Institut für Kernphysik

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Weiterentwicklung eines Glaskapillarendetektors und Anbindung eines Prototypen an den CHORUS-Detektor

Experimentelle Physik

Diplomarbeit
von
Kirsten Holtz

April 1998

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Teilchendetektoren haben in den modernen Naturwissenschaften vielfältigen Einsatz gefunden, dazu ist es in den meisten Bereichen nötig, Detektoren mit immer besserer Orts-, Zeit-, Energie- und Impulsauflösung zu entwickeln und einzusetzen.

Insbesondere in der Teilchenphysik werden Detektoren mit hoher Ortsauflösung benötigt, da sehr kurzlebige Teilchen durch ihre Zerfallstopologien nachgewiesen werden sollen. Sehr gute Auflösungen im Mikrometerbereich sind schon seit längerer Zeit mit Kernspuremulsionen möglich. Diese haben jedoch den Nachteil, daß sie nicht direkt elektronisch auszulesen sind. Vielmehr werden sie zunächst längere Zeit bestrahlt, bevor sie entwickelt werden können, um dann erst mit der recht aufwendigen Auswertung zu beginnen.

Eine Alternative, allerdings mit deutlich schlechterer Ortsauflösung, bieten Spurerkennungsdetektoren auf der Grundlage von szintillierenden Fasern. Ihr zusätzlicher Vorteil ist die Möglichkeit der simultanen Energiemessung. Solche Fasern werden schon seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt [18]. Ein neuer Ansatz ist der Einsatz von Glaskapillaren, die mit einem Flüssigszintillator gefüllt werden. Diese Detektoren eignen sich aufgrund ihrer guten Auflösung zur Untersuchung von Vertex-Topologien, aber auch zur Detektion sehr kurzlebiger Teilchen (Tau, Charm, Beauty).

Einen solchen Glaskapillarendetektor, kurz "Kapillartarget" genannt, hat die RD46-Kollaboration am CERN entwickelt. Insbesondere beschäftigt sich die Kollaboration mit der Entwicklung eines optoelektronischen Auslesesystems für diesen Detektor. Zur Zeit sind zwei Prototypen mit unterschiedlichen Ausleseketten im Einsatz. Der ältere der beiden ist mit einer herkömmlichen Bildverstärkerkette ausgestattet, die durch einen Megapixel CCD (*Charged Coupled Device*)[1] ausgelesen wird. Der neuere Prototyp wird mit einem *Electron Bombarded CCD* (EBCCD) ausgelesen. Dieser Aufbau hat den Vorteil, daß weniger herkömmliche Bildverstärker in der Auslesekette notwendig sind und somit die Auflösung sowie das Signal/Rausch-Verhältnis deutlich verbessert werden.

In der vorliegenden Arbeit sollen Fortschritte in der Entwicklung dieser Kapillardetektoren und derer Auslesesysteme vorgestellt werden. Außerdem werden die Ergebnisse der Anbindung eines Prototypen an das CHORUS[2]-Experiment und die Auswertung der sich daraus ergebenden Daten dargestellt.

[1] Englische Fachbegriffe werden durch Kursivdruck kenntlich gemacht.
[2] *CERN Hybrid Oscillation Research apparatUS*

Kapitel 2

Theorie

2.1 Standardmodell

Die kleinsten bekannten Bausteine der Materie und die Gesetze, nach denen diese miteinander in Wechselwirkung treten, werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben.

Im Standardmodell werden heute folgende Bausteine als elementar angesehen, da sie keine nachweisbare räumliche Ausdehnung, also auch keine Substruktur, haben:

- Fermionen zur Beschreibung der Materiefelder
  (Spin 1/2-Teilchen)
- Bosonen, die Quanten der Wechselwirkungsfelder
  (Spin 1-Teilchen)

Die zwölf elementaren Fermionen lassen sich nach dem Standardmodell in zwei Klassen zu je sechs Quarks bzw. Leptonen einordnen. Sie werden nach steigender Masse in drei Familien geordnet. Eine Übersicht über diese Fermionen ist in Tabelle 2.1 gegeben.

Die Quarks tragen zusätzlich zu ihrer elektrischen Ladung eine sogenannte Farbladung. Im Gegensatz zu den Leptonen beobachtet man keine freien Quarks, sondern nur aus ihnen zusammengesetzte farbneutrale Teilchen, die sogenannten Hadronen. Die Quarks kombinieren entweder zu Mesonen (bestehend aus einem Quark-Antiquark-Paar) oder Baryonen (bestehend aus drei Quarks oder drei An-

	Ladung	1.Familie	2.Familie	3.Familie
Quarks	+2/3	u	c	t
	-1/3	d	s	b
Leptonen	-1	e	μ	τ
	0	ν_e	ν_μ	ν_τ

Tabelle 2.1: *Die elementaren Fermionen des Standardmodells*

tiquarks). Zu allen elementaren Fermionen existieren entsprechende Antiteilchen mit gleicher Masse aber entgegengesetzter elektrischer Ladung und Farbladung.

Wechselwirkungen zwischen den elementaren Bausteinen der Materie werden durch Austauschbosonen vermittelt. Eine Übersicht über die verschiedenen Wechselwirkungen ist in Tabelle 2.2 gegeben:

Wechselwirkung	Austauschteilchen	koppelt an	Reichweite
stark	8 Gluonen	Farbe	$\leq 10^{-15}$ m
elektromagnetisch	Photon	elektrische Ladung	∞
schwach	$W^{\pm}$,Z^0	schwache Ladung	10^{-18} m
Gravitation	"Graviton"	Masse	∞

Tabelle 2.2: *Fundamentale Wechselwirkungen*

Die Gravitation als vierte Wechselwirkung wird im Standardmodell vernachlässigt, da ihre Wirkung im Vergleich zu den drei anderen Wechselwirkungen bei den in der Elementarteilchenphysik betrachteten Entfernungen zu gering ist. Außerdem konnte bisher keine quantenmechanische Beschreibung gefunden werden, durch die sie sich in das Standardmodell einpassen würde.

Die unterschiedlichen Wechselwirkungen erfüllen verschiedene Erhaltungssätze. So bleiben Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung, Farbe, Baryonenzahl und die drei Leptonenzahlen bei allen Wechselwirkungen erhalten. Die Paritätserhaltung (Invarianz unter Raumspiegelung) gilt nur für die elektromagnetische und die starke Wechselwirkung, in der schwachen Wechselwirkung ist sie verletzt. Das wird deutlich in der Tatsache, daß Neutrinos nur mit fester Händigkeit auftreten. Als Händigkeit wird das normierte Skalarprodukt von Spin und Impuls bezeichnet. Die Spinprojektion entgegen der Impulsrichtung wird Linkshändigkeit genannt. So werden nur linkshändige Neutrinos und rechtshändige Antineutrinos beobachtet [4]. Die kombinierte CP-Parität (Raumspiegelung und Ladungskonjugation) ist in der schwachen Wechselwirkung zumindest in einem Fall verletzt (Zerfall des K^0) [4]. Als erhalten gilt lediglich die CPT-Parität, gleichzeitig zur Raumspiegelung und Ladungskonjugation wird hier auch die Zeitrichtung umgekehrt.

Die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung wurden von Weinberg und Salam zur sogenannten 'Elektroschwachen Wechselwirkung' vereinheitlicht. Hierzu führten sie eine neue Quantenzahl ein, den schwachen Isospin. So bildet jede Familie von linkshändigen Quarks und linkshändigen Leptonen ein Isospin-Dublett. Die Fermionen dieser Isospin-Dubletts können sich durch Absorption bzw. Emission von W-Bosonen ineinander umwandeln. Rechtshändige Fermionen werden als Singuletts beschrieben, da sie nicht an die W-Bosonen koppeln [4].

Um das Standardmodell zu bestätigen oder auf der Suche nach Physik jenseits des Standardmodells, werden heute sehr unterschiedliche Experimente durchgeführt, insbesondere auch Experimente zur Neutrinophysik. Im Standardmodell wird die Masse der Neutrinos zwar ad hoc auf Null festgelegt, dieser Sachverhalt konnte jedoch bis heute nicht experimentell nachgewiesen werden. Mit diesem Problem ist direkt die Frage gekoppelt, ob der schwache Eigenzustand des Neutrinos auch ein Masseneigenzustand ist. Ist dies nicht der Fall, so können neben den linkshändigen Neutrinos der schwachen Wechselwirkung auch Neutrinos mit rechtshändigen Komponenten existieren. Eine weitere Motivation für Neutrinoexperimente ist die Tatsache, daß Neutrinos nur über die schwache Wechselwirkung mit Materie koppeln. Diese kann daher unabhängig von den anderen Wechselwirkungen untersucht werden. Aus dem gleichen Grund eignen sich Streuexperimente mit Neutrinos, um Strukturuntersuchungen an Hadronen oder Kernen vorzunehmen. Detailierte Ausführungen zur Neutrinophysik und zu möglichen Experimenten mit Neutrinos sind in [5] gegeben.

Kapitel 3

Neutrinos im Experiment

3.1 Der Neutrinostrahl

Um gezielte Versuche mit Neutrinos unternehmen zu können, benötigt man eine Neutrinoquelle. Die größte Neutrinoquelle in unsere Nähe ist die Sonne, sie produziert allerdings hauptsächlich Elektronneutrinos. Um Versuche mit Neutrinos einer anderen Familie durchzuführen, benötigt man daher andere Neutrinoquellen. Am CERN in Genf werden zur Zeit zwei Neutrino-Experimente durchgeführt. Die West Area Neutrino Facility (WANF) des CERN Super-Proton-Synchrotrons (SPS) liefert dafür einen Breitband-Neutrino-Strahl, dessen Hauptkomponente Myonneutrinos (ν_μ) sind. Eine schematische Darstellung des Aufbaus zur Erzeugung des Neutrinostrahls ist in Abbildung 3.1 gezeigt.

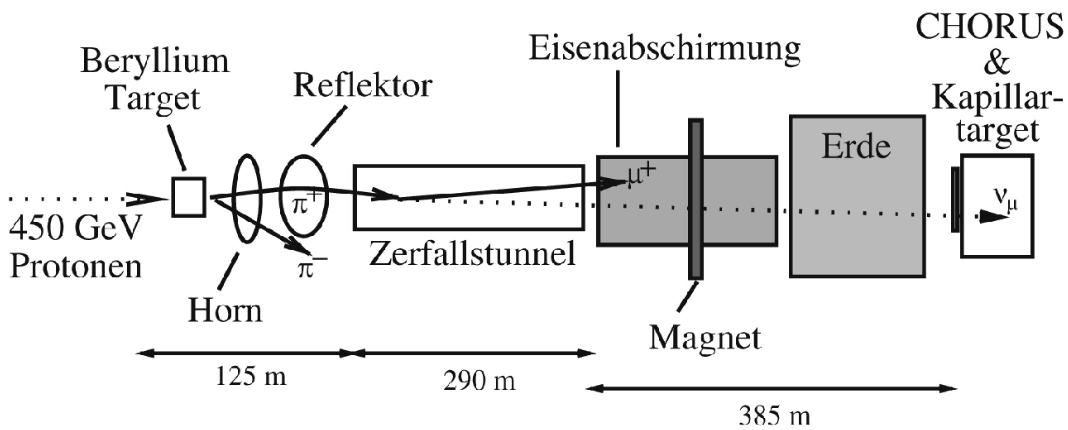


Abbildung 3.1: *Aufbau zur Erzeugung des CERN Neutrinostrahls (schematisch)*

Protonen werden im SPS in einem Zyklus von 14,4 s auf 450 GeV beschleunigt. Sie werden in zwei 6 ms langen Extraktionen (*Spills*) mit einem zeitlichen Abstand von 2,7 s auf ein Beryllium-Target gelenkt. Dort werden hauptsächlich Pionen und Kaonen produziert. Die entstehenden positiv geladenen Teilchen werden mit Hilfe von magnetischen Linsen (Horn und Reflektor) fokussiert, die negativ geladenen werden dagegen aus dem Strahl ausgelenkt. Ein Teil der auf diese Weise gebündelten positiven Mesonen zerfällt in einem 290 m langen Vakuumtunnel. Dabei entstehen Neutrinos aus den folgenden Zerfällen:

$$\begin{array}{lc} \pi^+ \to \mu^+\nu_\mu & 99{,}99\% \\ K^+ \to \mu^+\nu_\mu & 63{,}51\% \\ K^+ \to \pi^0\mu^+\nu_\mu & 3{,}18\% \\ K^+ \to \pi^0 e^+\nu_e & 4{,}82\% \end{array}$$

