



**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5973 B

**Experimentelle Untersuchung  
von „Resistive Plate Countern“  
als Detektoren zum Nachweis  
kosmischer Myonen**

**S. Ganter**  
Institut für Kernphysik

August 1997

---



**Forschungszentrum Karlsruhe**

**Technik und Umwelt**

**Wissenschaftliche Berichte**

**FZKA 5973 B**

**Experimentelle Untersuchung von**

**"Resistive Plate Countern"**

**als Detektoren zum Nachweis**

**kosmischer Myonen**

**S. Ganter**

**Institut für Kernphysik**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe**

**1997**

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

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

**ISSN 0947-8620**

## Zusammenfassung

Zur Untersuchung von "Resistive Plate Countern" aus Bakelit mit einem spezifischen Widerstand von  $10^{12} \Omega\text{cm}$ , wird ein Teststand, einschließlich eines Gasversorgungs- und Mischungssystems sowie der benötigten Signalausleseelektronik, aufgebaut.

Durch ein Teleskop aus zwei Szintillationszählern werden Myonen aus der kosmischen Strahlung ausgewählt, um einen innerhalb des Teleskops eingebrachten Resistive Plate Counter zu untersuchen.

Alternativ zu den bisher bei diesen Detektoren verwendeten Gasmischungen werden neue Mischungen getestet. Dazu wird Argon mit Methan und Isobutan gemischt. Bei weiteren Untersuchungen wird zu einem Argon-Isobutan-Gemisch noch Tetrafluormethan bzw. Isopropanol beigefügt.

Die Effizienz und die Zeitauflösung des Detektors sowie das Übersprechen zwischen benachbarten Kanälen werden bei verschiedenen Gasmischungen und Spannungen ermittelt. Die auftretenden Signale werden nach Zahl und Form der begleitenden Nachpulse klassifiziert und ihre relative Häufigkeit bestimmt. Zusätzlich wird das zeitliche Auftreten der Nachpulse untersucht. Es werden teilweise starke Asymmetrien in den Spektren der Ankunftszeiten bei den einzelnen Gasmischungen beobachtet.

Aus den gewonnenen Meßdaten wird ersichtlich, daß auf Freon verzichtet werden kann.

## Abstract

### Experimental Investigation on the Detection of Cosmic Muons by Resistive Plate Counters

A test facility, including a system for supplying and mixing gas as well as the necessary read-out electronics, is built up to examine bakelite Resistive Plate Counters with a bulk resistivity of  $10^{12} \Omega\text{cm}$ .

A telescope of scintillation counters selects cosmic ray muons to investigate a Resistive Plate Counter placed in between.

New mixtures are tested alternatively to gas mixtures used till now. For that purpose argon is mixed with methane and isobutane. For further investigations, tetrafluoromethane and 2-propanol are added to an argon-isobutane-mixture.

The efficiency and the time resolution of the detector as well as the crosstalk between neighbored read-out pads are determined for different gas mixtures and voltages. The signals of the detector are classified by number and shape of the afterpulses. The relative abundance of these classes is determined. In addition, the appearance of the afterpulses in time is investigated. A strong asymmetry was found partially for the arrivaltime distributions of the different gas mixtures.

The data of the measurements show, that it is possible to resign from the use of freon.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Resistive Plate Counters</b>	<b>7</b>
2.1	Die Entwicklung von Resistive Plate Countern . . . . .	7
2.2	Aufbau und Funktion des Detektors . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Der Aufbau des Teststandes</b>	<b>13</b>
3.1	Gasversorgungs- und Mischungsanlage . . . . .	13
3.2	Meßelektronik und Datenaufnahme . . . . .	16
3.3	Gasmischungen . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Messungen</b>	<b>21</b>
4.1	Effizienz- und Strommessungen . . . . .	21
4.2	Bestimmung der Zeitauflösung . . . . .	31
4.3	Klassifikation der Signale . . . . .	38
4.4	Das Ansprechverhalten des RPCs . . . . .	42
4.5	Untersuchung übersprechender Signale . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse mit anderen Experimenten</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>49</b>

# 1 Einleitung

Im Weltall werden ständig Teilchen durch verschiedene, zum Teil noch unbekannt Mechanismen, auf Energien bis zu  $10^{20}$  eV oder sogar darüber hinaus beschleunigt [1]. Bei diesen Teilchen handelt es sich hauptsächlich um Atomkerne von Wasserstoff bis Eisen sowie zu einem geringen Anteil um Photonen ( $< 0.1\%$ ) und Elektronen ( $< 1\%$ ) [2]. Entdeckt wurde diese kosmische Strahlung 1912 von V. Hess, als er bei Ballonaufstiegen feststellte, daß die von ihm gemessene Aktivität der Strahlung erst mit zunehmender Höhe abnimmt, um ab einer Höhe von 800 m wieder anzusteigen. Er folgerte daraus, daß diese Strahlung von außerhalb der Erde kommt [3].

Das Energiespektrum dieser Strahlung folgt einem Potenzgesetz  $N(E)dE \propto E^{-x}dE$ . Bis zu einer Energie von ca.  $3 \cdot 10^{15}$  eV ist der Exponent  $x \approx 2.7$ , danach vergrößert sich sein Wert auf  $\approx 3.0$ . Der Bereich des Spektrums, in dem dieser Wechsel geschieht, wird 'Knie' genannt. Die Ursache dieses Knies ist bislang noch unbekannt; sie könnte in einer Änderung der chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung in diesem Bereich liegen.

Trifft diese Strahlung auf die Erdatmosphäre, so entstehen durch nukleare Wechselwirkungen in Höhen von ca. 20 bis 100 km über dem Erdboden sogenannte ausgedehnte Luftschauer ("Extensive Air Showers", EASs), die sekundäre kosmische Strahlung [4, 5].

Bis zu Energien von  $10^{14}$  eV ist es möglich, die primäre Strahlung direkt mit Ballons oder Satelliten zu messen. Aufgrund des stark abfallenden Flusses kann man bei darüberliegenden Energien nur noch mit erdgebundenen, großflächigen Detektoren die sekundäre Strahlung untersuchen, die bei diesen Energien noch auf Meereshöhe nachweisbar ist.

Die ausgedehnten Luftschauer bestehen im wesentlichen aus drei Bestandteilen: Eine hadronische, eine elektromagnetische und eine myonische Komponente (Abb. 1.1).

Bei der hadronischen Komponente handelt es sich um die bei den Kernstößen entstehenden Baryonen (Protonen, Neutronen, etc.), Mesonen (Pionen, Kaonen, etc.) und Fragmente von Kernen. Diese haben genügend Energie, um selbst durch Wechselwirkungen weitere Teilchen zu erzeugen. Die laterale Ausdehnung dieser Komponente beträgt lediglich wenige Meter und stellt den Schauerkern dar.

Die in der hadronischen Komponente vorhandenen neutralen Pionen zerfallen in jeweils zwei Photonen. Die Photonen selbst wandeln sich durch Paarbildung in Elektron-Positron-Paare um. Durch deren Bremsstrahlung entstehen wiederum Photonen. Dies führt zur Bildung der elektromagnetischen Komponente. Die Anzahl der Elektronen des Schauers kennzeichnet die Schauergroße. Für ein Primärteilchen der Energie  $10^{15}$  eV beträgt die radiale Ausdehnung dieser Komponente, aufgrund von Transversalimpulsen bei der Paarbildung sowie Coulombstreuung in der Atmosphäre, in der Größenordnung

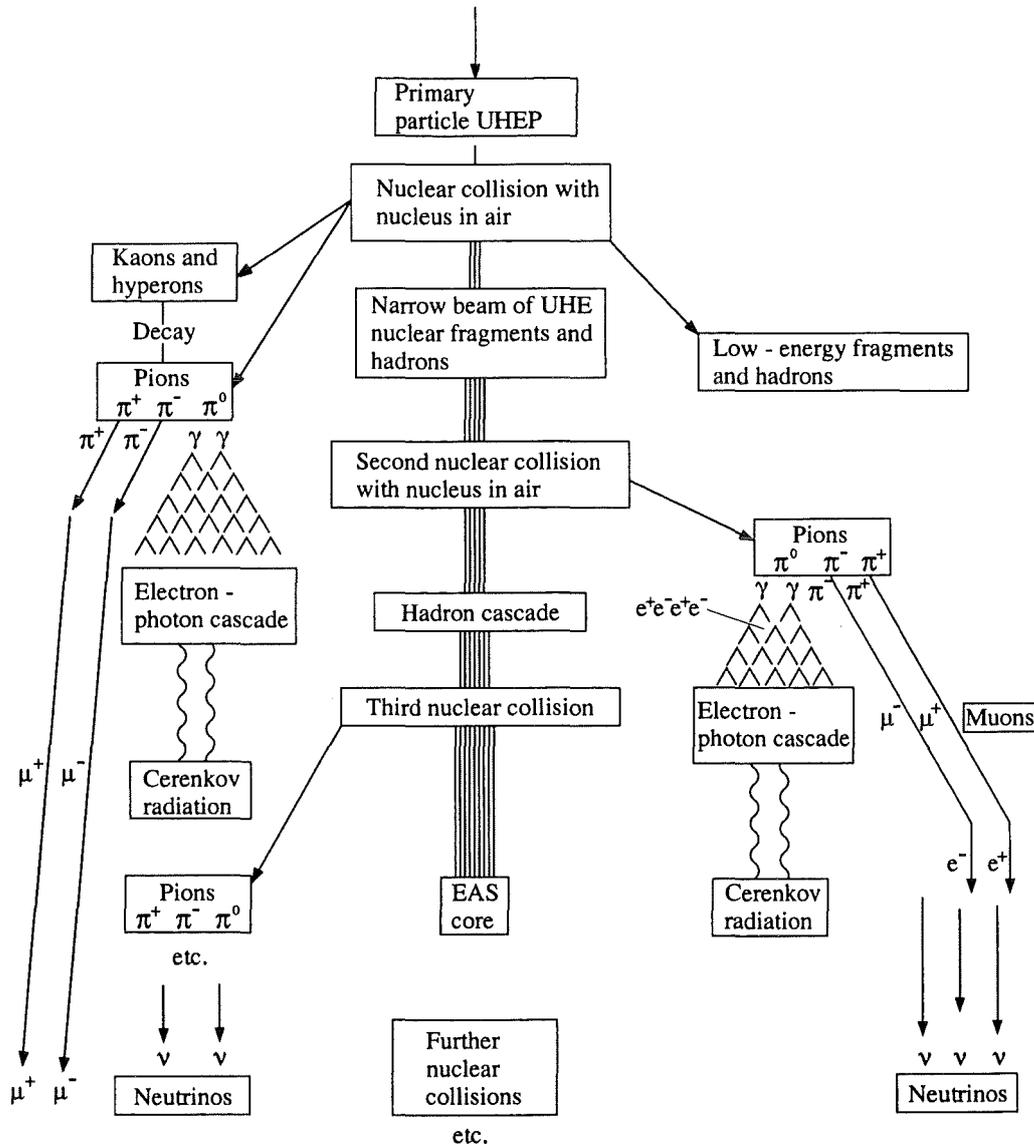


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau eines ausgedehnten Luftschauers

100 m auf Meereshöhe.

Durch den Zerfall der aus der hadronischen Komponente stammenden geladenen Pionen und Kaonen bildet sich die myonische Komponente. Myonen durchdringen die Atmosphäre nahezu ungestört, da sie praktisch nur Ionisationsverluste erleiden. Sie liefern daher direkte Informationen über ihre Entstehung. Die bei diesen Zerfällen ebenfalls entstehenden Neutrinos sind nicht effizient genug nachweisbar. Die radiale Ausdehnung der myonischen Komponente erreicht einige 100 m, da die meisten Myonen sehr hoch in

der Atmosphäre entstehen und somit auch eine kleine transversale Impulskomponente bei ihrer Bildung zu großen Abständen von der Schauerachse auf Beobachtungsniveau führen kann.

Das 110 m über dem Meeresspiegel gelegene Experiment KASCADE (“KARlsruhe Shower Core and Array DETector”) hat die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der primären kosmischen Strahlung im Energiebereich von  $10^{14}$  bis  $10^{17}$  eV zum Ziel [6].

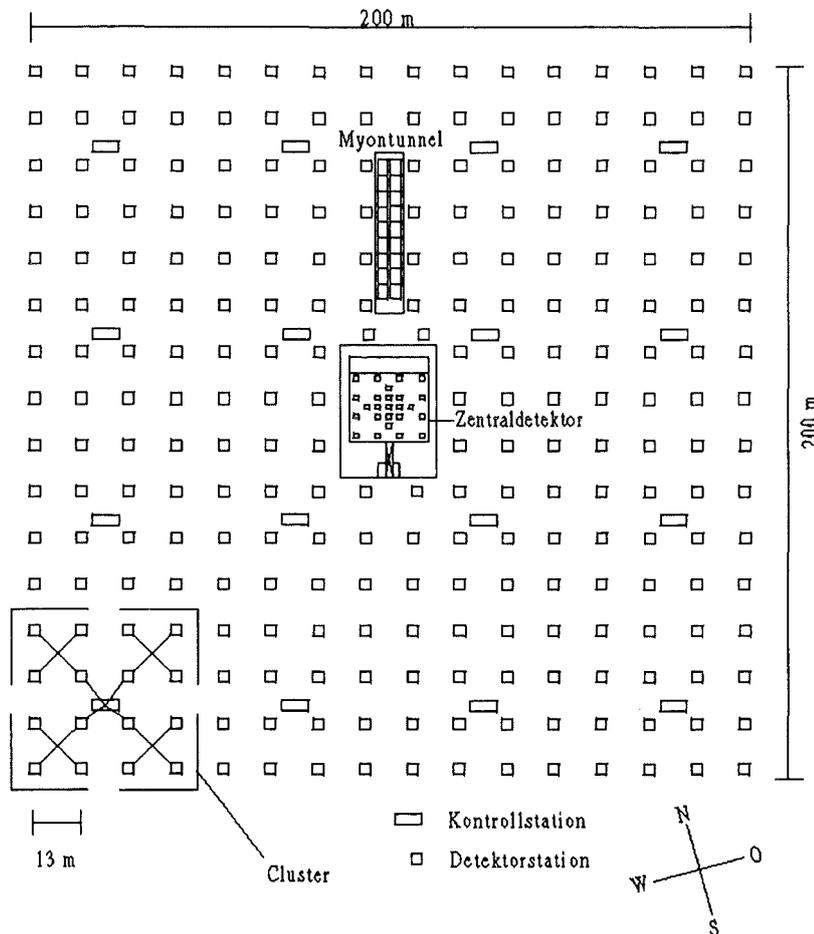
Durch seinen experimentellen Aufbau mit einem  $200 \times 200$  m<sup>2</sup> großen Detektorfeld, einem Myontunnel und einem  $16 \times 20$  m<sup>2</sup> großen Zentraldetektor, der sich in der Mitte der Anlage befindet (Abb. 1.2), besitzt KASCADE gegenüber älteren Luftschauer-Experimenten den Vorteil, alle drei Komponenten eines ausgedehnten Luftschauers simultan messen zu können. Dadurch sollte es für Einzelschauer gelingen, die Identität und Energie des Primärteilchens zu bestimmen.

Auf dem Detektorfeld (“Array”) sind 252 Detektorstationen zur Messung der Anzahl von Elektronen und Myonen sowie ihrer Lateralverteilungen und Ankunftszeiten in einem Luftschauer untergebracht. Der Nachweis der elektromagnetischen Komponente geschieht hier mittels Flüssigszintillatoren. Die myonische Komponente wird in diesen Detektorstationen mit Plastikszintillatoren, welche sich unterhalb einer 10 cm dicken Blei- und einer 4 cm dicken Eisenschicht (zur Absorption der elektromagnetischen Komponente) befinden, gemessen. Dadurch erhält man eine Energieschwelle von 300 MeV für die Myonen. Durch die unterschiedlichen Ankunftszeiten der Teilchen der elektromagnetischen Komponente ist es möglich, die Einfallsrichtung des Schauers zu ermitteln. Aus der Lateralverteilung erhält man die Lage des Schauerzentrums.

Innerhalb des Myontunnels werden “Streamertubes” verwendet, um die Nachweisfläche zur Bestimmung der Myonlateralverteilung zu erweitern und die Einfallsrichtung der Myonen zu ermitteln. Die Streamertubes werden in drei Ebenen übereinander angeordnet. Dies läßt die Bestimmung der Richtung der Myonen mit einer Auflösung von  $0.5^\circ$  zu. Die Energieschwelle für die Myonen beträgt hier, bedingt durch eine Abschirmung von Erdrich, Beton und Eisenplatten, ungefähr 0.8 GeV.

Der Zentraldetektor mißt die hadronische und myonische Komponente im Schauerzentrum. Außerdem befindet sich auf seinem Dach ein Detektorfeld aus 25, mit Plastikszintillatoren bestückten Detektorstationen zur Untersuchung niederenergetischer Luftschauer und zur Schließung der Detektorlücke des Arrays. Im Zentraldetektor wird durch ein Kalorimeter die Anzahl der Hadronen, ihre Richtung und ihre Energie im Schauerkern ermittelt. Als Absorber dienen mehrere Lagen Eisen zunehmender Dicke, die insgesamt elf nuklearen Wechselwirkungslängen entsprechen. Damit ist es möglich, Hadronen mit einer Energie bis 10 TeV nahezu vollständig zu absorbieren. Zwischen den Eisenabsorbieren befinden sich acht Lagen Flüssigionskammern, welche zum Teil mit Tetramethylsilan (TMS) und zum Teil mit Tetramethylpentan (TMP) gefüllt sind.

Unterhalb des Kalorimeters befinden sich 32 großflächige, ortsempfindliche Vieldraht-



**Abbildung 1.2:** Das KASCADE-Experiment

Proportionalkammern ("Multiwire Proportional Chambers", MWPCs) zur Messung der Myonen im Schauerkern bei einer Energieschwelle von 2 GeV. Die MWPCs sind in zwei Lagen zu je 16 Stück angeordnet. Dadurch sind Aussagen über die Myondichte im Kern des Schauers sowie über Ort und Einfallsrichtung der Myonen möglich.

Die dritte Ebene des Kalorimeters ist mit Plastiksintillatoren zur Triggerung des Kalorimeters und der Myonkammern sowie zur Messung der Ankunftszeit der Myonen belegt.

Die je nach Art des Primärteilchens auftretenden Unterschiede in der Entwicklung von Luftschauern in der Atmosphäre lassen sich durch den Vergleich eines durch ein Proton mit einem durch einen Eisenkern ausgelösten Schauer veranschaulichen.

Den Eisenkern kann man nach dem Superpositionsprinzip als Zusammenschluß von 56 Nukleonen betrachten, wobei jedes Nukleon  $1/56$  der Energie des Kerns besitzt. Da die Multiplizität der Sekundärteilchen-Produktion nur logarithmisch mit der Energie ansteigt, produzieren die 56 Nukleonen des Eisenkerns im Mittel mehr Sekundärteilchen als ein Proton gleicher Energie. Bei den meisten Sekundärteilchen handelt es sich um Pionen, von denen ein Bruchteil in Myonen zerfällt. Somit enthält ein 'Eisenschauer' bei gleicher Energie des Primärteilchens mehr Myonen als ein 'Protonschauer'.

Aus analogen Gründen haben die sekundären Hadronen in einem Protonschauer eine höhere Energie als diejenigen in einem Eisenschauer. Dies führt zu kleineren Ablenkungen der sekundären Teilchen in einem Protonschauer und damit zu einer steileren Lateralverteilung aller Teilchenarten in der Beobachtungsebene. Bei einem protoninduzierten Schauer ist die Myondichte im Zentrum höher und fällt zu größeren Abständen hin schneller ab als bei einem eiseninduzierten Schauer mit gleicher Myongesamtzahl.

Mißt man zusätzlich zur Anzahl der Myonen die Anzahl der Elektronen, so kann man eine Aussage über die Masse und Energie des Primärteilchens machen. Aufgrund der höheren Energie der neutralen Pionen im Protonschauer ist die Anzahl der Elektronen hier größer. Da Elektronen und Positronen schnell absorbiert werden, wenn ihre Energie unter 84 MeV fällt, wird das Maximum der Schauerentwicklung für einen Eisenschauer in höheren Atmosphärenschichten erreicht. Auf dem Beobachtungsniveau sieht man weniger Elektronen und Hadronen. Die somit erhaltene Signatur ist allerdings noch relativ schwach um zwischen den möglichen Primärteilchen zu trennen. Insbesondere möchte man nicht nur leichte und schwere Kerne, sondern drei bis fünf Massengruppen unterscheiden. Daher sucht man nach zusätzlichen massenabhängigen Größen.

Ein weiterer meßbarer Parameter ist die Ankunftszeit der Schauerteilchen. Diese läßt Rückschlüsse auf die longitudinale Entwicklung des Schauers zu [7]. Bevorzugt werden hierfür Myonen gemessen, da diese aufgrund ihrer geringen Wechselwirkung mit Materie die Atmosphäre relativ ungestört durchdringen. Die Ankunftszeit der Myonen ist abhängig von der Masse und Energie des Primärteilchens, dem Abstand zum Schauerkern sowie dem Einfallswinkel [8, 9]. Damit sind Rückschlüsse auf die Produktionshöhe der Myonen möglich.

Mit Hilfe eines Detektorteleskops lassen sich Myonspuren rekonstruieren und damit die Verteilung der Einfallswinkel messen. Analog zur Ankunftszeitmessung läßt sich somit die Produktionshöhe der Myonen bestimmen [9]. Mißt man hiermit Zeiten und Winkel gleichzeitig ("timing und tracking"), läßt sich die Genauigkeit der Meßergebnisse verbessern [10].

Die simultane Messung von Ort und Ankunftszeit bei einer guten Orts- und Zeitauflösung, könnte mit Hilfe von "Resistive Plate Countern" (RPCs) [11] durchgeführt werden. Diese Detektoren würden den Nachweis der Myonen beim KASCADE-Experiment in den folgenden Punkten verbessern:

Durch den Einsatz von RPC-Detektoren im Keller des Zentraldetektors wäre es

möglich, die Nachweisfläche für Myonen zu vergrößern. Dadurch ließe sich die Anzahl der Myonen und damit deren Dichte und laterale Verteilung besser bestimmen.

Der Gebrauch von RPCs zur Ankunftszeitmessung wäre aus folgendem Grund von Interesse: Bisher erfolgt die Ankunftszeitmessung der Myonen im Zentraldetektor durch die Plastiksintillatoren in der dritten Ebene des Kalorimeters. Dazu werden die Spuren der in den Vieldraht-Proportionalkammern auftretenden Teilchen rekonstruiert und nach entsprechenden Treffern in den Szintillatoren gesucht. Die Szintillatoren liefern dann die Ankunftszeit der Teilchen. Durch die Verwendung von RPCs im Keller des Zentraldetektors könnte man die Ankunftszeit neben dem Ankunftsort simultan bestimmen und somit die Zeitmessung verbessern.

