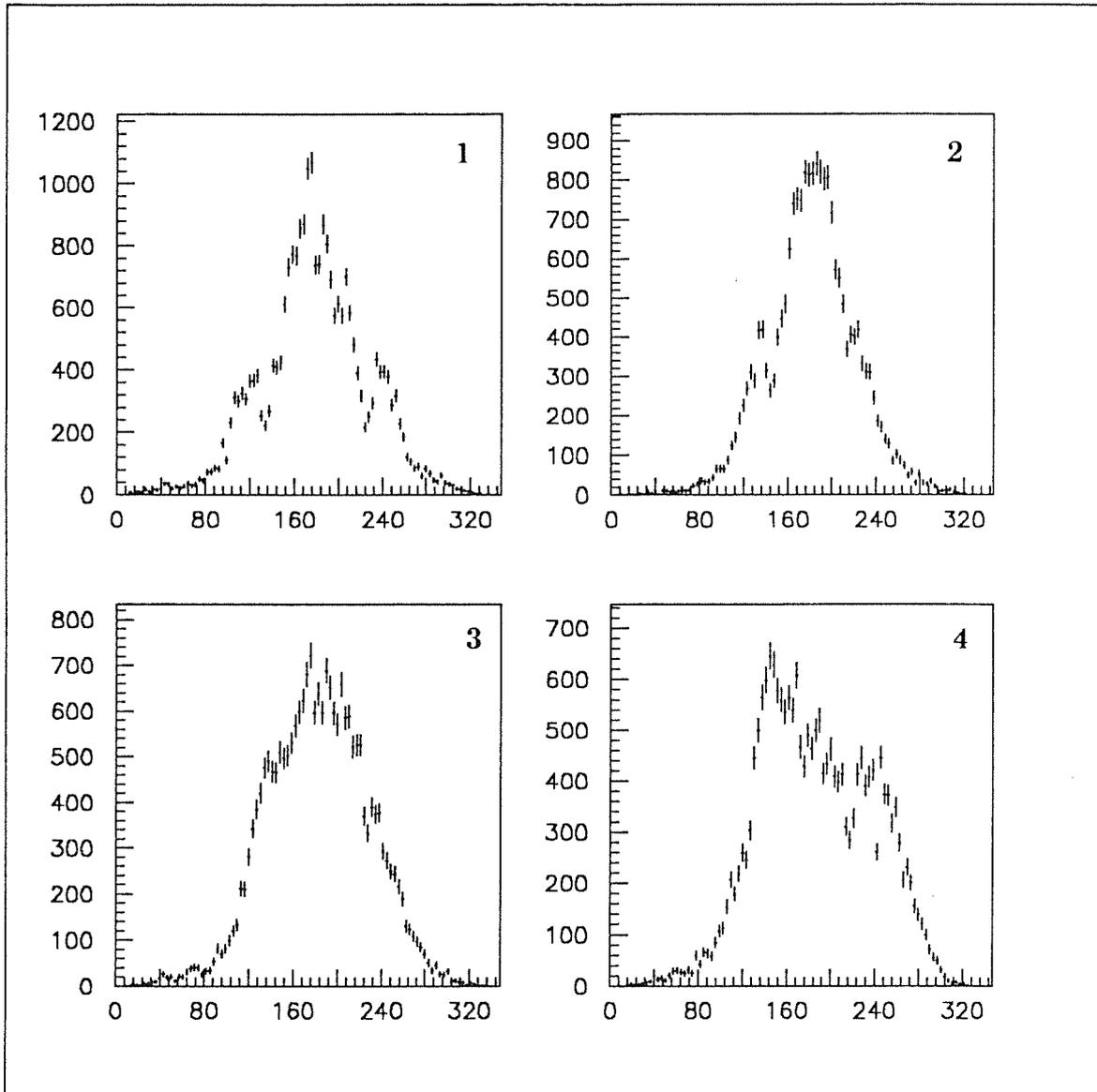


Abb. 8.14 : Projektion der Eventverteilung auf eine Achse senkrecht zu den Kathodenstreifen der Kathode 1.

genügend langer Meßzeit (viele Ereignisse) - glatt verlaufendes Spektrum, dessen Form vom jeweiligen Ort der Triggerebenen und von den unterschiedlichen Streifenlängen (unterschiedliche sensitive Fläche der Kanäle) bestimmt wird. Um die zu erwartenden Verteilungen zu erhalten, wurde ein Simulationsprogramm geschrieben, das wählbare Triggereinstellungen und die Winkelverteilung kosmischer Myonen berücksichtigt. Die so simulierten Treffer werden ebenfalls senkrecht zu Streifen- bzw. Drahrichtung der Kammer projiziert, so daß unter Berücksichtigung der Kammergeometrie Verteilungen entstehen, die für jede

Triggereinstellung einen Vergleich der zu erwartenden mit der gemessenen Verteilung zulassen.

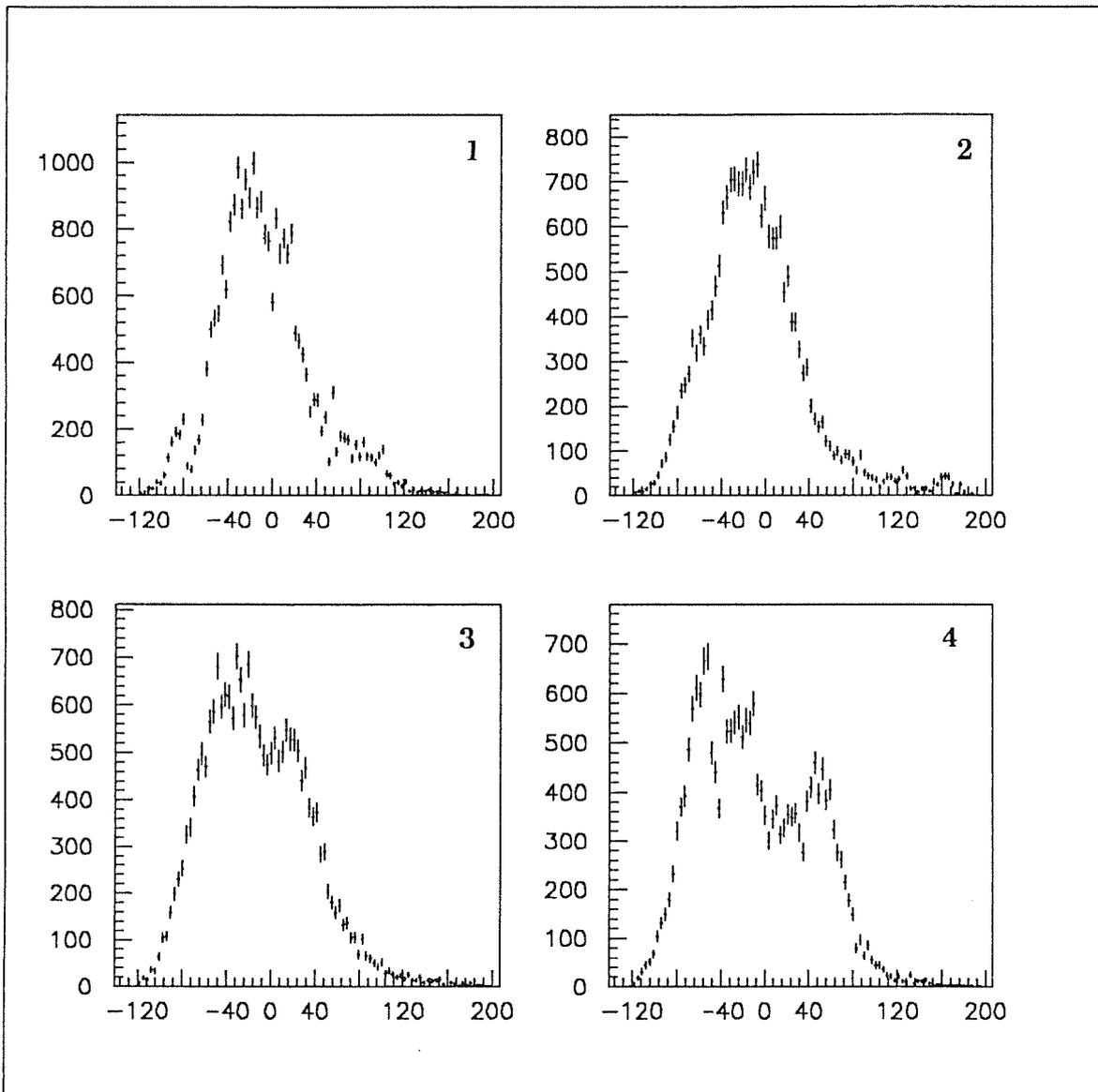


Abb. 8.15: Projektion der Eventverteilung auf eine Achse senkrecht zu den Kathodenstreifen der Kathode 2.

Trotz der nicht überall gleichmäßig eingestellten Elektronik-Kanäle wurde bereits bei diesen ersten Messungen versucht, für jedes Ereignis Spuren durch den Detektoraufbau zu finden. Es wurde verlangt, daß mindestens drei Kammern Treffer besitzen, die bei einer gewissen Fehlertoleranz (Abweichung durch begrenzte Ortsauflösung des Detektors) auf einer Ausgleichsgeraden liegen. Die Abstände (in der Kammerebene) dieser Treffer zur jeweiligen Ausgleichsgeraden wurden für jede Kammer wiederum in einem Scatter-Plot aufgetragen. Als

Ursprung dieser Plots wurde der jeweilige Durchstoßpunkt der Ausgleichsgeraden durch die Kammerebene gewählt. Abb. 8.16 zeigt Abweichungen von

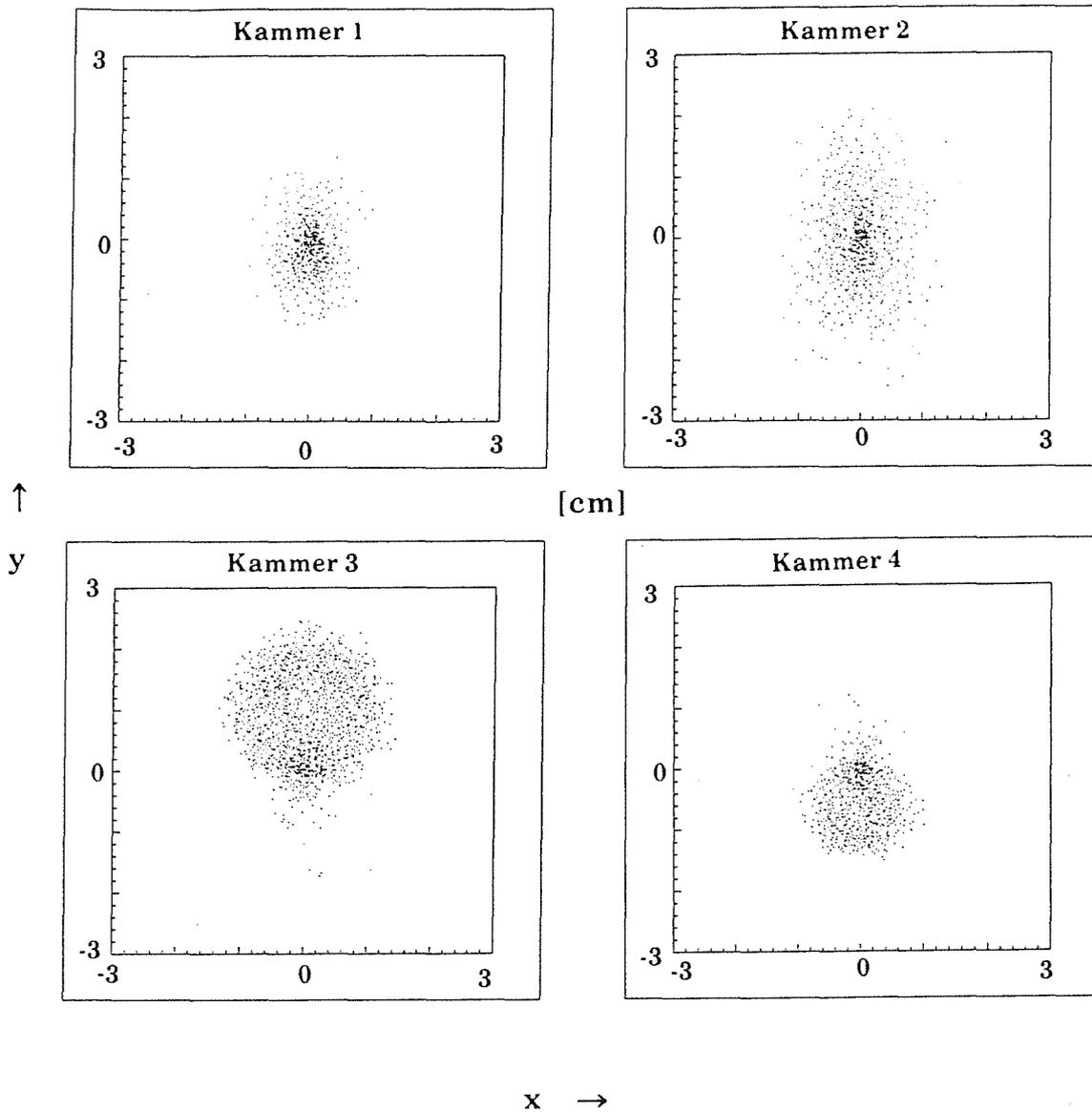


Abb. 8.16 : Scatterplots für die Abweichungen (in der Kammerebene) der rekonstruierten Ortskoordinaten zur ermittelten Trajektorie.

einer zu erwartenden symmetrischen Verteilung bezüglich der x- und y-Achse. Dies wurde als Zeichen dafür erkannt, daß die Myonkammern nicht exakt übereinander liegen, sondern etwas gegeneinander verschoben sind. Während Verschiebungen der Kammern in y-Richtung durch entgegengesetztes Bewegen der Kammern in ihren Laufschienen zu korrigieren waren, sind Verschiebungen in x- und z-Richtung sowie Verdrehungen gegeneinander nicht zu beheben, da sie

auf mechanischen Toleranzen der Tragekonstruktion (Gerüst) des Versuchsaufbaus, sowie der Kammeraufhängungen zurückzuführen sind.