Nicht zerfallene Hadronen sowie aus Zerfällen entstandene geladene Leptonen werden in einer auf den Zerfallstunnel folgenden Abschirmungen aus Eisen und Erde (*Beam-Dump*) gestoppt. Lediglich Neutrinos und durch Neutrinoreaktionen produzierte Myonen erreichen die Detektoren der Neutrinoexperimente. Die durchschnittliche Energie der so erzeugten ν_μ liegt bei 26,9 GeV. Verunreinigungen des Strahls entstehen aus verschiedenen Gründen: Durch Zerfälle neutraler Kaonen, die nicht durch magnetische Felder aus dem Strahl

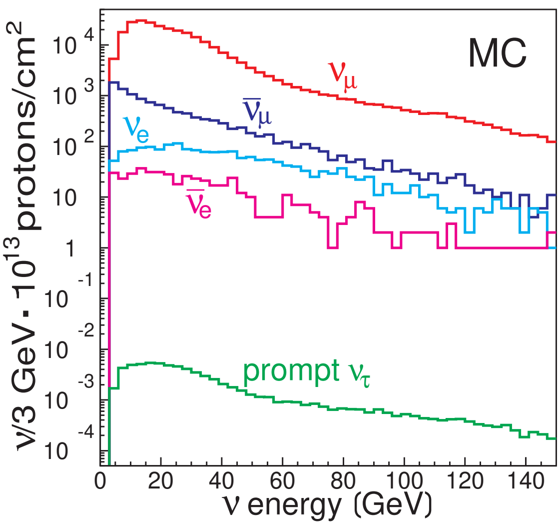


Abbildung 3.2: *Spektrum des CERN Breitband-Neutrinostrahls in der CHORUS-Emulsion, normiert auf 1 cm^2 Oberfläche der Emulsion, Monte-Carlo-Simulation [13].*

gelenkt werden, entstehen Antineutrinos. Elektronneutrinos resultieren aus Zerfällen von π^+ und K^+. Der Untergrund an ν_τ wird D-Mesonen zugeschrieben, die im Berylliumtarget oder im *Beam-Dump* erzeugt werden und anschließend zerfallen. Es ergibt sich ein Untergrund von $\bar{\nu}_\mu$ (5,6%), ν_e (0,7%), $\bar{\nu}_e$ (0,17%) und ν_τ (3-4$\cdot 10^{-6}$%) [13]. Das Ergebnis einer Monte-Carlo-Simulation der Neutrinoverteilung im Strahl ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

3.2 Das CHORUS-Experiment

Das CHORUS-Experiment (CERN *Hybrid Oscillation Research apparatUS*) ist für die Suche nach Neutrinooszillationen vom Typ $\nu_\mu \to \nu_\tau$ konzipiert worden. Es beruht auf dem Nachweis von ν_τ induzierten Reaktionen. Die in diesen Reaktionen erzeugten τ^--Leptonen haben nur eine sehr kurze mittlere Lebensdauer (cτ=87μm). Um die Topologie des Tau-Zerfalls von ν_μ-induzierten Ereignissen unterscheiden zu können, ist eine sehr gute Auflösung am Ort des Ereignisses sowie die Möglichkeit der anschließenden Identifikation der erzeugten Teilchen notwendig. Aus diesem Grund wurde CHORUS als Hybridexperiment aus Kernspuremulsion und elektronischen Detektoren realisiert. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Mit Hilfe der elektronischen Detektoren können spezielle Ereignisse selektiert und deren Teilchenspuren bis in die Emulsion zurückverfolgt werden. So können aus 40.000 Spuren pro cm^2, die durch Myonen und andere Teilchen erzeugt wurden, die etwa 20 Spuren pro cm^2 gefunden werden, die für die physikalische Fragestellung von Interesse sind und daher gezielt analysiert werden sollen.

Die elektronischen Detektoren können auch benutzt werden, um Spuren bis in das Kapillartarget zurückzuverfolgen, das direkt vor der Emulsion installiert ist (vergleiche hierzu auch Abb.4.17). Aus diesem Grund ist der CHORUS-Detektor mit seinen unterschiedlichen Subdetektoren hier kurz vorgestellt. Detailliertere Informationen finden sich in [13].

Die Emulsion

Als erster Detektorteil in Strahlrichtung befindet sich die Kernspuremulsion mit einer Masse von etwa 800 kg. Das Emulsionsmaterial bietet eine sehr gute Auflösung von 1 μm bei einer Trefferdichte von 300 Treffer/mm entlang der Teilchenspuren. Die Emulsion wird zwei Jahre lang bestrahlt, bevor sie entwickelt und mit automatischen Mikroskopen ausgelesen wird.

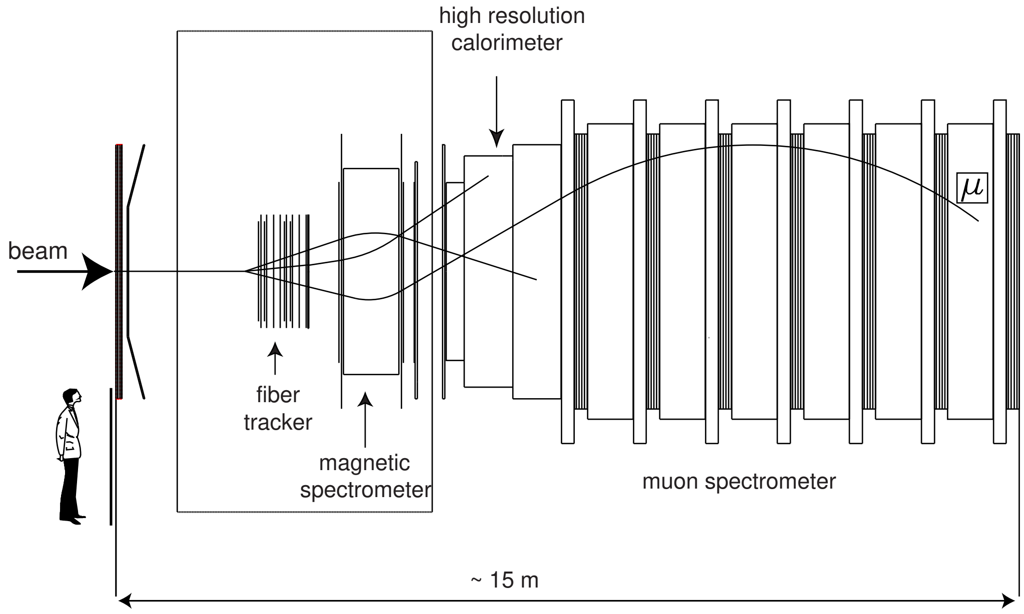


Abbildung 3.3: *Der CHORUS-Detektor*

Die Spurerkennungsdetektoren

Zur Spurverfolgung bis in die Emulsion werden szintillierende Fasern benutzt, die eine räumliche Auflösung von 150 μm und die benötigte Zweispurauflösung von 1 mm bieten [14].

Der gesamte Targetbereich besteht aus vier Emulsionsblöcken und acht Modulen aus szintillierenden Fasern, den sogenannten *Target-Trackern (TT).* Auf einen Emulsionsblock folgt jeweils direkt ein TT-Modul, auf den zweiten und vierten Block folgt eine Driftstrecke mit drei Target-Trackern.

Aus der Messung von einigen hundert Strahlmyonen, ergibt sich eine Winkelauflösung von 2,5 mrad für einzelne minimal ionisierende Teilchen [14].

Das Magnetspektrometer

Um nicht nur die Spuren, sondern auch die Ladung und den Impuls von niederenergetischen Hadronen zu bestimmen, wird das auf die Spurerkennungsdetektoren folgende Magnetspektrometer benötigt. Die Bestimmung des Vorzeichens der Ladung eines Teilchens mit diesem Spektrometer ist bis zu einer Energie von 10 GeV möglich. Die Impulsauflösung setzt sich zusammen aus einem konstanten Term, der von Mehrfachstreuungen in dem durchquerten Material herrührt, und einem zum Impuls proportionalen Term, der die Meßgenauigkeit wiedergibt [13]. Die Werte hierfür sind:

$$(\frac{\Delta p}{p})_{streu} = 22~\%$$
$$(\frac{\Delta p}{p})_{mess} = 3,5~\% \times \frac{p}{GeV/c}$$

Das Kalorimeter

Das auf das Magnetspektrometer folgende Kalorimeter erlaubt eine Bestimmung der Schauerrichtung und der Energie der entstandenen Hadronen. Es ist aus drei Sektoren zusammengesetzt (EM, HAD1, HAD2). Die ersten beiden Komponenten bestehen aus szintillierenden Fasern, die in eine Bleimatrix eingebettet sind, die dritte ist in "Sandwichbauweise" aus Blei- und Szintillatorstreifen aufgebaut. Nahezu alle Teilchen werden im Kalorimeter gestoppt, lediglich Myonen mit einer Energie größer 1,5 GeV erreichen das nachfolgende Myonspektrometer. Die elektromagnetische Komponente eines Schauers wird durch EM gemessen. EM und HAD1 messen die Energie der hadronischen Teilchen. Durch HAD2 wird die Energie gemessen, die von EM und HAD1 nicht erfaßt werden konnte.
Energieauflösung für Elektronen: $\Delta E/E = 13~\% \cdot \sqrt{E}(GeV)$
Energieauflösung für Hadronen: $\Delta E/E = 32\% \cdot \sqrt{E}(GeV)$ [13]

Das Myon-Spektrometer

Die Aufgabe des Myon-Spektrometers besteht in der Identifizierung von Myonen, sowie der Bestimmung ihres Impulses, ihrer Ladung und ihrer Trajektorie. Es besteht aus sechs magnetisierten Eisenmodulen und sieben Spurdetektoren, die aus Driftkammern und Streamerröhren aufgebaut sind.

Es erreicht eine Impulsauflösung von $\Delta p/p = 18~\%$ für 20 GeV/c Myonen [13].