Mit Resistive Plate Countern wäre es möglich, ein "timing und tracking"-fähiges Teleskop zu bauen, um mit einer guten Zeit- und Ortsauflösung die Einfallswinkel und Ankunftszeiten gleichzeitig zu messen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Eigenschaften von Resistive Plate Countern und deren Abhängigkeit von bestimmten Betriebsparametern, um zu entscheiden, ob sie für den Einsatz bei KASCADE geeignet sind.

Die geeignete Wahl der Betriebsparameter ist wichtig für den Gebrauch der Detektoren bei unterschiedlichen Teilchenflüssen. Entsprechend dem Fluß der Myonen aus der kosmischen Strahlung von ungefähr  $150 \text{ Teilchen}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  wird im Rahmen dieser Arbeit, abhängig von der verwendeten Gasmischung sowie der angelegten Spannung, die Effizienz und Zeitauflösung eines RPCs ermittelt. Die Gasmischung und die Betriebsspannung erweisen sich außerdem als bestimmend für die Pulsform der Signale sowie das Übersprechen von Signalen auf benachbarte Kanäle.

Bei bisherigen Untersuchungen von RPCs mit Hilfe der kosmischen Strahlung wurden Argon, Isobutan und Freon gemischt [12, 13, 14]. Der Gebrauch von Halogen-haltigen Stoffen wie Freon ist allerdings kritisch, da diese Stoffe aufgrund der in ihnen enthaltenen Halogene für den Abbau der Ozonschicht mitverantwortlich sind. Aus diesem Grund dürfen sie in den Ländern der Europäischen Union nicht mehr hergestellt und gehandelt werden [15]. Es soll daher bewußt auf die Beimischung eines solchen Stoffes verzichtet und das Verhalten des RPCs bei alternativen Mischungen untersucht werden.

## 2 Resistive Plate Counters

### 2.1 Die Entwicklung von Resistive Plate Countern

Am Anfang der Entwicklung der Resistive Plate Counters stand der Wunsch, die Zeitauflösung der bis dahin verwendeten Gasdetektoren zu verbessern. Diese arbeiteten mit radialen elektrischen Feldern. Je nach Ort der Ionisation eines Gasatoms muß das freigesetzte Elektron eine unterschiedlich lange Strecke im Feld driften, bis es den Bereich der Elektronenvervielfachung durch Gasverstärkung erreicht (Abb. 2.1). Die unterschiedlich langen Driftzeiten verschlechtern die Zeitauflösung erheblich. Diese zeitlichen Fluktuationen betragen im Falle der bei KASCADE verwendeten Vieldraht-Proportionalkammern bis zu 120 ns [16].

Um diese Schwankungen zu vermeiden, begann man, Detektoren mit parallelen, leitenden Elektrodenplatten zu konstruieren, zwischen denen man nach Anlegen einer Hochspannung ein homogenes elektrisches Feld erhält [17, 18]. Der Aufbau entspricht damit einem Plattenkondensator. Somit entfällt der Driftweg, da durch die hohe elektrische Feldstärke ein freigesetztes Elektron sofort beschleunigt wird und die Gasverstärkung unmittelbar einsetzt. Die primär freigesetzten Elektronen bilden "Streamer", die sich zu Funken entwickeln. Durch den Zusammenbruch des Feldes wird die Entladung gelöscht.

Von Nachteil sind hierbei die leitenden Elektrodenplatten. Aufgrund der kapazitiven Ankopplung der Hochspannung ist es nicht möglich, das elektrische Feld außerhalb des Orts einer Entladung aufrecht zu erhalten. Dadurch bricht beim Nachweis eines ionisierenden Teilchens das Feld großflächig zusammen, und der gesamte Detektor wird insensitiv.

Diese sogenannten "Planar Sparc Counters" (PSCs) wurden, basierend auf Überlegungen von Babykin [19], mit Elektroden aus Glas eines hohen spezifischen Widerstandes von  $10^9$  bis  $10^{10}$   $\Omega\text{cm}$  ausgerüstet [20, 21]. Dadurch wird erreicht, daß das elektrische Feld nur in einem begrenzten Bereich um die auftretende Entladung zusammenbricht. Nur dieses Gebiet wird während einer gewissen Totzeit insensitiv, ansonsten kann mit dem Detektor weiter gemessen werden. In den lediglich 0.1 bis 0.2 mm dicken Gasspalt wird Gas unter einem Druck von 12 bar eingefüllt. Durch die höhere Gasdichte im Spalt erhält man eine ausreichende Anzahl an primären Ladungsträgern, welche ein detektierbares Signal erzeugt. Die Größe des Detektors betrug maximal  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ .

Durch die Benutzung von Elektroden aus Bakelit, einem Phenolharz mit einem spezifischen Widerstand von  $10^{11\pm 1}$   $\Omega\text{cm}$ , entstanden aus den PSCs die Resistive Plate Counters (RPCs) [11, 12]. Der Gasspalt wurde auf 2 mm vergrößert. Damit kann der Detektor ohne nennenswerte Einbußen an primären Ladungsträgern mit einem unter Atmosphärendruck stehenden Gas gefüllt werden. Es wird daher möglich, diese Detektoren

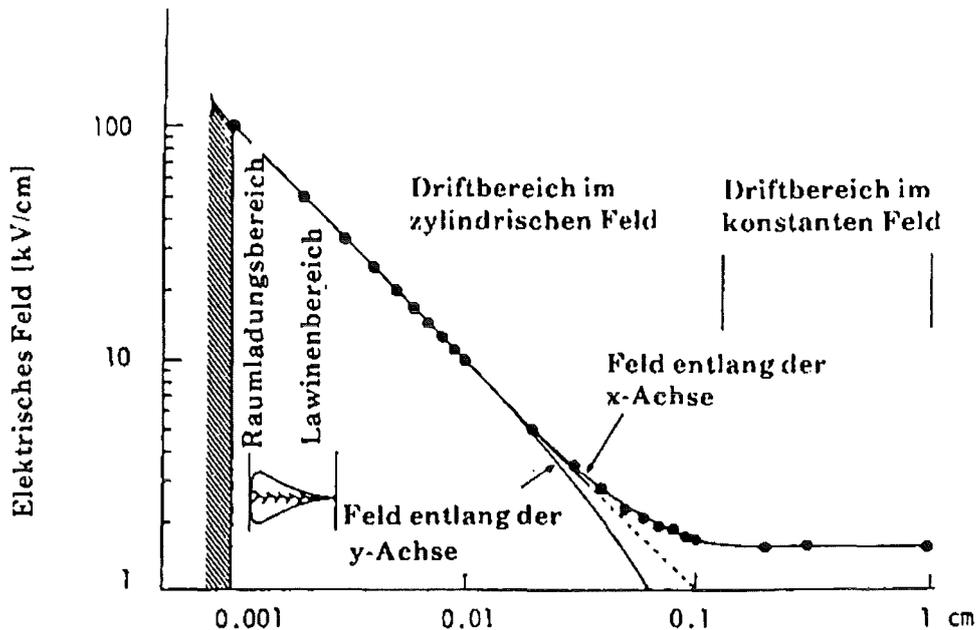


Abbildung 2.1: Driftweg der Elektronen in einer MWPC [29]

großflächig zu bauen.

## 2.2 Aufbau und Funktion des Detektors

Der Aufbau des verwendeten RPC-Detektors ist aus Abbildung 2.2 ersichtlich. Er entspricht dem eines RPCs, wie er bei General Technica in Colli (Italien) hergestellt wird. Der Detektor hat eine Länge von 200.6 cm und eine Breite von 100.4 cm. Die Elektroden bestehen aus zwei parallelen Bakelitplatten der Dicke 2 mm und haben einen spezifischen Widerstand von  $\rho = 10^{12} \Omega\text{cm}$ . Ihr konstanter Abstand von 2 mm wird durch Abstandshalter ("Spacer") aus isolierendem PVC garantiert. Die Spacer haben einen Durchmesser von 1.6 cm und sind auf einem quadratischen Gitter mit 10.1 cm Kantenlänge angeordnet. Ein PVC-Rand der Breite 1.9 cm verschließt den so erhaltenen Gasspalt nach außen. Abzüglich der Spacer und des Randes hat der RPC eine effektive Fläche von 1.86 m<sup>2</sup>. Der Gasspalt faßt ein Volumen von 3.73 l.

Die Innenseiten der Elektroden sind mit einer leinsamenöhlhaltigen Farbe bestrichen. Das Leinsamenöl ist sehr viskos und füllt jede Ritze in den Elektrodenplatten aus. Dadurch wird erreicht, daß die Innenseiten plan sind und man ein homogenes elektrisches

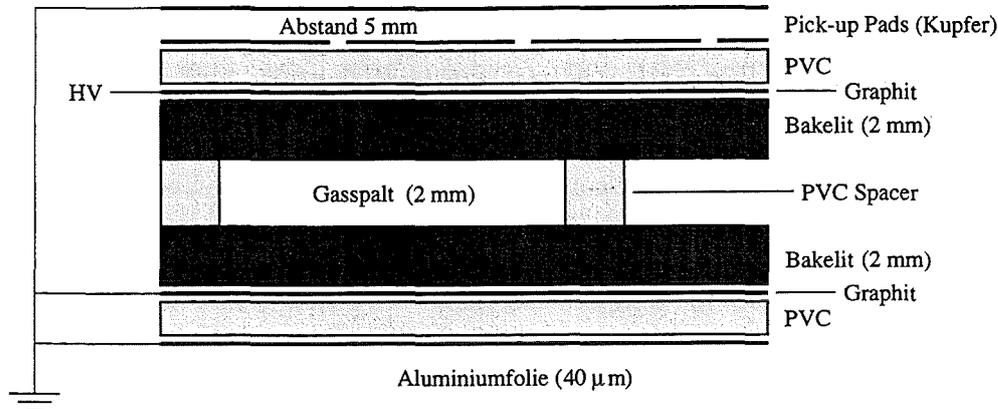


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines RPCs

Feld im Gasspalt erhält.

Die Bakelitelektroden sind an den Außenseiten mit Graphit beschichtet und werden zur Isolation von PVC-Platten eingerahmt. An die Graphitschicht zwischen Anode und PVC wird eine positive Hochspannung bis zu 10 kV [22] angelegt, diejenige zwischen Kathode und PVC liegt auf Nullpotential.

Aufgrund des hohen Oberflächenwiderstandes von  $\sim 0.1 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$  der mit Graphit beschichteten Elektroden, können die im Gasspalt erzeugten Entladungen außerhalb des Detektors kapazitiv ausgelesen werden. Die Signalauslese erfolgt über 128 quadratische "Pads" der Größe  $12 \times 12 \text{ cm}^2$ . Diese Pads bestehen aus einer beidseitig mit Kupferfolie beklebten 5 mm dicken Doppelstegplatte, welche eine Wandstärke von 0.5 mm hat. Die dem Bakelit zugewandte Kupferfolie ist in der Größe der Pads segmentiert. Die Kupferfolie auf der anderen Seite der Doppelstegplatte stellt die Signalmasse dar. Die Verwendung von Auslese pads erlaubt, den Detektor neben der Zeitmessung auch mit einer hinreichenden Auflösung zur Ortsmessung zu verwenden.

Alternativ zu den Auslese pads kann man auch Streifen verwenden [11]. Um hiermit eine Ortsinformation zu erhalten, muß man allerdings mindestens zwei Detektorlagen mit zueinander senkrecht stehenden Auslestreifen betreiben. Ein weiterer Nachteil der Auslese mit Streifen liegt in deren begrenztem Nachweisvermögen bei hohen Teilchendichten. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Resistive Plate Counters mit zwei Gasspalten zu konstruieren [12]. Dabei werden die Spacer im zweiten Gasspalt gegenüber den Spacern im ersten Spalt versetzt angebracht, wodurch sich die Nachweisfläche erhöht und sich die Effizienz des Detektors verbessert.

Als Gas dient gewöhnlich ein Gemisch aus Argon, Isobutan und Freon, das unter Atmosphärendruck eingefüllt wird [12]. Als Zählgas wird Argon (Ar) verwendet, da es sich hierbei um ein Edelgas handelt. Edelgase fangen keine Elektronen ein und ermögli-

chen aufgrund ihres hohen spezifischen Ionisationsvermögens bei geringen elektrischen Feldstärken Lawinenbildung. Xenon und Krypton haben zwar einen höheren Wirkungsquerschnitt für Ionisation als Argon [23], sie sind allerdings auch wesentlich teurer und finden daher bei Zählern mit hohem Gasfluß kaum Verwendung.

Isobutan ( $C_4H_{10}$ ) wird wegen seines hohen Absorptionskoeffizienten für ultraviolette Photonen als Löschgas ("Quenchgas") benutzt. Der Quencheffekt beruht auf der Existenz von Anregungszuständen bei komplexen Molekülen, die nicht durch Emission eines Photons in den Grundzustand zurückgehen. Es handelt sich hierbei um Rotations- und Vibrationszustände. Die Quenchwirkung steigt mit der Anzahl der Atome im Molekül. Aus diesem Grund wird Isobutan verwendet, da es über eine große Anzahl von Atomen verfügt. Durch die Anregung der nicht strahlend in den Grundzustand übergehenden Vibrations- und Rotationszustände werden Sekundärionisationen verhindert, welche Nachpulse oder Entladungen in einem anderen Teil des Detektors verursachen können. Weiterhin erreicht man mit Isobutan eine höhere Gasverstärkung und damit ein großes Signal, ohne daß es zu Dauerentladungen kommt. Würde man den Detektor mit reinem Argon betreiben, käme es bereits bei Gasverstärkungen von  $10^3$  bis  $10^4$  zu Dauerentladungen [24].

Um die Ausdehnung der Entladung noch zusätzlich zu beschränken, mischt man ein Freon bei. Dieses fängt aufgrund der hohen Elektronenaffinität der im Freon enthaltenen Halogene die äußeren Elektronen der Lawine ein. In der Regel wird hierzu Bromtrifluormethan ( $CF_3Br$ , R13B1) verwendet. Dieses Freon hat allerdings das höchste Ozonabbaupotential aller in der Europäischen Union verbotenen ozonabbauenden Stoffe [15]. Man muß daher auf die Beimischung von  $CF_3Br$  verzichten oder nach einem geeigneten Ersatz suchen.

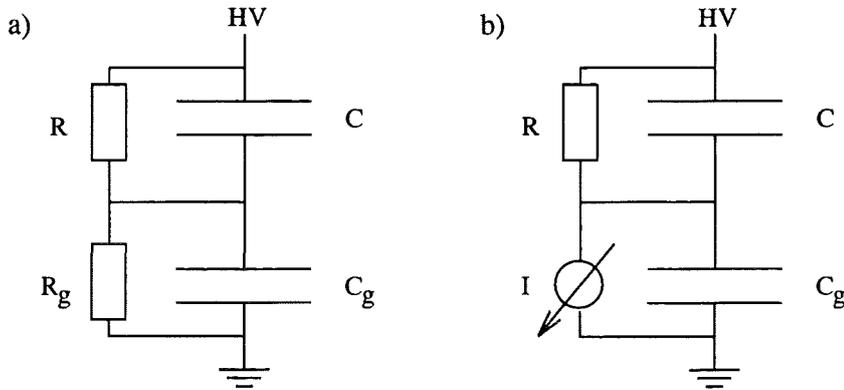
Je nach der erforderlichen Zählrate werden Resistive Plate Counters mit unterschiedlichen Gasgemischen betrieben. Als Mischungen werden bei Teilchenflüssen, wie sie bei der kosmischen Strahlung auftreten, in der Regel Ar (60 bis 70) :  $C_4H_{10}$  (40 bis 30) : Freon (2 bis 5) Volumen-% verwendet [12, 13, 14].

Die für den RPC-Detektor typischen Nachpulse lassen sich hiermit allerdings nicht vollständig unterdrücken.

Die elektrische Feldstärke im Gasspalt kann folgendermaßen bestimmt werden [25]:

$$E_g = \frac{U}{g + \frac{2d}{\epsilon_r}}$$

$U$  ist hierbei die angelegte Spannung,  $\epsilon_r = 3$  bis 5 [26] die Permittivitätszahl des Bakelits,  $g$  ist die Dicke des Gasspalts und  $d$  die Dicke einer Bakelitelektrode. Man erhält damit im Gasspalt des hier verwendeten RPCs eine Feldstärke von  $\approx 2.4$  kV/mm bei einer Spannung  $U$  von 8 kV und  $\epsilon_r = 3$ . Am Gasspalt selbst liegt somit eine Spannung von  $U_g \approx 4.8$  kV an, woraus folgt, daß man bereits im Entladungsbereich arbeitet und



**Abbildung 2.3:** Äquivalenter Stromkreis einer Entladungszelle. Die Kapazität  $C$  entspricht den Bakelitelektroden und  $C_g$  entspricht dem Gasspalt

keine Proportionalität der im Detektorgas deponierten Energie zur Zahl der primär freigesetzten Elektronen besteht.

Wird ein Gasatom ionisiert, setzt im homogenen elektrischen Feld sofort Lawinenbildung ein. Aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke im Gasspalt wird die maximal mögliche Gasverstärkung von ungefähr  $10^8$  erreicht [24]. Die Größe des Raumladungsfeldes wird so groß wie die des äußeren Feldes, welches dadurch zusammenbricht. Dies geschieht wegen des hohen spezifischen Widerstandes des Bakelits aber nur in einer begrenzten Umgebung der Entladung. Außerhalb dieses Gebiets bleibt die Sensitivität des Zählers erhalten.

Zur genauen Erklärung der Funktion kann man sich den Aufbau des RPC-Detektors als zwei mit Dielektrika gefüllte Plattenkondensatoren vorstellen [27]:

1. Im Falle eines nicht ionisierten Gases kann man dessen Widerstand als unendlich betrachten,  $R_g = \infty$  in Abbildung 2.3a. Die Spannung liegt somit vollständig am Gasspalt an.
2. Die durch ein ionisierendes Teilchen verursachte Entladung kann als Stromgenerator betrachtet werden (Abb. 2.3b), welcher die Gaskapazität  $C_g$  entlädt.

Das gesamte System geht exponentiell mit einer charakteristischen Zeitkonstante  $\tau$ , der Totzeit, in den Anfangszustand zurück [27]:

$$\tau = R(C + C_g) = \rho \epsilon_0 \left( \epsilon_r + \frac{2d}{g} \right),$$

wobei  $\rho$  der spezifische Widerstand der Elektroden und  $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante ist.

Für einen spezifischen Widerstand  $\rho = 10^{12} \Omega\text{cm}$  erhält man eine Totzeit  $\tau \approx 1 \text{ s}$ . Diese ist sehr viel größer als die Dauer der Entladung, die ungefähr 10 ns beträgt [12, 27]. In dieser kurzen Zeit verhalten sich die Elektroden wie Isolatoren, was die Ausbreitung der Entladung ebenfalls hemmt und sie gleichzeitig löscht.

Die Fläche der Entladung auf den Elektroden und damit die während der Totzeit insensitive Fläche

$$S = \frac{Qg}{\epsilon_0 U}$$

ist abhängig von der im Spalt freigesetzten Ladung  $Q$ , welche  $\sim 100 \text{ pC}$  beträgt, und der angelegten Spannung  $U$ . Sie liegt in der Größenordnung von  $0.1 \text{ cm}^2$  [12].

## 3 Der Aufbau des Teststandes

Um die Testmessungen mit dem Resistive Plate Counter durchzuführen, wird dieser zwischen zwei Szintillationszähler gelegt (Abb. 3.1). Diese dienen zur Triggerung des RPC-Detektors. Die jeweils  $200 \times 50 \times 3 \text{ cm}^3$  großen Szintillatoren bestehen aus dem Material BC 408 des Herstellers Bicron und werden beidseitig über dreiecksförmige Lichtleiter durch "Photomultiplier" (Philips XP 2252) ausgelesen [28]. Da sich der eine Szintillator oberhalb und der andere unterhalb des Zählers befindet, wird durch ein koinzidentes Ansprechen beider Szintillationsdetektoren das Auftreten eines durchfliegenden Teilchens garantiert. Im wesentlichen wird die Koinzidenz durch einzelnen Myonen ausgelöst, wobei mit einem geringen Anteil an Luftschauern zu rechnen ist. Der RPC-Detektor befindet sich zur stabilen Lagerung zwischen zwei Holzplatten.

Die Anzahl  $K$  zufälliger Koinzidenzen läßt sich mit der Gleichung

$$K = Z_1 \cdot Z_2 \cdot \tau$$

abschätzen.  $Z_x$  ist die Zählrate des Detektors  $x$  und  $\tau$  ist die Koinzidenzzeit der beiden betrachteten Detektoren. Für die zwei Szintillatoren erhält man an zufälligen Koinzidenzen eine Rate  $K = 2.4 \cdot 10^{-9} \text{ 1/s}$ . Wird der RPC mit den Szintillatoren in Koinzidenz genommen, so erniedrigt sich die Rate auf  $K = 1.0 \cdot 10^{-13} \text{ 1/s}$ . Das Auftreten von zufälligen Koinzidenzen ist somit vernachlässigbar.

Repräsentativ für den gesamten Detektor werden 15 Pads, die sich in der Mitte des RPCs befinden, untersucht. Diese sind in einem Rechteck der Größe  $62.5 \times 36.0 \text{ cm}^2$  angeordnet (Abb. 3.2). Die direkt an dieses Rechteck angrenzenden Pads werden mit  $50 \text{ } \Omega$  gegen Masse kurzgeschlossen, um das Übersprechen von Signalen zu unterdrücken.

Über eine Klimaanlage wird die Raumtemperatur auf  $20^\circ\text{C}$  eingestellt, um Schwankungen der Gasdichte und des spezifischen Widerstandes der Elektroden zu vermeiden. Diese Schwankungen könnten die durchgeführten Messungen beeinflussen.

Mit dem Luftdruck ändert sich auch der Gasdruck innerhalb des Detektors. Damit schwankt die Zahl der zur Gasverstärkung zur Verfügung stehenden Ladungsträger, was ebenfalls die Messungen beeinflussen kann.

### 3.1 Gasversorgungs- und Mischungsanlage

Um die Gasversorgung der Detektoren sicherzustellen, braucht man ein System, mit dem sich verschiedene Gase mischen lassen. Außerdem sollte damit eine Kontrolle des Gasflusses möglich sein. Im folgenden wird der Aufbau der benutzten Gasversorgungs- und Mischungsanlage beschrieben.