Durch Verschiebungskorrekturen in y-Richtung war jedoch eine deutliche Verbesserung zu erzielen. Merkwürdig bleibt jedoch, daß offensichtlich nicht alle Kammern - trotz gleicher Geometrie - das gleiche Auflösungsvermögen besitzen, da manche Kammern stärker um den Geradendurchstoßpunkt streuen, als andere. Eine Erklärung hierfür sind unterschiedliche Ansprechhäufigkeiten und Untergrundzählraten in den einzelnen Kammern, da (wie bereits erwähnt ; Kap. 8) das Fehlen als auch das Ansprechen zu vieler Kanäle, das Auswertprogramm täuschen können. Um Hinweise auf die Untergrundzählrate der Kammern zu bekommen, wurde das Meßprogramm derart verändert, daß ohne Trigger gemessen werden konnte. Es wurde ein WRITE-Signal für die Kammer erzeugt und überprüft, ob innerhalb diesen Gates (300 ns Breite) ein Ereignis in der Kammer registriert wurde. Im Fall, daß einer oder mehrere Kanäle angesprochen haben, wurden diese Daten auf Datei geschrieben, im anderen Fall wurde das nächste Write-Gate zur Kammer geschickt. In beiden Fällen wurde Statistik über die Häufigkeit dieser Fälle geführt. Weiterhin wurde untersucht, wie häufig die so registrierten Daten eine Rekonstruktion von Treffern zulassen.

	Kammer-Nummer :			
	1	2	3	4
Anzahl ausgesendeter WRITE-Gates (300 ns) :			213 837	
Effektive Meßzeit / Gesamtmeßzeit :			0,064 s / 604,24 s	
Anzahl der Ereignisse, bei denen ≥ 1 Kanäle angesprochen haben [Zählrate] :			30 000 [= 468 kHz]	
	595	21 695	8 383	384
Anzahl, der vom Rekonstruktionsprogramm gefundenen Treffer (minimale Clustergröße = 2) :			18 591	
	454	14 031	5 315	289
Anzahl der Treffer, wenn zusätzlich gefordert wird, daß mehrere Kammern ansprechen :				
≥ 2			409	
	41	403	418	74
≥ 3			28	
	11	36	40	28
4			4	
	6	6	6	4
Anzahl der gefundenen Spuren (≥ 3 Kammern) : [Zählrate] :			17	
			[= 265 Hz]	

Tab.8.1 : Statistik für ungetriggerte Daten zur Abschätzung der Untergrundzählrate.

Tabelle 8.1 zeigt, daß bei etwa 14 % der ausgesandten WRITE-Gates mindestens 1 Kanal der vier Kammern angesprochen hat. Betrachtet man allerdings jede Kammer für sich, so ergeben sich sehr unterschiedliche Zählraten, was sich in der Rekonstruktion von Treffern noch deutlicher niederschlägt. Diese bereits vermutete unterschiedliche Empfindlichkeit der Kammern auf Untergrundereignisse ist wiederum Folge lokaler Differenzen in der FILAS-Schwelleneinstellung. Fordert man aber die Koinzidenz mehrerer Kammern, so gleichen sich die Zählraten mit verschärfter Koinzidenzbedingung einander an. Verlangt man, daß sich aus den Treffern Spuren bilden lassen, sinkt die Zählrate abermals. Aus den so erhaltenen Messungen läßt sich folgern, daß eine Vortäuschung durchgehender Teilchenspuren durch zufällige Koinzidenzen nahezu auszuschließen ist, während eine Beeinflussung der Messung durch Untergrundereignisse durchaus möglich ist.

Messung	D011	D012	D013	D014	D015	D016	D017	D018
Vorauswahl	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja
Anz. Events	10000	18867	16306	16502	17148	17363	15093	18287
Rekonstr.								
1. Auswahl	69%	67%	66%	69%	70%	68%	100%	100%
2. Auswahl	62%	59%	63%	65%	64%	63%	98%	98%
Spurgehalt	45%	42%	49%	49%	47%	47%	82%	90%

Tab. 8.2: Vergleich der Raten für rekonstruierte Treffer (zwei Auswahlkriterien) und Spuren in den Meßdateien D011 - D018.

In einem weiteren Schritt wurde das Meßprogramm dahingehend erweitert, daß es bereits bei der Datenaufnahme das gleichzeitige Ansprechen von Anodendrähten in mindestens 3 Kammern fordert. So wurden Daten auf Datei geschrieben, die mit großer Wahrscheinlichkeit zu Spuren führen. Dies wird beim Betrachten von Tabelle 8.2 deutlich. Mit diesen Messungen war eine gleichmäßige "Ausleuchtung" der gesamten sensitiven Detektorfläche möglich, so

daß hier Spuren über große Winkelbereiche zugelassen waren. Zunächst wurden wiederum Scatter-Plots für die Trefferverteilungen in den Kammern aufgenommen (siehe Abb. 8.17). Besonders auffällig waren deutliche Muster in Kammer 1, sowie eine Häufung von Treffern am rechten vorderen Rand von Kammer 2.

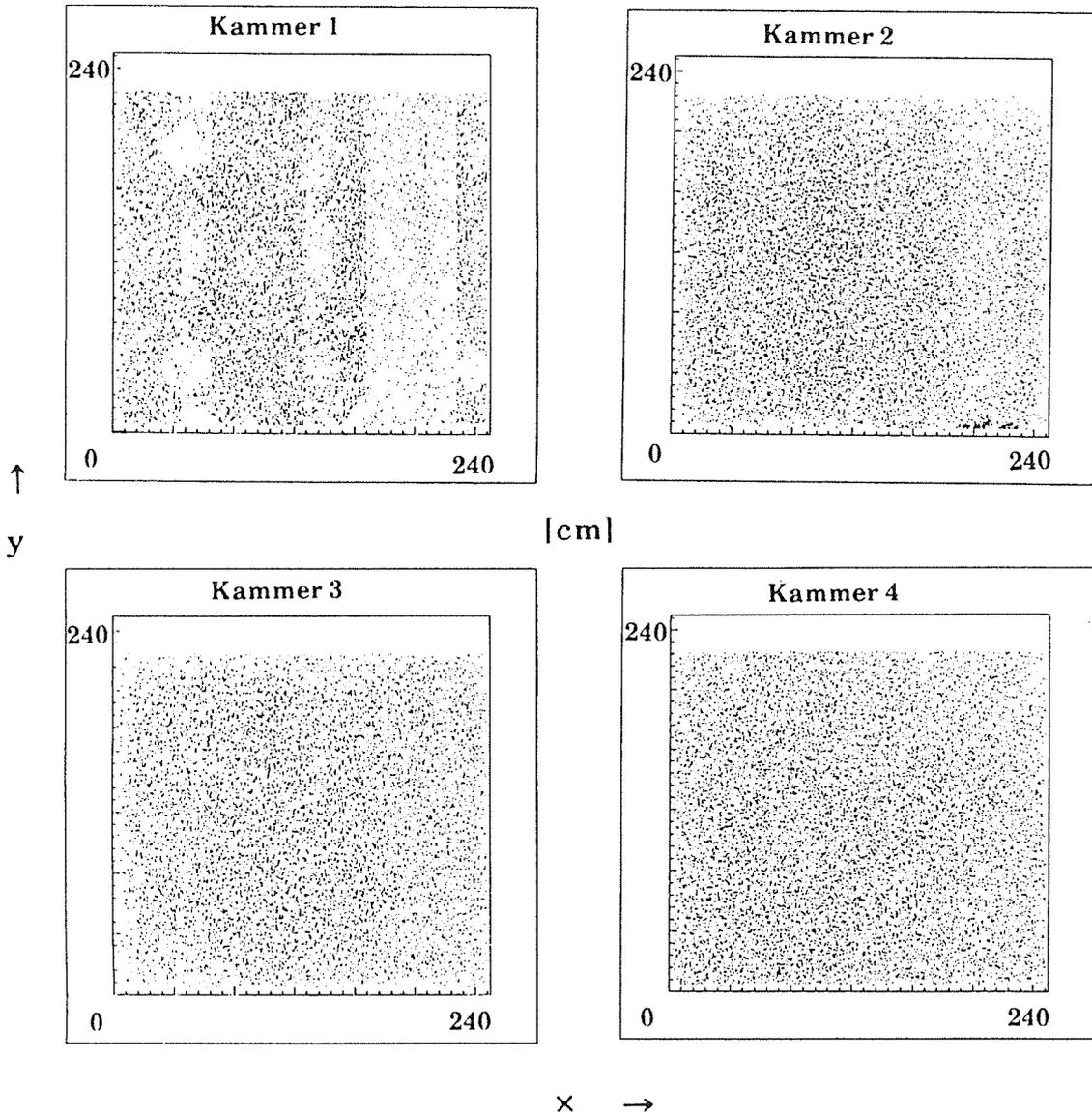


Abb. 8.17: Eventverteilungen für ausschließlich software-getriggerte Daten.

Da sich diese Effekte durch Elektroneinstellungen nicht korrigieren ließen, war eine Öffnung dieser Kammern nicht zu vermeiden. Bei Kammer 1 war die Fehlerquelle vorhersagbar, da aus den Erfahrungen einer bereits durchgeführten Kammeröffnung bekannt war, daß die Kontaktierung der Kathodenstreifen nach außen hin gelegentlich zerstört sein kann. Im zweiten Fall wurden eventuelle

Gasundichtigkeiten oder Verschmutzung der Kammer an der entsprechenden Stelle vermutet. Dies ließ sich aber nach der Öffnung nicht eindeutig beweisen. Die Scatter-Plots von Kammer 3 und 4, sowie der Kammer 2 (bis auf die erwähnte Ausnahme), wiesen nach Abgleich der FILAS-Einstellungen kontinuierliche Trefferverteilungen auf. Bei genauem Betrachten der Plots erkennt man jedoch, daß für alle Kammern die Trefferdichte zum rechten Rand hin abnimmt. Dies läßt sich dadurch erklären, daß sich der Versuchsaufbau mit seinem rechten Rand unterhalb einer Zwischendecke in der Experimentierhalle befindet, und daß sich auf der rechten Seite das Gebäude 401 anschließt, während die anderen Richtungen von "Gebäudeschatten" unbeeinflusst bleiben.

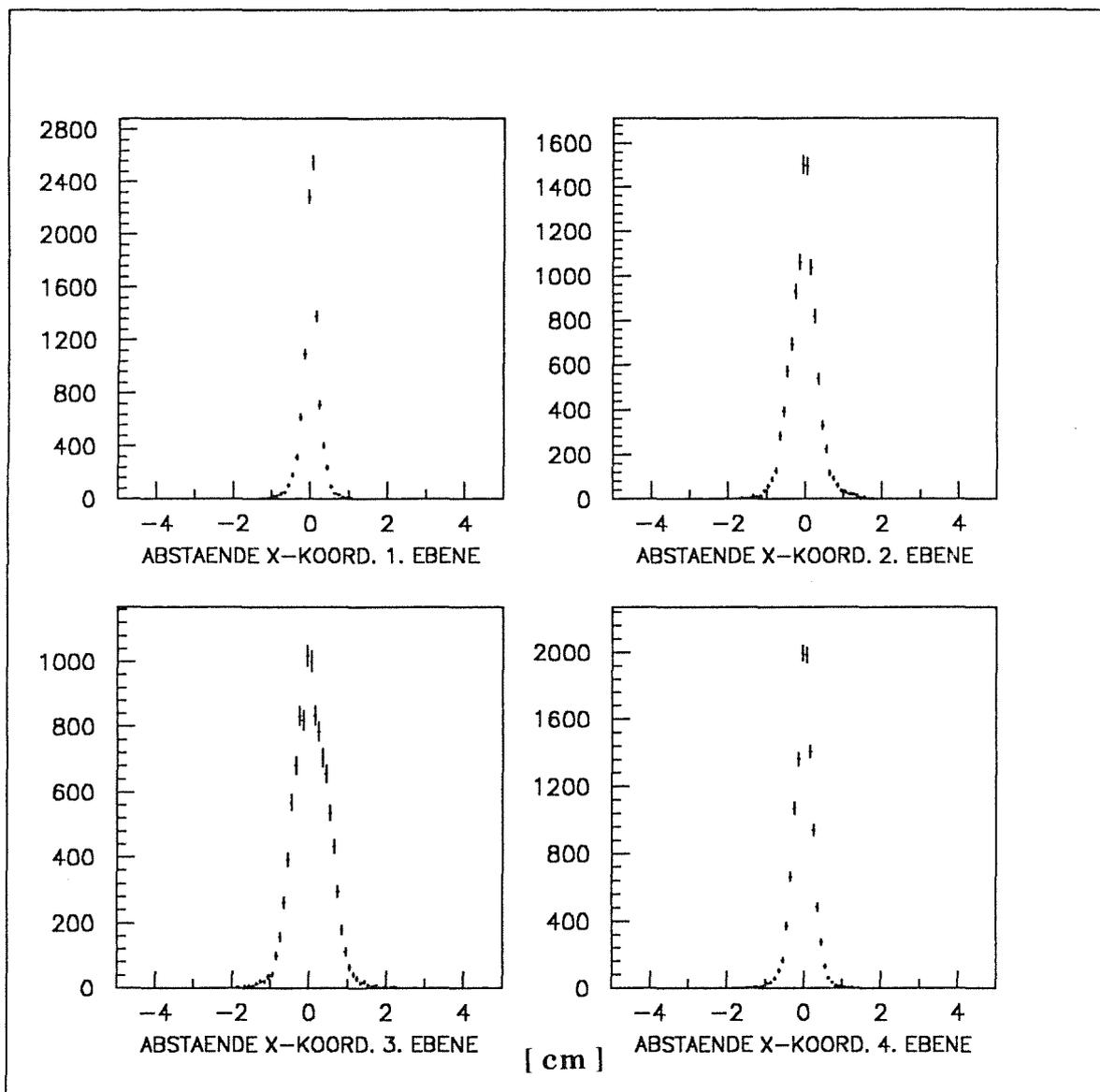


Abb. 8.18: Ortsabweichungen der vier Testkammern senkrecht zur Anodendraht-Richtung.