Kapitel 4

Kapillartarget

In vielen Experimenten der Hochenergiephysik werden erfolgreich szintillierende Fasern als Spurdetektoren und als Bestandteil von Kalorimetern eingesetzt. Bisher werden hauptsächlich Plastik- und Glasfasern verwendet. Eine Alternative hierzu besteht in der Verwendung von Glaskapillaren, die mit organischem Flüssigszintillator gefüllt werden. Diese Kapillaren vereinigen die Vorteile kurzer Antwortzeiten und hoher Lichtausbeute der Plastikfasern mit dem geringeren *Cross-Talk* (Übersprechen des Lichtes von einer Faser zu einer benachbarten) der Glasfasern. Ein weiterer deutlicher Vorteil gegenüber Plastik- und Glasfasern ist ihre hohe Strahlungsbeständigkeit. Die zeitliche Auflösung eines Detektors auf der Basis von Glaskapillaren liegt bei wenigen Nanosekunden. Sie wird beschränkt durch die Abklingzeit des Szintillators (3 - 7 ns) und die Zeitspanne, die das Licht braucht, um zum auslesenden Ende zu gelangen. Zusätzlich ist es neuerdings möglich, Kapillaren mit einer großen Abschwächlänge von mehr als 3 m[1] herzustellen [16].
Szintillationsdetektoren jeglicher Art benötigen ein Auslesesystem, das die erzeugten Photonen in elektronische Impulse umwandelt. Dieses kann durch eine optoelektronische Auslesekette realisiert werden, die das Signals zunächst verstärkt, bevor es mit einem CCD-Chip erfaßt wird. Eine verbesserte Auflösung kann mit einer Auslesekette erreicht werden, die zur Erfassung der Signale einen EBCCD (*Electron Bombarded CCD*) - Chip nutzt.
An der Entwicklung solcher Glaskapillarendetektoren und besonders ihrer optoelektronischen Auslese arbeitet die RD46-Kollaboration am CERN. Sie untersucht hierzu verschiedene Themenbereiche:

[1] Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf Kapillaren mit 20 μm Durchmesser

- Flüssigszintillatoren: deren unterschiedliche Emissionsspektren, Lichtausbeute, Lichtabschwächung, Strahlungsbeständigkeit
- Kapillarenbündel: Qualitätschecks, Schneide- und Füllprozeduren, Test im Neutrinostrahl, verschiedene Bündelgeometrien
- Auslesesysteme: Entwicklung eines EBCCD-Bildverstärkers, optisches Multiplexing, Photokathoden mit hoher Quanteneffizienz

In diesem Kapitel soll der Stand der Entwicklung auf den verschiedenen Gebieten dargestellt werden. Der Ausdruck Kapillartarget bezeichnet im Folgenden die Gesamtheit aus Kapillarenbündel und optoelektronischer Auslesekette. Zwei Prototypen solcher Kapillartargets mit unterschiedlichen optoelektronischen Ausleseketten wurden von der RD46-Kollaboration entwickelt und getestet.

4.1 Glaskapillarenbündel

4.1.1 Produktion von Glaskapillaren

Die in diesem Experiment benutzten Kapillarenbündel werden industriell von der Firma Schott[2] hergestellt und bestehen aus Borosilikat 8250 mit einem Brechungsindex von 1,49. Die Produktion eines Bündels startet mit Glasröhrchen von etwa 1-2 mm Durchmesser, von denen einige hundert zu einer hexagonalen Struktur zusammengefaßt werden. In einem industriellen Verfahren wird diese Struktur zu einer sogenannten Multistruktur gezogen, die mit einer Glaswand von 30 μm Dicke umgeben wird. Wiederum einige hundert dieser Multistrukturen werden zum endgültigen Bündel gezogen (siehe Abbildungen 4.1 und 4.2). Auf diese Weise können Kapillaren von einigen Metern Länge und Durchmessern zwischen 2 und 1000 μm mit einer Wanddicke von typischerweise 5 - 10 Prozent des Kapillardurchmessers produziert werden.

In den Kapillaren können Fehlstellen auftreten, durch die es zu unerwünschten Effekten kommen kann. Photonen, die in einer Kapillare unter einem Winkel kleiner dem der Totalreflexion emittiert werden, können so in einer benachbarten Kapillare unter einem größeren Winkel auf die Wände auftreffen und eingefangen

[2] Schott Fiber Optics Inc., Southbridge, MA, USA

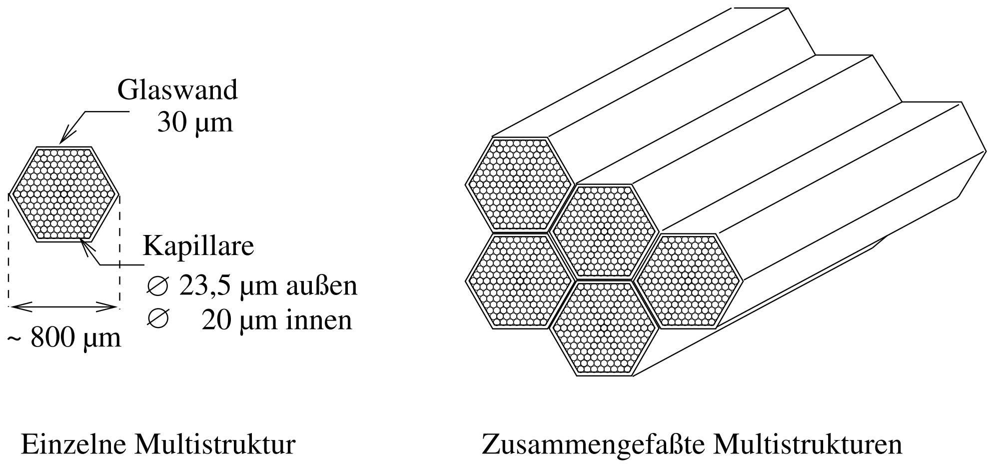


Abbildung 4.1: *Schematischer Aufbau einer Multistruktur und eines Kapillarenbündels. Einige hundert Kapillaren werden zu einer Multistruktur zusammengefaßt, die mit einer dünnen Glaswand umgeben wird. Wiederum einige hundert dieser Multistrukturen ergeben ein Kapillarenbündel.*

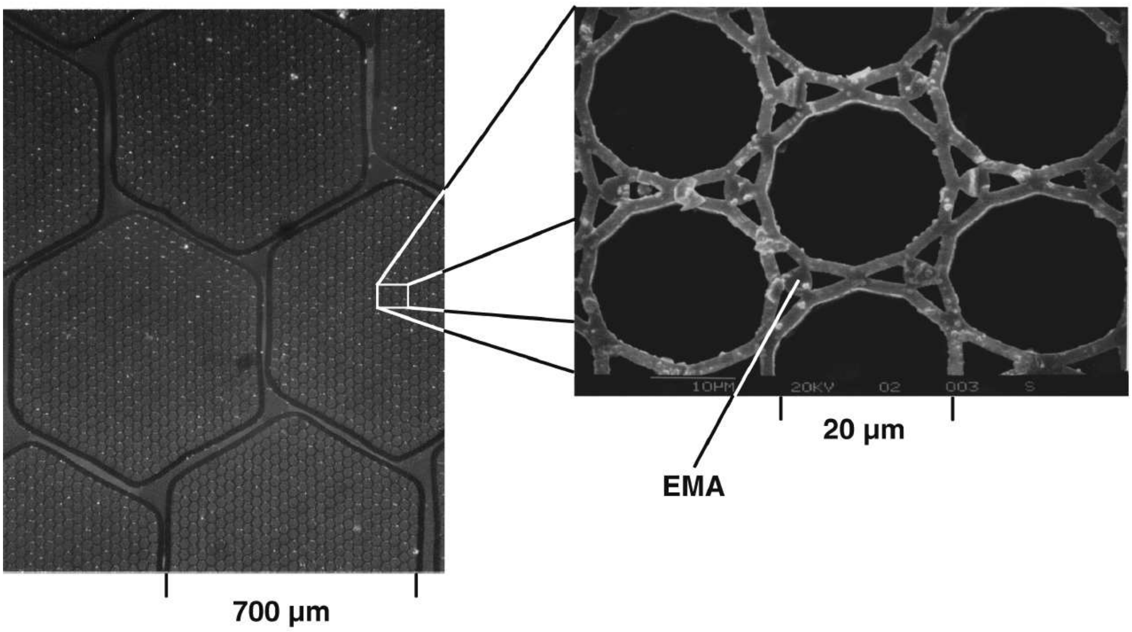


Abbildung 4.2: *Multistrukturen und Kapillaren unter einem Mikroskop betrachtet. Rechts deutlich sichtbar der EMA aus Borosilikatstäbchen in den Zwischenräumen zwischen den Kapillaren.*

werden (*cross-talk*). Um den so entstehenden Untergrund zu unterdrücken, werden vor den Ziehprozeduren dünne Stäbe aus schwarzem Borosilikat als zusätzliche Absorber (*extra-mural-absorber*, EMA) zwischen die Kapillaren eingefügt (Abb. 4.2). Genauere Informationen zur Herstellung finden sich in [19].

4.1.2 Prototypen

Das Kapillarenbündel des ersten von der RD46-Kollaboration eingesetzten Prototypen besteht aus $5 \cdot 10^5$ Kapillaren mit einem inneren Durchmesser von 20 μm. Die Auflösung der im Bündel erzeugten und durch die Auslesekette verstärkten und aufgezeichneten Bilder wird durch die Bildverstärker der Auslesekette begrenzt. Aus diesem Grund vergrößert sich zwanzig Zentimeter vor dem Ausleseende der Durchmesser der Kapillaren auf 34 μm. Das Bündel selbst hat einen quadratischen Querschnitt von $2\times$ 2 cm^2 auf einer Länge von 1,60 m. Das Verhältnis des sensitiven Volumens am Gesamtvolumen beträgt für dieses Bündel 55%.

Zur Zeit wird ein zweites Bündel ebenfalls getestet. Es enthält $1{,}4 \cdot 10^5$ Kapillaren mit je 30 μm Durchmesser und einer Länge von 0,93 m. Die Multistrukturen sind für dieses Target in einer hexagonalen Form angeordnet; sein sensitives Volumen liegt bei 70%.
Die Kapillaren dieser Prototypen sind mit organischem Flüssigszintillator gefüllt.

4.2 Flüssigszintillator

Ein Szintillator ist ein transparenter Stoff, der durch geladene Teilchen angeregt werden kann und die so absorbierte Energie in Form von Licht wieder emittiert. Dieses Verhalten wird auch als Lumineszenz bezeichnet. Sie kann in zwei Formen auftreten, der Fluoreszenz und der Phosphoreszenz. Mit Fluoreszenz bezeichnet man den direkte (in etwa 10^{-8}-10^{-9} sec erfolgende) Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand. Geht der angeregte Zustand zunächst strahlungslos in einen anderen Zustand über (*Intersystem Crossing*), der dann erst verzögert ($\geq 10^{-4}$ sec) unter Aussendung von Photonen in den Grundzustand übergeht, so nennt man dieses Phosphoreszenz (Abb. 4.3).

Organische Flüssigszintillatoren bestehen in der Regel aus einem Lösungsmittel, dem ein Szintillator beigemischt ist. Geladene Teilchen, die den Szintillator durchqueren, können in ihm Molekülzustände anregen. Beim Zerfall können diese

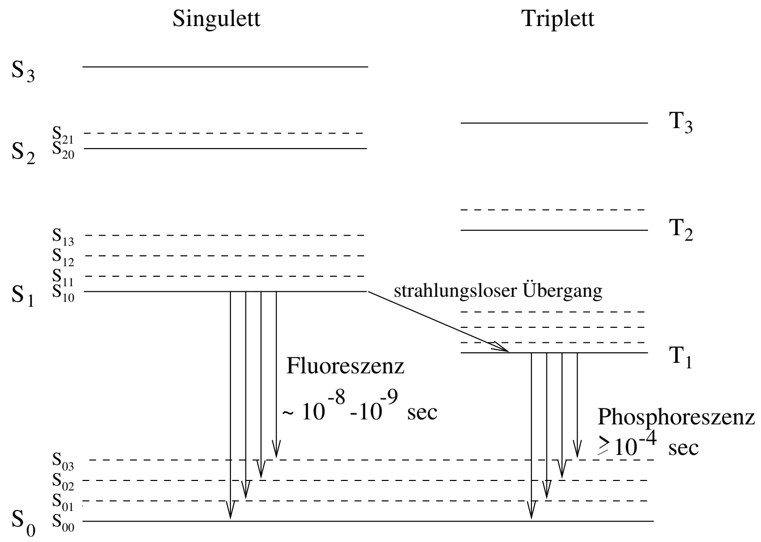


Abbildung 4.3: *Termschema eines organischen Szintillators. Molekülzustände sind in Singulett(S_{ij})- und Triplett(T_{ij})-Zustände quantisiert, i=0,1,2,... bezeichnet die Energieniveaus, j=0,1,2,... die Vibrationszustände. S_0 bezeichnet den Grundzustand. Der Szintillator kann durch geladene Teilchen angeregt werden, dabei werden Elektronen in einen energetisch höherliegenden Zustand gebracht. Die Abregung erfolgt entweder über Fluoreszenz oder nach strahlungslosem Übergang in einen Triplettzustand durch Phosphoreszenz.*

Licht emittieren. Um eine Lichtleitung zu ermöglichen, muß die Wellenlänge des vom Szintillator emittierten Lichtes von den Wellenlängen abweichen, die durch das Lösungsmittel absorbiert werden können. Diese Verschiebung des Emissionsspektrums bezüglich des Absorptionsspektrum nennt man *Stokes-Verschiebung*, zur Definition siehe Abbildung 4.4.