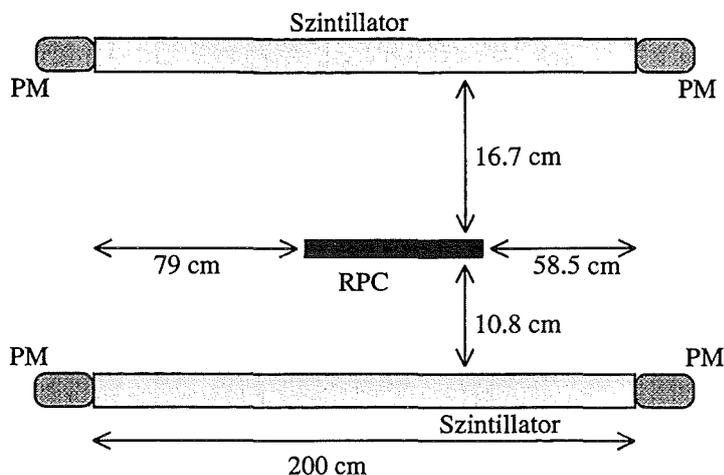


Abbildung 3.1: Seitenansicht des Teststands

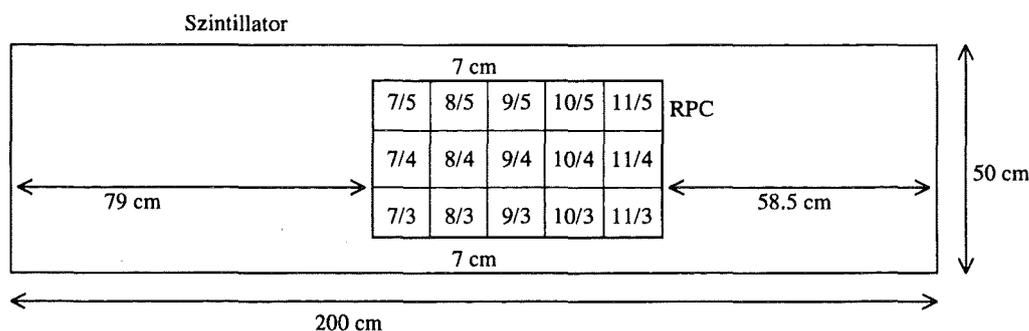


Abbildung 3.2: Teststand-Aufsicht

Die verschiedenen zu mischenden Gase strömen jeweils durch einen Flußregler (Rotameter, Firma ROTA) in die Mischröhre (Abb. 3.3). Am Flußregler wird ein konstanter Gasfluß eingestellt und über die verbrauchte Gasmenge der jeweiligen Gase wird die Mischung bestimmt. Bei Druckgasen wird der Verbrauch über den Druckabfall am Manometer und bei Flüssiggasen über den Gewichtsunterschied der Flaschen vor und nach der Messung bestimmt.

Nach der Mischröhre wird nochmals ein Flußregler (der Firma Emerson Electric) durchlaufen, mit dem der gesamte Gasfluß durch die Kammer geregelt werden kann. Danach befindet sich eine Spülflasche zur Beimischung von leicht verdampfenden Flüssigkeiten im Gasweg. Anschließend verzweigt sich dieser. Zum einen strömt das Gas auf ein langes Röhrchen (R1) in einen mit Paraffinöl gefüllten Gasbubblen, zum anderen zuerst durch den RPC und dann auf ein kurzes Röhrchen (R2) in den gleichen Bubbler. Dieser besteht aus Plexiglas und ist somit durchsichtig.

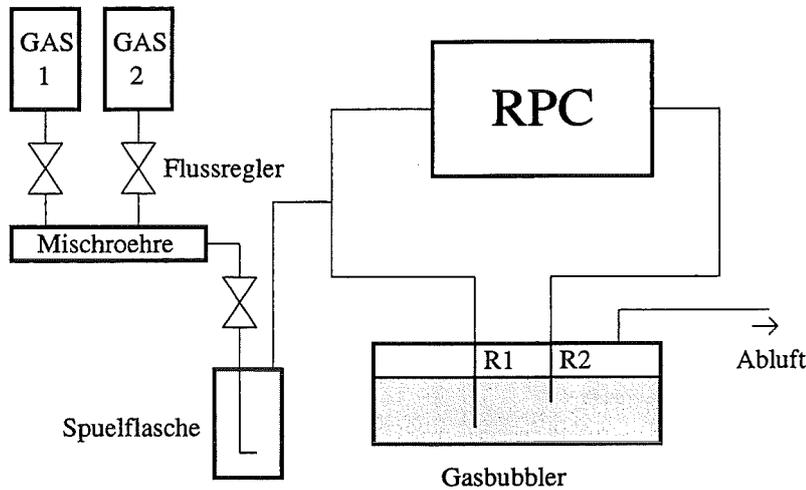


Abbildung 3.3: Gasversorgungs- und Mischungsanlage

Der Gasbubbler hat mehrere Funktionen [29]. Im Gasweg stellt sich der hydrostatische Druck des kurzen Röhrchens ein. Das Gas fließt aus diesem Grund über das kurze Röhrchen ab, wodurch der Gasfluß durch den Detektor garantiert wird. Die Eintauchtiefe des Röhrchens bestimmt den Druckunterschied zum Luftdruck. Relativ zum Luftdruck erhält man somit innerhalb der Kammer konstanten Gasdruck. Des weiteren wird bei einer Verstopfung des Gaswegs im RPC das Gas über das lange Röhrchen im Bubbler abfließen. Dadurch wird ein Druckaufbau im Detektor vermieden, der diesen eventuell beschädigen könnte. Schließlich dient der Bubbler auch zur Sichtkontrolle des Gasflusses. Erscheinen im Bubbler weniger Gasblasen als gewöhnlich, so ist ein Leck im Gasweg vorhanden.

Außerdem garantiert der Gasbubbler, daß bei einer Unterbrechung des Gasflusses keine Luft in den Detektor einströmt. Die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit kann vom Bakelit absorbiert werden, wodurch sich sein Widerstand und damit das elektrische Feld im Spalt ändert [30].

Zusätzlich befinden sich vor und nach dem Detektor weitere Plexiglasbehälter. Diese dienen als Paraffinabscheider, um zu verhindern, daß bei plötzlich auftretenden Druckschwankungen im Gasweg das Paraffinöl in den Detektor hineingezogen wird.

Für die unterschiedlichen Mischungen werden folgende Gase verwendet: Argon (Ar, Reinheit 4.6), Methan ( $\text{CH}_4$ , Reinheit 2.5), vorgemischtes Argon-Methan im Verhältnis 90:10, Isobutan ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , Reinheit 3.5) sowie Tetrafluormethan UHP ( $\text{CF}_4$ , Reinheit 99.995 %). Über die Spülflasche wird außerdem bei einer Messung Isopropanol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ , Reinheit 99.7 %) beigemischt.

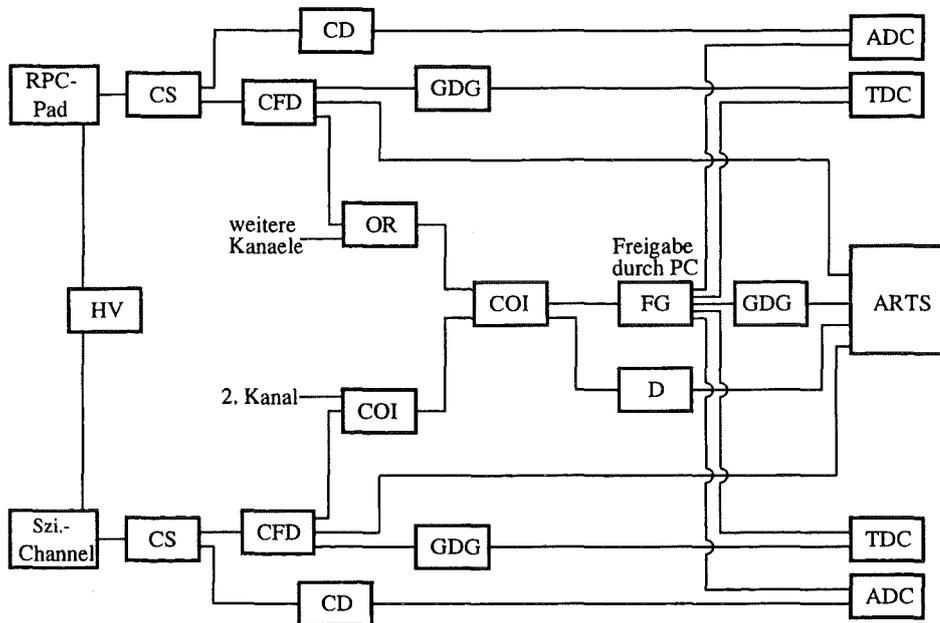


Abbildung 3.4: Aufbau der Meßelektronik für ein RPC-Pad und einen Szintillatorkanal

CS	Signal Splitter	CD	Cable Delay
CFD	Constant Fraction Discriminator	OR	Or Unit
GDG	Gate and Delay Generator	HV	High Voltage Supply
COI	Coincidence Unit	FG	Fast Gate
TDC	Time to Digital Converter	D	Discriminator
ADC	Analog to Digital Converter	ARTS	Arrival Time System

Tabelle 3.1: Bedeutung der Abkürzungen in Abb. 3.4

## 3.2 Meßelektronik und Datenaufnahme

Zur Signalauslese wird für die RPC-Pads und für die Szintillatorkanäle Elektronik in Form von NIM-Modulen der Firmen EG&G Ortec und LeCroy verwendet. Die Weiterverarbeitung erfolgt durch CAMAC-Module der Firma LeCroy. Als Hochspannungsvorsorgung steht ein CAEN SY127-System zur Verfügung. Für den RPC-Detektor wird ein A431-Modul verwendet, das 8 kV bei maximal 200  $\mu$ A liefert, und für die Szintillatoren ein A333-Modul, das 4 bzw. 3 kV bei maximal 2 bzw. 3 mA liefert.

Die Signalwege für jeweils ein RPC-Pad und einen Szintillatorkanal sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

Im RPC-Signalweg befindet sich jeweils zwischen Pad und Elektronik ein Hochpaßfilter mit einer Grenzfrequenz von 3 MHz als Hochspannungsschutz (Abb. 3.5), da

auf den Signalkabeln statische Aufladungen von über 900 V nachgewiesen wurden. Als zusätzlichen Hochspannungsschutz werden zwei Schottky-Dioden verwendet, welche die Ausgangssignale auf  $\pm 410$  mV begrenzen. Schottky-Dioden werden verwendet, weil sie schneller leitend werden als normale Silizium- oder Germanium-Dioden. Aufgrund der großen Pulse, die der RPC liefert, kann auf einen Vorverstärker verzichtet werden.

Der Signalweg zweigt sich in einen analogen Teil und in einen digitalen Triggerteil auf (Abb. 3.4). Der analoge Zweig führt in einen ladungsintegrierenden "Analog to Digital Converter" (ADC, LeCroy 2249A). Die Auflösung beträgt aufgrund der Schwächung der Signale durch das Signalfilter und das 10 m langen Signalkabel 0.825 pC pro Kanal.

Der digitale Zweig durchläuft zuerst einen "Constant Fraction Discriminator" (CFD, Ortec CF8000), dessen Schwelle bei -50 mV eingestellt ist. Dieser Wert wurde gewählt, um eventuelle Rauschsignale zu unterdrücken. Echte Signale kommen aufgrund ihrer großen Amplitude von -100 bis -250 mV, bei einer Eingangsimpedanz von 50  $\Omega$ , problemlos über die Schwelle. Vom CFD laufen die Signale zum einen über einen "Gate and Delay Generator" (Ortec GG8000) zur Verzögerung des Pulses als Stoppsignal in den "Time to Digital Converter" (TDC, LeCroy 2228A). Dieser dient zur Messung der Signalkunftszeit. Die Zeitaufösung des TDC beträgt 100 ps pro Kanal [31]. Zum anderen laufen sie in ein "Arrival Time System" (ARTS) bzw. in ein OR mit den anderen RPC-Pads.

Das "Arrival Time System" ist ein multihitfähiges Zeitmeßsystem mit einer zeitlichen Tiefe von 5.12  $\mu$ s und einer Auflösung von 20 ns [32]. Es handelt sich hierbei um ein Eigenbau-NIM-Modul. Die Multihitfähigkeit erlaubt die Erkennung und Klassifizierung von Mehrfachpulsen.

Das OR aller RPC-Pads wird in einer Koinzidenz mit den beiden Szintillatoren zusammengeführt. Die Breite des Koinzidenzfensters beträgt 85 ns, falls zuerst das Signal vom RPC eintrifft, bzw. 140 oder 155 ns, falls zuerst das Signal von einem der beiden Szintillatoren eintrifft. Die Wahl der unterschiedlich langen Fenster berücksichtigt, daß die Signale des Resistive Plate Counters eher zu spät als zu früh in der Koinzidenz eintreffen.

Der Szintillatorzweig ist analog zum RPC-Zweig aufgebaut, mit dem Unterschied, daß der jeweils rechte und linke Kanal eines Szintillators in Koinzidenz geschaltet sind.

Aufgrund der Länge der verwendeten Szintillatoren erfolgt eine merkliche Abschwächung der Pulshöhe für Teilchen, welche am jeweils entgegengesetzten Ende (bzgl. des auslesenden Photomultipliers) durch den Szintillator fliegen [28]. Um sicherzustellen, daß ein minimalionisierendes Teilchen unabhängig vom Durchflugsort von beiden Diskriminatoren registriert wird, sind die CFD-Schwellen der Szintillatoren auf ihren niedrigstmöglichen Wert von -10 mV [33] eingestellt.

Ist die Koinzidenzbedingung zwischen RPC und Szintillatoren erfüllt, wird ein Triggersignal an ein selbstverriegelndes "Fast Gate" geschickt. Dieses öffnet das ADC-Gate zur Messung, löst den TDC-Start aus und gibt das Triggersignal für das ARTS. Weitere einlaufende Signale werden solange durch das Fast Gate gesperrt, bis dieses ein Freiga-

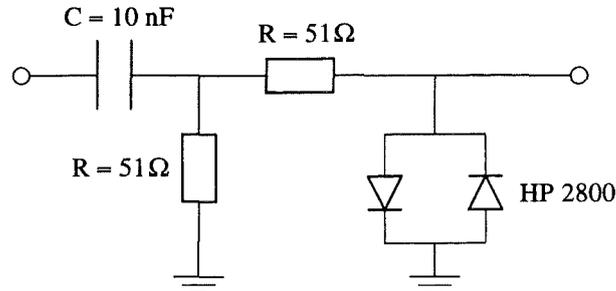


Abbildung 3.5: Signalfilter

besignal durch den Datenaufnahme-PC erhält. Dadurch wird verhindert, daß vor Beendigung der Datenauslese ein neues Triggersignal auftritt [34]. Die Zeitmessung durch den TDC wird für alle Pads bzw. Kanäle gleichzeitig begonnen, während sich jede Komponente selbst stoppt.

Bei erfüllter Koinzidenzbedingung wird außerdem ein Puls als Referenzzeit an das ARTS gegeben. Dieser dient zur Festlegung des zeitlichen Nullpunkts für das Arrival Time System, um relativ zur erfüllten Koinzidenzbedingung das zeitliche Auftreten der Signale zu bestimmen.

Die Datenaufnahme erfolgt über das Programm MYDAS (MYonkammer Datenaufnahme und Analyse-Software) [34] durch ein PC/CAMAC Interface (Hytec 1331/Turbo der Fa. Struck) mit einem PC 486 DX/33. Hierzu mußte lediglich die Konfigurationsdatei des ursprünglich für die Datenaufnahme an einem Vieldraht-Proportionalkammer-Teststand geschriebenen Programms für den Gebrauch der Resistive Plate Counters modifiziert werden.

### 3.3 Gasmischungen

Ein minimal ionisierendes Teilchen deponiert im Detektorgas Energien in der Größenordnung einiger keV pro cm (Tab. 3.2). Die dadurch freigesetzten primären Elektronen können weitere Atome ionisieren, falls ihre Energie größer als das entsprechende Ionisationspotential ist. Die Anzahl  $n_p$  der primären und die Anzahl  $n_s$  der sekundären Ionisationen ergibt die gesamte Ionisation  $n_t$  (Tab. 3.2). Die Gesamtzahl der Ionenpaare kann auch durch

$$n_t = \frac{\Delta E}{W_i}$$

ausgedrückt werden [24]. Hierbei ist  $\Delta E$  der gesamte Energieverlust  $\frac{dE}{dx} \cdot X$  im betrachteten Gasvolumen und  $W_i$  die mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares.  $dE/dx$  ist der spezifische Energieverlust und  $X$  die Dicke des Gasspaltes.

Gas	$\frac{dE}{dx} [\frac{keV}{cm}]$	$E_i$ [eV]	$W_i$ [eV]	$n_p [cm^{-1}]$	$n_t [cm^{-1}]$
Ar	2.44	15.7	26	29.4	94
CH <sub>4</sub>	1.48	15.2	28	16	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	4.50	10.6	23	46	195

$dE/dx$ : spezifischer Energieverlust von minimal ionisierenden Teilchen

$E_i$ : Ionisationspotential

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

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

$n_t$ : Anzahl der zur Gasverstärkung zur Verfügung stehenden Elektron-Ion-Paare pro cm

**Tabelle 3.2:** Kenngrößen einiger Detektorgase unter Atmosphärendruck für minimal ionisierende Teilchen [24]

Man erhält mit den Werten aus Tabelle 3.2 die Gesamtzahl der primären und sekundären Ionenpaare für verschiedene Gasmischungen vor Einsetzen der Gasverstärkung in einem 2 mm dicken Spalt:

$$\text{Ar:CH}_4 \text{ (90:10): } n_t = 18$$

$$\text{Ar:CH}_4 \text{ (30:70): } n_t = 13$$

$$\text{Ar:C}_4\text{H}_{10} \text{ (80:20): } n_t = 23$$

$$\text{Ar:C}_4\text{H}_{10} \text{ (60:40): } n_t = 27$$

Bei Argon-Methan-Mischungen stehen weniger Ladungsträger zur Verstärkung zur Verfügung als bei Isobutan-Mischungen. Jedoch setzt bei einfacheren Molekülstrukturen die Gasverstärkung früher ein, d.h. die Gasverstärkung ist bei niedrigeren Spannungen höher als bei komplexeren Molekülen, so daß sich trotzdem genügend große Signale zum Nachweis entwickeln.

Es erfolgten zunächst Tests mit verschiedenen Argon-Methan-Mischungen (Ar-CH<sub>4</sub>). Die niedrigste Anregungsenergie für einen strahlenden Übergang des Argons beträgt 11.6 eV [35]. Methan absorbiert im Energiebereich von 7.9 bis 14.5 eV gut [24]. In diesem Bereich emittiert Argon Photonen, die aus strahlenden Übergängen von angeregten Zuständen in den Grundzustand resultieren. Somit stellt Methan eine preiswerte Alternative zum bislang bei diesen Detektoren als Löschgas verwendeten Isobutan dar.

Zuerst wurde Argon-Methan im Mischungsverhältnis von 90:10 getestet, was bereits vorgemischt bezogen werden kann. Es ist somit keine Mischungsanlage für dessen Gebrauch notwendig. Außerdem ist dieses Gemisch aufgrund des hohen Argon-Anteils nicht mehr explosiv, falls es in die Luft austritt. Eine Explosionsgefahr bestünde nur

wenn sich Argon und Methan entmischen würden, was aufgrund der ähnlichen Dichten bei normalen Temperaturen und normaler Belüftung auszuschließen ist. Beim Austritt von reinem Isobutan bildet sich allerdings stets ein explosives Verhältnis beim Durchmischen mit Luft. Die Untersuchung von Methan als Ersatz für Isobutan ist somit auch aus Sicherheitsgründen empfehlenswert.

Bei weiteren Untersuchungen wurde statt Methan Isobutan ( $C_4H_{10}$ ) als Löschgas verwendet. Die so erhaltenen Mischungen sollten als Vergleich zu den ansonsten verwendeten Mischungen mit Argon und Isobutan [12, 13, 14] dienen, jedoch ohne das verbotene Freon R13B1. Dadurch sollte eine Aussage darüber möglich sein, ob auf einen Gaszusatz mit hoher Elektronenaffinität verzichtet werden kann.

Abschließend wurde zu Argon und Isobutan noch ein dritter Stoff gemischt. Verwendet wurden hierfür Isopropanol ( $C_3H_8O$ ), Methan sowie Tetrafluormethan ( $CF_4$ ).

Tetrafluormethan wird bereits von anderen Arbeitsgruppen als Ersatz für das verbotene Bromtrifluormethan getestet [36, 37, 38], denn dieses Gas fällt nicht unter das EU-Verbot ozonabbauender Stoffe.

Isopropanol hat aufgrund seiner OH-Gruppen etwas andere Absorptionseigenschaften als Methan und Isobutan. Es wird zu einigen Prozent dem Füllgas in Zählrohren beigemischt, da es die Eigenschaften des Füllgases dahingehend verändert, daß sich auftretende Entladungen selbst löschen [39]. Außerdem besitzt Isopropanol reinigende Eigenschaften [40]. Aus diesen Gründen wird es auch in den Vieldraht-Proportionalkammern von KASCADE verwendet [29].

Um das Isopropanol beizumischen, wird es in die im Gasweg vorhandene Spülflasche gefüllt. Durch Verdampfen des Alkohols reichert sich das durchfließende Gas mit Isopropanol an. Um einen genügend großen Isopropanol-Anteil zu erhalten, wird dieses auf  $40^\circ C$  erwärmt. Dazu wird die Spülflasche, in der sich das Isopropanol befindet, in ein heizbares Wasserbad gestellt.

Unter dem Begriff Methan-Mischungen werden im folgenden die Ar- $CH_4$ -Mischungen verstanden. Analog werden die Ar- $C_4H_{10}$ -Mischungen als Isobutan-Mischungen bezeichnet.

## 4 Messungen

Das Ziel der Messungen war zum einen die Ermittlung der Effizienz und der Zeitauflösung des RPC-Detektors, zum anderen sollten auch alternativ zu den bisher zur Untersuchung von ausgedehnten Luftschauern mit Resistive Plate Countern verwendeten Mischungen andere Gase getestet werden. Außerdem wurde die Abhängigkeit der Detektor-Signale sowie des Übersprechens von Signalen auf benachbarte Pads von der Gasmischung untersucht.

Zur Untersuchung der Detektoren wurden Messungen unter zwei Rahmenbedingungen durchgeführt.