In einem weiteren Schritt wurden auch bei diesen Daten versucht Spuren zu finden, indem Ausgleichsgeraden angelegt wurden. Die Abstände der jeweils zu Spuren führenden Treffer zur Ausgleichsgeraden wurden in x-Abweichung und y-Abweichung zerlegt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß die Kammer in beiden Richtungen unterschiedliches Auflösungsvermögen besitzt. In getrennten Diagrammen (Abb. 8.18 und 8.19) wurden die jeweiligen Abweichungen in

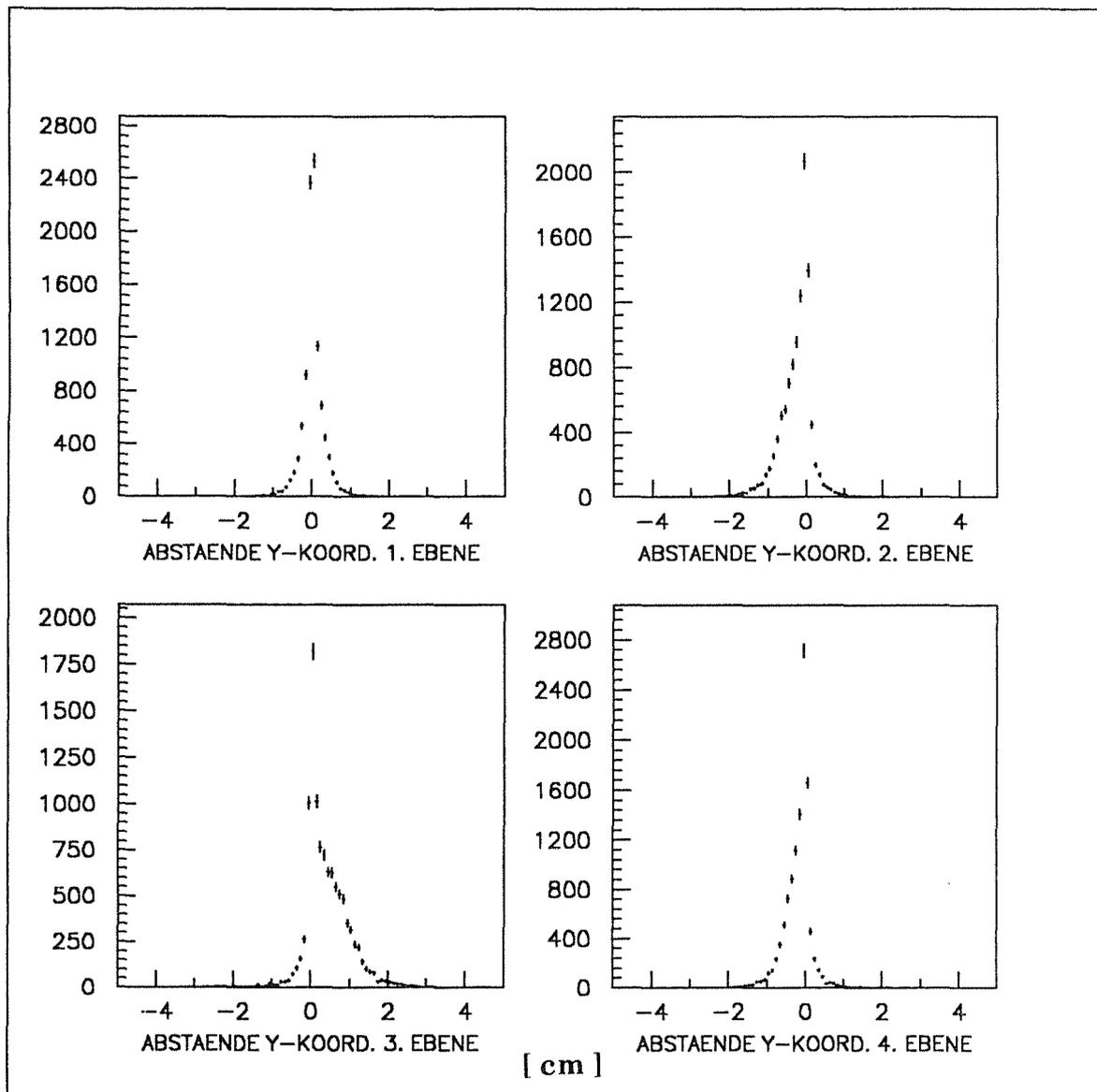


Abb. 8.19 : Ortsabweichungen der vier Testkammern entlang der Anodendraht-Richtung.

Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Die Halbwertsbreiten σ_x und σ_y dieser Verteilungen sind ein Maß für die Ortsauflösung der Detektoren. Im nächsten Schritt wurde die Dichte für eine zweidimensionale Normalverteilung nach

$$f(x, y) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \left[\left(\frac{\Delta x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \cdot \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\sigma_x \cdot \sigma_y} + \left(\frac{\Delta y}{\sigma_y} \right)^2 \right]}$$

berechnet. Hier sind Δx und Δy die Abweichungen und ρ ist der Korrelationskoeffizient zwischen x und y , der sich aus der Kovarianzmatrix ergibt. In Abb. 8.20a - 8.20d sind die hieraus resultierenden Dichteverteilungen für die

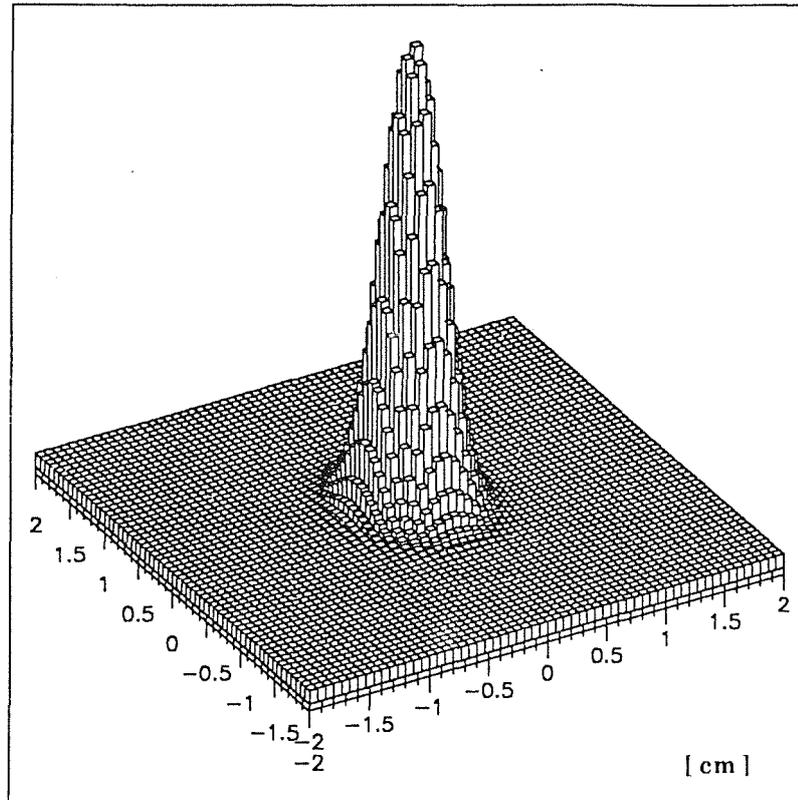


Abb. 8.20a : Dichteverteilungen der Ortsabweichungen - Kammer 1.

Abweichungen in einem zweidimensionalen Histogramm dargestellt. Eine Projektion (Abb. 8.21) dieser Verteilung in die x - y -Ebene (mittels Höhenlinien) macht deutlich, daß auch hier die Kammern leicht gegeneinander verschoben waren und vermutlich verschiedene Untergrundzählraten der Kammern zu verschiedenen Breiten in den Dichteverteilungen führten. Die Halbwertsbreite der Ortsabweichungs-Dichteverteilungen entspricht jeweils dem Durchmesser der mittleren dargestellten Ellipse. Man sieht so deutlich das unterschiedliche Ortsauflösungsvermögen der Kammern in verschiedenen Richtungen der Kammerebenen. Das Auflösungsvermögen entlang der Drähte (x -Richtung) ist aufgrund der Kammergeometrie deutlich größer als das in y -Richtung.

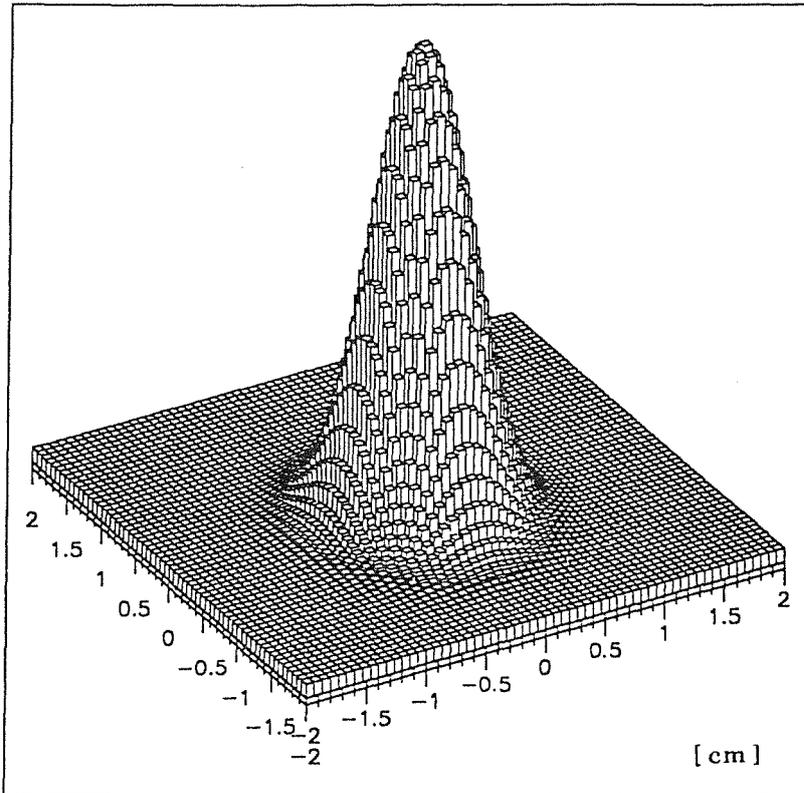


Abb. 8.20b : Dichteverteilungen der Ortsabweichungen -Kammer 2.