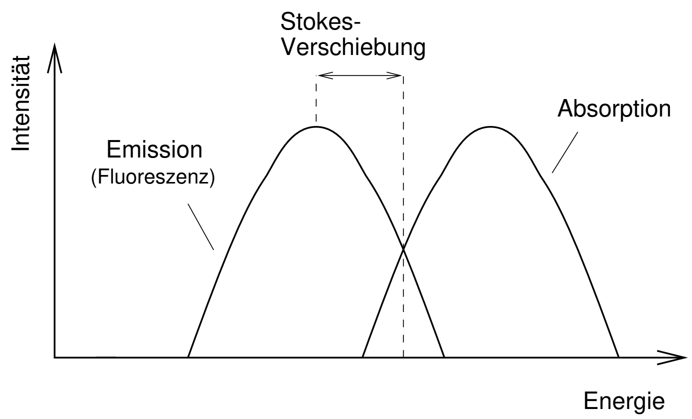


Abbildung 4.4: *Die Stokes-Verschiebung beschreibt die Verschiebung des Emissionsspektrums gegenüber dem Absorptionsspektrum zu niedrigeren Energien [9].*

An das Lösungsmittel für einen Flüssigszintillator werden verschiedene Anforderungen gestellt:

- hohe Strahlungsbeständigkeit
- hoher Brechungsindex ($\Rightarrow$ großer Brechungswinkel), um eine möglichst gute Lichtleitung durch Totalreflexion an den Glaswänden der Kapillaren zu erzielen
- hohe Transparenz für Licht der emittierten Wellenlänge

Der Szintillator muß außerdem die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- hohe Effizienz für die Konversion von Anregungsenergie in fluoreszente Strahlung
- große Stokes-Verschiebung (Verschiebung des Emissionsspektrums gegen das Absorptionsspektrum zu niedrigeren Energien, um Selbstabsorption zu minimieren, Definition siehe Abbildung 4.4)
- gute Übereinstimmung des Emissionsspektrums mit dem Sensitivitätsbereich der detektierenden Photokathode

Im Rahmen des RD46-Projektes wurden verschiedene Lösungsmittel und Szintillatoren auf diese Anforderungen hin getestet (Ergebnisse siehe [21] und [24]). Für die von der RD46-Kollaboration getesteten Kapillartargets wurde 1-Methyl-Naphtalen (1MN[3]) als Lösungsmittel verwendet. Dieses wird mit 3,01 g/l eines Szintillators versetzt. Hierzu werden die Pyrazolinderivate 3M15[3] bzw. R45[3] verwendet, die im grünen Wellenlängenbereich (490 nm bzw. 500 nm) emittieren. Diese Mischungen zeichnen sich durch hohe Lichtausbeute und geringe Temperaturabhängigkeit aus. Es konnte außerdem festgestellt werden, daß Flüssigszintillatoren, die aus 1MN mit R39[3], einem Pyrazolinderivat wie 3M15 und R45, bestehen, eine sehr gute Strahlungsbeständigkeit aufweisen. Die Szintillationseffizienz verringerte sich nach einer Dosis von 60 Mrad lediglich um 10% und 30% nach einer 190 Mrad-Dosis [21].

[3] 1MN, 3M15, R39 und R45 sind Warenzeichen von Geosphera Inc., Moskau, Rußland

4.2.1 Lichtleitung durch Totalreflexion

Wird das Kapillartarget von geladenen Teilchen durchquert, so regen diese den Flüssigszintillator an. Die bei der Abregung des Szintillators entstehenden Photonen breiten sich durch Totalreflexion am Übergang Flüssigkeit/Glas zu den Enden der Kapillaren hin aus (siehe Abbildung 4.5).

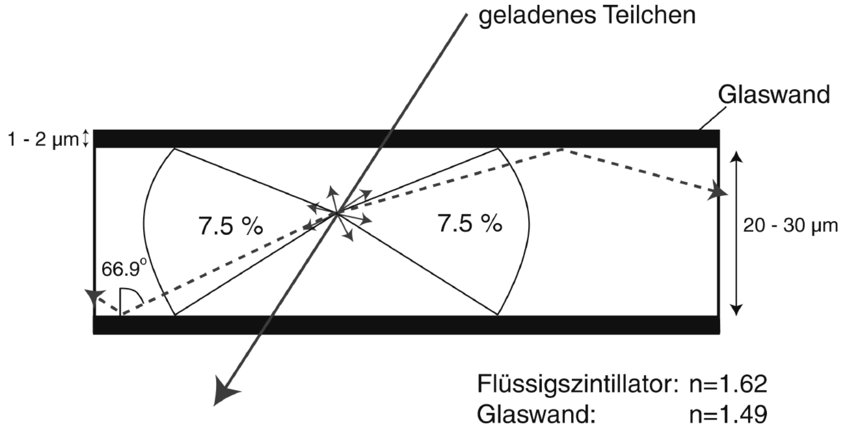


Abbildung 4.5: *Schematische Darstellung einer Kapillare, die von einem geladenen Teilchen durchquert wird. Dieses regt den Szintillator an, der die aufgenommene Energie isotrop in Form von Licht wieder abgibt. In jede Richtung werden etwa 7,5% der Photonen durch Totalreflexion an den Glaswänden eingefangen und breiten sich so zu den Enden der Kapillaren hin aus.*

Das im Experiment benutzte Lösungsmittel 1MN hat einen Brechungsindex von 1,62. Zusammen mit dem Brechungsindex von 1,49 des Borosilikatglases ergibt sich nach

$$\frac{n_1}{n_2} = \sin\theta_c \tag{4.1}$$

ein Winkel von $\theta_c = 66,9°$ für die Totalreflexion am Übergang Flüssigkeit/Glas. Da die Kapillaren eine zylindrische Oberfläche haben, gilt diese einfache Formel allerdings nur für Lichtstrahlen, die durch die Mitte der Kapillare laufen. Für alle anderen Lichtstrahlen gilt in zylinderförmigen Kapillaren die folgende Formel:

$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{n^2 - \rho^2 \sin^2\phi}}{\sqrt{1 - \rho^2 \sin^2\phi}} \tag{4.2}$$

mit $n = \frac{n_1}{n_2}$.

Sie ist abhängig von den Brechungsindizes und zusätzlich vom Ort, an dem der Strahl erzeugt wird und der Richtung, in die er emittiert wird. Dabei ist der Ort durch den Abstand vom Mittelpunkt ρ und die Richtung durch den azimutalen Winkel ϕ und den polaren Winkel θ gegeben (siehe Abbildung 4.6) [25].

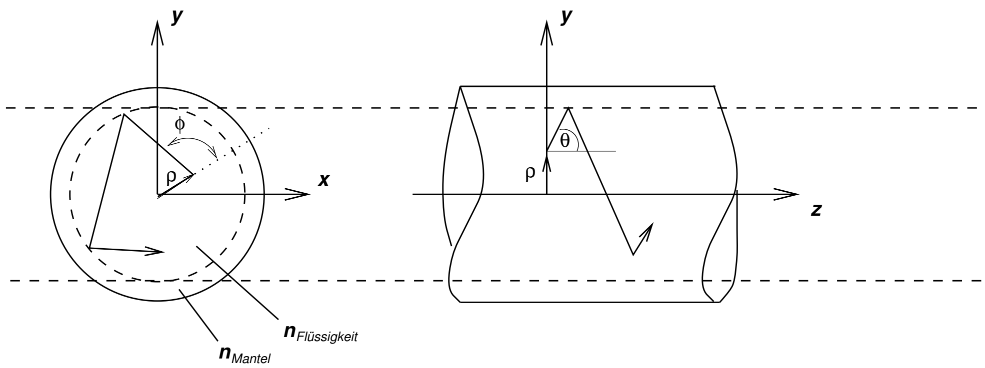


Abbildung 4.6: *Projektionen einer Kapillare, Definition des Abstandes ρ und des Winkels ϕ zur Festlegung des Ortes und der Richtung eines emittierten Lichtstrahls [25]*

Definiert man die Wahrscheinlichkeit, erzeugte Photonen einzufangen, als Verhältnis des gesamten emittierten Lichtes zu dem durch Totalreflexion am Übergang Flüssigkeit/Glas in den Kapillaren eingefangenen Anteil des Lichtes, so wird dies durch die Formel

$$\epsilon = \frac{1}{3}\int_0^1 \rho d\rho \int_0^{2\pi} (1 - \cos\theta_c) d\phi \qquad (4.3)$$

beschrieben. Hieraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 15% für den Einfang von Lichtstrahlen [25].

4.2.2 Abklinglänge des Szintillationslichtes

Bei der Lichtleitung in Kapillaren entstehen durch verschiedene Effekte Verluste. Sie hängen zum einen von der Güte der Kapillaren ab; diese kann die Lichtleitung durch Unebenheiten am Flüssigkeit/Glasübergang oder auch durch Krümmungen und Verzerrungen der Kapillaren einschränken. Zum anderen stellen Verunreinigungen ein großes Problem für organische Flüssigszintillatoren dar. Fremdmoleküle, die im Szintillator vorhanden sind, können mit angeregten Molekülen zusammenstoßen und dabei das Szintillatormolekül abregen, ohne daß es zur Emission von Licht kommt (*Quenching*). Eine besonders häufig vorkommende Verunreinigung dieser Art ist Sauerstoff ("Sauerstoff-*Quenching*"). Durch diese Verluste breitet sich im Szintillator erzeugtes Licht nicht beliebig weit in den Kapillaren aus, sondern wird nach einer gewissen Zeit abklingen. Um diese Abklinglänge des Szintillationslichtes zu messen, wurden 1994 Testmessungen in einem 5 GeV-Pion-Strahl gemacht. Hierbei ergab sich eine Abklinglänge von 3,4 m [22].

4.2.3 Füllen der Kapillaren

Um das gleichmäßige Füllen von Kapillaren mit etwa 20 μm innerem Durchmesser zu gewährleisten und gleichzeitig die Verunreinigung des Szintillators möglichst gering zu halten, wurde eine spezielle Füllmethode entwickelt. Hierbei wird der Kontakt mit Sauerstoff oder organischem Material gänzlich vermieden. Der Aufbau der hierzu benutzten Apparatur ist in Abbildung 4.7 dargestellt.
Im ersten Schritt werden mögliche Verunreinigungen entfernt. Hierzu werden die Kapillaren mit Argon "durchflutet". Außerdem kann mit einer Quirlvorrichtung im Vorratsgefäß der noch im Szintillator enthaltene Sauerstoff entfernt werden. Von dort wird die Szintillatorflüssigkeit mittels einer peristaltischen Pumpe in einen Dewar im Kreislauf gepumpt. Im zweiten Schritt der Füllprozedur wird mit Argon ein Überdruck im Dewar erzeugt, der die Flüssigkeit durch die Kapillaren drückt. Am Ende der Kapillaren wird der Szintillator mit einem zweiten Behälter aufgefangen. Das überschüssige Argon wird mit einem Ballon aufgefangen. Die Szintillatorflüssigkeit wird zurück in das Ausgangsgefäß gepumpt und von dort wieder durch die Kapillaren gedrückt. Durch diesen geschlossenen Kreislauf ist es möglich, die Flüssigkeit mehrere Stunden lang durch die Kapillaren zu pumpen und so Gasblasen, die in den Kapillaren entstehen können, zu entfernen. Während des Füllvorgangs kann die Güte der Füllung getestet werden, indem die Kapillaren von einer Seite beleuchtet und an der anderen Seite mit einem Mikroskop betrachtet werden. Kapillaren, in denen noch Blasen vorhanden sind, erscheinen schwarz.