Bei den Messungen der Detektoreffizienz und des Stromverbrauchs des RPCs wurden lediglich die zwei Szintillatoren in Koinzidenz genommen (Koinzidenzbedingung 1). Die restlichen Messungen wurden mit allen drei Detektoren, d.h. dem RPC und den zwei Szintillatoren, in Koinzidenz aufgenommen (Koinzidenzbedingung 2). Unter diesen Bedingungen wurden die Zeitauflösungen der einzelnen Pads, die Signale sowie deren Übersprechen auf benachbarte Kanäle untersucht.

Im folgenden werden die Messungen und ihre Ergebnisse beschrieben. Die dabei verwendeten Gasmischungen sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt.

### 4.1 Effizienz- und Strommessungen

Zur Effizienzmessung werden nur die zwei Szintillatoren in Koinzidenz genommen. Anschließend wird über die Einträge im Time to Digital Converter ermittelt, wieviele von diesen Ereignissen der RPC sieht.

Aufgrund dessen, daß der RPC und die Szintillatoren eine unterschiedlich große Fläche belegen und der RPC-Detektor sich nicht direkt zwischen den Szintillatoren befindet, sondern einen gewissen Abstand von diesen hat (Abb. 3.2, 3.1), muß die gemessene Ansprechrate mit einem Geometriefaktor  $G$  korrigiert werden, um die Effizienz zu erhalten. Der Geometriefaktor wird aus einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt.

Die einfallenden Myonen sind ab einer Energie von 0.5 GeV bezüglich des Azimutalwinkels  $\phi$  isotrop [41]. Die Intensität der einfallenden Myonen

$$I = \frac{dN}{dA \cdot dt \cdot d\Omega},$$

mit  $N$  der Zählrate,  $A$  der Flächeneinheit,  $t$  der Zeiteinheit und  $\Omega$  dem Raumwinkelelement, kann für Zenitwinkel bis  $\theta = 80^\circ$  durch

$$I(\theta) = I(\theta = 0) \cdot \cos^n \theta$$

Koinzidenzbedingung 1:		Koinzidenzbedingung 2:	
Ar-CH <sub>4</sub>	90:10	Ar-CH <sub>4</sub>	90:10
Ar-CH <sub>4</sub>	49:51	Ar-CH <sub>4</sub>	30:70
Ar-CH <sub>4</sub>	30:70	Ar-CH <sub>4</sub>	23:77
Ar-CH <sub>4</sub>	23:77	Ar-CH <sub>4</sub>	5:95
Ar-CH <sub>4</sub>	5:95	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	81:19
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	80:20	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	70:30
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	70:30	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	65:35
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	54:46	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	60:40
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	24.5:75.5	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	46.5:53.5
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -CH <sub>4</sub>	51.2:43.1:5.7	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -CH <sub>4</sub>	51.2:43.1:5.7
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -CF <sub>4</sub>	5.3:14.3:80.4	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -CF <sub>4</sub>	5.3:14.3:80.4
Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	58.4:40.4:1.2	Ar-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	58.4:40.4:1.2

**Tabelle 4.1:** Tabelle der verwendeten Gasmischungen

beschrieben werden [42].

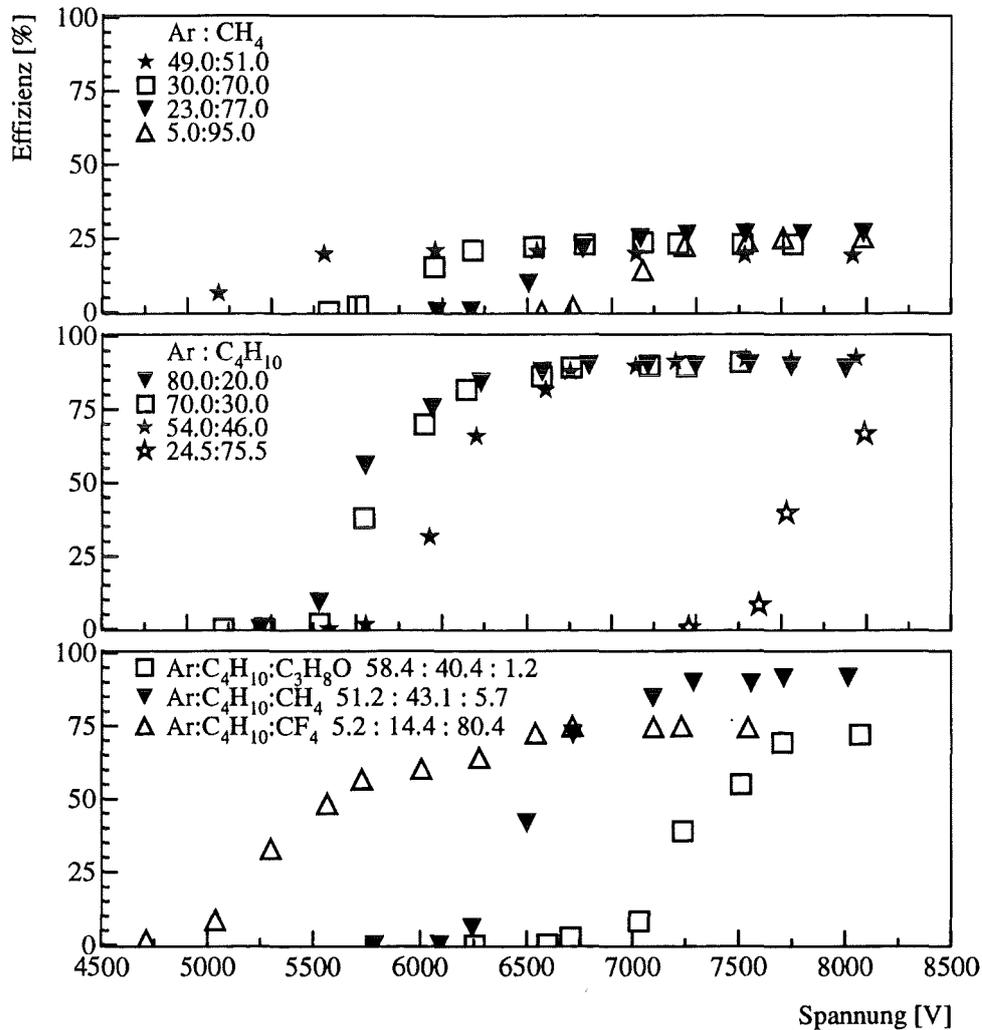
Der Exponent  $n$  ist abhängig von der Energie der Myonen, allerdings ist diese Abhängigkeit bis 50 GeV nur schwach, und  $n$  beträgt in diesem Bereich  $\approx 2$  [43].

Das Raumwinkelement  $d\Omega$  ist durch  $\sin\theta d\theta$  und das dem Myonstrahl zugewandte, senkrechte Flächenelement  $dA_s$  ist durch  $dA \cdot \cos\theta$  gegeben. Damit ist die Zenitwinkelabhängigkeit der Myonen proportional zu  $\cos^{n+1}\theta \cdot \sin\theta$ . Mit  $n = 2$  ergibt sich die Proportionalität zu  $\cos^3\theta \sin\theta$ .

Auf den obersten Szintillator werden der Zenitwinkel  $\theta$  mit der  $\cos^3\theta \sin\theta$ -Funktion zwischen 0 und  $\frac{\pi}{2}$  und der Azimutalwinkel  $\phi$  zwischen 0 und  $2\pi$  sowie die  $x$  und  $y$ -Koordinate eines Teilchens gleichverteilt gewürfelt. Anschließend werden die Treffer auf dem untersten Szintillator bestimmt. Wenn beide Szintillatoren einen Treffer haben, wird die Spur zurückberechnet, um zu prüfen, ob sie durch eines der angeschlossenen Pads geht.

Der durch die Simulation erhaltene Anteil  $A_{RPC}$  von RPC-Treffern bezüglich der koinzidenten Treffer auf beiden Szintillatoren entspricht dem bei diesem Teststand-Aufbau theoretisch möglichen. Um die wahre Effizienz des Detektors zu erhalten, muß man also den gemessenen Anteil von RPC-Treffern mit dem von der Teststand- und Detektorgeometrie abhängigen Geometriefaktor  $G = \frac{1}{A_{RPC}}$  multiplizieren.

Zur Überprüfung der Effizienzbestimmung wird ein Szintillator mit einer Größe von  $10 \times 40 \text{ cm}^2$  direkt über und ein weiterer Szintillator der Größe  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  direkt unter ein RPC-Pad gelegt. Es wird nur die Effizienz dieses Pads gemessen. Der so erhaltene Wert wird mit einer Effizienzmessung, welche mit den beiden großen Szintillatoren durchgeführt wurde, verglichen, wobei ebenfalls nur das eine Pad betrachtet wird. Die



**Abbildung 4.1:** Effizienzwerte des RPCs bei verschiedenen Gasmischungen und Spannungen

Werte stimmen überein, woraus folgt, daß die in die Simulation eingehenden Annahmen und die Simulation selbst korrekt sind. Wenn nur die Effizienz eines Pads, statt simultan diejenige aller angeschlossenen Felder, gemessen wird, erhöht sich jedoch auch die Meßzeit aufgrund des geringeren Teilchenflusses.

Aus Abbildung 4.1 sind die Effizienzwerte der verschiedenen Gasmischungen, abhängig von der angelegten Hochspannung, ersichtlich.

Zuerst wurden die Effizienzkurven der Argon-Methan-Mischungen aufgenommen. Hierbei fällt auf, daß mit zunehmendem Methananteil eine höhere Effizienz erreicht

wird. Maximal erreicht man mit diesen Mischungen ungefähr 27 %, bei einem Ar:CH<sub>4</sub>-Verhältnis von 23:77 und einer angelegten Spannung von 8000 V. Außerdem erreicht man das Plateau der Kurve, d.h. den Bereich gleichbleibender Effizienz, bei einer höheren Spannung, je mehr Methan beigemischt wird. Dies liegt an dem erhöhten Quenchgasanteil, der die Entwicklung von kleineren Entladungen unterdrückt. Es ist durchaus möglich, daß die Effizienz bei der 5:95-Mischung besser wird, jedoch konnte nur eine maximale Spannung von 8000 V angelegt werden, so daß die Meßkurve bereits in ihrem Anstieg endet.

Die schlechteste Effizienz von fast konstant 9 % über den gesamten Hochspannungsbereich erhält man bei einem Methananteil von lediglich 10 % (in Abb. 4.1 nicht dargestellt). Das Plateau wird hier bereits bei einer Spannung unter 4000 V erreicht. Es wird auch beobachtet, daß bei dieser Mischung die Effizienzwerte pro Spannung bei durchgeführten Wiederholungsmessungen zwischen 6 und 16 % schwanken.

Wird als Quenchgas Isobutan verwendet, erhält man über 90 % Effizienz. Auch hier zeigt sich, daß das Plateau bei zunehmendem Quenchgas-Anteil bei höheren Spannungen erreicht wird. Für die Mischung mit 75.5 % Isobutan reicht die angelegte Spannung nicht aus, um das Plateau zu erreichen. Die beste Effizienz von 92.7 % erhält man bei einer Mischung von 54:46 und 8000 V.

Die Plateaus in den Kurven werden bei den Methan-Mischungen bei geringeren Spannungen erreicht als bei den Isobutan-Mischungen. Da die Gasverstärkung bei einem komplexeren Molekül bei einer höheren Spannung einsetzt, wird verständlich, daß das Plateau bei den Isobutan-Mischungen ebenfalls bei einer höheren Spannung erreicht wird.

Die großen Unterschiede zwischen den gemessenen Effizienzen der Methan- und der Isobutan-Mischungen liegen an der Art der erhaltenen Signale.

Die Signale werden an einem Oszilloskop (Tektronix TDS 540) bei einer Eingangsimpedanz von 50  $\Omega$  betrachtet. Bei den verwendeten Methan-Mischungen sind langanhaltende Entladungen bis zu 1.7  $\mu$ s Dauer zu sehen, von denen nur wenige mit den beiden Szintillatoren koinzident auftreten. Die Signale der Isobutan-Mischungen sind größtenteils Einzelpulse, die sich in Koinzidenz mit den Szintillatoren befinden.

Die Effizienzmessung erfolgt wie bereits erwähnt über die Einträge im TDC. Gibt es einen Eintrag im TDC irgendeines angeschlossenen RPC-Pads, so wird dies als Treffer des Detektors betrachtet. Der TDC hat 2048 Kanäle mit einer Zeitauflösung von jeweils 100 ps [31]. Nach erfüllter Koinzidenzbedingung zwischen den beiden Szintillatoren erhält der TDC das Startsignal und mißt daraufhin ungefähr 205 ns lang. Erhält er in dieser Zeitspanne ein Stoppsignal, so erfolgte ein Treffer.

Die langandauernden Entladungen mit ihren vielen Nachpulsen werden von UV-Photonen induziert. Methan ist bei diesen elektrischen Feldstärken nicht mehr in der Lage, UV-Quanten effektiv zu absorbieren, da sein Absorptionskoeffizient um Größenordnungen geringer als derjenige des Isobutans ist. Die UV-Photonen können in einem Bereich des Detektors entstehen, in dem keine Signalauslesepedas angeschlossen sind.

Von dort können sie in den Bereich der angeschlossenen Pads gelangen, wo sie eine nachweisbare Entladung auslösen. Diese Entladungen sind nicht oder nur zufällig mit den Szintillatoren in Koinzidenz. Aufgrund der geringeren Quenchwirkung des Methans wird die Entladung nicht genügend begrenzt und damit ist die insensitive Fläche größer als beim Gebrauch von Isobutan. Berücksichtigt man noch die Totzeit dieser Fläche von ungefähr 1 s, so ist zu verstehen, daß nur in 9 % der Fälle ein gültiges Stoppsignal den TDC erreicht. Eine Wiederholung der Messung mit Ar-CH<sub>4</sub> im Verhältnis 90:10 ergibt deutlich verschiedene Werte für die Effizienz. Dies liegt vermutlich am unterschiedlichen Luftdruck und damit am unterschiedlichen Gasdruck während der Wiederholungsmessungen.

Eine Bestätigung dafür, daß sich die schlechten Effizienzwerte durch die ungenügende Quenchwirkung des Methans erklären, liefert eine Messung mit reinem Argon. Hierbei sind Dauerentladungen sichtbar, deren zeitliche Längen bis zu 2  $\mu$ s betragen. Echte Signale können nicht nachgewiesen werden. Der Detektor hat ohne Quenchgas keine Effizienz.

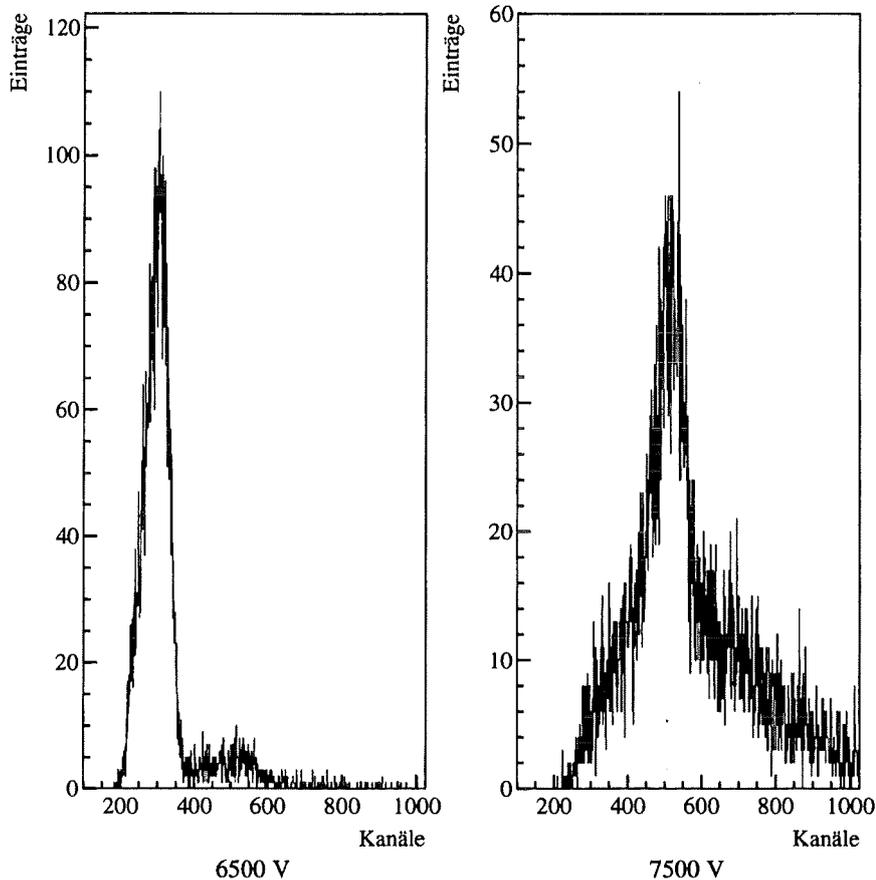
Somit ist auch verständlich, warum sich die Effizienz mit zunehmendem Methan-Anteil verbessert. Durch den höheren Anteil des Methans werden die ultravioletten Photonen besser absorbiert. Dadurch wird auch verhindert, daß die UV-Photonen in einem anderen Bereich des Detektors Entladungen induzieren, welche außerhalb der Koinzidenz mit den Szintillatoren auftreten und für die Insensitivität gegenüber koinzident auftretenden Teilchen verantwortlich sind.

Aufgrund des hohen Absorptionskoeffizienten für UV-Photonen verhindert Isobutan die Rauschsignale und Nachpulse wesentlich besser. Die echten Signale heben sich deutlich heraus und können den TDC innerhalb der Meßzeit stoppen.

Ähnliche Effekte sind auch bei Streamertubes zu beobachten. Auch hier sieht man mit Argon-Methan im Verhältnis 90:10 wilde Entladungen, aber im Vergleich zu den Isobutan-Mischungen eine geringere Effizienz [44]. Es zeigt sich, daß sobald man mit der Spannung in den Entladungsbereich kommt, das Absorptionsvermögen für UV-Quanten beim Methan nicht mehr ausreichend ist. Im Proportionalbereich kann man aber durchaus mit diesem Gasgemisch arbeiten [39, 45].

Auch mit der verwendeten Argon-Isobutan-Methan-Mischung erhält man gute Effizienzwerte. Diese liegen hier bei maximal 91.5 % bei 8000 V. Das Plateau beginnt hier deutlich später als bei den Argon-Isobutan- oder den Argon-Methan-Mischungen.

Die Schwankungen bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-CF<sub>4</sub> erklären sich dadurch, daß es nicht gelang, den Gasfluß des Tetrafluormethans während der Messung konstant zu halten. Außerdem konnten die zur Regelung des Gasflusses benutzten Flußregler für den Gebrauch von Tetrafluormethan nicht fein genug eingestellt werden. Dadurch erklärt sich dessen Anteil von 80.4 % relativ zu Argon-Isobutan. Dieses Verhältnis entspricht den "low gain"-Mischungen, die für RPCs bei hohen Teilchenflüssen verwendet werden (z.B.: [46, 47]). Das Plateau beginnt hier bei 6750 V und die maximale Effizienz beträgt bei 7250 V lediglich 74.7 %.



**Abbildung 4.2:** ADC-Spektren von Pad 9/4 mit Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (60:40)

Über die Argon-Isobutan-Isopropanol-Mischung kann ebenfalls keine genaue Aussage gemacht werden. Zum einen wird das Plateau augenscheinlich erst bei einer sehr hohen Spannung erreicht, zum anderen kondensierte der erwärmte Alkohol in den Schläuchen des Gaszulaufs und im Detektor, da die Temperatur des Alkohols nicht im gesamten Gasweg aufrechterhalten werden konnte. Somit schwanken die Meßergebnisse der einzelnen Pads untereinander sehr stark, wodurch die Effizienzmessung beeinträchtigt wird. Ein weiterer Grund, der gegen die Erwärmung des Isopropanols spricht, ist die Tatsache, daß Isopropanol im erwärmten Zustand stark polare Harze löst [48].

Die Spacer belegen 1.6 % der Fläche der angeschlossenen Auslesepads. Wenn man die Fläche der angeschlossenen Pads bezüglich des Spacer-Anteils korrigiert und sich dann die Effizienzen anschaut, erhält man folgende Werte:

Bei der Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Mischung im Verhältnis 54:46 erhöht sich die Effizienz von 92.7 auf 94.1 % und bei der Mischung mit Isobutan und Methan kombiniert steigt sie von

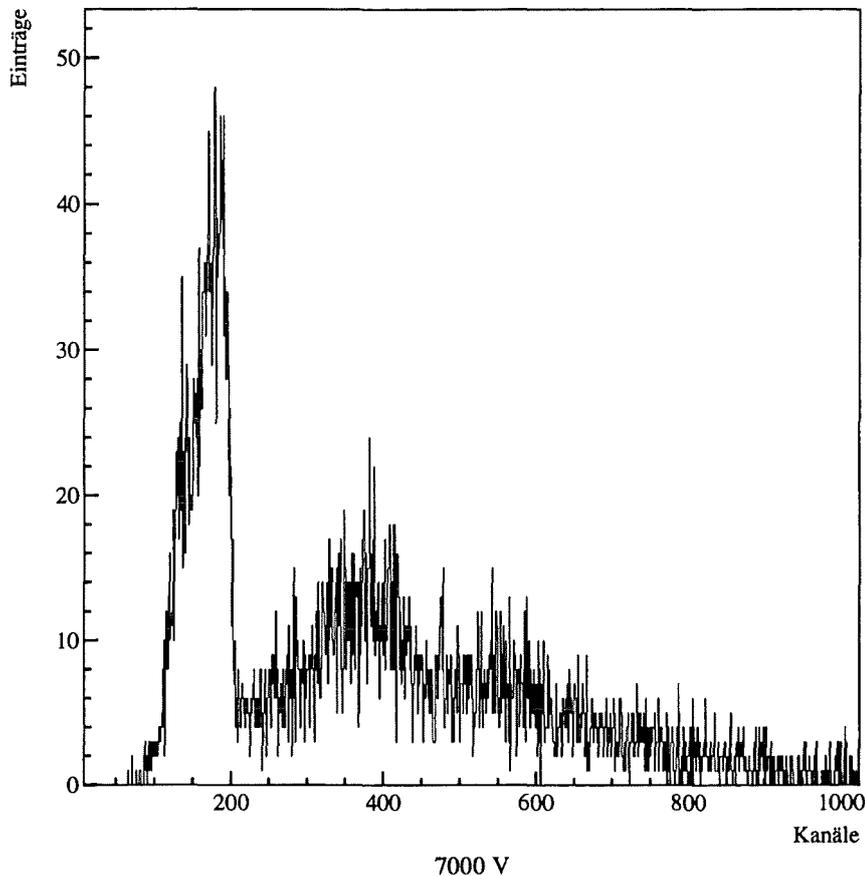


Abbildung 4.3: ADC-Spektrum von Pad 10/5 mit Ar-CH<sub>4</sub> (30:70)

91.5 auf 92.9 %. Der Effizienzwert der Ar-CH<sub>4</sub>-Mischung mit 77 % Methan erhöht sich von 26.7 auf 27.4 %.