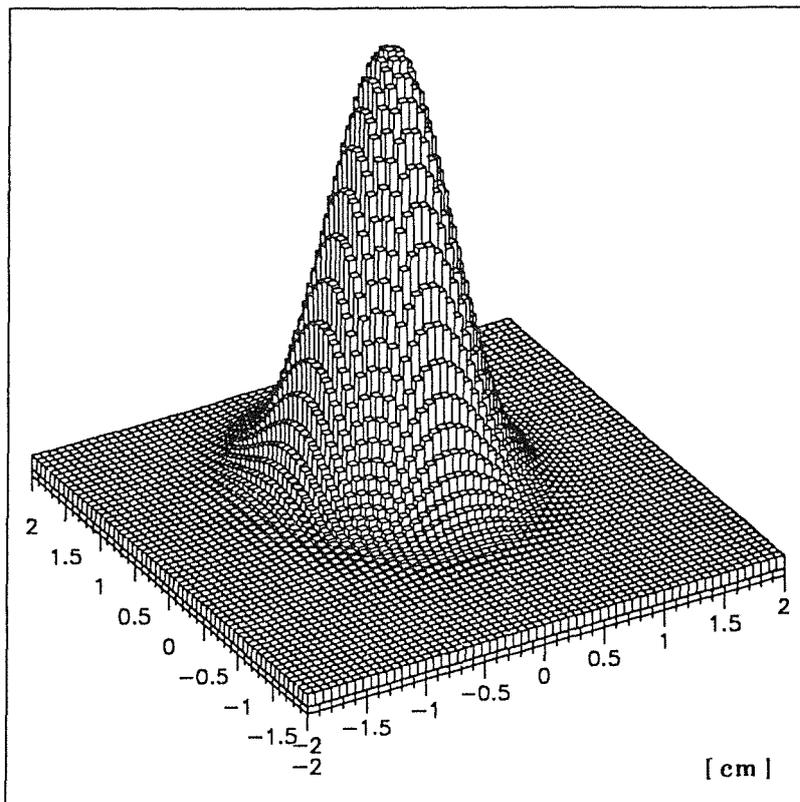


Abb. 8.20c : Dichteverteilungen der Ortsabweichungen - Kammer 3.

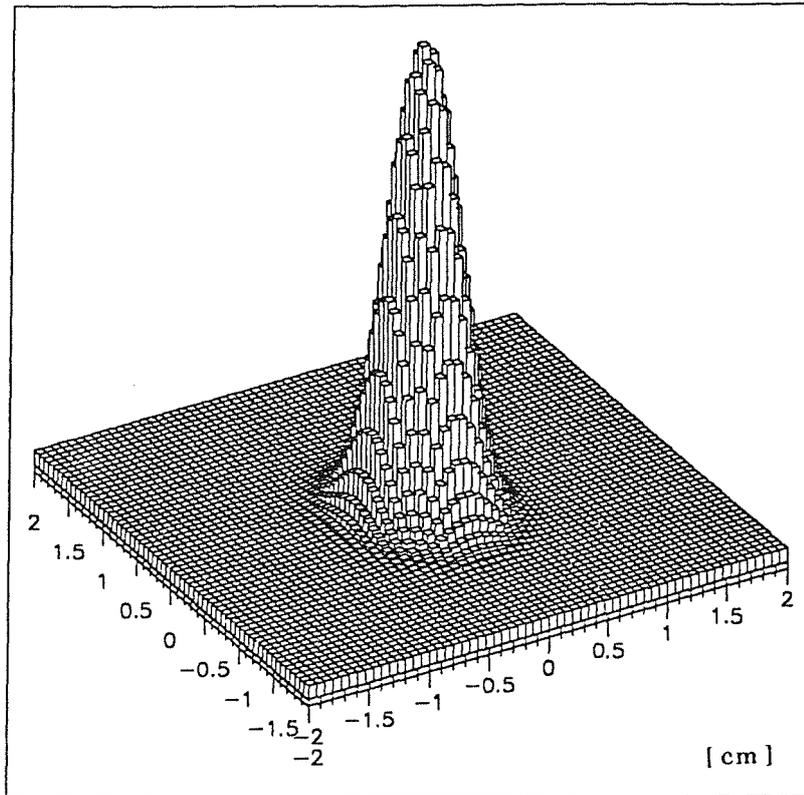


Abb. 8.20d : Dichteverteilungen der Ortsabweichungen - Kammer 4.

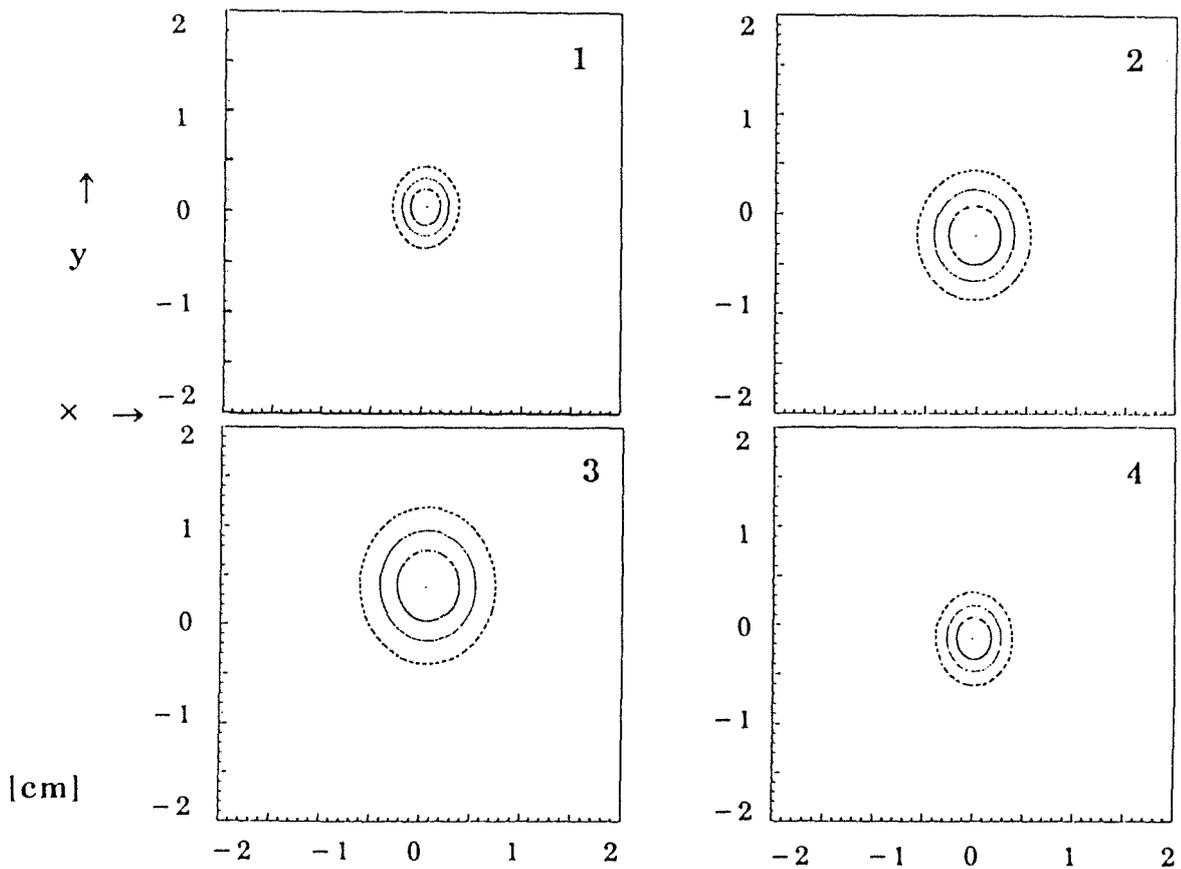


Abb. 8.21 : Projektion der Dichteverteilungen der Ortsabweichungen.

Die Halbwertsbreiten (FWHM) betragen im schlechtesten Fall (Kammer 3) in x-Richtung $\pm 4,8$ mm und in y-Richtung $\pm 5,8$ mm. Im besten Fall (Kammer 1) betragen sie in x-Richtung $\pm 1,6$ mm und in y-Richtung $\pm 2,9$ mm. Das gemessene Auflösungsvermögen der Kammern ist auch im schlechtesten Fall besser als das in [Ale81] mit ± 6 mm angegebene Auflösungsvermögen.

Um unterschiedliches Ansprechverhalten der einzelnen Kanäle zu erkennen, wurden wiederum Projektionen der Trefferverteilungen auf Achsen senkrecht zu Draht- und Streifenrichtungen durchgeführt. Auch hier zeigte sich, daß Kammer 1 weit von einer optimalen Einstellung abweicht. Da bei der Projektion der Kammertreffer auch das Einsortieren in Nachbarkanäle möglich ist, wurde unser Testprogramm dahingehend erweitert, daß es auch Histogramme für ungetriggerte Ereignisse erstellen kann. Hierfür wurde hardwaremäßig ein Triggerpuls als Gate-Signal erzeugt, der von der Software her ausgelöst werden kann. Damit erfolgte ein exaktes Einsortieren der Kanäle in die Histogramm-Bins. Die Histogramme verdeutlichen sehr gut die unterschiedlichen Untergrundraten Kanal für Kanal (Abb. 8.22).

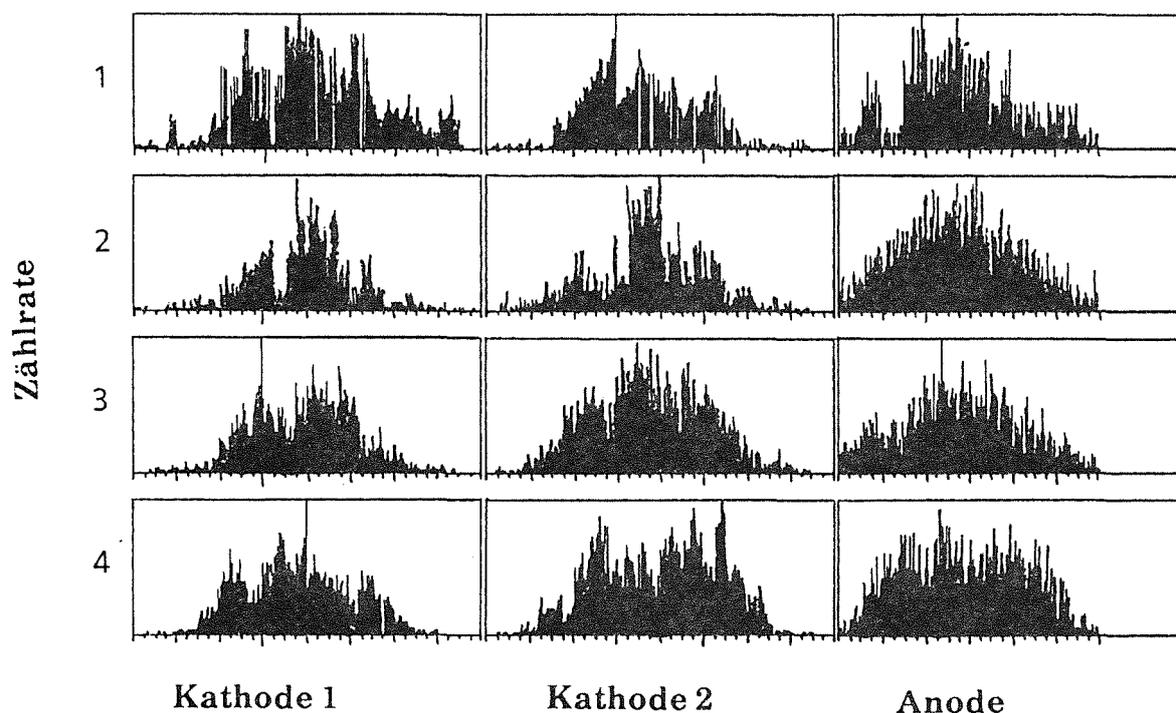


Abb. 8.22 : Untergrundraten der vier Testkammern. Jeder Strich in den Histogrammen entspricht einem Elektronik-Kanal.

Trotz der unterschiedlichen Einstellungen wurde versucht, aus den rekonstruierten Spuren Zenitwinkel-Verteilungen zu erstellen. Da die für

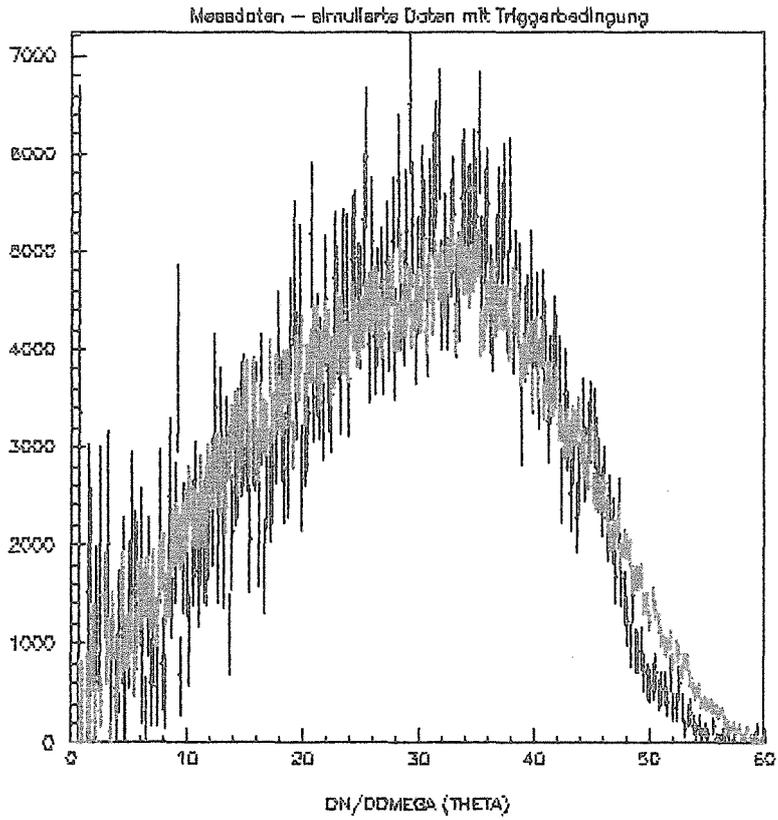
Myonen zu erwartende Winkelverteilung (siehe [Gre42], [Gru83], [Joh33], [Mae73]),