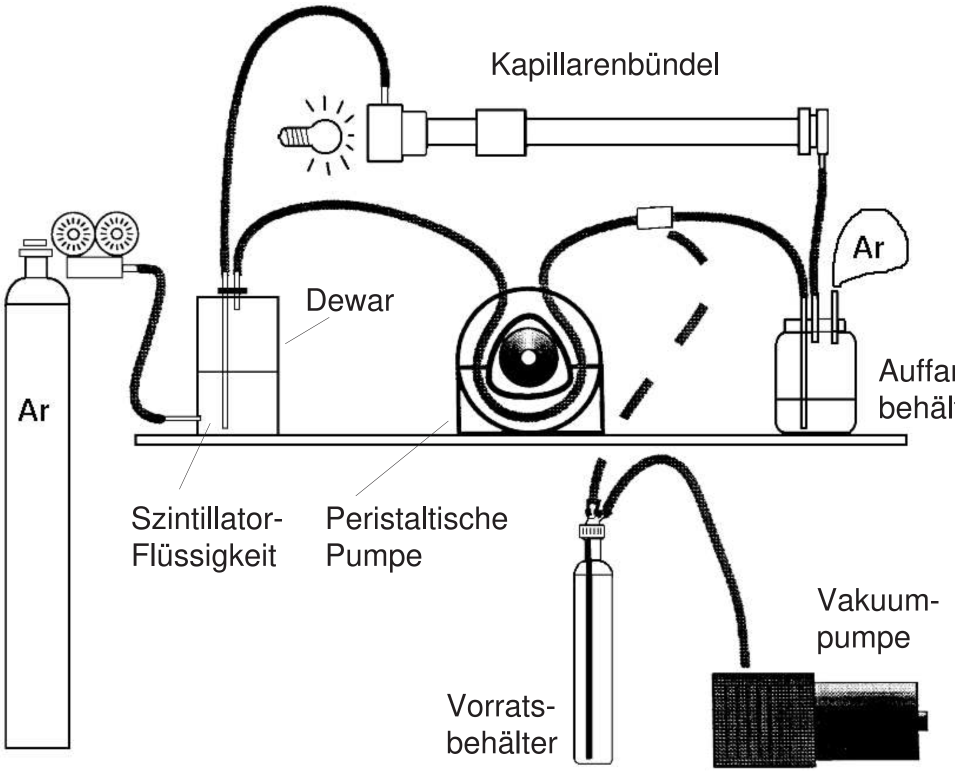


Abbildung 4.7: *Schematischer Aufbau zum Füllen der Kapillaren: Mit der Vakuumpumpe wird die Luft aus dem Vorratsbehälter gepumpt. In dem Vorratsbehälter selbst befindet sich eine Quirlvorrichtung, mit der noch im Szintillator enthaltener Sauerstoff entfernt werden kann. Die Szintillatorflüssigkeit wird mittels einer peristaltischen Pumpe in den Behälter im Kreislauf gepumpt. Durch das Argon wird in diesem Behälter ein Überdruck erzeugt, der die Flüssigkeit durch die Kapillaren drückt. Am Ende der Kapillaren wird der Szintillator in einem zweiten Behälter aufgefangen. Das überschüssige Argon kann mit einem Ballon aufgefangen werden. Die Szintillatorflüssigkeit wird zurück in das Ausgangsgefäß gepumpt und kann von dort wieder durch die Kapillaren gedrückt werden. Die Güte der Füllung kann bestimmt werden, indem das Bündel auf der einen Seite beleuchtet wird und die Lichtausbeute am anderen Ende betrachtet wird. Dieser Test ist schon während der Füllprozedur möglich.*

Dieser Aufbau hat mehrere Vorteile:

- nahezu keine Verluste an Szintillatorflüssigkeit und Argon durch geschlossenen Kreislauf
- sehr große Reinheit der Szintillatorflüssigkeit
- Möglichkeit des direkten Tests der Güte der Füllung

Mit einem ähnlichen Aufbau ist es auch möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Atmosphären während des Pumpvorganges auf die Lichtausbeute des Szintillators zu untersuchen. Die besten Ergebnisse werden im Vakuum erzielt, allerdings ist dies experimentell nur schwer realisierbar. Ähnlich gute Erfolge wurden mit einer Argon- oder Neonatmosphäre erzielt, durch die sich die Lichtausbeute des Szintillators um 27% im Vergleich zu Luft erhöht. In Abbildung 4.8 ist die unterschiedliche Lichtausbeute für verschiedene Atmosphären dargestellt [24].

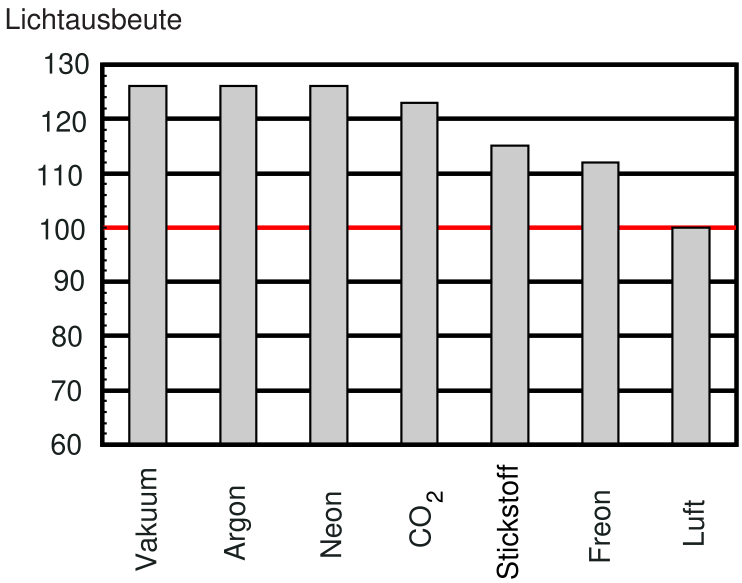


Abbildung 4.8: *Lichtausbeute des Szintillators in verschiedenen Atmosphären, normiert auf die Lichtausbeute in Luft*

4.3 Auslese

Das in den Kapillaren erzeugte Licht wird mittels einer optoelektronischen Auslesekette "verstärkt" und detektiert. Für den ersten Prototypen ist die Auslese mit einem CCD-Chip realisiert. Da nur wenige Photonen in den Kapillaren erzeugt werden, muß das Signal zunächst verstärkt werden, bevor es ausgelesen werden kann. Für den zweiten Prototypen wurde ein in der Kollaboration entwickelter "EBCCD"- Bildverstärker benutzt, der gleichzeitig zur Verstärkung und Auslese dient. Er erzielt ein deutlich besseres Signal/Rausch-Verhältnis und eine bessere Auflösung.

4.3.1 Auslesekette des ersten Prototypen

Um möglichst viele Photonen am ersten Bildverstärker (*Image Intensifier, II*) der Auslesekette nachzuweisen, muß dieser eine hohe Quanteneffizienz besitzt. Da nur ein verkleinernder Bildverstärker mit dieser Eigenschaft vorhanden war, wird das Bild zunächst verkleinert und anschließend mit einem zweiten Bildverstärker wieder vergrößert. Die Quanteneffizienz der gesamten Kette hängt von der des ersten Bauteils ab; sie liegt in diesem Fall bei 23%. Zur Hauptverstärkung dient ein Bildverstärker mit *Micro-Channel-Plate* (MCP), der eine Elektronenvervielfachung um den Faktor 1000 erreicht. Das entspricht im Vergleich mit den anderen benutzten Bildverstärkern einer etwa 100-fach besseren Verstärkung.

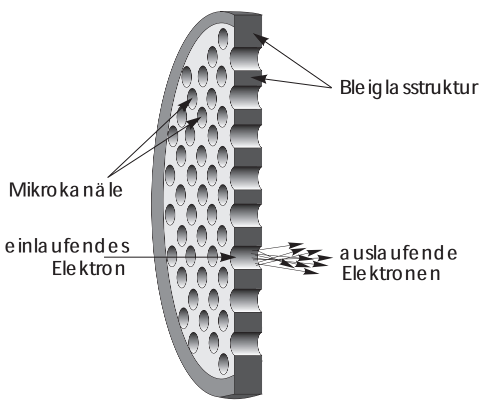


Abbildung 4.9: *Schematische Darstellung eines MCPs. Er besteht aus einer Bleiglasplatte, in die feine Kanäle geätzt werden. Diese haben einen Durchmesser von 10 bis 100 μm und sind etwa 40- bis 100-fach so lang.*

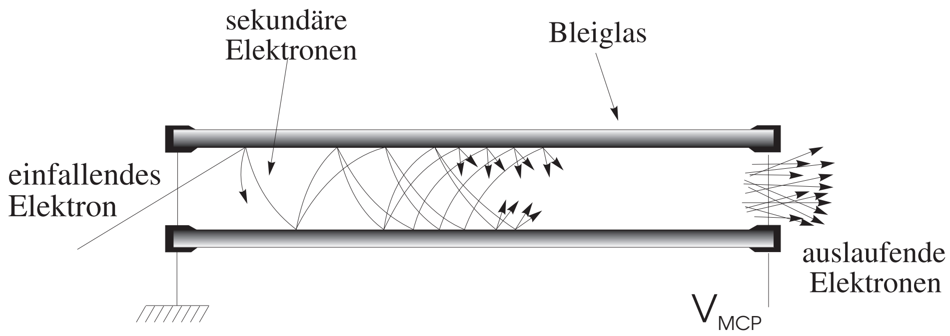


Abbildung 4.10: *Schematische Darstellung der Funktionsweise eines MCPs. Das einfallende Elektron schlägt aus der Kanalwand Sekundärelektronen aus, die wiederum beschleunigt werden und ihrerseits weitere Elektronen auslösen können. Dieser Prozeß wiederholt sich mehrfach, so daß am Ende des Kanals pro einfallendem Elektron etwa 1000 Elektronen unter unterschiedlichen Winkeln austreten.*

Ein solcher MCP besteht aus einer Bleiglasplatte, in die sehr feine parallele Kanäle von 10 bis 100 μm Durchmesser geätzt werden (Abb. 4.9). Durch geeignete Bedampfung der Platte wird es möglich, ein elektrisches Feld so an die Kanäle anzulegen, daß diese als kontinuierliche Dynode wirken (Abb. 4.10).

Auf diese Weise kann eine hohe Elektronenvervielfachung erreicht werden, die Auflösung wird dagegen durch den MCP stark herabgesetzt. Begrenzend wirkt hier, daß von einem Elektron mit einer bestimmten Bewegungsrichtung sehr viele Elektronen erzeugt werden, die unter unterschiedlichen Winkeln aus dem MCP austreten (siehe Abbildung 4.10). Die einzelnen Bildpunkte werden auf diese Weise aufgeweitet, wodurch sich die Bildauflösung deutlich verschlechtert. Ein weiteres Problem ist das sogenannte *Backscattering* (siehe Abbildung 4.11). Trifft ein einfallendes Elektron nicht auf einen der Kanäle sondern auf das Bleiglas dazwischen, kann es zurückgestreut und so wieder auf den MCP beschleunigt werden, daß es in einem anderen Kanal verstärkt wird. Beide Fehlerquellen sind abhängig von der Anzahl und Größe der Kanäle. Der in unserem Fall benutzte MCP begrenzt die Ortsauflösung auf etwa 50 μm.