Die Formen der erhaltenen ADC-Spektren weichen deutlich von einer Landau-Verteilung ab (Abb. 4.2), was darauf zurückzuführen ist, daß der RPC im Entladungs-Bereich arbeitet und somit keine Proportionalität zur im Gasspalt deponierten Energie besteht.

Was auffällt, ist die Tatsache, daß sich der "Peak" im Spektrum mit zunehmender Spannung zu höheren Kanälen verschiebt. Aufgrund der höheren Spannung herrscht im Gasspalt ein stärkeres elektrisches Feld. Je stärker das Feld, desto größer ist die Entladung, die sich ausbilden kann, bevor das Feld zusammenbricht. Aus diesem Grund wandert der Peak mit zunehmender Spannung zu höheren Kanälen, d.h. die nachgewiesene Entladung ist größer. Da sich mit der Spannung auch die Entladungen mit Nachpulsen stärker bemerkbar machen, verbreitert sich zudem die Kurve immer mehr.

Im ADC-Spektrum bei 6500 V ist rechts neben dem Peak ein zweiter Peak zu erkennen. Dieser entsteht dadurch, daß zwei Signale gleichzeitig, aber auf dem Pad räumlich getrennt, nachgewiesen werden. Somit werden die zwei Entladungen innerhalb der Integrationszeit des ADCs addiert, was zu Einträgen mit einer Häufung beim doppelten Peakwert führt. Aufgrund der Höhe des zweiten Peaks kommen hierfür hauptsächlich durch UV-Quanten ausgelöste Entladungen in Frage und weniger Myonen, welche von Delta-Elektronen begleitet werden, oder zwei Teilchen aus einem Luftschauer.

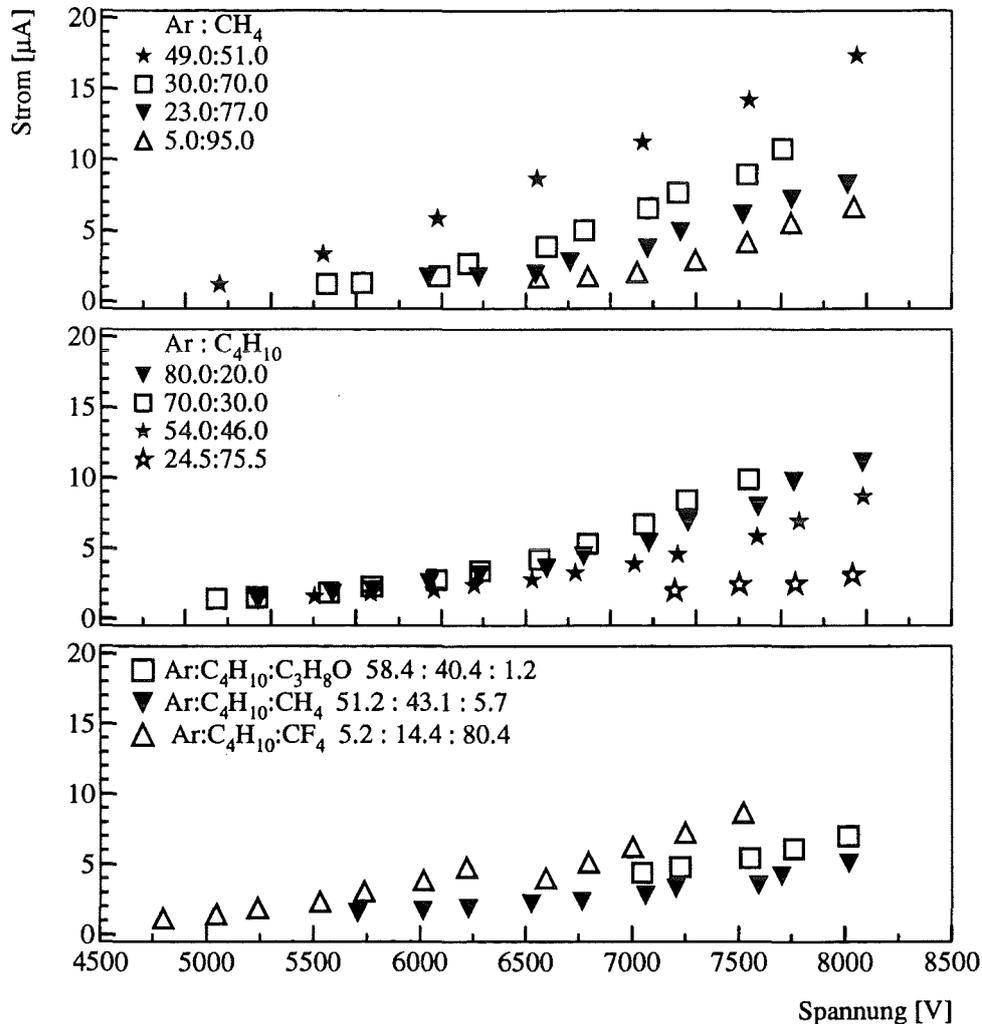
Vergleicht man ein ADC-Spektrum, welches bei einer Methan-Mischung gewonnen wurde, sieht man, daß der zweite Peak im Verhältnis wesentlich ausgeprägter ist als bei einer Isobutan-Mischung (Abb. 4.3). Man kann weiterhin einen dritten Peak erkennen. Der Grund liegt darin, daß durch das Methan UV-Photonen nur unzureichend gequenchet werden. Durch diese Photonen werden in der Nachbarschaft der Entladungszelle weitere Entladungen induziert, welche innerhalb der Integrationszeit des ADCs zur ursprünglichen Entladung addiert werden.

Am ADC-Spektrum erkennt man außerdem, daß alle Teilchen über die Diskriminator-Schwelle kommen und damit auch für die Messungen berücksichtigt werden.

Der beim Betrieb des Zählers fließende Strom wird über ein Amperemeter gemessen. Hierbei wird aufgrund der Schwankungen der Stromwerte an der Anzeige des Meßgerätes der Mittelwert aus der größten und kleinsten Schwankung gebildet. Die Messungen erfolgen nachdem ca. 25 Minuten lang die entsprechende Spannung an den Detektor angelegt ist. Die erhaltenen Stromwerte sind in Abbildung 4.4 wiedergegeben.

Bei den Argon-Methan- bzw. Argon-Isobutan-Mischungen ist deutlich zu sehen, daß mit erhöhtem Quenchgasanteil bei gleicher Spannung weniger Strom fließt. Dies liegt daran, daß durch die Absorption von UV-Photonen die Entladungen in ihrer Größe begrenzt werden.

Es fällt auf, daß die Ströme der Argon-Methan-Mischungen alle nach einem konstanten Bereich linear mit der Spannung ansteigen. Der konstante Bereich ist um so länger, je mehr Methan in der Mischung vorhanden ist. Der Grund für das Auftreten des konstanten Bereichs ist wiederum die Begrenzung der Entladungen, die erst ab einer bestimmten Spannung groß genug werden, um ein deutliches Ansteigen des Stroms zu verursachen. Daraus resultiert die zunehmende Länge des konstanten Bereichs mit zunehmendem Methan-Anteil. Da die Quenchwirkung des Methans bei den angelegten Spannungen allerdings nicht ausreichend ist, nimmt die Anzahl der Entladungen linear mit der Spannung zu, was zu den linearen Stromkurven führt. Der Detektor verhält sich bei diesen Mischungen wie ein ohmscher Widerstand (Tabelle 4.2). Mit zunehmendem Methan-Anteil wird auch der ohmsche Widerstand größer, mit einer Ausnahme bei der Mischung mit dem höchsten Methan-Anteil von 95 %. Der maximale Stromverbrauch beträgt bei einem Methan-Anteil von 51 % und bei einer Spannung von 8000 V  $17.3 \mu\text{A}$ . Lediglich beim in der Abbildung 4.4 nicht aufgeführten vorgemischten Argon-Methan ist der Strom höher. Dort beträgt er bei 6500 V bereits über  $21 \mu\text{A}$ .



**Abbildung 4.4:** Stromwerte des RPCs bei verschiedenen Gasmischungen und Spannungen

Die Stromwerte der Isobutan-Mischungen zeigen dagegen das erwartete Verhalten, d.h. einen schnellen, nichtlinearen Anstieg. Dies liegt daran, daß die Gasverstärkung mit zunehmender Spannung den Stromverbrauch dominiert und damit die Zahl der nachweisbaren Entladungen zunimmt. Hier ist allerdings zu beobachten, daß bei der Mischung mit dem höchsten Argon-Anteil von 80 % ein geringerer Stromfluß zu sehen ist als bei derjenigen, mit dem nächsthöheren Anteil an Argon von 70 %. Die maximalen Werte liegen hier je nach Mischungsverhältnis zwischen 11.1 und 3.1  $\mu\text{A}$ , bei einer Spannung von 8000 V.

Mischung [%]	Widerstand [M $\Omega$ ]
90:10	151
49:51	186
30:70	194
23:77	232
5:95	212

**Tabelle 4.2:** Äquivalente Werte eines ohmschen Widerstandes bei den verwendeten Argon-Methan-Mischungen

Vergleicht man die ähnlichen Mischungsverhältnisse bei Ar-CH<sub>4</sub> 49:51 und 23:77 mit Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 54:46 und 24.5:75.5, so sieht man, daß bei Isobutan-Mischungen weit weniger Strom fließt. Die Quenchwirkung des Isobutans ist wesentlich effektiver als diejenige des Methans. Dadurch treten die bei den Methan-Mischungen beobachteten großen Entladungen nicht auf, und der Stromfluß ist wesentlich geringer. Je mehr Entladungen auftreten und je größer diese sind, desto höher ist der Stromverbrauch des Detektors.

Zu den Mischungen von drei Komponenten ist wieder zu sagen, daß aus den bereits dargelegten Gründen die Mischung mit Isopropanol nicht aussagekräftig ist. Die Schwankungen bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-CF<sub>4</sub> sind darauf zurückzuführen, daß der Gasfluß nicht konstant gehalten werden konnte. Der Stromverbrauch liegt hier mit 8.7  $\mu$ A bei 7500 V aber im Bereich der Argon-Isobutan-Mischungen.

Der kombinierte Einsatz von Methan und Isobutan senkt den Stromverbrauch erheblich. Er ist bei dieser Mischung mit 5  $\mu$ A bei 8000 V am geringsten.

Aus der Lage des Peaks im ADC-Spektrum läßt sich die Größe  $Q$  der Entladung direkt ablesen, da es sich um einen ladungsintegrierenden Analog-to-Digital-Converter handelt.

Die Kanalnummer, bei der der Peak auftritt, wird über das "Full width half maximum" (FWHM) bestimmt. Von dem so erhaltenen Wert werden noch die Kanäle, ab denen das ADC-Spektrum beginnt ("Pedestal"), subtrahiert.

Da sich die ADC-Peaks für alle angeschlossenen Pads in etwa bei der gleichen Kanalnummer befinden, gibt  $Q$  eine mittlere Ladung an. Für die Isobutan-Mischung im Verhältnis 70:30 beträgt  $Q$  350 pC und für die Methan-Mischung im Verhältnis 30:70 beträgt  $Q$  110 pC, jeweils bei 7000 V.

Der beim Fluß der kosmischen Myonen erwartete Strom  $I$  berechnet sich mit

$$I = Q \cdot \Phi \cdot A,$$

wobei  $\Phi$  der Myonenfluß von ungefähr 150 Teilchen/(s  $\cdot$  m<sup>2</sup>) und  $A$  die Fläche des RPCs von 2 m<sup>2</sup> ist.

Nimmt man als Beispiel die Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Mischung im Verhältnis 70:30, welche den größten Stromverbrauch der Isobutan-Mischungen hat, erhält man nach der Berechnung bei einer angelegten Spannung von 7000 V einen Strom von 0.105  $\mu$ A. Gemessen wird ein Strom von 6.7  $\mu$ A. Das Verhältnis  $V_{RM}$  von berechnetem zu gemessenem Strom beträgt  $16 \cdot 10^{-3}$ . Die Differenz wird durch langanhaltende Signale verursacht.

Bei Ar-CH<sub>4</sub> im Verhältnis 30:70 erhält man aus den ADC-Werten einen Strom von 0.032  $\mu$ A bei 7000 V. Hier werden 6.6  $\mu$ A gemessen. Das Verhältnis  $V_{RM}$  der beiden Werte zueinander beträgt  $3.5 \cdot 10^{-3}$ .

Bei ähnlichen gemessenen Stromwerten ist das Verhältnis  $V_{RM}$  bei Methan im Vergleich zu  $V_{RM}$  bei Isobutan geringer. Der höhere Anteil von Signalen mit Nachpulsen und langandauernden Entladungen bei Gasgemischen, welche Methan enthalten, dominiert den Stromverbrauch des Detektors. Betrachtet man zusätzlich die Ladung, welche im zweiten Peak des ADC-Spektrums der oben erwähnten Methan-Mischung deponiert ist, erhöht sich  $V_{RM}$  auf  $8.5 \cdot 10^{-3}$ .

Berechnet man mit den aus den ADC-Spektren erhaltenen Werten für die Ladung  $Q$  die Größe der Entladungsfläche auf den Elektroden, erhält man im Falle der oben erwähnten Isobutan-Mischung ein Fläche von 0.11 cm<sup>2</sup>.

## 4.2 Bestimmung der Zeitauflösung

Zur Bestimmung der Zeitauflösung des Resistive Plate Counters werden die vom Time to Digital Converter gemessenen Ankunftszeiten verwendet. Die Zeitauflösung wird für jedes Pad einzeln bestimmt.

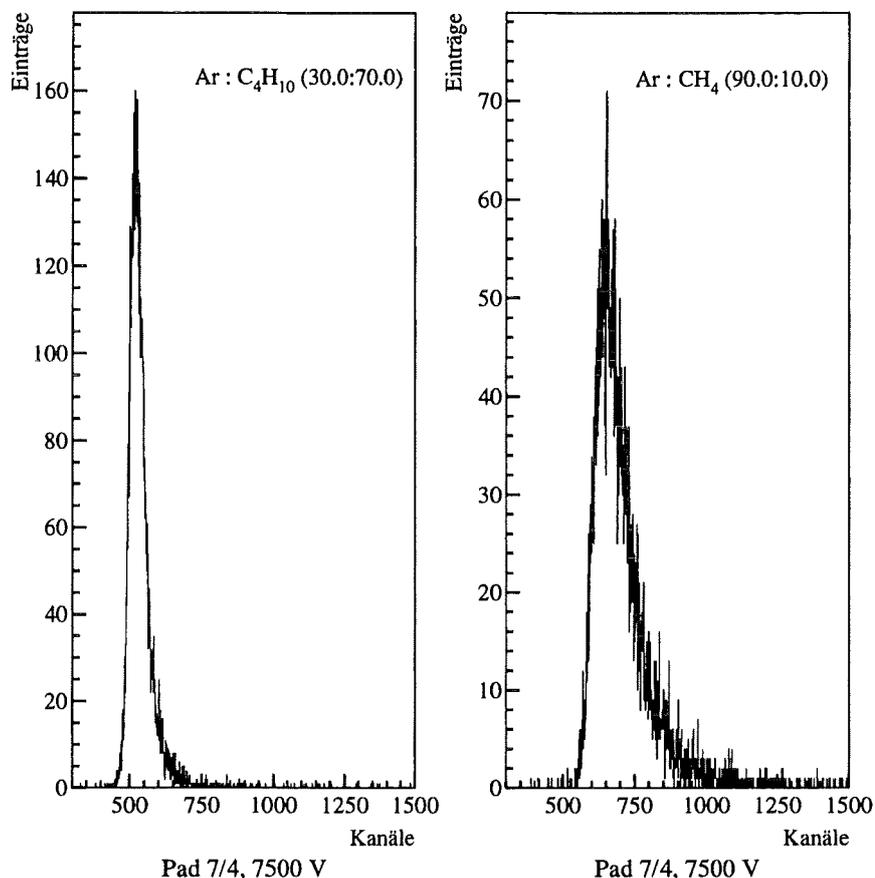
Der TDC-Wert eines Pads, d.h. der Zeitpunkt des Stoppsignals für das jeweilige Pad, wird nur dann betrachtet, wenn dieses Pad zusammen mit den Szintillatoren die Koinzidenz auslöste. Das somit erhaltene Zeitspektrum ist abhängig vom unbekanntem Zeitpunkt der erfüllten Koinzidenz.

Zunächst wird der Mittelwert aus den TDC-Werten aller vier Szintillatorkanäle gebildet und vom TDC-Wert des betrachteten RPC-Pads subtrahiert. Dadurch fällt das Startsignal heraus. Durch das so erhaltene Spektrum wird eine Gaußkurve gelegt. Die Streuung  $\sigma_{Gau\beta}$  ergibt dann die Zeitauflösung des betrachteten Pads. Diese ist nun allerdings von der ortsabhängigen Zeitauflösung  $\sigma_{SZI}$  beider Szintillatoren abhängig. Die wahre Zeitauflösung eines RPC-Pads ist somit durch

$$\sigma_{RPC} = \sqrt{\sigma_{Gau\beta}^2 - \sigma_{SZI}^2}$$

gegeben.

Um die Zeitauflösung  $\sigma_{SZI}$  der Szintillatoren (S2 und S4) zu bestimmen, wird ein 10 x 10 cm<sup>2</sup> großer Szintillationszähler (S10) zwischen S2 und S4 gelegt, so daß er in der Mitte zwischen jeweils rechtem und linkem Photomultiplier zu liegen kommt, wo sich auch die angeschlossenen RPC-Pads befinden. Die Größe von S10 ist kleiner als die



**Abbildung 4.5:** Die Gasabhängigkeit der rechten Flanke des Zeitspektrums

Größe eines Auslesepads von  $12 \times 12 \text{ cm}^2$ , so daß die Zeitauflösung eingeschränkt auf die Fläche eines Pads bestimmt werden kann. Die Zeitauflösung des Szintillators S10 wird als vernachlässigbar angenommen.

Alle drei Zähler werden in Koinzidenz genommen. Um wiederum den unbekanntem Zeitpunkt des Startsignals herauszurechnen, werden jeweils für S2 und S4 die Mittelwerte der TDC-Werte des rechten und des linken Kanals in ein Histogramm gefüllt und durch die so erhaltenen Spektren eine Gaußkurve gelegt. Die Streuung der Gaußverteilung ergibt die Zeitauflösung des entsprechenden Szintillationszählers und beträgt für S2 0.61 ns und für S4 0.58 ns.

Die gesamte Zeitauflösung beider Szintillatoren  $\sigma_{SZI}$  berechnet sich mit Hilfe der allgemeinen Gleichung [49]

$$\sigma^2(\bar{x}_p) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_i^2 \sigma^2(\bar{x}_i)$$

zu

$$\sigma_{SZI} = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{S2}^2 + \sigma_{S4}^2)} = 0.42 \text{ ns.}$$

$\sigma_{S2,S4}$  sind die jeweiligen Auflösungen der Szintillatoren S2 und S4.

Bei Betrachtung der Zeitspektren der einzelnen RPC-Pads fällt auf, daß je nach verwendeter Gasmischung eine mehr oder minder starke Asymmetrie zwischen der linken und der rechten Flanke des Spektrums vorhanden ist (Abb. 4.5). Die linken Flanken der Spektren entsprechen jeweils verfrühten, und die rechten Flanken entsprechen verspäteten Teilchen. Die Zeitspektren, die bei Verwendung der Methan-Mischungen gewonnen wurden, sind deutlich asymmetrischer als diejenigen, die mit Isobutan gewonnen wurden.

Als Konsequenz werden die zwei Flanken des Spektrums getrennt behandelt. Durch jede Flanke wird eine passende Gaußkurve gelegt. Die Streuungen dieser zwei Kurven geben somit eine frühe und eine späte Zeitauflösung für das betrachtete Auslesepad.

Zusätzlich werden die Anteile  $P_G$  der Signale, die unter die durch die frühe Flanke gelegte Gaußkurve fallen, bestimmt. Dazu wird diese Gaußkurve vom Histogramm subtrahiert, wodurch man die Zahl der Ereignisse erhält, die innerhalb dieser Kurve liegen. Anschließend wird der Anteil dieser Ereignisse relativ zu den gesamten Einträgen des Histogramms bestimmt. Der so erhaltene Anteil soll als Maß für die Asymmetrie des Zeitspektrums dienen.

Die durch die frühe Flanke der TDC-Kurve gelegte Gaußverteilung beschreibt die bei den Isobutan-Mischungen gemessenen Ereignisse um so besser, je höher die angelegte Spannung ist (Abb. 4.6). Im Falle der Methan-Mischungen kann man nicht sagen, daß mit Erhöhen der Spannung mehr Ereignisse durch die Gaußverteilung beschrieben werden. Die prozentualen Anteile der Ereignisse, welche sich innerhalb der linksseitigen Gaußverteilung befinden, schwanken bei den einzelnen Methan-Gemischen mit der Spannung.

Die Anteile  $P_G$  sind bei den Isobutan-Mischungen höher als bei den Mischungen mit Methan. Dies ist ein Zeichen dafür, daß die Asymmetrie der Kurven bei den Methan-Gemischen größer ist.