$$dN / d\Omega (\theta) \simeq \cos^2 \theta$$

mit $dN / d\Omega$: Teilchenzahl pro Raumwinkel,

durch die Geometrie des Detektoraufbaus und die Stellung der Triggerzähler in der Messung beeinflusst wird, wurden für die jeweiligen Triggereinstellungen verschiedener Dateien Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Hiermit können Auswirkungen der Detektorgeometrie auf die zu erwartende Winkelverteilung studiert werden. In Abb. 8.23 sind die simulierten Daten flächenmäßig (unter beiden Kurven befindet sich die gleiche Fläche) auf die Meßdaten normiert. Man sieht, daß die Meßdaten (schwarz) sich sehr gut dem zu erwartenden Verlauf anpassen. Auch für die Dateien, die ohne Triggerung durch die Szintillatorebenen aufgenommen wurden, wurde die gemessene Winkelverteilung mit der simulierten verglichen. Man sieht (Abb. 8.24), daß die Meßwerte im wesentlichen auch hier den zu erwartenden Verlauf wiedergeben. Einige Winkelbereiche scheinen durch die ungleichen Schwelleneinstellungen in den Kammern etwas benachteiligt zu sein. Sehr auffällig ist dies besonders bei sehr kleinen Zenitwinkeln, da hier die Statistik sehr arm ist (es wird auf kleinere Raumwinkelelemente normiert \rightarrow große statistische Fehler). Das Fehlen einiger Treffer bei sehr kleinen Winkeln, die eventuell auch durch leichte Verschiebung der Kammern bzw. dadurch, daß senkrechte Myonen den kürzesten Weg durch das aktive Gasvolumen zurücklegen, unterdrückt werden, wirkt sich deshalb so stark aus, da bei kleinen Zenitwinkeln die Raumwinkelelemente $d\Omega$ sehr klein sind, so daß nur wenige Myonen aus diesen Richtungen kommen. Trägt man jedoch die Meßwerte über einer $\cos^2(\theta)$ -Skala auf, so fallen die Meßwerte bei kleinen Winkeln kaum noch ins Gewicht und die zu erwartende Ausgleichsgerade paßt sich den Meßwerten bis auf leichte Schwankungen recht gut an (siehe Abb. 8.25).

Da das Einstellen der FILAS bis zuletzt ständig mit Problemen behaftet war (die Diskriminatorschwelle beeinflusst das Timing) und trotz zahlreicher Korrekturen zu keinem befriedigenden Ergebnis führte, galt es, das Einwirken der Diskriminatorschwelle auf das Meßergebnis systematisch zu untersuchen. Da das Eichen der Kanäle mit einer Quelle (β -Präparat) ausgeschlossen ist, wurde die Lage der Myonen im Signalhöhenspektrum untersucht.



rot : simulierte Daten
schwarz : Meßdaten

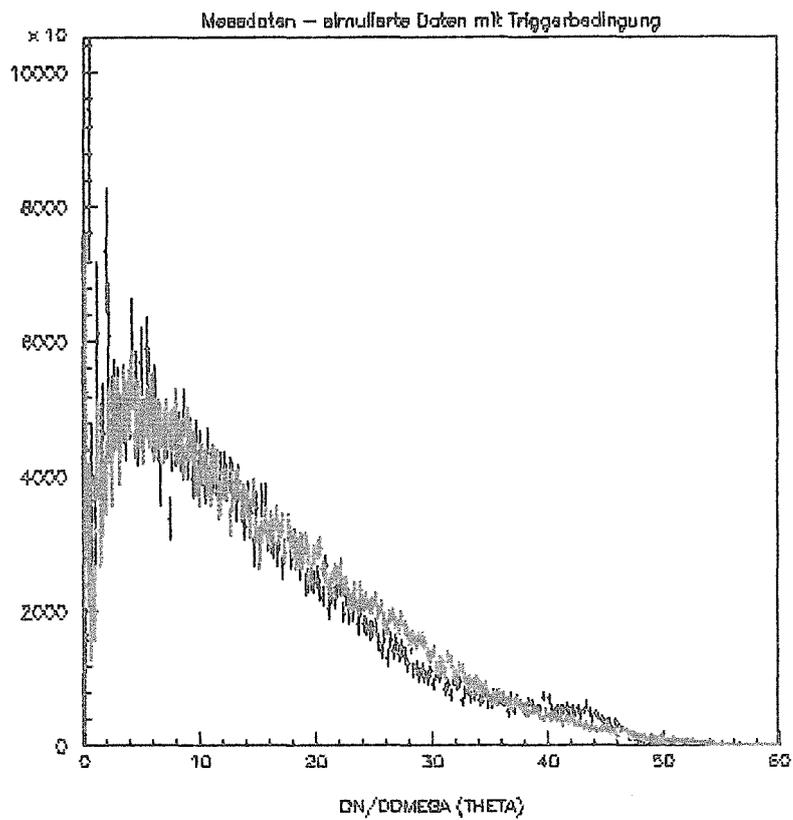


Abb. 8.23 : Myon-Winkelverteilungen für verschiedene Triggerbedingungen.

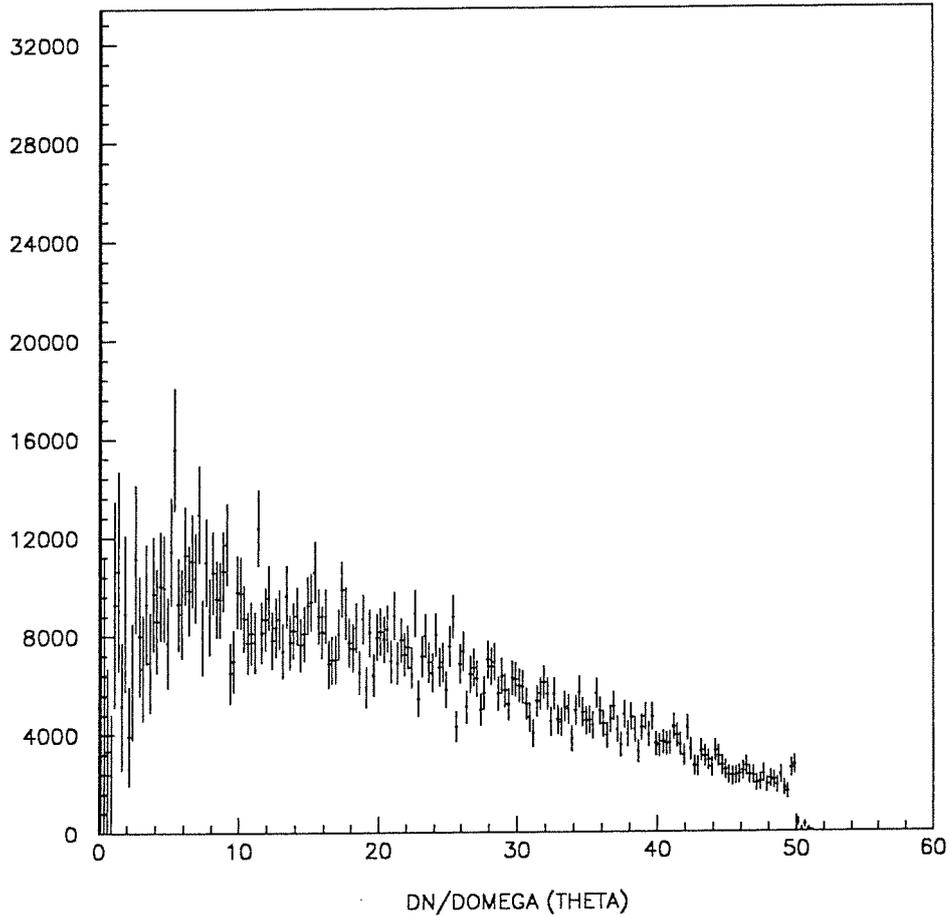


Abb. 8.24 : Winkelverteilung für untriggergte Daten.

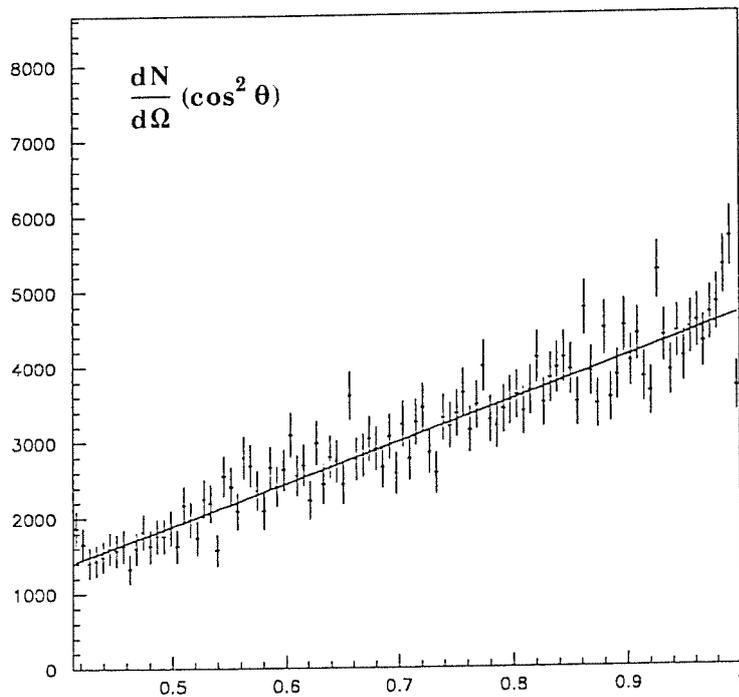


Abb. 8.25 : Winkelverteilung der Myonen als Funktion von $\cos^2\theta$.

Es wurde ein Signalkabel an den Eingang eines FILAS-Kanals angelötet und versucht, mit einer geeigneten Wahl von Vorverstärkern und Verstärkern ein möglichst unverzerrtes Spektrum der Signalhöhen auf einen Vielkanalanalysator zu geben. Während die Lage des Testpuls-Signals recht gut bestimmt werden konnte, ging der Myon-Peak im Rauschen unter. Deshalb wurde der Aufbau dahingehend erweitert, daß unterhalb und oberhalb des entsprechenden Drahtes ein dickes Szintillatordpadel, sowie ein weiterer schmaler Szintillator direkt oberhalb des Drahtes angeordnet wurden. Die Koinzidenz der über einen Diskriminator ausgewählten Myon-Signale dieses Myon-Teleskops wurde auf den Gate-Eingang des Vielkanalanalysators gegeben, so daß eine Vorauswahl der Signale erfolgte.

In dem so aufgenommenen Draht-Spektrum ist die Lage der Myon-Signale gut zu erkennen und kann mit der Lage des Testpulssignals verglichen werden (Abb. 8.26). Verändert man nun die Amplitude des Testpulssignals so, daß diese Signale kurz vor dem Spektrum der Myonen liegen und stellt die FILAS-Schwellen so ein, daß die Testpulse gerade noch zu sehen sind, sollte eine optimale Einstellung der Schwellen gefunden sein. Daraufhin kann das Delay der FILAS-Module eingestellt werden. Mögliche Fehlerquelle bei einer derartigen Einstellung sind unterschiedliche Signalhöhen zwischen unterschiedlichen Kammern, bzw. die Tatsache, daß das Testpulssignal nicht unbedingt der üblichen Signalform entspricht, und so von Verstärkern der Pulshöhenmessung gegenüber den FILAS-Verstärkern unterschiedlich behandelt werden könnte. Der Unterschied zwischen einzelnen Kammern läßt sich messen und durch Variation der Hochspannung korrigieren. Das unterschiedliche Verhalten der Verstärker würde sich auch messen lassen, indem man das Signalhöhenspektrum eines Drahtes mit dem diskriminierten F.OR-Signal (siehe Kap. 5.1.2) "gatet", und Signalhöhe des Testpulses, sowie Schwelleneinstellung des Diskriminators variiert.