Vorteil des MCPs ist neben der großen Verstärkung die Möglichkeit, die gesamte Auslesekette zu steuern. Hierzu wird das Feld zwischen MCP und Photokathode so variiert, daß die Elektronen entweder zum MCP hin angezogen oder von ihm abgestoßen werden. Auf diese Weise ist es möglich, bestimmte Ereignisse zu selektieren.

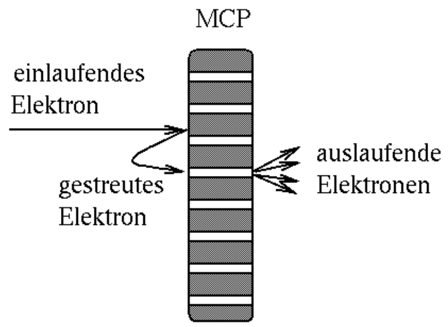


Abbildung 4.11: *Prinzip des Backscattering: Ein einfallendes Elektron trifft nicht auf einen der Kanäle des MCPs, sondern auf das umgebende Bleiglas. Es wird zurückgestreut und anschließend wieder auf den MCP beschleunigt. So kann es in einem "falschen" Kanal verstärkt werden.*

Hinter dem MCP muß das Bild auf die Größe des CCD-Chips verkleinert werden. Insgesamt ergibt sich eine Auslesekette aus fünf Teilen (siehe Abbildung 4.12). Die mit dieser Auslesekette verstärkten Signale werden von einem *Megapixel CCD-Chip* mit einer Pixelgröße von $19{\times}19\ \mu\mathrm{m}^2$ ausgelesen, dessen gesamte Fläche als Bildbereich benutzt wird (*Full-Frame CCD*).

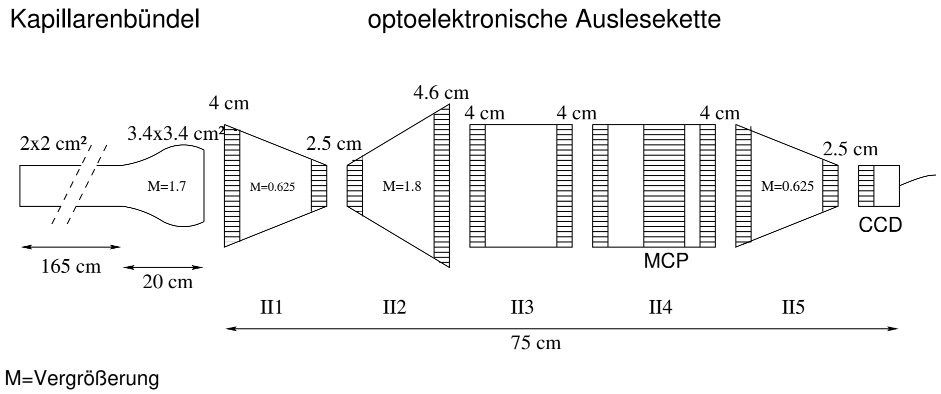


Abbildung 4.12: *Schematische Abbildung der optoelektronischen Auslesekette des ersten Prototypen. Sie besteht aus fünf Bildverstärkern (Image Intensifier, II), die Hauptverstärkung macht der Bildverstärker mit MCP.*

4.3.2 Auslese mit EBCCD-Bildverstärker

Im Rahmen der RD46-Kollaboration wurde eine neue Auslesekette entwickelt, deren wesentlicher Bauteil ein *Electron bombarded CCD (EBCCD)*-Bildverstärker ist. Ausführliche Erläuterungen zur Herstellung und Funktionsweise eines solchen EBCCD finden sich in [34].
Für den in der Kollaboration entwickelten EBCCD wurde ein CCD mit 1024×1024 Pixeln und einer Pixelgröße von 13,1×13,1 μm^2 benutzt. Der CCD besteht aus zwei Zonen mit 512×1024 Pixeln, die jeweils durch ein Ausleseregister ausgelesen werden.

Herkömmliche Bildverstärker bestehen aus einer Photokathode, in der Elektronen erzeugt werden, und einem Phosphorschirm, auf den die Elektronen beschleunigt werden und in dem sie eine vervielfachte Anzahl von Photonen erzeugen. In dem Bildverstärker mit EBCCD ersetzt der CCD den Phosphorschirm, so daß die Rückseite des CCDs den von der Photokathode kommenden Elektronen zugewandt ist. Die rückseitige Bestrahlung des CCDs wird gewählt, da die Elektrodenstrukturen der Vorderseite schon durch einen kurzen Beschuß mit Elektronen zerstört würden. Der CCD muß zusätzlich auf etwa 10 μm verdünnt werden, um mögliche Rekombinationsverluste der Elektronen gering zu halten. Durch Änderung des von der Fokussierelektrode erzeugten Feldes, kann, wie in der herkömmlichen Auslesekette durch den MCP, die Auslesekette getriggert werden. Das Feld wird durch einen Spannungsstoß von 1,6 kV, dessen Länge nur durch die Elektronik begrenzt wird und bis zu 100 ns kurz sein kann, variiert.

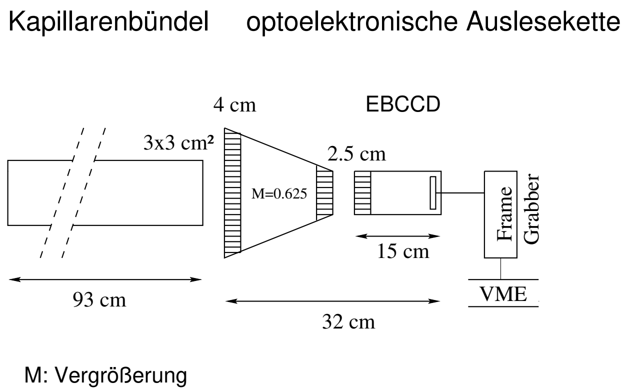


Abbildung 4.13: *Schematische Darstellung der neuen Auslesekette mit EBCCD-Bildverstärker. Für diese Auslesekette ist lediglich ein zusätzlicher Bildverstärker nötig. Im Vergleich zur Auslesekette mit MCP (Abb. 4.12) ist sie deutlich kompakter.*

Es wurde eine schnelle rauscharme *Front-End*-Elektronik von INFN-Dubna zur Kontrolle und Steuerung der EBCCD-Auslese entworfen. Diese ermöglicht es, entweder mittels eines einzelnen Ausleseregisters den gesamten CCD oder gleichzeitig beide Zonen des CCDs in unterschiedlicher Richtung durch zwei Ausleseregister auszulesen. Die Auslese erfolgt mit einer Taktrate von 10 MHz, die Auslesezeit eines Bildes beträgt 104 ms mit einem Ausleseregister bzw. 52 ms bei Nutzung beider Ausleseregister.
Vorteile des EBCCD-Bildverstärkers sind:

- Variationsmöglichkeit der Bildvergrößerung von M=0,62 - 1,3
- hohe Taktraten
- hohe Verstärkung, etwa 4000 Elektronen pro Photoelektron bei einer Spannung von 15 kV mit geringen Fluktuationen in der Verstärkung [26]
- Möglichkeit des Nachweises einzelner Photoelektronen (Abbildung 4.14) [26]
- hohe örtliche Auflösung von 13 μm bzw. 26 μm auf dem CCD, abhängig von der betrachteten Richtung (Abbildung 4.15) [27]
- Vermeidung unnötiger Konversion von Photonen in Elektronen und wieder in Photonen
- gutes Signal/Rausch-Verhältnis besser als 10 [26]

Die Auslesekette des neueren Kapillartargets besteht aus einem herkömmlichen verkleinernden Bildverstärker mit hoher Quanteneffizienz und einem Phosphorschirm, der das Bild lang genug hält, bis der Trigger das Signal zum Auslesen gibt. Auf diesen Bildverstärker folgt der oben beschriebene Bildverstärker mit Megapixel-EBCCD.

Vor jeder Datennahme mit dieser Auslesekette werden zunächst 20 *Dark Frames* aufgenommen. Hierzu wird durch einen Pulser das Signal zur Auslese gegeben, ohne daß der CCD zuvor beleuchtet wurde. Die Daten werden Punkt für Punkt gemittelt und dann als *Background Frame* gespeichert. Dieser Untergrund wird von den aufgenommenen Bildern Pixel für Pixel subtrahiert. Das ist notwendig, da der Untergrund nicht über die gesamte Fläche des CCDs gleichförmig ist. Zusätzlich zu dieser *Online* Hintergrundsubtraktion wird ein Schwellwert an die Pulshöhe gesetzt, der dafür sorgt, daß das Rauschen unterdrückt wird, und somit die zu speichernde Datenmenge verringert.

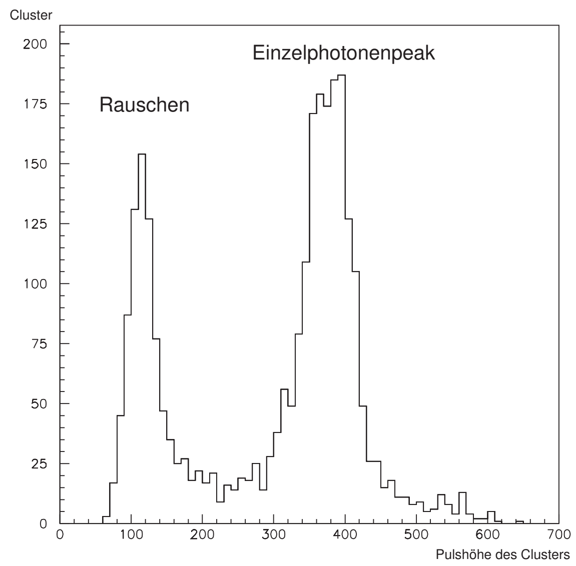


Abbildung 4.14: *Mit dem EBCCD ist der Nachweis einzelner Photoelektronen möglich. Sie erscheinen als Peak im Pulshöhenspektrum und sind deutlich vom Untergrundrauschen zu unterscheiden. [26]*

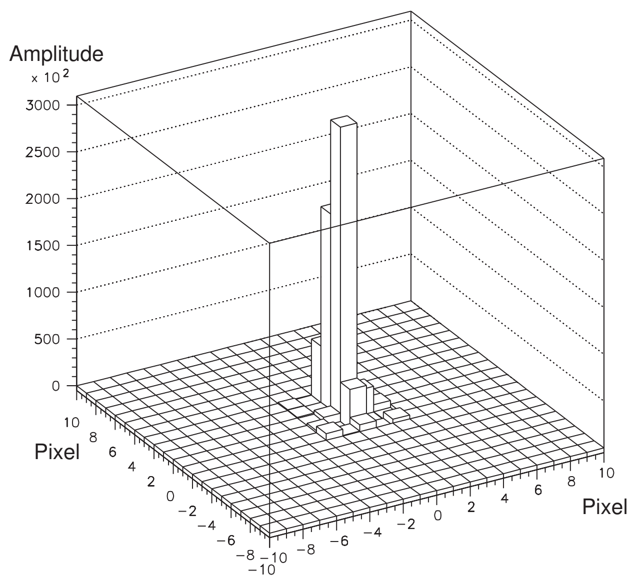


Abbildung 4.15: *Cluster, der vom EBCCD aufgenommen wurde. Die Pixelgröße entspricht 13,4×13,4 μm^2. In x-Richtung hat er eine Halbwertsbreite von 13 μm, in y-Richtung ist er etwas verbreitert (FWHM=26 μm) und leicht asymmetrisch. Dieser Effekt ist nicht auf die Ortsauflösung der Elektronenwolke im Siliziumchip sondern auf die CCD-Auslese bei hohen Auslesefrequenzen zurückzuführen [26].*