Wie aus Abbildung 4.7 zu entnehmen ist, wird die Zeitauflösung der einzelnen Pads mit zunehmender Spannung besser. In Abbildung 4.8 ist die Zeitauflösung aller Pads bei einer gegebenen Gasmischung und Spannung dargestellt. Es ist zu sehen, daß es bei jeder Gasmischung zu unterschiedlich starken Schwankungen zwischen den Zeitaufösungen der einzelnen Pads kommt. Am stärksten sind diese Schwankungen bei der Mischung mit Isopropanol ausgeprägt (Abb. 4.8), wo sie bei 8000 V 2.33 ns betragen. Der Grund dafür liegt in der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Kondensation des warmen Alkohols im kühleren Gasspalt. Daraus resultiert auch die bessere Auflösung mit zunehmendem Abstand vom Anschluß der Gaszuleitung. An den Stellen, an denen der Alkohol kondensierte, ist die Zeitauflösung schlechter. Hierbei muß erwähnt werden, daß die Schwan-

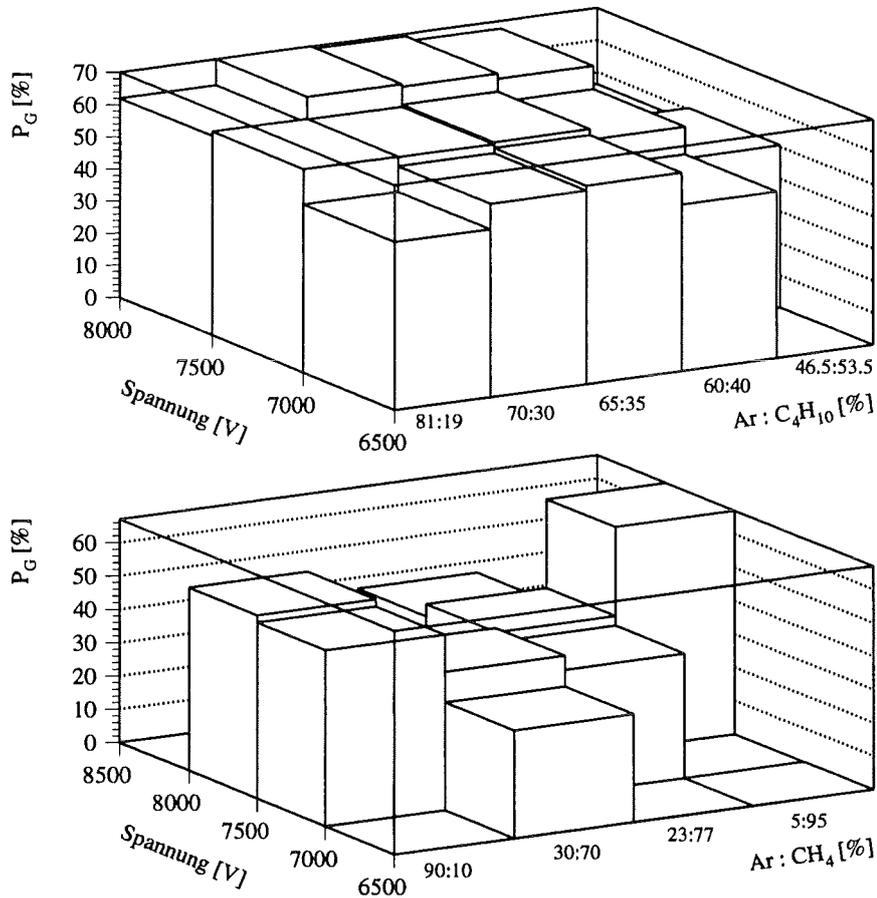


Abbildung 4.6: Anteile  $P_G$  für das Pad 10/4 bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> und Ar-CH<sub>4</sub>

kungen bei allen Gemischen mit der Spannung abnehmen. Die fehlenden Einträge bei Pad Nr. 9 haben ihre Ursache im entsprechenden Gate and Delay Generator, welcher die Signale unterschiedlich stark verzögerte, wodurch die Spektren unbrauchbar wurden.

Aus Tabelle 4.3 sind die besten sowie die schlechtesten Werte für die Zeitauflösung der Auslesepads bei den verwendeten Gasmischungen ersichtlich. Da die Abhängigkeit der späten Flanke vom Gas in der Literatur noch nicht beschrieben wurde, beziehen sich die in der Tabelle angegebenen Werte bei jeder Gasmischung auf die Messung bei der angelegten Spannung  $U$ , bei der die beste linksseitige Auflösung  $\sigma_{l,b}$  erzielt wurde. Die angegebenen Werte der besten rechtsseitigen Auflösung  $\sigma_{r,b}$  sind daher auch nicht die besten Werte, die bei dieser Mischung erzielt wurden. Sie beziehen sich auf das Pad mit dem besten  $\sigma_{l,b}$ . Auf dieses Pad bezieht sich auch die Angabe der Prozentzahl  $P_{G,b}$  der Einträge des Spektrums, die in der durch die frühe Flanke gelegten Gaußkurve enthalten sind.

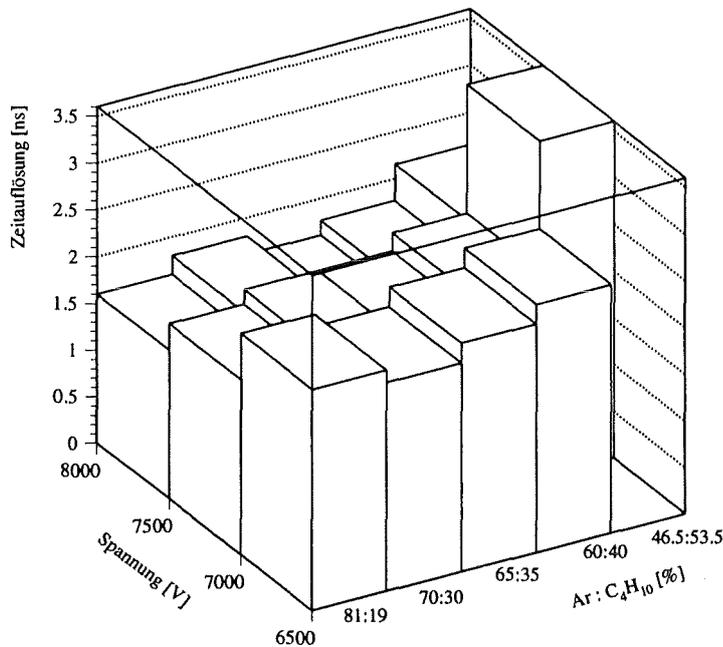


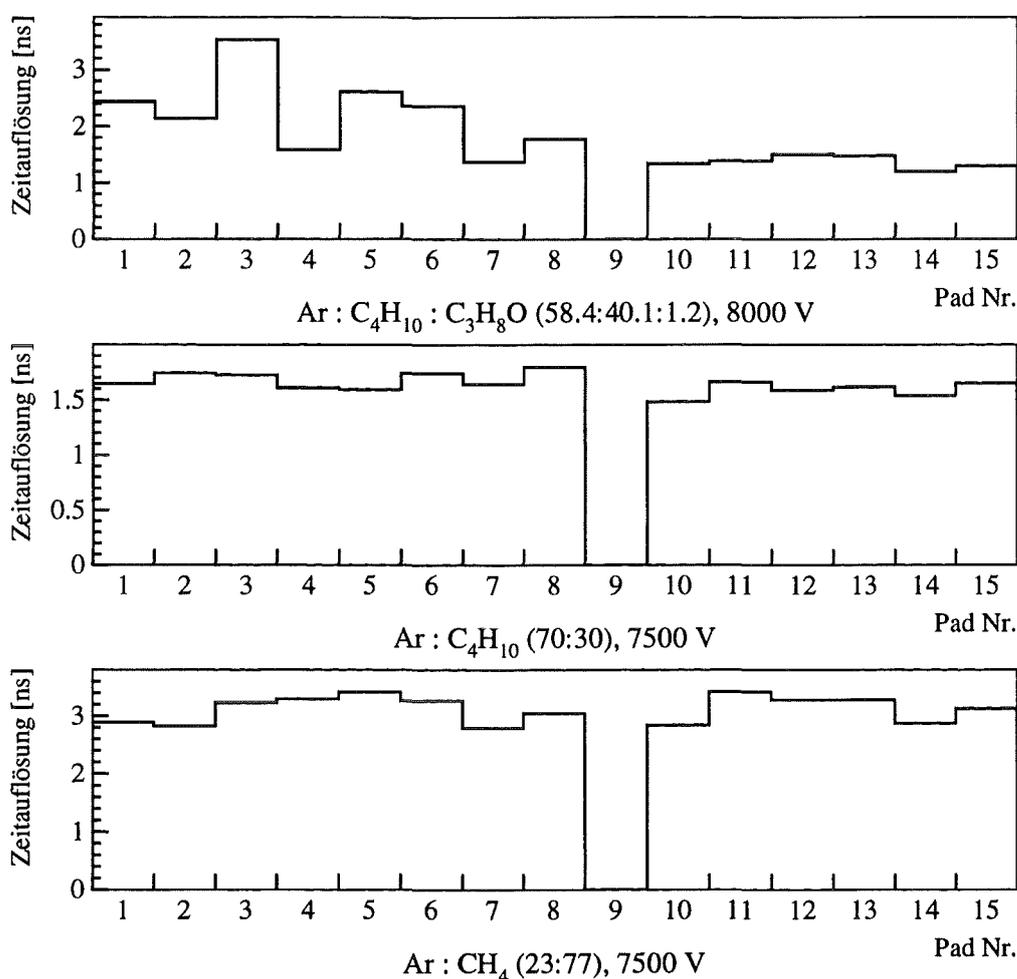
Abbildung 4.7: Zeitauflösung der frühen Flanke des Pads 9/4 mit Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

Analog beziehen sich nun die Angaben von  $\sigma_{r,s}$  und  $P_{G,s}$  auf das Pad mit der schlechtesten frühen Zeitauflösung  $\sigma_{l,s}$  bei der gleichen Messung.

Wenn im folgenden von der Zeitauflösung die Rede ist, so bezieht sich dies stets auf diejenige der frühen Flanke des Zeitspektrums.

Wie man aus Tabelle 4.3 entnimmt, sind die Zeitaufösungen bei Mischungen die Isobutan als Löschgas enthalten, besser als bei den Methan-Mischungen, bei denen nicht besser als mit 2.50 ns Auflösung gemessen werden kann. Auch sind die Schwankungen zwischen den Auflösungen der einzelnen Pads größer als bei den Isobutan-Mischungen.

Die beste Zeitauflösung erhält man mit Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> im Verhältnis 60:40 mit einem Wert von 1.27 ns. Der Unterschied zur schlechtesten Auflösung bei diesem Gemisch und bei der angelegten Spannung von 7500 V beträgt lediglich 0.49 ns. Die geringste Schwankung in der Auflösung beträgt 0.29 ns bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 65:35 und ebenfalls einer Spannung von 7500 V. Noch besser erweist sich hier die Mischung mit Isobutan und Methan kombiniert. Man muß allerdings hierbei beachten, daß diese Werte bei einer Spannung von 8000 V gewonnen wurden und somit nicht direkt vergleichbar sind. Die Auflösungen der späten Flanken sind bei dieser Mischung durchweg besser, als bei allen anderen Gasgemischen, die hier getestet wurden.



**Abbildung 4.8:** Zeitauflösung der frühen Flanke aller Pads bei verschiedenen Gasgemischen

Ein Isobutan-Anteil von 53.5 % beginnt die Signalentwicklung bereits so zu beeinflussen, daß man mit 1.66 ns die schlechteste Zeitauflösung der verwendeten Isobutan-Mischungen erhält. Die Schwankungen sind mit 0.90 ns bei 7500 V auch deutlich höher als bei den anderen Isobutan-Mischungen, und die schlechteste Auflösung ist größer als 2.50 ns.

Die gute Zeitauflösung von 1.20 ns der Mischung mit Isopropanol darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß die hiermit erhaltenen Daten aufgrund der Kondensation des Alkohols innerhalb der Kammer nicht repräsentativ sind. Man sieht dies auch anhand der

Mischung [%]	$\sigma_{l,b}$ [ns]	$\sigma_{r,b}$ [ns]	$P_{G,b}$ [%]	$\sigma_{l,s}$ [ns]	$\sigma_{r,s}$ [ns]	$P_{G,s}$ [%]	$U$ [V]
<i>Ar:C<sub>4</sub>H<sub>4</sub></i>							
90:10	2.50	21.50	50.1	3.44	29.3	53.9	7500
30:70	3.10	48.80	34.4	4.18	57.3	43.4	7000
23:77	2.79	46.80	31.2	3.40	47.7	44.0	7500
5:95	2.85	45.30	36.9	4.19	49.8	67.0	7500
<i>Ar:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></i>							
81:19	1.31	7.90	67.3	1.79	9.3	77.5	7500
70:30	1.43	7.76	68.2	2.00	10.4	81.2	7000
65:35	1.34	9.88	64.5	1.63	10.5	69.6	7500
60:40	1.27	8.82	67.1	1.76	8.1	72.1	7500
46.5:53.5	1.66	10.20	57.5	2.56	15.9	55.4	7500
<i>Ar:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>:CH<sub>4</sub></i>							
51.2:43.1:5.7	1.27	5.46	67.5	1.58	8.6	80.4	8000
<i>Ar:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>:C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O</i>							
58.4:40.4:1.2	1.20	7.73	53.0	3.53	7.7	66.0	8000
<i>Ar:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>:CF<sub>4</sub></i>							
5.3:14.3:80.4	1.73	10.20	53.4	2.67	13.1	87.4	7000

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Zeitaufösmessung

Schwankungen der Auflösung von bis zu 2.33 ns und daran, daß lediglich 53 bzw. 66 % der gemessenen Ereignisse innerhalb der linksseitigen Gaußverteilung liegen.

Die Fehler der angegebenen Zeitaufösmungen betragen unabhängig von der Gas Mischung zwischen 1.4 und 5.8 % des gemessenen Wertes.

Bei den Isobutan-Mischungen werden viel mehr Ereignisse durch die Gaußverteilung der frühen Flanke beschrieben als bei den Methan-Mischungen. Das gilt auch für die Isobutan-Mischungen, die einen weiteren Zusatz enthalten. Diese Beobachtung deckt sich auch mit der stärkeren Asymmetrie in den Zeitspektren der Methan-Mischungen. Bei den C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Mischungen liegen die Anteile hier durchweg über 60 %, ausgenommen bei einem C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Anteil von 53.5 %. Auch die kombinierte Mischung mit Isobutan und Methan zeigt hier symmetrischere Verteilungen als die Methan-Mischungen.

Daß die Anteile  $P_{G,s}$ , der in der linksseitigen Gaußverteilung enthaltenen Einträge der schlechtesten Auflösung höher als die in der Gaußverteilung der frühen Flanke enthaltenen Anteile  $P_{G,b}$  der besten Auflösung sind, ist verständlich. Durch die schlechtere Zeitaufösmung wird die Gaußverteilung breiter und somit liegen mehr Ereignisse innerhalb davon.

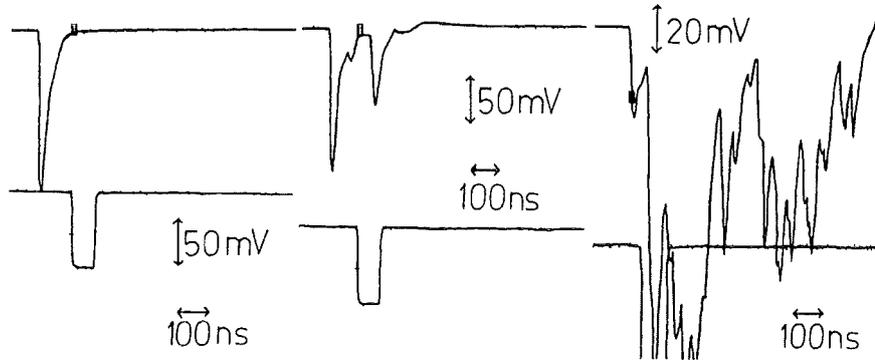


Abbildung 4.9: Beispiele der Signaltypen 1 bis 3

### 4.3 Klassifikation der Signale

Wie bereits erwähnt, haben die RPC-Signale abhängig von der verwendeten Gas Mischung und der angelegten Spannung ein unterschiedliches Aussehen.

Bei der ersten getesteten Mischung, Argon-Methan im Verhältnis 90:10, sind am Oszilloskop Signale mit vielen, langanhaltenden Nachpulsen zu sehen (Abb. 4.9: Typ 3). Diese können eine zeitliche Länge von bis zu  $1.7 \mu\text{s}$  haben. Diese Signale nehmen erst dann in ihrer Häufigkeit ab, wenn Methan durch Isobutan ersetzt wird. Bei den Isobutan-Mischungen dominieren einzelne Signale (Abb. 4.9: Typ 1). Betrachtet man sich diese Signale bei verschiedenen Spannungen und Mischungsverhältnissen am Oszilloskop, sieht man, daß es sich um Einzelpulse mit einer Halbwertsbreite von im Mittel 28 ns handelt.

Es erweist sich als sinnvoll, zum Verständnis der Funktionsweise von Resistive Plate Countern bei verschiedenen Gasgemischen, eine Unterteilung der erhaltenen Signale in verschiedene Gruppen vorzunehmen. Die Signale werden deshalb mit Hilfe des Arrival Time Systems in drei Klassen eingeteilt:

- Signaltyp 1: Signal ohne Nachpulse, mit einer Länge kürzer als 60 ns
- Signaltyp 2: Signal mit getrennten Nachpulsen, jeder Puls kürzer als 60 ns
- Signaltyp 3: Signal mit zusammenhängenden Nachpulsen und einer Länge größer 60 ns, oder Signal mit getrennten Nachpulsen, wobei mindestens ein Nachpuls länger als 60 ns ist

Der Signaltyp 1 charakterisiert somit Einzelpulse, während Typ 3-Signale langandauernde Entladungen darstellen. Die Signale des Typs 1 und des Typs 2 stellen die erwarteten RPC-Signale dar. Beispiele für die drei verschiedenen Signaltypen sind in Abbildung 4.9 gegeben.

Mit Erhöhen der Spannung nehmen die Anteile der Signaltypen 2 und 3 zu (Abb. 4.10, 4.11). Der Grund für die Entstehung der Nachpulse, bzw. der großen Entladungen,

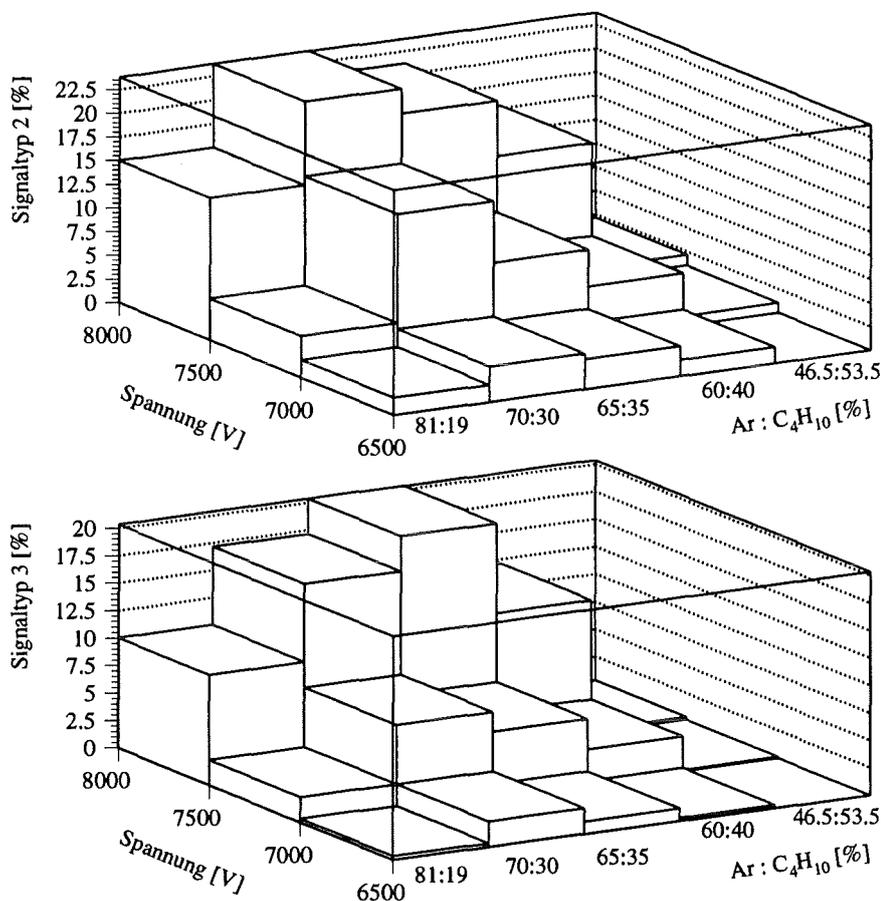


Abbildung 4.10: Prozentualer Anteil der Signaltypen bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

ist das vermehrte Auftreten von UV-Photonen bei höheren Spannungen. Die Quenchgase können nicht mehr alle UV-Quanten absorbieren, somit kommt es verstärkt zu Signalen mit Mehrfachpulsen.

Bei Betrachtung der Abbildung 4.10 fällt auf, daß bei den Argon-Isobutan-Mischungen der Anteil von Typ 2- und Typ 3-Signalen mit abnehmendem Argonanteil zuerst zunimmt, um daraufhin wieder abzunehmen. Dadurch erklärt sich auch der geringere Stromverbrauch der Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Mischung im Verhältnis 80:20. Außerdem fällt auf, daß es stets mehr Signale vom Typ 2 als solche vom Typ 3 gibt. Es kann also zum Auftreten von Nachpulsen kommen, jedoch werden die Dauerentladungen, wie bereits bei Beschreibung der Effizienzmessung erwähnt wurde, erfolgreich unterdrückt.