Bei den Kathodenstreifen war es zunächst nicht möglich, durch die Koinzidenzbedingung mit dem μ -Teleskop die Lage der Myonsignale (Landau-Verteilung) im Signalhöhenspektrum festzustellen, da man hierzu einen Szintillator benötigt, der nicht breiter als der Streifen selbst ist (10,6 mm). Bei breiteren Szintillatoren läßt man auch Signale zu, die von Teilchen stammen, die neben dem ausgelesenen Streifen die Kammer durchqueren. Die Signale die davon auf dem Streifen influenziert werden, sind um so kleiner, je weiter der Teilchendurchgangspunkt vom Kathodenstreifen entfernt ist. Man würde somit eine Überlagerung mehrerer Landauverteilungen messen, die mit zunehmender

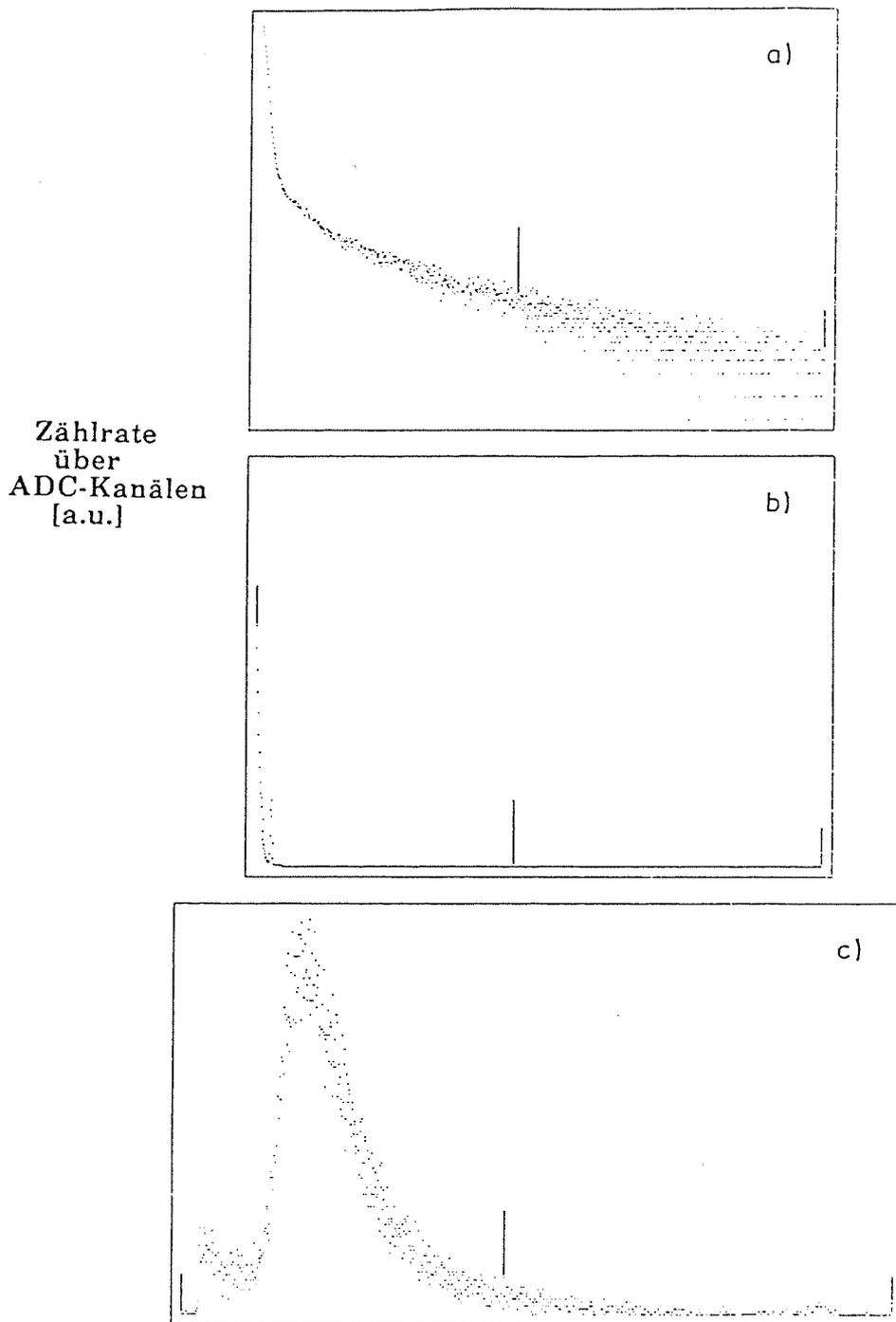


Abb. 8.26 : Anodendraht - Signalspektrum. a) logarithmisch, b) mit Testpuls-
signalen, c) in Koinzidenz mit μ -Teleskop.

Entfernung der Teilchen weiter zu kleinen Signalhöhen hin verschoben sind (extreme Verschmierung der Landau-Verteilung).

Um zu sehen wie sich ein Teilchensignal auf benachbarte Streifen verteilt, wurden vier Speicheroszillographen-Kanäle gleichzeitig mit dem Signal des sich in diesem Bereich befindlichen μ -Teleskops extern getriggert und abgespeichert. Die davon erstellten Plots (siehe Abb. 8.27) geben einen Eindruck, wie sich die

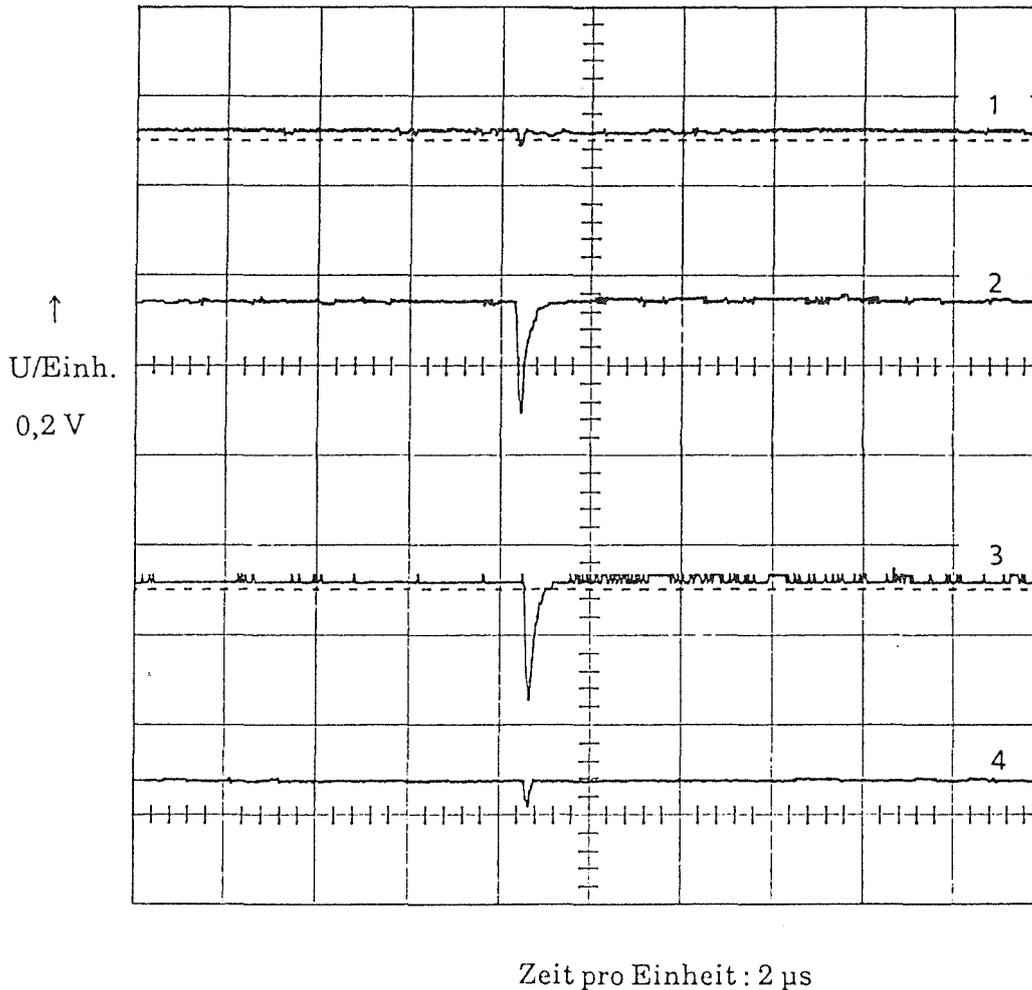


Abb. 8.27: Signalverteilung eines Ereignisses auf vier benachbarte Kathodenstreifen.

Signale auf mehrere Kanäle verteilen (jeder Kanal wurde mit 50Ω abgeschlossen).

Um eventuell die Schwellen der FILAS so einstellen zu können, daß jeweils drei Streifen ansprechen, mußte versucht werden, mit einem Testpulsgenerator Testsignale zu erzeugen, die möglichst in Form, Dauer und Höhe denen der μ -Signale gleichen. Das Problem hierbei liegt darin, daß diese Signale nicht direkt eingespeist werden können, sondern kapazitiv eingekoppelt werden, und zuvor über einen Transistor verstärkt werden (siehe Kap. 5.2). Dies verändert die vom Testpulsgenerator erzeugte Signalform erheblich, so daß es mit dem bisher verwendeten Testpulsgenerator nicht möglich war, die Form der Myonsignale zu reproduzieren. Indem aber das Testgerät CAF 20 (siehe Kap.4.2) als Gate für einen Testpulsgenerator mit variablen Signalen verwendet wurde und zeitversetzt dazu WRITE-Signale erzeugte, konnte das Verhalten der FILAS-

Diskriminatoren bei unterschiedlichen Signalformen studiert werden. Offensichtlich wird nur auf die Amplitude des Signals diskriminiert.

Nachdem ein Myon-Teleskop aufgebaut war, mit dem es möglich war, einen extrem engen Bereich (etwas größer als Kathodenstreifen-Breite) zu triggern und so auch an der Kathode die Lage der Myonsignale im Vergleich zu Testpulssignalen geeigneter Form verglichen werden konnte, wurde versucht die Schwellen der FILAS auf Werte kurz unterhalb der Myon-Signalhöhen einzustellen. Folgende prinzipielle Mängel der Kammerelektronik erschwerten diese Einstellungen :

- a) Der Abgleich der 8 Kanäle eines FILAS-Moduls ist nur gemeinsam mit einem Potentiometer möglich. Die 8 Kanäle untereinander sind jedoch nur grob aufeinander abgeglichen, so daß unterschiedliches Ansprechverhalten zwischen den 8 Kanälen des FILAS die Folge ist. Es zeigte sich daß einzelne Kanäle schon bei unter 50% der Signalhöhe, bei der alle 8 Kanäle oberhalb der Schwelle liegen, ansprechen.
- b) Die Toleranzen zwischen einzelnen FILAS-Modulen sind zum Teil so groß, daß manche Module sich nicht auf die anderen abgleichen lassen.
- c) Der dynamische Bereich der FILAS-Schwelle ist begrenzt, so daß es trotz Anheben aller FILAS-Schwellen durch die Spannung U_{pol} nicht gelang alle FILAS-Schwellen so hoch einzustellen, wie dies nach den vorangegangenen Messungen als wünschenswert erachtet wurde. Die Schwelle mußte daher etwas tiefer gesetzt werden, um alle FILAS möglichst gleichmäßig einstellen zu können.

Um Aussagen über die Nachweiswahrscheinlichkeit der Kammern machen zu können, wurde das Ansprechverhalten der Kammer anhand von Myonen getestet, welche durch ein Triggersystem ausgewählt wurden. Dieses Verhalten ist von großer Bedeutung für die Optimierung des Auswerteprogramms für den KASCADE-Einsatz.

Für verschiedene Hochspannungswerte wurden Ereignisse auf dem Bildschirm dargestellt und das Ansprechverhalten (Anzahl der angesprochenen Anoden und Kathodenstreifen der beiden Kathoden) von Hand ausgewertet, um bei Problemfällen von den Parametern des Auswerteprogramms unabhängig zu sein. Gleichzeitig wurde jeweils notiert, wieviele Triggersignale notwendig waren, um ein Ereignis mit mindestens einer angesprochenen Anode in der Kammer nachzuweisen. Somit lies sich für die Anoden die totale Ansprechwahrscheinlichkeit (Effizienz) der Kammer in Abhängigkeit von der angelegten

Hochspannung bestimmen. Für die Kathoden erhält man nur eine relative Ansprechwahrscheinlichkeit, da nur Ereignisse berücksichtigt wurden, bei denen mindestens eine Anode angesprochen hat. Abb. 8.28 zeigt, daß bei 1900 V eine