4.4 Experimenteller Aufbau

Eine wichtige Überlegung bei den Tests eines Detektors aus Kapillarenbündel und optoelektronischer Auslesekette in einem Neutrinostrahl ist die Wahl der Orientierung der Kapillaren zum Neutrinostrahl. Hierzu gibt es zwei prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten:

senkrecht zum Neutrinostrahl parallel zum Neutrinostrahl

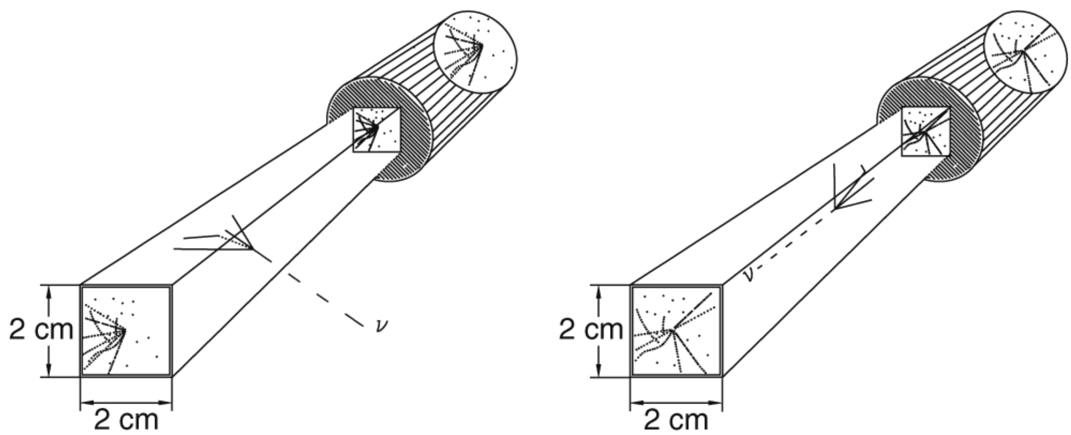


Abbildung 4.16: *Orientierung des Kapillartargets zum Neutrinostrahl, schematische Darstellung nachzuweisender Ereignisse. Links: Ausrichtung des Bündels senkrecht zum Strahl, rechts: Ausrichtung parallel zum Strahl*

Beide Ausrichtungen haben verschiedene Vor- und Nachteile. In Abbildung 4.16 ist dargestellt, wie Neutrinoereignisse vom Kapillartarget erfaßt werden können, abhängig von der Orientierung des Kapillartargets zum Neutrinostrahl.

Es zeigt sich, daß bei paralleler Ausrichtung zum Strahl fast alle Teilchen einen Impuls hauptsächlich in Vorwärtsrichtung bekommen. Es entsteht ein "Stern" um den Vertex herum. Die Spuren sind hierdurch deutlich voneinander zu unterscheiden. Außerdem wird ein möglicher zweiter Zerfallsknick in dieser Darstellung deutlicher sichtbar. Nachteilig wirkt sich bei dieser Orientierung aus, daß Teilchen, die nahezu gerade durch den Detektor laufen, nur sehr kurze Spuren hinterlassen.
Die Argumente für eine Orientierung senkrecht zum Strahl sind entsprechend: Die Teilchen legen nur eine sehr kleine Strecke innerhalb des Targets zurück, wodurch Mehrfachstreuungen verhindert werden. Nachteilig ist hierbei, daß die Spuren fächerförmig auseinanderlaufen, wodurch sie näher beieinander liegen und so

schwerer voneinander zu separieren sind. Auch sekundäre Zerfälle können durch diese Projektion verdeckt werden.

Beide oben beschriebenen Prototypen waren im CERN Neutrinostrahl in Betrieb. Sie wurden direkt vor der Emulsion des CHORUS-Experiments installiert. Für das Target mit konventioneller Auslese wurde eine Orientierung senkrecht zum Strahl gewählt. Das durch EBCCD ausgelesene Target ist längs zum Strahl ausgerichtet (Abb. 4.17).

Um die Rekonstruktionsmöglichkeit von Vertizes außerhalb des Kapillartargets zu untersuchen, wurde zusätzlich ein 1,5 m langes, 2 cm breites und 0,6 cm starkes Stück Blei als Hilfstarget direkt vor dem älteren Kapillartarget installiert.

Mit dem Kapillartarget und dem CHORUS-Detektors sollen dieselben Ereignisse erfaßt werden, um sie miteinander zu vergleichen. Trigger entscheiden, ob ein Ereignis aufgenommen werden soll und sorgen dafür, daß beide Detektoren zum gleichen Zeitpunkt Ergebnisse aufzeichnen.

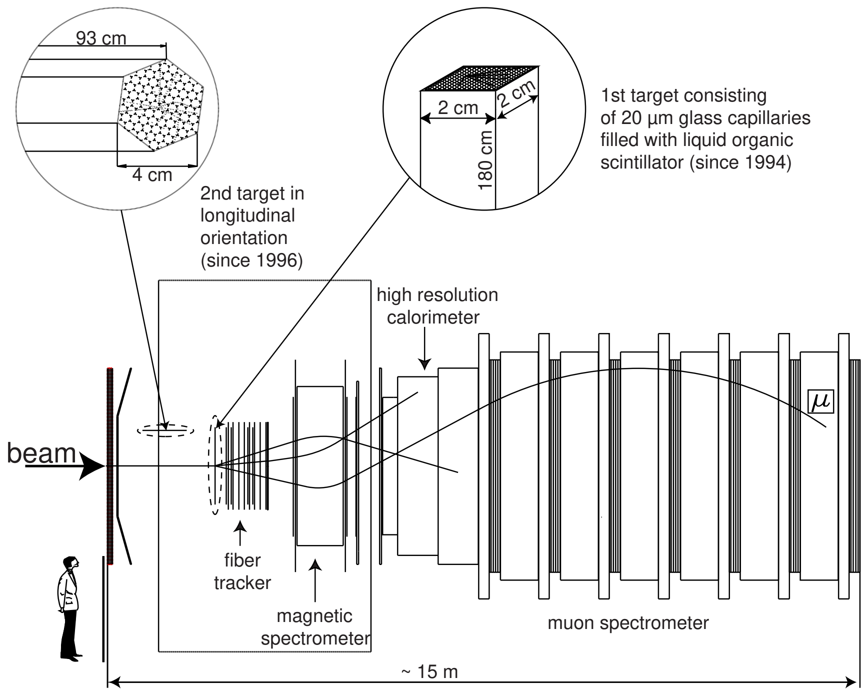


Abbildung 4.17: *Schematische Darstellung des CHORUS-Detektors. Vor der Emulsion und den Spurerkennungsdetektoren von CHORUS wurden die beiden Prototypen der Kapillartargets in unterschiedlichen Orientierungen installiert.*

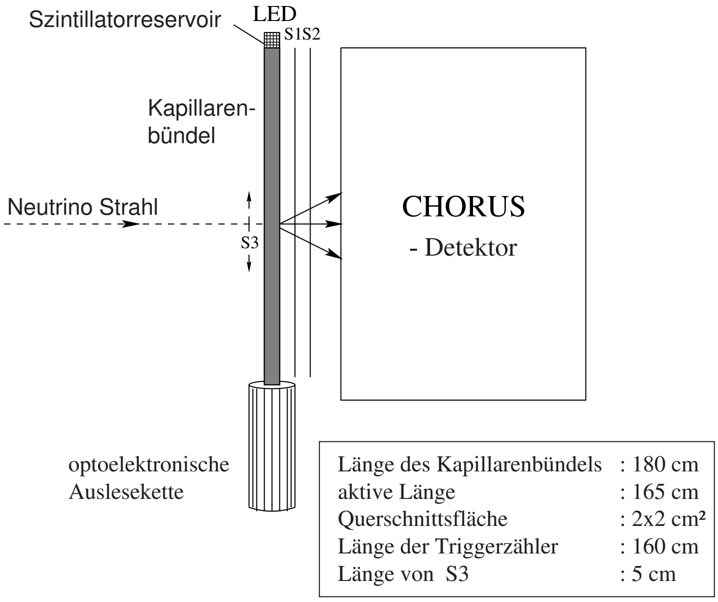


Abbildung 4.18: *Hinter dem Kapillartarget, hier gezeigt der ältere Prototyp, befinden sich zwei koinzident geschaltete Szintillationszähler S1 und S2. Zusätzlich ist ein beweglicher Zähler S3 vor dem Kapillartarget angebracht. Dieser wird für Messungen erforderlich, in denen der Ort des Ereignisses in z-Richtung benötigt wird z.B. Messung der Abklinglänge.*

4.5 Trigger

Die Aufgabe des Triggers besteht in der Selektion und Steuerung der Auslese der Ereignisse. Je nachdem welche Ereignisse aufgenommen werden sollen, wird die Koinzidenz verschiedener Signale überprüft, und dann ein Signal an den MCP bzw. an den EBCCD gegeben, das deren *Gate* für eine gewisse Zeit öffnet. Das Öffnen des *Gates* sorgt dafür, daß die Daten weitergeleitet und anschließend ausgelesen werden.

Die Trigger sind für beide Kapillartargets ähnlich aufgebaut. Hinter den Kapillartargets befinden sich jeweils zwei Szintillationszähler, S1 und S2. Für den ersten Prototypen wurde zusätzlich ein dritter beweglicher Szintillationszähler, S3, vor dem Kapillartarget installiert (Abb. 4.18). Dieser wird für Messungen erforderlich, in denen der Ort des Ereignisses in z-Richtung benötigt wird (z.B. Messung der Abklinglänge).

Es gibt zwei Konfigurationsmöglichkeiten des Triggers:

Global Trigger
Dieser Modus wird benutzt, um Neutrinoereignisse oder Myonenspuren zur Anbindung des Kapillartargets an den CHORUS-Detektor aufzunehmen. Mit dem neueren Prototyp wurden bisher nur Neutrinoereignisse aufgenommen, da sich das *Setup* dieses Kapillartargets nicht zur Anbindung an den CHORUS-Detektor eignet. Die Triggerlogik ist in drei Stufen unterteilt. Zunächst wird ein Koinzidenzsignal der Szintillationszähler S1 und S2 (Abb. 4.18) benötigt, das zu einer zweiten Triggerentscheidung führt. Diese ist erfolgreich, wenn zusätzlich zum Koinzidenzsignal das *Spill*signal, gegeben ist und das Kapillartarget bereit ist auszulesen (Antitotzeit). Dieses Signal wird zum CHORUS-Trigger weitergeleitet. Gleichzeitig wird das *Gate* des MCP für 1 μs geöffnet. Dies ist notwendig, da der Trigger 850 ns auf eine Antwort vom CHORUS-Trigger wartet und das Signal in dieser Zeit schon zum Teil abklingt.