Der hohe Isobutan-Anteil von 53.5 % quencht die UV-Photonen am effektivsten, weshalb man hier bei 7500 V zu mehr als 97 % Einzelpulse erhält. Allgemein läßt sich bei den Isobutan-Mischungen feststellen, daß die Einzelpulse stets zu mehr als der Hälfte

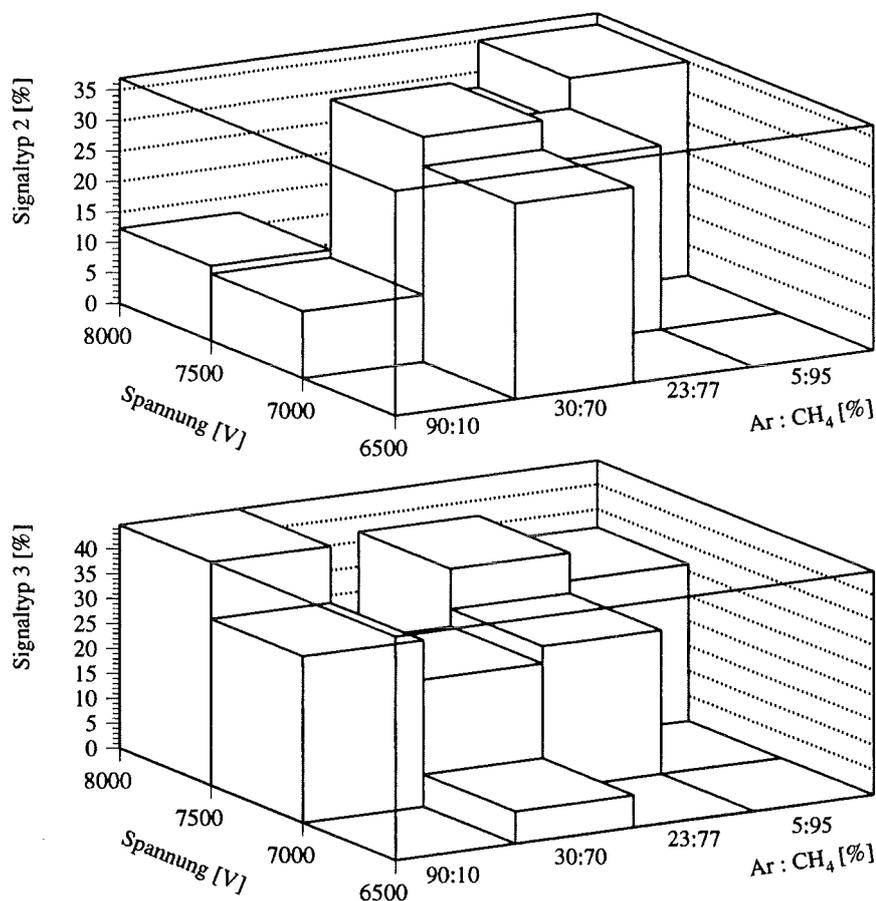
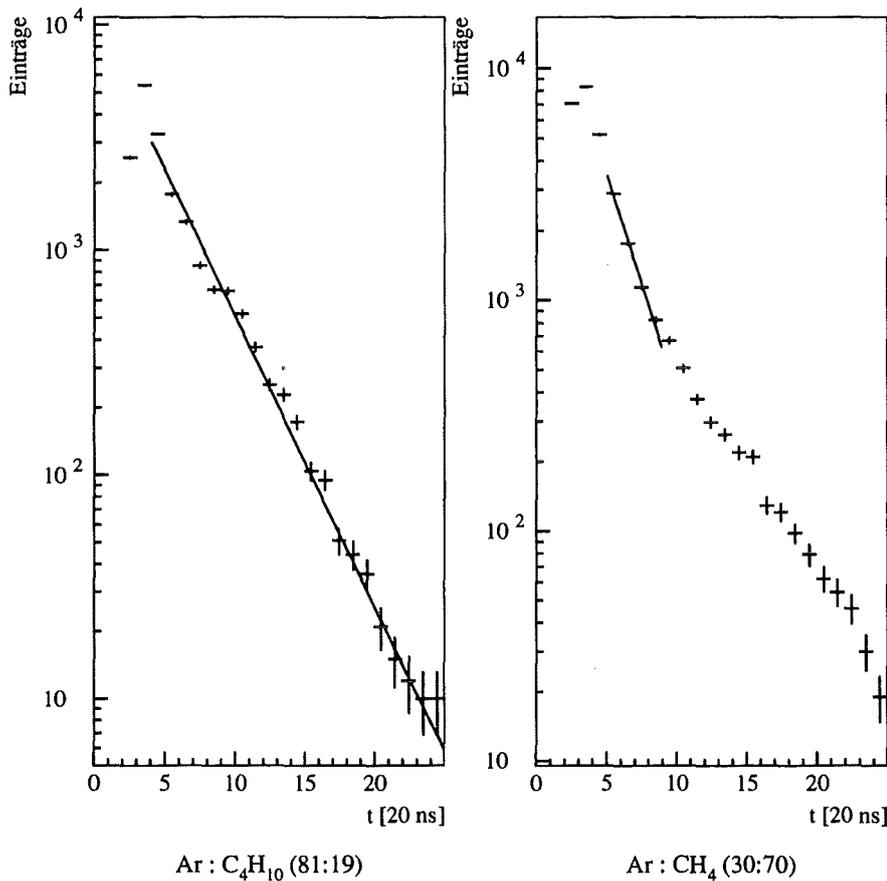


Abbildung 4.11: Prozentualer Anteil der Signaltypen bei Ar-CH<sub>4</sub>

vorhanden sind.

Bei den Argon-Methan-Mischungen sind die Mehrfachpulse deutlich häufiger als bei den Mischungen mit Isobutan. Es zeigt sich hier sehr gut, daß die Quenchwirkung des Methans nicht ausreichend ist, um die langen Entladungen zu unterdrücken. Teilweise ist der Anteil des Signaltyps 3 größer als der des Typs 2. Besonders extrem zeigt sich dies beim vorgemischten Argon-Methan 90:10, wo bei 7500 V zu 44,8 % Typ 3-Signale, hauptsächlich in der Form durchgehender Entladungen, und zu 12,3 % Typ 2-Signale auftreten.

Isobutan quencht aufgrund seines höheren Absorptionskoeffizienten für ultraviolette Photonen wesentlich besser als Methan. Insofern ist verständlich, daß bei den Isobutan-Mischungen wesentlich weniger Typ 2- und Typ 3-Signale auftreten. Aufgrund der schlechteren Löschwirkung des Methans ist auch der höhere Anteil von Typ 3-Signalen bei den Mehrfachpulsen zu verstehen.



**Abbildung 4.12:** Das zeitliche Auftreten von Nachpulsen bei 7500 V

Die Ergebnisse der Mischungen von Argon, Isobutan und einer dritten Komponente sehen wie folgt aus:

Mit Methan als drittem Stoff erhält man bei 8000 V 16.5 % Typ 2- und 11.2 % Typ 3-Signale. Dieses Ergebnis entspricht in etwa den Anteilen bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 60:40. Hier sind es 15.3 % Typ 2 und 12.2 % Typ 3-Signale. Die Ähnlichkeit liegt auf der Hand, da die Ar-CH<sub>4</sub>-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Mischung einen Isobutan-Anteil von 43.1 % hat. Allerdings treten bei dieser Mischung wieder die besonders langandauernden Typ 3-Signale auf. Während dieser Signaltyp bei den Isobutan-Mischungen eine Länge von ca. 100 ns hat, beobachtet man hier wieder deutlich längere Entladungen. Inwieweit dies mit dem Methan zusammenhängt, ist unklar.

Mit Tetrafluormethan erhält man bei 7500 V 10.9 % vom Signaltyp 2 und nur noch 0.8 % des Typs 3. Der Typ 3 wird so gut unterdrückt, weil das Fluor aufgrund seiner hohen Elektronenaffinität die großen Entladungen weitgehend verhindert. Es muß aller-

dings darauf hingewiesen werden, daß der Anteil des Tetrafluormethans 80 % beträgt.

Unter den bekannten Vorbehalten läßt sich sagen, daß das Isopropanol die Entladungen ebenfalls gut begrenzt, denn die Anteile für Typ 2 und 3 betragen nur 8.7 % bzw. 0.7 % bei 8000 V. Diese Ergebnisse können aber auch mit der Kondensation des Isopropanols zusammenhängen, wodurch die Ausbildung größerer Entladungen generell unterdrückt wird.

Der hohe Anteil von Typ 2- und Typ 3-Signalen, welche bei den Methan-Mischungen in Koinzidenz mit den Szintillatoren auftreten, bestätigen die Beobachtungen, daß Methan nicht in der Lage ist, die Entladungen genügend zu begrenzen.

Um das zeitliche Auftreten der Nachpulse zu betrachten, wird mit Hilfe des Arrival Time Systems der jeweils erste Nachpuls, abhängig vom zeitlichen Abstand  $t$  zum ersten Puls, in ein Histogramm eingefüllt. Durch die somit erhaltene Verteilung wird eine Exponentialfunktion der Form

$$f(t) = k \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{NP}}\right)$$

gelegt (Abb. 4.12), wobei  $k$  eine Konstante ist.

Für die Isobutan-Mischungen beträgt  $\tau_{NP} \approx 65$  ns, für die Methan-Mischungen beträgt  $\tau_{NP} \approx 45$  ns.

Es fällt auf, daß die Exponentialfunktion bei der Methan-Mischung zu späteren Zeiten sehr stark von der Verteilung abweicht (Abb. 4.12). Der Grund hierfür könnte mindestens ein angeregter Zustand des Methans sein, der sich strahlend abregt und dadurch Nachpulse auslöst.

#### 4.4 Das Ansprechverhalten des Resistive Plate Counters

Schaut man sich an, wie oft ein Pad bei einer gegebenen Gasmischung und Spannung im Vergleich zu den anderen die Koinzidenzbedingung mit den Szintillatoren erfüllt, so erkennt man ein charakteristisches Muster (Abb. 4.13).

Das jeweils dritte Pad sieht aus dem Grund mehr als seine zwei Nachbarn, weil es sich hierbei um ein mittleres Pad handelt (siehe Abb. 3.2). Aus rein geometrischen Gründen ist klar, daß die mittlere Reihe durch ihre Lage mehr Treffer erhält, als die zwei äußeren Padreihen.

Betrachtet man nun ein Pad bei verschiedenen Gasmischungen und Spannungen, so sieht man, daß dieses unabhängig von diesen Parametern gleich häufig die Koinzidenzbedingung erfüllt (Abb. 4.14). Das heißt, das Ansprechverhalten des Zählers ist sehr gleichmäßig.

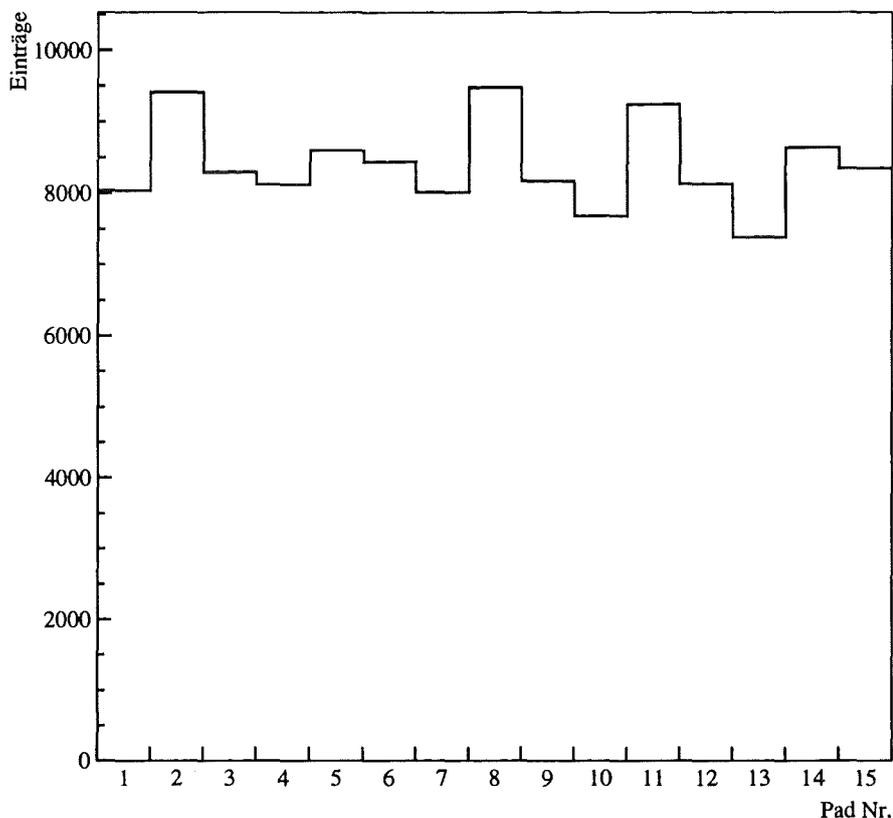


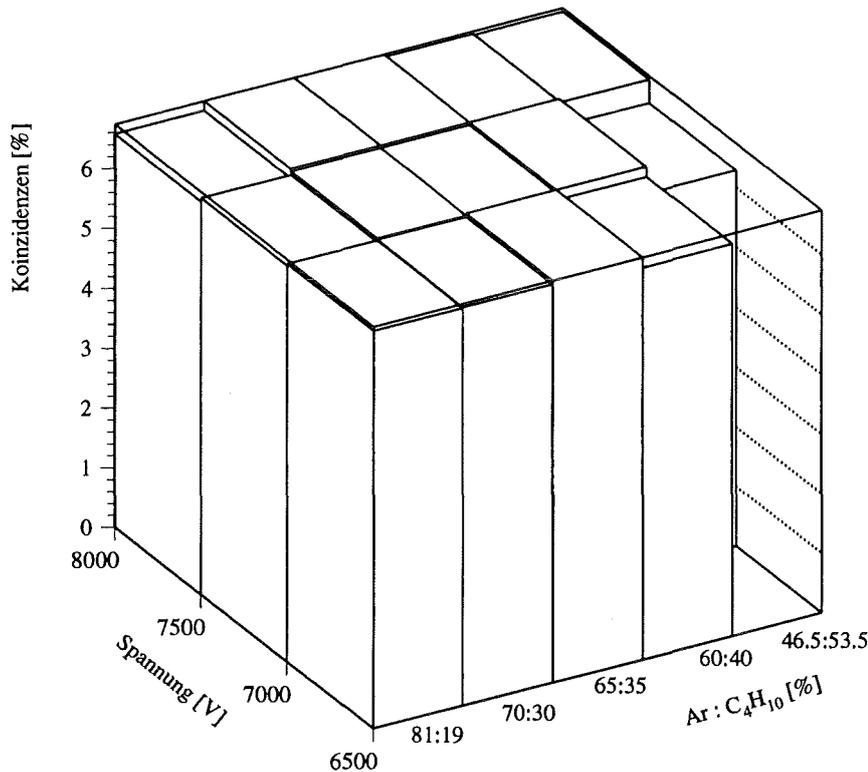
Abbildung 4.13: Koinzidenzen bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (60:40) und 7500 V

1 = 7/3	4 = 8/3	7 = 9/3	10 = 10/3	13 = 11/3
2 = 7/4	5 = 8/4	8 = 9/4	11 = 10/4	14 = 11/4
3 = 7/5	6 = 8/5	9 = 9/5	12 = 10/5	15 = 11/5

Tabelle 4.4: Beziehung zwischen den Kanalnummern in Abb. 4.13 und den Padnummern in Abb. 3.2

## 4.5 Untersuchung übersprechender Signale

Zur Untersuchung wird die Bedingung gestellt, daß ein zum getroffenen Pad benachbartes Pad innerhalb von 40 ns ebenfalls einen Treffer registriert. Das getroffene Pad ist hierbei dasjenige, das zusammen mit den Szintillatoren die Koinzidenzbedingung erfüllt. Ein benachbartes Pad muß mit einer Seite direkt an das getroffene Pad angrenzen.



**Abbildung 4.14:** Anteil des Pads 8/5 an der Gesamtkoinzidenz

Das Zeitfenster von 40 ns wurde aufgrund der Zeitauflösung des Arrival Time Systems gewählt. Da diese nur 20 ns beträgt, ist es möglich, daß ein Signal aufgrund des Zeitpunktes seines Auftretens noch in den ersten 20 ns langen Block geschrieben wird, während der Übersprecher bereits in den zweiten Block eingetragen wird.

Die auf benachbarten Pads nachgewiesenen Signale können durch drei Mechanismen verursacht werden: Zum einen kann ein Teilchen in der Nähe des Randes eines Pads den Detektor durchqueren, so daß die freigesetzten Ladungsträger auch auf dem Nachbarfeld nachgewiesen werden. Zum anderen können entstehende UV-Photonen weitere Entladungen induzieren, die auf einem benachbarten Pad nachgewiesen werden. Die Signatur des Übersprechens kann jedoch auch durch zwei direkt aufeinanderfolgende Teilchen ausgelöst werden, welche zufälligerweise benachbarte Felder treffen.

Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird mit der Monte Carlo-Methode simuliert, wie oft auf einer Fläche von 3 x 5 Feldern bei zwei auftreffenden Teilchen direkt benach-

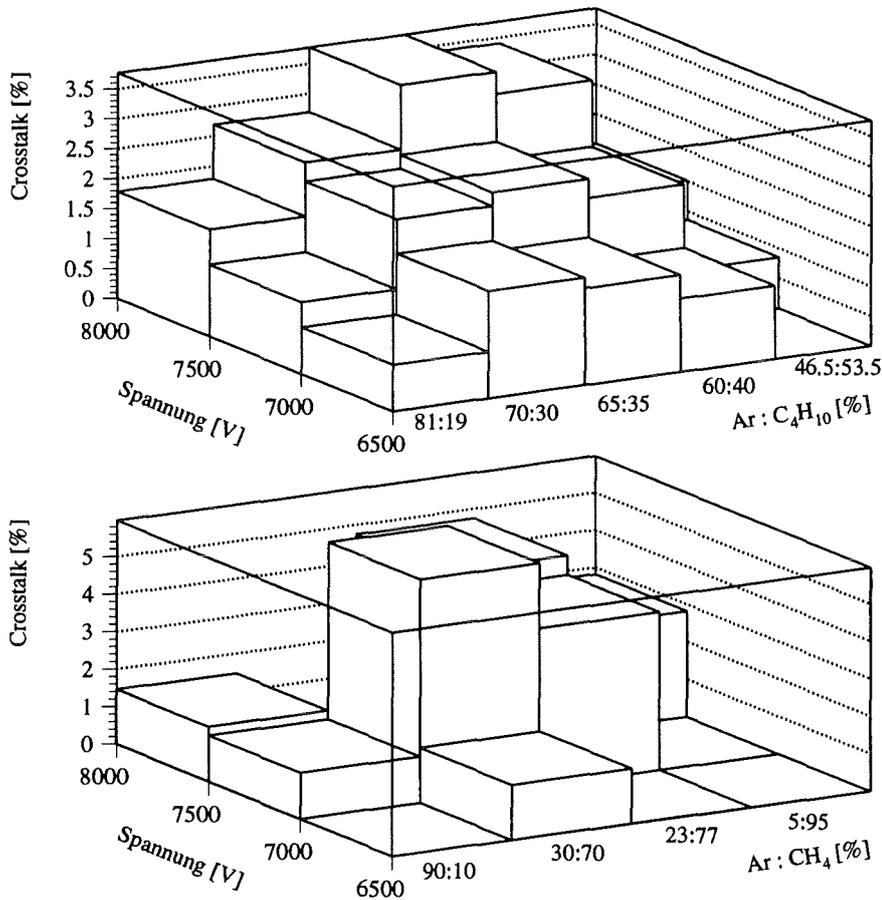


Abbildung 4.15: Häufigkeit des Übersprechens von Signalen bei Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> und Ar-CH<sub>4</sub> bzgl. aller gemessenen Teilchen

barte Felder getroffen werden. Aus der Simulation folgt, daß sich dies in 19 % der Fälle ergibt. Mit diesem Anteil müssen die gemessenen Ereignisse, bei denen zwei benachbarte Pads angesprochen haben, korrigiert werden. Bei der somit korrigierten Anzahl von Treffern auf benachbarten Pads handelt es sich um Übersprecher, welche von einem Teilchen durch UV-Photonen oder durch die Ausbreitung des Signals auf das Nachbarpad verursacht werden. Diese beiden Arten des Übersprechens sind auch gemeint, wenn im folgenden von übersprechenden Signalen die Rede ist.

Für die Argon-Isobutan- sowie die Argon-Methan-Mischungen sind deren prozentuale Anteile an den gesamten registrierten Treffern aus Abb. 4.15 ersichtlich. Man sieht, daß das Übersprechen von Signalen mit zunehmender Spannung häufiger wird. Dies ist verständlich, da bei einer höheren Spannung mehr Teilchen eine nachweisbare Entladung auslösen, wodurch bei der anschließenden Verstärkung insgesamt mehr UV-Quanten auf-

treten, die nicht vom Löschgas gequencht werden. Außerdem werden durch die höhere Effizienz vermehrt Teilchen nachgewiesen, die zwischen zwei Pads den Detektor durchqueren und somit auf beiden Pads eine nachweisbare Entladung deponieren.

Analog zum Anteil der Signaltypen 2 und 3 ist bei der Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Mischung im Verhältnis 81:19 die Häufigkeit der übersprechenden Signale geringer als bei den zwei nachfolgenden Mischungen, was ebenfalls in Übereinstimmung mit dem geringen Stromverbrauch dieser Mischung ist. Nach einem Maximum von 3.77 % beim Verhältnis 65:35 und einer Spannung von 7500 V, nimmt die Häufigkeit bis auf 1.51 % bei 53.5 % C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> und ebenfalls 7500 V, ab.

Bei den Methan-Mischungen ist der Anteil übersprechender Signale teilweise höher als bei den Isobutan-Mischungen. Maximal beträgt er hier 5.96 % bei der 30:70-Mischung. Es ist verständlich, daß mit Methan als Quenchgas neben dem vermehrten Auftreten von Signalen mit Nachpulsen und langandauernden Entladungen auch das Übersprechen von Signalen häufiger auftritt.

Wird Methan zu Argon-Isobutan dazugemischt, beträgt der Anteil übersprechender Signale 3.95 % bei 8000 V. Bei Isopropanol beträgt der Anteil 1.71 % bei 8 kV und bei Tetrafluormethan beträgt er 1.59 % bei 7500 V.

Abschließend läßt sich sagen, daß zur Vermeidung übersprechender Signale Gase mit einem hohen Absorptionsvermögen für UV-Photonen bzw. mit hoher Elektronenaffinität benutzt werden müssen.

## 5 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Experimenten

Vergleicht man die hier vorgestellten Ergebnisse mit denen anderer Gruppen, welche Resistive Plate Counters mit kosmischen Strahlen untersuchen, so ist Folgendes zu bemerken:

Die hier getesteten RPCs wurden bereits beim COVER\_PLASTEX-Experiment in Haverah Park nahe Leeds (Großbritannien) mit einer Mischung von 68 % Argon, 28 % Isobutan und 4 % Freon verwendet. Die dabei gemessene Effizienz beträgt 95.8 % bei einer Eingangsschwelle von 120 mV, der Anteil übersprechender Signale beträgt 3.2 % [13]. Die Zeitauflösung ist aufgrund der dort verwendeten Signalausleseelektronik nicht genauer als mit 2 ns meßbar [22].

Ebenfalls zum Nachweis ausgedehnter Luftschauer werden RPCs mit 58 % Ar, 40 % C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> und 2 % CF<sub>3</sub>Br in einem Myoneteleskop (MINI) verwendet [14]. Das Bakelit dieser RPCs hat ebenfalls einen spezifischen Widerstand von  $\rho \approx 10^{12} \Omega\text{cm}$ . Die angegebene Effizienz beträgt ca. 95 % bei einer Eingangsschwelle von 100 mV und wird oberhalb von 9 kV erreicht. Die Zeitauflösung wird mit 0.6 ns angegeben, wird allerdings auf eine andere Art und Weise bestimmt als hier. Trotz ebenfalls asymmetrischer Zeitspektren wird nur durch den schmalen Zentralbereich eine Gaußkurve gelegt, wodurch ungefähr 56 % der gemessenen Einträge nicht berücksichtigt werden.