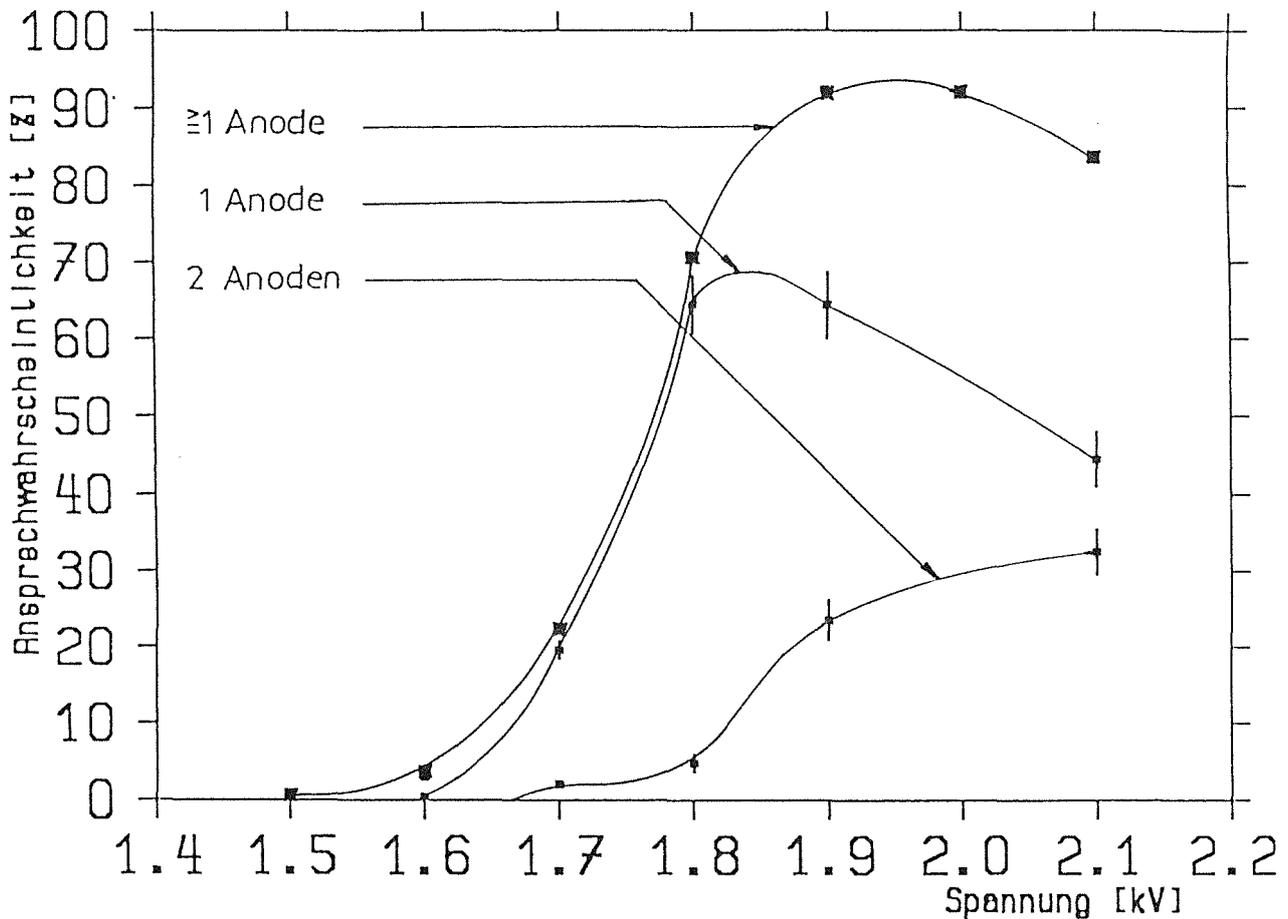


Abb. 8.28: Ansprechwahrscheinlichkeit der Anodendrähte.

Ansprchwahrscheinlichkeit von über 92% erreicht ist und in den meisten Fällen nur eine Anode anspricht. Daß die Ansprechwahrscheinlichkeit bei 2100 V wieder leicht abfällt, könnte Anzeichen dafür sein, daß die Totzeit der Kammern bei großen Hochspannungswerten ansteigt. Für beide Kathodenebenen getrennt sind in Abb. 8.29 Ansprechwahrscheinlichkeiten für gewisse Anzahlen an Kathodenstreifen dargestellt. Man sieht deutlich, daß bei einem festen Hochspannungswert (z. B. 2000 V) sehr unterschiedliches Ansprechverhalten der Kathoden möglich ist. Dies erschwert die Aufgaben des Auswerteprogramms (vgl. Kap. 7). Man sieht jedoch auch bei den Kathoden, daß bei etwa 2000 V eine Ansprechwahrscheinlichkeit von über 90% erreicht ist, da die Wahrscheinlichkeit dafür, daß kein Kathodenstreifen anspricht, hier unter 5% sinkt. Die gewonnenen Verteilungen für die Kathoden weichen deutlich von den in [Ale81] veröffentlichten Verteilungen ab (vgl. Abb. 7.1). So sollten nach [Ale81] bei 2100 V in 44% der Fälle vier Kathodenstreifen, in 35% der Fälle drei

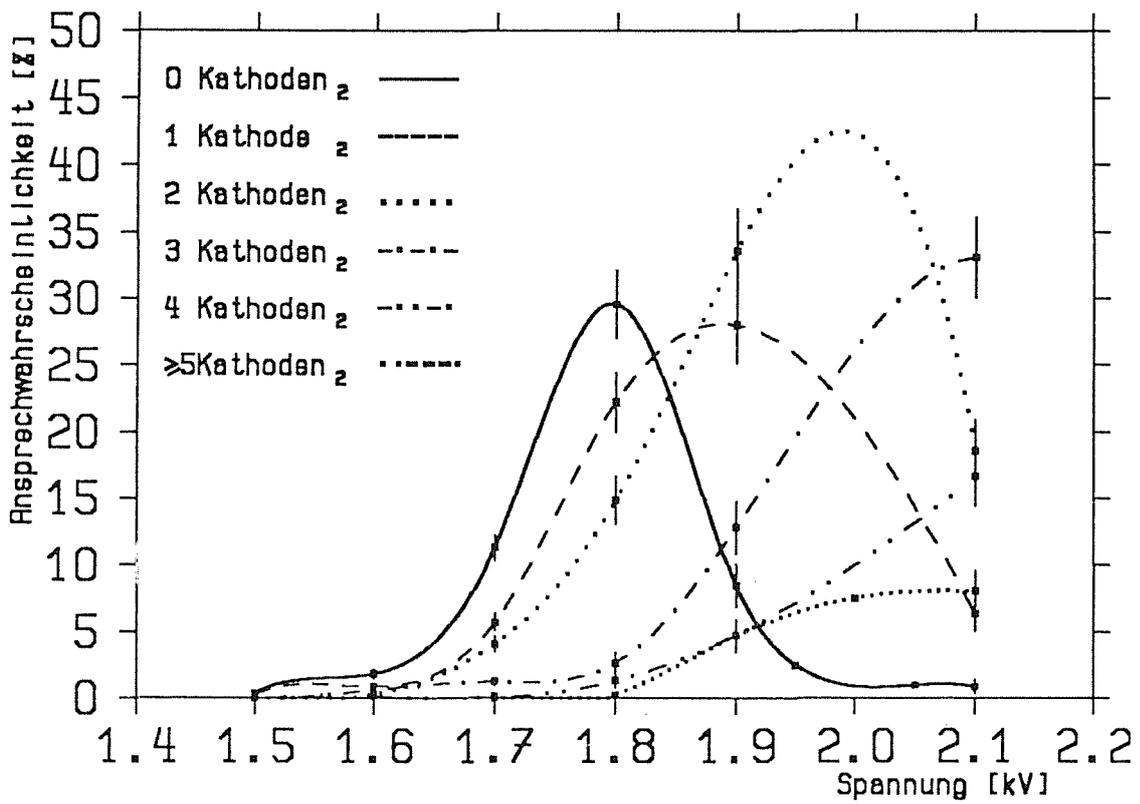
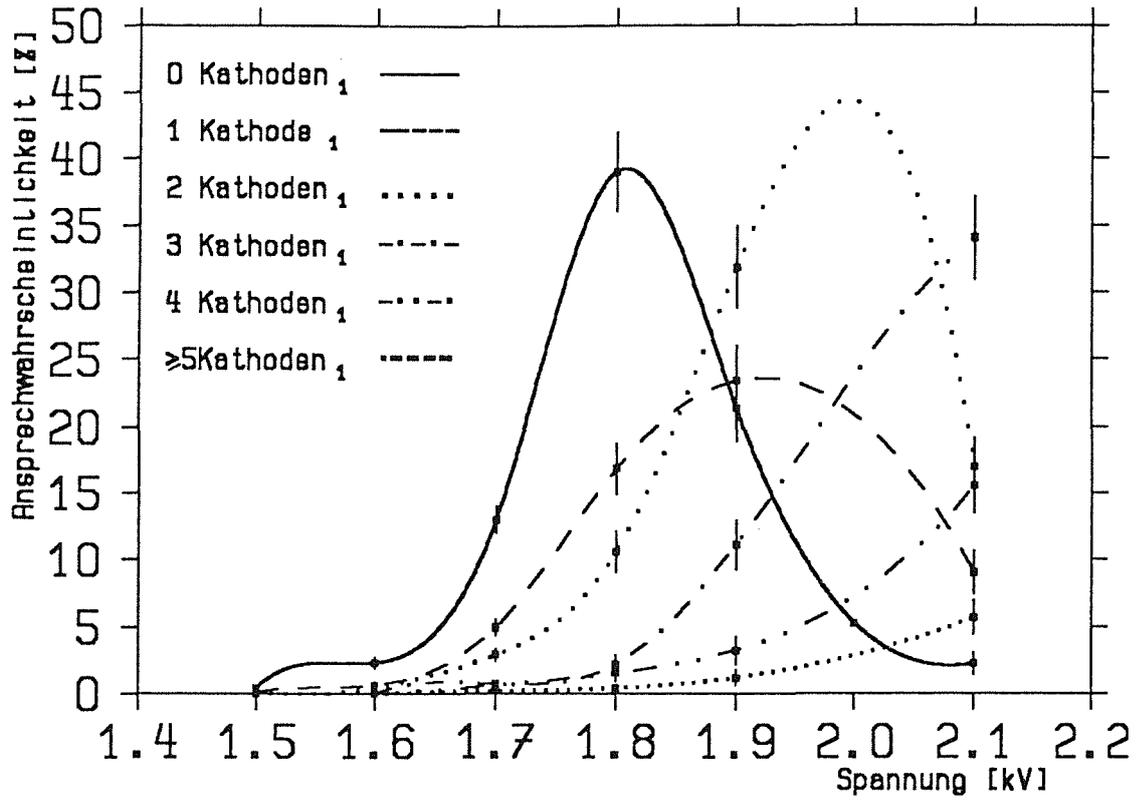


Abb. 8.29 : Ansprechwahrscheinlichkeiten der Kathodenstreifen der beiden Kathoden.

Kathodenstreifen, in 18% der Fälle mehr als 4 Kathodenstreifen und in 3% der Fälle zwei Kathodenstreifen ansprechen. Dies steht deutlich im Gegensatz zu den gemessenen Verteilungen (siehe Abb. 8.29). Es ist jedoch nicht klar, ob die in [Ale81] veröffentlichten Daten auf Messungen beruhen, und für welche Schwellenwerte sie gültig sind. Die Aussagekraft der Abb. 8.28 und 8.29 muß jedoch relativiert werden, da dadurch, daß nicht alle Schwellen (wegen der angesprochenen Elektronikmängel) auf den gleichen Wert abgeglichen werden konnten, sich die Ansprechwahrscheinlichkeiten für bestimmte Anzahlen an Kathodenstreifen sämtlich verbreitern.

Eine Neuentwicklung der Kammerelektronik, bei der jeder Kanal separat abgeglichen werden kann, könnte sowohl das Ansprechverhalten, als auch das Ortsauflösungsvermögen der Kammern verbessern. Eine Computersteuerung der Schwelleneinstellung, bei der Toleranzen zwischen den einzelnen Kanälen ausgeglichen werden, indem das Ansprechverhalten der Kanäle auf Testpulssignale als Regelgröße für die Einstellung verwendet wird, wäre hierbei eine große Hilfe. Der dynamische Bereich, in dem die Schwellen verändert werden können, sollte zudem erweitert werden, um auch bei größeren Hochspannungswerten direkt unterhalb des Myon-Signalspektrums abschneiden zu können. Mit einer solchen Anordnung könnte das Ansprechverhalten der Kammern in Abhängigkeit von verschiedenen Schwelleneinstellungen und Hochspannungswerten gemessen werden. Weiterhin würde eine Messung des Anodendraht - bzw Kathodenstreifen - Signalhöhenspektrums in Koinzidenz mit einem sehr schmalen Myon-Teleskop (siehe oben) für verschiedene Hochspannungswerte Auskunft darüber geben, wie die Schwellenwerte für unterschiedliche Hochspannungswerte zu setzen sind.

Hierzu sollten jedoch andere Vorverstärker bzw. Verstärker beschafft werden, da die vorhandenen Kombinationen sämtlich zu leicht bipolaren Signalen (Unterschwingen) führten, so daß durch Anpassen der Testpulssignale auf die tatsächlichen Signale lediglich relative Aussagen zur Lage der Schwelle gemacht werden konnten, jedoch keine exakte Absolutbestimmung möglich war.

Energie- und Zeitmessungen sind bei den vorliegenden Kammern aufgrund der vorhandenen Auslese-Elektronik ausgeschlossen. Beides wäre nur mit erheblichem finanziellen Aufwand zu erreichen und ist für das KASCADE-Projekt nicht anstrebenswert, da die Zeitmessung von dem benötigten Triggersystem automatisch (und wahrscheinlich besser) erfolgt und die Energieauflösung (siehe Kap. 2.4) beim Myonnachweis keinen neuen physikalischen Parameter liefern würde (lediglich bessere Ortsauflösung).