Schaut man sich die Ergebnisse von Arbeitsgruppen an, welche Myonen mit Bakelit-RPCs in Beschleunigerexperimenten nachweisen, so werden, wie im folgenden aufgeführt wird, auch dort teilweise Effizienzen von unter 95 % sowie Zeitauflösungen von mehr als 2 ns gemessen. Die Signalauslese erfolgt bei den dort verwendeten RPCs über Streifen.

Eine Arbeitsgruppe des BaBar-Experimentes am PEP II-Speicherring mißt mit einem Tetrafluormethan-Anteil zwischen 3 und 10 %, bei 55 bis 58 % Argon und dem Rest Isobutan, Effizienzen zwischen 80 und 85 % [36].

Am L3-Experiment am LEP-Beschleuniger wird mit einer Ar-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-Freon-Mischung von 58:38:4 % eine Zeitauflösung von 2.16 ns gemessen [53].

Die CMS-RPC-Kollaboration gibt für ihre Resistive Plate Counters eine Effizienz von ca. 95 % sowie eine Zeitauflösung zwischen 1.7 und 2.8 ns, bei einer low-gain-Mischung von 90 % C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub> und 10 % C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, an [52].

Bei einem Vergleich der Ergebnisse stellt sich damit heraus, daß die hier getesteten Gasmischungen durchaus geeignet sind.

Die Zeitauflösungen sind mit Werten zwischen 1.27 und 1.66 ns, je nach Isobutan-Mischung, besser als die der COVER\_PLASTEX-Gruppe und der an Beschleunigern arbeitenden Gruppen. Die gemessenen Anteile übersprechender Signale liegen im Bereich

der von der COVER\_PLASTEX-Gruppe gemessenen Werte.

Die erhaltenen Effizienzen sind mit maximal 92.7 % bei Argon-Isobutan im Verhältnis 54:46 geringfügig schlechter als bei den Gruppen, die Bromtrifluormethan verwenden.

Es scheint, daß  $\text{CF}_3\text{Br}$  durch seine hohe Elektronenaffinität und die dadurch erreichbare Begrenzung der Entladung die Effizienz soweit verbessert, daß sie mehr als 95 % beträgt.

Vergleicht man die gewonnenen Zeitspektren mit RPC-Zeitspektren anderer Experimente, so erkennt man auch zum Teil bei diesen asymmetrische Verteilungen, sowohl bei RPCs mit nur einem Gasspalt [50, 51], als auch bei solchen mit zwei Gasspalten [14, 52]. Diese Asymmetrien sind unabhängig davon, ob die Signalauslese über Pads oder Streifen geschieht. Sie treten bei verschiedenen Teilchenflüssen, darunter auch dem der kosmischen Myonen [14], und bei verschiedenen Gasgemischen, darunter auch eine der Standardmischungen mit 58 % Argon, 40 % Isobutan und 2 %  $\text{CF}_3\text{Br}$  [14], auf. Der Grund für die Asymmetrien bei RPCs mit zwei Gasspalten wird durch die unterschiedlichen Durchstoßpunkte der durchgehenden Teilchen in den zwei Kammern begründet [14]. Je nachdem, ob ein Teilchen den einen Gasspalt in der Nähe eines isolierenden Spacers durchquert, verändert sich die Signalentwicklung aufgrund des schwächeren elektrischen Feldes in der Nähe des Spacers.

Diese Argumentation kann nicht der einzige Grund für die Asymmetrien sein, da sie auch bei RPCs mit nur einem Gasspalt auftreten. Außerdem zeigen die hier vorgestellten Daten eine deutliche Abhängigkeit der Asymmetrie von der benutzten Gasmischung.

Aus den ADC-Spektren erhält man bei Argon-Isobutan im Verhältnis 70:30 für die Ladung  $Q$  einen Wert von 350 pC und für die damit berechnete Größe der Entladungsfläche  $A_E$  einen Wert von  $0.11 \text{ cm}^2$ . Diese decken sich mit den in der Literatur angegebenen Werten von  $Q \sim 100 \text{ pC}$  und  $A_E \sim 0.1 \text{ cm}^2$  [12].

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung eines Resistive Plate Counters wurde mit Hilfe zweier Szintillationszähler ein Detektor-Teleskop aufgebaut. Der RPC wurde in der Mitte zwischen den Szintillatoren plazierte, so daß die zur Messung verwendeten Myonen aus der kosmischen Strahlung durch ein koinzidentes Ansprechen der Szintillatoren bzw. aller Detektoren ausgewählt werden konnten.

Um die Gasversorgung des Resistive Plate Counters zu gewährleisten, wurde ein Gasversorgungssystem aufgebaut, welches die Mischung verschiedener Gase erlaubt. Durch die Verwendung eines mit Paraffinöl gefüllten Gasbubblers gelang es, den Gasdruck innerhalb des Detektors relativ zum Luftdruck konstant zu halten sowie bei einer eventuellen Verstopfung des Gasweges den Aufbau eines Überdrucks im RPC zu vermeiden. Mit dem Gasbubbler war eine Sichtkontrolle des Gasflusses möglich, und der Eintritt von Luft in den Detektor bei unterbrochener Gasversorgung konnte nicht stattfinden.

Für die durchgeführten Messungen wurde auf die Beimischung von Freon verzichtet, da es sich hierbei um einen von der Europäischen Union verbotenen, ozonabbauenden Stoff handelt. Als Gase wurden lediglich Argon mit Methan und Isobutan gemischt. Die zusätzliche Verwendung von Tetrafluormethan und Isopropanol fand unter dem Gesichtspunkt statt, eine eventuelle Alternative zu Freon zu finden.

Die Auslese und Verarbeitung der Signale wurde mit modularer Standardelektronik durchgeführt. Aufgrund der großen Pulse, die der Detektor liefert, konnte auf einen Vorverstärker verzichtet werden, jedoch mußte ein Filter in den Signalweg eingebaut werden, da an den Auslesepads Hochspannung statisch nachgewiesen wurde. Als Signalfilter dienen ein Hochpaß sowie zwei antiparallel geschaltete Dioden, welche die Höhe der Ausgangssignale auf  $\pm 410$  mV begrenzen.

Zur Untersuchung der RPC-Signale wurde ein multihitfähiges Zeitmeßsystem, das Arrival Time System, benutzt. Hiermit wurden die Signale in verschiedene Klassen eingeteilt, deren Häufigkeit je nach der verwendeten Gasmischung bestimmt werden konnte. Zur Datenaufnahme dienten ein PC/CAMAC-Interface, ein Personal Computer sowie das bereits vorhandene Datenaufnahme-Programm MYDAS.

Bei verschiedenen Gasgemischen und Spannungen wurden die Effizienz und der Stromverbrauch des RPCs gemessen. Zur korrekten Bestimmung der Effizienz wurde ein Simulationsprogramm geschrieben, um abhängig vom Aufbau des Teststandes den Geometriefaktor zu erhalten. Mit diesem Faktor wurde die gemessene Ansprechrate des RPCs korrigiert, um die Werte für die Effizienz zu erhalten. Außerdem wurde das Übersprechen von Signalen sowie das Auftreten bestimmter Signaltypen untersucht.

Ebenfalls bei verschiedenen Gasgemischen und Spannungen wurde für jedes Pad mit Hilfe eines Time-to-Digital-Converters die Zeitauflösung gemessen. Dabei wurde eine

Abhängigkeit der Form der Zeitspektren vom benutzten Quenchgas festgestellt.

Es zeigt sich, daß Methan kein geeigneter Ersatz für Isobutan ist. Bei elektrischen Feldstärken, wie sie im Gasspalt eines Resistive Plate Counters herrschen, reicht das Absorptionsvermögen des Methans für ultraviolette Photonen bei weitem nicht aus, um den Detektor effektiv zu betreiben. Bei den erhaltenen Signalen handelt es sich um langandauernde Entladungen und nicht um die erwarteten Einzelpulse, die eventuell noch zusammen mit wenigen Nachpulsen auftreten. Dies zeigt sich deutlich, wenn man sich die Anteile der einzelnen Signaltypen anschaut. Man erhält bei den Methan-Mischungen zwischen 33.1 und 61.1 % Einzelpulse. Beim Rest handelt es sich um Signale mit Nachpulsen und Dauerentladungen. Die Untersuchung des zeitlichen Auftretens der Nachpulse ergibt, daß bei Methan mindestens zwei langlebige, strahlende Zustände bei ihrer Entstehung beteiligt sind. Verwendet man stattdessen Isobutan als Quenchgas, erhält man zwischen 58.4 und 98.7 % Einzelpulse, bei nur einem langlebigen Zustand, der Nachpulse verursacht. Ebenso ist der Anteil von Übersprechern auf benachbarte Pads mit Anteilen von 5.96 bis 1.23 % bei Methan höher als bei Isobutan. Hier betragen die Anteile zwischen 3.77 und 0.78 %. Die Ursache dafür ist das im Vergleich zu Isobutan geringere Absorptionsvermögen für ultraviolette Photonen bei Methan. Dieses ist nicht ausreichend, um die bei höherer elektrischer Feldstärke ausgedehntere Entladung zu begrenzen, so daß durch einzelne Photonen ausgelöste weitere, räumlich getrennte Entladungen entstehen.

Die erhaltenen Effizienzen und Zeitauflösungen sind bei Methan-Gemischen mit Werten von maximal 27 % für die Effizienz und einer Zeitauflösung von 2.50 ns im besten Fall durchweg schlechter als bei den verwendeten Isobutan-Mischungen und machen den Einsatz von Methan-Gemischen in Resistive Plate Countern bei KASCADE unmöglich. Abgesehen davon ergeben sich mit Methan-Gemischen deutliche Asymmetrien in den Zeitspektren, was zusätzlich zu schlechteren Zeitauflösungen führt.

Für einen erfolgreichen Einsatz der RPCs muß Isobutan als Quenchgas verwendet werden. Man erhält mit den getesteten Isobutan-Mischungen Effizienzen von maximal 93 % und Zeitauflösungen von bis zu 1.27 ns bei 7.5 kV. Als beste Mischung erwies sich dabei diejenige mit einem Isobutan-Anteil von 40 %. Das Übersprechen benachbarter Kanäle erreicht bei dieser Mischung einen Anteil von weniger als 3.4 % bei einer Spannung von 7500 V.

Die nachgewiesenen Entladungen befinden sich in der Größenordnung von 100 pC und die mit diesen Werten berechneten Flächen der Entladungen auf den Elektroden liegen in der Größenordnung von 0.1 cm<sup>2</sup>. Diese Resultate decken sich mit den in der Literatur angegebenen Werten.

Alternativ kann auch die getestete Argon-Isobutan-Methan-Mischung im Verhältnis 51.2:43.1:5.7 verwendet werden. Hier wird eine Effizienz von 91.5 % sowie eine Zeitauflösung von 1.27 ns, allerdings bei 8 kV, erreicht. Die Unterdrückung von langandauernden Entladungen ist bei diesem Gemisch ähnlich effektiv wie bei der oben erwähnten besten Isobutan-Mischung, jedoch halten die Dauerentladungen bei der Bei-

mischung von Methan wieder wesentlich länger an. Der Anteil übersprechender Signale ist mit ca. 4 % höher als bei der Isobutan-Mischung, doch ist die Spannung, bei der dies gemessen wurde, auch um 500 V höher als bei der Isobutan-Mischung. Diese zwei Gasgemische erweisen sich von allen getesteten als die empfehlenswertesten. Allerdings ist fraglich, ob es infolge der Ähnlichkeit der Ergebnisse nicht sinnlos wäre, drei Gase zu mischen, wenn man gewissermaßen die gleichen Resultate mit zwei Gasen erhält.

Isopropanol und Tetrafluormethan erwiesen sich als keine geeigneten Zusätze. Durch die Kondensation des zur Erhöhung der Konzentration erwärmten Isopropanols kam es zu starken Schwankungen der Meßwerte. Der erwärmte Alkohol kann außerdem das Bakelit sowie die Kunststoffschläuche der Gaszufuhr angreifen. Aufgrund der Kondensationen sind die Meßwerte nicht aussagekräftig.

Mit Tetrafluormethan erreicht man keine Effizienz über 75 %. Auch andere Arbeitsgruppen erreichen mit diesem Gas keine Effizienz über 90 %. Nachpulse und übersprechende Signale werden allerdings sehr effektiv unterdrückt. Die Werte der erhaltenen Zeitauflösungen liegen zwischen denen der Isobutan- und der Methan-Mischungen. Tetrafluormethan stellt somit, wie auch Isopropanol, keinen vollwertigen Ersatz für Bromtrifluormethan dar.

Bei einem Vergleich der Resultate mit denen anderer Gruppen, welche Resistive Plate Counters untersuchen, zeigt sich, daß diese Detektoren durchaus ohne Freon betrieben werden können. Die dabei erhaltenen Effizienzwerte sind allerdings geringer als beim Gebrauch von Freon. Daran ändert auch die Beimischung der hier getesteten Ersatzstoffe nichts. Allerdings sind die gemessenen Zeitauflösungen teilweise besser als diejenigen der anderen Gruppen.

Die hier nachgewiesene Abhängigkeit der Zeitspektren vom benutzten Löschgas wurde bis jetzt noch nicht in der Literatur angegeben und sollte daher weiter untersucht werden, um die genaue Wirkungsweise eines Resistive Plate Counters besser zu verstehen.

Aufgrund der guten Zeitauflösungen von durchweg besser als 2 ns bei den Gemischen, die Isobutan als Quenchgas enthalten, sind die Resistive Plate Counters zur Ankunftszeitmessung bei KASCADE einsetzbar.

Die Ortsauflösung ist durch die Größe der Auslesepads von 12 x 12 cm<sup>2</sup> begrenzt. Um eine bessere Ortsauflösung zu erhalten, müßten kleinere Pads oder Streifen zur Signalauslese verwendet werden. Bei der Verwendung von Auslesestreifen wären allerdings mindestens zwei Lagen Resistive Plate Counters mit zueinander senkrecht stehenden Streifen notwendig.

In Anbetracht der Tatsache, daß diese Detektoren mit Standardelektronik ausgelesen werden können, daß kein Vorverstärker zur Signalverarbeitung nötig ist, daß die RPCs in verschiedenen Größen hergestellt werden können, wegen ihres geringen Gewichts flexibel einsetzbar sind und bereits industrielle Fertigung besteht, stellen sie eine preiswerte Möglichkeit zur Vergrößerung der Myon-Nachweisfläche bei gleichzeitiger Ankunftszeitmessung mit guter Zeitauflösung dar.

Allerdings müssten die RPCs mit teurem Isobutan betrieben werden, um effizient zu arbeiten. Da ein Isobutan-Luft-Gemisch explosiv ist, müssten dementsprechend auch teure Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] M. S. Longair, High energy astrophysics, Cambridge University Press, Cambridge 1981
- [2] S. W. Barwick et al., Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 390
- [3] V. F. Hess, Phys. Z. **13** (1912) 1084
- [4] P. Auger et al., Compt. Rend. Hebd. Seanc. Acad. Si. **206** (1938) 354
- [5] W. Kolhörster et al., Naturw. **26** (1938) 576
- [6] G. Schatz, Interdiscipl. Sci. Rev. **18** (1993) 306
- [7] J. Linsley und L. Scarsi, Phys. Rev. **128** (1962) 2384
- [8] H. Rebel et al., Jour. Phys. G: Nucl. Part. Phys **21** (1995) 451
- [9] I. M. Brâncuş et al., FZKA-Bericht 5835, Forschungszentrum Karlsruhe 1996
- [10] T. J. L. McComb et al., Journ. Phys. Soc. Japan **51** (1982) 3087
- [11] R. Santonico und R. Cardarelli, Nucl. Instr. & Meth. **187** (1981) 377
- [12] R. Cardarelli et al., Nucl. Instr. & Meth. **A263** (1988) 20
- [13] G. A. Agnetta et al., Nucl. Instr. & Meth. **A381** (1996) 64
- [14] M. Abbrescia et al., Nucl. Instr. & Meth. **A359** (1995) 603
- [15] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften **L333** (1994) 1
- [16] H.J. Mathes, persönliche Mitteilung
- [17] I. W. Keuffel, Phys. Rev. **73** (1948) 531 und Rev. Sci. Instr. **20** (1949) 202
- [18] R. W. Pidd et al., Phys. Rev. **75** (1949) 627
- [19] M. V. Babykin et al., Sov. Journ. of Atomic Energy **VI** (1956) 487
- [20] G. V. Fedotovitch und Y. N. Pestov, Preprint IYAF 77-78, SLAC Transl. **184** (1978)
- [21] Y. N. Pestov, Nucl. Instr. & Meth. **196** (1982) 45

- [22] M. Ambrosio et al., Nucl. Instr. & Meth. **A344** (1994) 350
- [23] S. C. Brown, Basic Data of Plasma Physics 1966, MIT Press, Cambridge 1967
- [24] F. Sauli, CERN-Report 77-09 (1977)
- [25] J. G. Bian et al., Proc. III Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Pavia 11.-12.10.1995, S. 419, "III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors", Herausgeber: S. P. Ratti, M. Merlo
- [26] H. Kuchling, Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig, 1991
- [27] R. Santonico, Proc. II Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Rom 1993, S. 1, "II International Workshop on the Resistive Plate Chambers in Particle Physics and Astrophysics", Herausgeber: S. P. Ratti, G. Ciapetti, R. Santonico
- [28] H.J. Mathes, KfK-Bericht 5173, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1993
- [29] J. Horzel, KfK-Bericht 4815, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1990
- [30] I. Crotty et al., Nucl. Instr. & Meth. **A360** (1995) 512
- [31] LeCroy, Gebrauchsanweisung für Octal Time-to-Digital Converter 2228A, 1985
- [32] J. Wentz, FZKA-Bericht 5500, Forschungszentrum Karlsruhe 1995
- [33] EG&G Ortec/ESN, Gebrauchsanweisung für CF 8000 Octal Constant Fraction Discriminator, 1986
- [34] M. Kretschmer, KfK-Bericht 5294, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1994
- [35] A. A. Radzig und B. M. Smirnov, Springer Series in Chemical Physics Bd. 31, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1985
- [36] N. Cavallo et al., Proc. III Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Pavia 11.-12.10.1995, S. 115, "III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors", Herausgeber: S. P. Ratti, M. Merlo
- [37] E. Ables et al., Proc. III Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Pavia 11.-12.10.1995, S. 373, "III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors", Herausgeber: S. P. Ratti, M. Merlo
- [38] M. Widgoff et al., GEM-Report TN-92-206, 1992
- [39] E. Fünfer und H. Neuert, Zählrohre und Szintillationszähler, Verlag G. Braun Karlsruhe 1959

- [40] R. Bouclier et al., Nucl. Instr. & Meth. **88** (1970) 149
- [41] J. R. Moroney und J. K. Parry, Austr. Jour. Phys. **7** (1954) 423
- [42] J. N. Crookes und B. C. Rastin, Nucl. Phys. **B39** (1972) 493
- [43] D. P. Bhattacharyya, Nuovo Cimento **B24** (1974) 78
- [44] S. Zagromski, persönliche Mitteilung
- [45] F. Herm, KfK-Bericht 5258 B, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1993
- [46] A. Di Ciaccio et al., Proc. III Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Pavia 11.-12.10.1995, S. 263, "III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors", Herausgeber: S. P. Ratti, M. Merlo
- [47] R. Cardarelli et al., Nucl. Instr. & Meth. **A333** (1993) 399
- [48] Kühn und Birret, Merkblätter gefährlicher Arbeitsstoffe - 52. Erg.-Lfg. 1/91, P35-1
- [49] S. Brandt, Datenanalyse, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim 1992
- [50] L. Pontecorvo et al., Proc. II Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Rom 1993, S. 145, "II International Workshop on the Resistive Plate Chambers in Particle Physics and Astrophysics", Herausgeber: S. P. Ratti, G. Ciapetti, R. Santonico
- [51] H. Faissner et al., Proc. II Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Rom 1993, S. 167, "II International Workshop on the Resistive Plate Chambers in Particle Physics and Astrophysics", Herausgeber: S. P. Ratti, G. Ciapetti, R. Santonico
- [52] M. Abbrescia et al., Proc. III Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Pavia 11.-12.10.1995, S. 217, "III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors", Herausgeber: S. P. Ratti, M. Merlo
- [53] R. De Asmundis, Proc. III Int. Workshop on Res. Pl. Chamb., Pavia 11.-12.10.1995, S. 139, "III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors", Herausgeber: S. P. Ratti, M. Merlo

*Diese Arbeit entstand am Institut für Kernphysik III des Forschungszentrums Karlsruhe.*

*Herrn Prof. Dr. G. Schatz danke ich dafür, daß er mir die Durchführung der Arbeit an seinem Institut ermöglicht hat.*

*Herrn Prof. Dr. H. Rebel danke ich für die Anregung und die ständige Begleitung bei dieser Arbeit sowie für seine vielfältigen Hinweise.*

*Herrn Prof. Dr. M. Ambrosio vom Istituto Nazionale di Fisica Nucleare in Neapel danke ich, daß er mir für die Untersuchungen freundlicherweise zwei seiner Resistive Plate Counters überließ.*

*Herrn Dr. J. Engler vom Institut für Kernphysik I danke ich dafür, daß er mein Interesse am KASCADE-Experiment geweckt hat.*

*Herrn Dr. J. Wentz danke ich für seine Unterstützung und seine Anregungen bei der Durchführung dieser Arbeit sowie seine Bereitschaft, auftretende Probleme zu diskutieren und zu deren Lösung beizutragen.*

*Herrn Dr. T. Thoww danke ich für seine vielfältigen Anregungen sowie für die zahlreichen Diskussionen über Probleme der Kosmologie und der Teilchenphysik.*

*Stellvertretend für die Mitarbeiter in den Werkstätten des Instituts danke ich Herrn B. Grüninger und Herrn G. Ludwig für die Unterstützung während der Aufbauphase des Experiments.*

*Weiterhin danke ich für die Tips und Tricks beim Aufbau und Betrieb des Teststandes den Herren Dr. H.-J. Mathes und Dipl.-Ing. S. Zagromski, beim Einbinden von Fortran-Funktionen in C-Programme Herrn Dipl.-Phys. T. Wiegert, zur Datenanalyse Herrn Dipl.-Phys. M. Roth und für die Tips zum Erstellen schöner Bilder Frau Dipl.-Phys. M. Föllner. Ich danke den Herren cand. phys. T. Antoni, K. Köhler, H. Leibrock, Dipl.-Phys. D. Mühlenberg und Dipl.-Math. J. Oehlschlager für die kreative Arbeitsatmosphäre.*

*Der gesamten Arbeitsgruppe möchte ich für das angenehme Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit danken. Mein besonderer Dank geht hierbei an Frau Elke Grüninger und Frau Claudia Ruf.*