9. Zusammenfassung und Ausblick

Während die Vieldraht-Proportionalkammern von einem ganzen Team französischer Forscher und Techniker (über 30 Mitarbeiter) über einen Zeitraum von etwa zehn Jahren entwickelt, getestet und betrieben wurden, wobei für jeden Teil des komplexen Detektorsystems (Mechanik, Elektronik auf den Kammern, Frontend-Elektronik, Gasversorgung, Datenauswertung) Spezialisten zur Verfügung standen, galt es im Rahmen dieser Arbeit in möglichst kurzer Zeit das komplette Detektorsystem zu errichten, zu verstehen und auf seine Funktionstüchtigkeit zu untersuchen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein Testaufbau errichtet, in dem vier übereinander liegende Kammern mit kosmischen Myonen getestet wurden. Hierzu wurden die komplexe Auslese-Elektronik detailliert untersucht, Testmöglichkeiten und -aufbauten erstellt und Verbesserungsvorschläge für das KASCADE-Projekt gemacht (siehe Kap. 5). Um die Daten im KASCADE-Projekt von einem Transputer auslesen zu können, wurde ein neues Auslesesystem entwickelt und getestet. Weiterhin wurde ein modifiziertes Gasversorgungs- und Sicherheitssystem entwickelt und aufgebaut. Auch hier konnten Vorschläge für den KASCADE-Einsatz gemacht werden (siehe Kap. 6). Um Myonen aus der kosmischen Strahlung auswählen zu können, wurde ein Triggersystem aus 12 Szintillatoren (in zwei Ebenen) entwickelt und abgeglichen. Zur Rekonstruktion von Daten in den Kammern (Ortskoordinaten), zur Rekonstruktion von Spuren im Detektorsystem, zur Steuerung der Datenaufnahme (Meßprogramm mit Triggerauswahl), zum Test bzw. Abgleich der Kammerelektronik und zur regelmäßigen Kontrolle verschiedener Meßparameter wurde Software erstellt (siehe Kap. 5 und 8, sowie [Föβ90]), die zumindest teilweise im KASCADE-Projekt übernommen werden kann. Durch Messungen kosmischer Myonen konnte die Funktionstüchtigkeit der vier Testkammern demonstriert werden. Das Ortsauflösungsvermögen ist für verschiedene Einstellungen der Kammerelektronik und der Hochspannung unterschiedlich, so daß aufgrund prinzipieller Mängel der Kammerelektronik (Kap. 8) unterschiedliche Ortsauflösungsvermögen für die vier Testkammern ermittelt wurden. Es zeigte sich außerdem, daß das Ortsauflösungsvermögen aufgrund der Geometrie der Kammern in verschiedenen Richtungen der Kammerebene unterschiedlich ist. Die Halbwertsbreite (FWHM) der Ortsbestimmung betrug im ungünstigsten Fall (Kammer 3 entlang der Anodendrähte) $\pm 5,8$ mm. Um die Funktionstüchtigkeit der Kammern unter Beweis zu stellen, wurde die Zenitwinkelverteilung kosmischer Myonen

gemessen. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit dem erwarteten Verlauf. Die Ansprechwahrscheinlichkeit (efficiency) der Kammern wurde ebenfalls anhand kosmischer Myonen überprüft. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für vom Triggersystem identifizierte Myonen lag deutlich über 90%. Die in [Ale81] veröffentlichten efficiency-Kurven wurden in Frage gestellt. Die bei diesen Messungen erhaltenen Informationen über das Ansprechverhalten der Kathodenstreifen ließen prinzipielle Mängel in der Kammerelektronik erkennen. Die gewonnenen Erfahrungen, lassen eine Neukonzeption der Elektronik sinnvoll erscheinen und könnten dann durch weitere systematische Untersuchungen der Schwelleneinstellungen zu einer verbesserten Ortsauflösung der Kammern beitragen.

Der Ortsnachweis von Myonen aus hochenergetischen Luftschauern im KASCADE-Projekt anhand der getesteten Kammern (unterhalb des Kalorimeters) ist möglich. Die vorgeschlagenen Verbesserungen würden die Präzision und Zuverlässigkeit der Kammern steigern. Der Einsatz zweier Kammern unterhalb des Prototyp-Kalorimeters könnte weitere wichtige Informationen (Untergrundzählrate, Teilchendichte bei Schauern, Möglichkeiten für Spurrekonstruktion durch das Kalorimeter) im Hinblick auf die im KASCADE-Projekt herrschenden Bedingungen geben.

Eine Erweiterung des bisherigen Testaufbaus um eine Absorberschicht zur Unterdrückung der elektromagnetischen Komponente wird zusammen mit einem groben Schauertrigger das Messen von Myonspuren in der Nähe des Schauerkerns ermöglichen. Hiermit könnte die Existenz sogenannter Myonbündel (mehrere parallele Myonspuren in einem engen Bereich des Detektors) überprüft werden. Bei bisher beobachteten Ereignissen dieser Art besteht noch die Möglichkeit, daß es sich um Aufschauern an der Hallendecke handelt. Bei Existenz von Myonbündeln könnte dies im KASCADE-Experiment als weiterer Parameter bei der Rekonstruktion von Schauerdaten dienen, indem die Anordnung der Kammern (mehrere Lagen übereinander → Spurrekonstruktion möglich) geändert wird.

Die Bestimmung der Einfallsrichtung von Myonen hätte zudem zwei weitere Vorteile. Die Spuren könnten durch das Kalorimeter zurückverfolgt werden und die vom Myon durchlaufenen Flüssig-Ionisationskammern ausgelesen und auf deren Energiesignale untersucht werden. Man hätte somit eine gute Möglichkeit, diese Detektoren während des KASCADE-Projekts ständig auf Alterungseffekte zu überwachen und sie neu zu kalibrieren. Es könnten schräge Spuren hierzu ausgewählt werden, um möglichst große Signale zu erhalten (Myon sieht größere

aktive Detektorschicht), die klar über dem Rauschen liegen. Zum anderen stimmt die Einfallsrichtung der meisten Myonen recht gut mit der Schauerachse überein. Nach Simulationsrechnungen mit dem Programm CORSIKA weichen 85% aller Myonen ($E \geq 300$ MeV) in ihrer Einfallsrichtung um weniger als 6° von der Schauerachse ab. Hiermit könnte unabhängig vom Array eine Bestimmung der Richtung der Schauerachse erfolgen (weiterer Schauerparameter). Dies könnte bei extremen Schauerbedingungen, wie sie in [Tho90] diskutiert werden von Bedeutung sein.

Referenzen

- Ale81 R. Aleksan et al., Large Proportional Chambers for Muon Detection in the CELLO Experiment at PETRA, Nucl. Instr. and Meth. **185** (1981) 95
- All84 O.G. Allkofer and P. K. F. Grieder, Cosmic Rays on Earth, Physics Data (1984)
- Cha68 G. Charpak et al., The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles, Nucl. Instr. and Meth. **62** (1968) 262
- Dol90 P. Doll et al., The Karlsruhe Cosmic Ray Project KASCADE, KfK 4686 (1990)
- Föß90 C. Fößel, N. Heide, J.T. Horzel, H.J. Mathes, G. Moedl, J. Oehlschläger, S. Zagromski, Interner Bericht (1990), unveröffentlicht
- Gre42 K. Greisen, The Intensities of the Hard and Soft Components of Cosmic Rays as Functions of Altitude and Zenith Angle, Phys. Rev. **61** (1942) 212
- Gru84 C. Grupen, News From Cosmic Rays at High Energies, SI-84-01 (1984)
- Gru88 J.M. Grunsfeld et al., Energy Spectra of Cosmic Ray Nuclei from 50 to 2000 GeV per AMU, Astrophys. J. **43** (1988) L31

- Hes12 V.F. Hess, Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten, *Physikalische Zeitschrift* **13** (1912) 1084
- Joh33 T.H. Johnson, Comparison of the Angular Distributions of the Cosmic Radiation at Elevations 6280 ft. and 620 ft., *Phys. Rev.* **43** (1933) 307
- Kif86 T.Kifune et al., Detection of 10^{15} eV Gamma Rays from Cygnus X-3, *Astrophys. J.* **301** (1986) 230
- Kok88 R.P. Kokoulin and A.A. Petrukhin, Theory of The Pair Meter For High Energy Muon Measurements, *Nucl. Instr. and Meth. A* **263** (1988) 468
- Loh85 W. Lohmann, R. Kopp and R. Voss, Energy Loss of Muons In The Energy Range 1 - 10000 GeV, CERN 85-03 (1985)
- Mae73 K. Maeda, Energy and Zenith Angle Dependence of Atmospheric Muons, *Fortschritte der Physik* **21** (1973) 113
- Mit83 K. Mitsui et al., Cosmic-Ray Muon Spectrum Derived from the Transferred Energy Spectrum of Bursts Observed by the Muon Calorimeter, *Nuovo Cimento* **73 A** (1983) 209
K. Mitsui et al., Electromagnetic Interaction of Cosmic-Ray Muons up to 10 TeV (Pair Productions and Bremsstrahlung), *Nuovo Cimento* **73 A** (1983) 235
- Mor87 R.Morse, Very High Energy Gamma Ray Astronomy, ed. K.E. Turner, Reidel Publishing Company, Dodrecht, Boston Lancaster and Tokyo (1987) 197

- Pal74 V. Palladino and B. Sadoulet, Application of the Classical Theory of Electrons in Gases to Multiwire Proportional Chambers and Drift Chambers, LBL-3013 (1974)
- Ric74 P. Rice-Evans, Spark, Streamer, Proportional and Drift Chambers, (Richelieu, London, 1974)
- Sau76 F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire, Proportional and Drift Chambers, CERN 77-09 (1974)
- Sch74 E. Schröder et al., Strahlung und Strahlungsmeßtechnik in Kernkraftwerken, (Elitera, Berlin, 1974)
- Tho90 T. Thouw, Interner Bericht (1990), unveröffentlicht
- Wee88 T.C. Weekes, Very High Energy Gamma-Ray Astronomy, 160 (1988) 1 & 2

Danksagung

Herrn Prof. Dr. G. Schatz möchte ich dafür danken, daß er diese Arbeit ermöglicht und durch sein stetiges Interesse gefördert hat.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Herrn Dr. K. Bekk, Frau S. Burkhardt, Herrn Dr. V. Corcalciuc, Frau C. Föbel, Herrn B. Feurer, Herrn Priv.-Doz. Dr. H. J. Gils, Herrn cand. phys. A. Grill, Herrn Dr. A. Hanser, Herrn Dr. D. Heck, Herrn Dr. N. Heide, Dipl. Ing. (FH) D. Manger, Herrn Dipl. Phys. H. J. Mathes, Frau G. Moedl, Herrn Prof. Dr. H. Rebel, Herrn M. Riegel, Herrn Dipl. Math. J. Oehlschläger, Frau cand. phys. B. Schulze, Herrn cand. phys. R. Supper, Herrn Dr. T. Thouw, Herrn Dipl. Ing. (FH) S. Zagromski möchte ich für viele hilfreiche Diskussionen, sowie ständiges Interesse an dieser Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Rebel für die Betreuung dieser Arbeit, Herrn Dr. T. Thouw für seine Einführungen in die physikalischen Zusammenhänge des KASCADE-Experiments, sowie Herrn Dipl. Phys. H. J. Mathes und Herrn Dipl. Ing. (FH) S. Zagromski für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Dr. N. Heide danke ich für die Unterstützung bei Simulationsrechnungen und bei der Datenauswertung.

Für die Unterstützung durch die anderen Arbeitsgruppen des KASCADE-Experiments möchte ich stellvertretend Herrn Dr. J. Engler, Herrn Dr. H. O. Klages und Prof. Dr. B. Zeitnitz meinen Dank aussprechen.

Herrn Dr. G. Cozzika danke ich für zahlreiche Hinweise und Bemühungen, die die Inbetriebnahme der Kammern sehr beschleunigten.

Frau S. Burkhardt und Frau A. Zirker möchte ich meinen Dank für die Unterstützung bei der technischen Bearbeitung dieser Arbeit aussprechen.

Anhang

Hinweise zur Funktionsweise des Encoder-Moduls Codeur Letis

Bedeutung der Statusanzeige-Leuchtdioden :

EC	=	Fehler im Ebenenmultiplexer
CNC	=	Kabel nicht verbunden, wird von allen Auslesezeigen zusammengefaßt
SC	=	Stop Kodierer, wegen Überlauf oder Ausleseende
DEB	=	Puffer Überlauf
OR	=	Output Ready-Signal des FIFO = Daten im FIFO
MO	=	M.OR liegt an
FCY	=	Auslesezyklus für eine Ebene beendet
GS	=	Gruppensignal, aktiv solange Datenwörter von Kammern anliegen
IR	=	Input Ready-Signal des FIFO = FIFO ist aufnahmebereit
MH	=	Taktgenerator für Timing aktiv
CTE	=	Zähler CTE, interne Ablaufsteuerung
ADR	=	Zähler ADR, FILAS-Auswahladressen
WC	=	Zählerregister WC, Wortanzahl im FIFO

CAMAC kann zugreifen auf : FIFO, WC, DEB, SC, EC + CNC.

Nur SC kann LAM erzeugen.

Camac-Befehle des Encoders :

F0*A0	=	Daten aus FIFO auslesen und weiterschalten
F0*A1	=	WC auslesen
F2*A1	=	WC auslesen und rücksetzen Flagge 'SC' löschen
F8*A0	=	Aufrufkontrolle (Test LAM)
F9*A0	=	Kodierer rücksetzen
F11*A0	=	Gesamtes Auslesesystem (Kod., FILAS, ...) rücksetzen
F24*A0	=	Sperrern LAM-Maske
F25*A0	=	Kodierer starten, Flagge 'Überlauf' rücksetzen
F26*A0	=	Freigabe LAM-Maske
F27*A0	=	Abfrage der Flagge 'Überlauf'
F27*A1	=	Abfrage der Flagge 'Stop Kodierer'
F27*A2	=	Abfrage von EC und CNC