Sollen Neutrinoereignisse aufgenommen werden, wird im CHORUS-Detektor überprüft, ob die Bedingungen für ein Neutrinoereignis gegeben sind. Myonereignisse, die eine direkte Auslese des CHORUS-Detektors bewirken, müssen um einen Faktor 2^7 herunterskaliert werden, da die Rate der Myonereignisse sehr hoch ist. Dies ist notwendig, um die Totzeit im CHORUS-Detektor zu begrenzen, die durch die Aufnahme von Kapillartarget-Daten entsteht. Wenn der CHORUS-Trigger ein Signal zurückliefert, startet dieses die Auslese des CCD. Ansonsten wird der CCD zurückgesetzt, um für die Aufnahme neuer Daten bereit zu sein. Gleichzeitig werden die Daten des CHORUS-Detektors ausgelesen. Ein Schema des *Global Trigger* ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

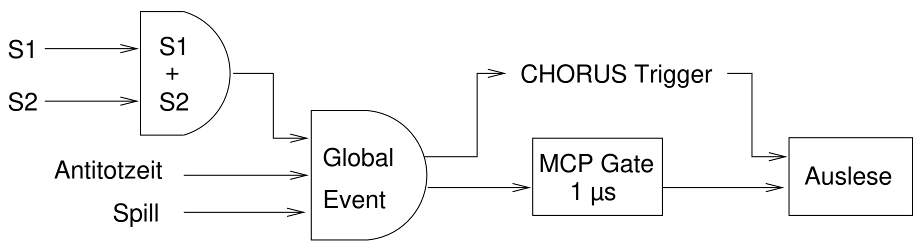


Abbildung 4.19: *Schema des Global Trigger*

Local Trigger

Dieser dient zur Datennahme im *Stand-alone* Betrieb, wenn die Daten nicht gleichzeitig auch vom CHORUS-Detektor aufgenommen werden sollen. Diese Messungen werden z.B. gemacht, um die Abklinglänge des Szintillators zu bestimmen und so Alterungsprozesse des Szintillators zu beobachten. Für die Aufnahme von Myonspuren muß zusätzlich zu S1 und S2 auch der bewegliche Zähler S3 (Abb. 4.18), der vor dem Bündel installiert ist, ein Signal in Koinzidenz geben. Hierdurch wird die Ortsbestimmung des Ereignisses längs des Targets ermöglicht. Gleichzeitig mit den Signalen von S1, S2 und S3 wird die Antitotzeit überprüft. Um Verzerrungen in den optoelektronischen Bauteilen der Auslesekette zu bestimmen, wird das Bündel am oberen Ende mit einer Leuchtdiode über ein Gitter beleuchtet (siehe 5.2). Ein Pulser, der die Leuchtdiode auslöst, dient gleichzeitig als Triggersignal für die Auslese.

Wird ein Ereignis vom *Global* oder *Local Trigger* akzeptiert, startet die Auslese. Hierzu wird das *Gate* des MCPs bzw. des EBCCDs für 100 μs geöffnet, die Auslese des CCDs erfolgt 350 ns später. Insgesamt hat man durch die Auslese eine Totzeit von 140 ms. Ist der *Global Trigger* aktiv, werden außerdem gleichzeitig die Daten des CHORUS-Detektors ausgelesen. Die Daten werden in das ZEBRA-Datenbankformat umgewandelt. In dieser Form stehen sie zur Online-Analyse zur Verfügung und werden außerdem zur späteren Datenanalyse auf Magnetbändern (*Tapes*) gespeichert. Da die CHORUS- und die Kapillartarget-Daten nicht auf die gleichen Tapes geschrieben werden, erhalten alle Ereignisse einen sogenannten *Event Tag*, eine achtstellige Zufallszahl. Über diese Zahl sowie über den Vergleich des Datums und des Zeitpunktes, die auch für jedes Ereignis erfaßt werden, ist es möglich, zusammengehörige Ereignisse später wieder als solche zu identifizieren.

Kapitel 5

Software

Um die Daten, die mit einem Detektor aufgenommen wurden, zu nutzen, sind recht umfangreiche Programme nötig, die die Daten analysieren. Diese stehen sowohl für den CHORUS-Detektor als auch für das Kapillartarget zur Verfügung. Sie werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert.

5.1 Das ACTAR-Programm

Für die Analyse der Daten des Kapillartargets wird das Programm ACTAR (von:*ACtive TARget*) benutzt. Im folgenden soll nur ein kurzer Überblick über dieses Programm gegeben werden, genauere Informationen finden sich in [33]. ACTAR kann über eine Datenkarte gesteuert werden, auf der spezifiziert wird, um welches Kapillartarget es sich handelt und welche Art der Analyse durchgeführt werden soll (z.B. Vertexrekonstruktion, Einzelspuranalyse). Das Programm liest die in Form von ZEBRA-Datenbänken[1] abgespeicherten Daten des CCDs ein. Diese Bänke enthalten die Ortskoordinaten und die Pulshöhe des detektierten Signals für alle Pixel, deren Signalhöhe über einer gewissen Grenze (*Online threshold*) liegt. Insgesamt werden typischerweise etwa 50 KByte pro Ereignis aufgezeichnet, was den Informationen von etwa 1500 Pixeln entspricht.

Um aus diesen Informationen die Spuren im Target zu bestimmen und die Ereignisse zu rekonstruieren, durchläuft das Programm verschiedene nachfolgend beschriebene Schritte:

[1]Das ZEBRA-System wurde entwickelt und geschrieben, um unter Fortran 77 dynamische Datenstrukturen zu ermöglichen, genauere Informationen finden sich in [29].

Filtern der Rohdaten

An dieser Stelle kann (gesteuert über die Datenkarte) eine zusätzliche Grenze für die Mindestsignalhöhe angebracht werden, um den Untergrund zu unterdrücken. Außerdem werden hier alle aktiven Pixel[2] herausgefiltert, die keinen oder nur sehr wenige aktive Nachbarn haben. Die Mindestanzahl zusammenhängender Pixel, die für die weitere Analyse benutzt werden, wird ebenfalls über die Datenkarte spezifiziert.

Die in den Kapillaren erzeugten Signale werden erst nach einer 10^4 bis 10^6-fachen Verstärkung detektiert. Jedes einzelne Elektron, das an der Photokathode des ersten Bildverstärkers erzeugt wurde, ist an dem CCD daher als Häufung von Punkten, sogenannten Clustern, zu sehen.

Clustering

Um die an der ersten Photokathode erzeugten Elektronen zu rekonstruieren, wird unter den verbleibenden Pixeln nach Regionen mit nebeneinander liegenden aktiven Pixeln gesucht. Jeder dieser Cluster entspricht in der Regel einem Photoelektron an der ersten Photokathode. An dieser Stelle werden Auswahlkriterien (minimale Anzahl von Pixeln pro Cluster und minimale Gesamtpulshöhe) für die Cluster verwendet, die wiederum über die Datenkarte gesteuert werden können. Die Cluster werden auf ihre Form hin untersucht. Weist ein Cluster mehrere Pulshöhenmaxima auf, deutet dies auf eine Überlagerung mehrerer Cluster hin und er wird nochmals in sogenannte *Subcluster* aufgespalten. Durch das Clustering kann die Datenmenge deutlich reduziert werden. Das ist notwendig, um die Analyse vieler Ereignisse in akzeptabler Zeit durchführen zu können. Der Nachteil dieser Methode ist, daß durch die starke Datenreduktion wichtige Informationen verloren gehen könnten. Für eine genaue Analyse einzelner Neutrinoereignisse sollte hier eine Methode verwandt werden, die die Daten weniger stark reduziert. In Abbildung 5.1 sind sowohl das CCD-Bild einer Spur sowie das Bild der gleichen Spur, das sich nach dem *Clustering* ergibt dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, daß die Datenmenge auf diese Weise stark reduziert wird, aber auch, daß schwächere Cluster zum Teil ganz verschwinden.

Verzerrungskorrektur

Durch die Bildverstärkerkette wird das im Kapillartarget erzeugte Bild vergrößert und auch leicht gekrümmt. Korrekturen, um diese Verzerrungen auszugleichen,

[2] Mit "aktive Pixel" bezeichnet man alle Bildpunkte, die ein Signal größer der geforderten Grenze aufweisen.

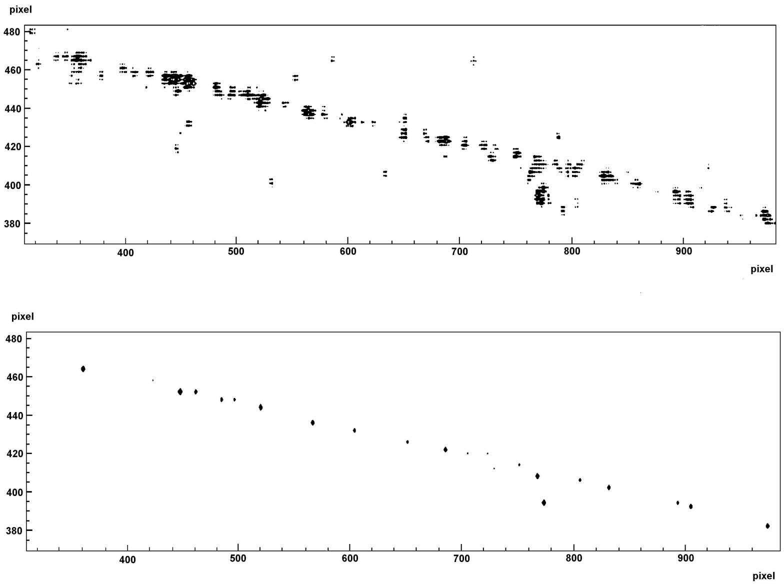


Abbildung 5.1: *Beispiel einer Spur im Kapillartarget. Das obere Diagramm zeigt das Bild der Spur, wie es von der CCD aufgenommen wurde. Das untere Diagramm zeigt die Cluster-Koordinaten der gleichen Spur.*

werden nun an die Koordinaten der Cluster angebracht. Näheres wird in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Spurrekonstruktion

Je nachdem welche Art von Ereignissen analysiert werden soll, wird ein *Single-track-fit* oder eine Vertexsuche mit anschließender Spurrekonstruktion ausgehend von dem gefundenen Vertex durchgeführt. Für Myonenspuren können mittels einer Projektion des Bildes senkrecht zum Strahl deutliche Maxima gefunden werden, die die Position der Spur angeben. Um dieses Maximum herum wird eine sogenannte *Track-road* definiert, ein Bereich von 150 μm, innerhalb derer ein linearer Fit an die mit ihrer Pulshöhe gewichteten Punkte angelegt wird. Ein Beispiel für eine solche Projektion ist in Abbildung 5.2 gegeben. Zur Analyse von Neutrinoereignissen wird ein Algorithmus zur Spurfindung benutzt, der auf einer Zirkularprojektion um den vorhergesagten Vertex basiert. Es ist bisher nicht möglich, mit diesem Programm auch sekundäre Vertizes zu identifizieren.

Mit diesen Rekonstruktionsalgorithmen erhält man eine Zweispurauflösung des Kapillartargets von 34 μm und eine Vertexauflösung von 15,7 μm parallel zur Strahlrichtung und 84 μm in Strahlrichtung. Die deutlich schlechtere Auflösung

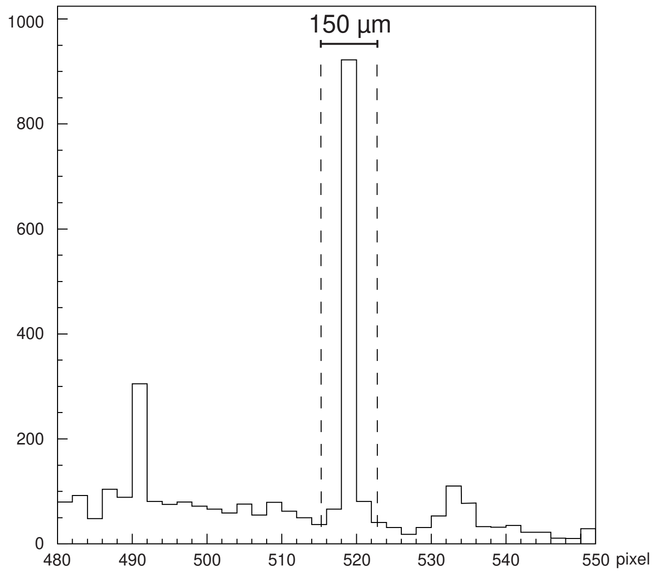


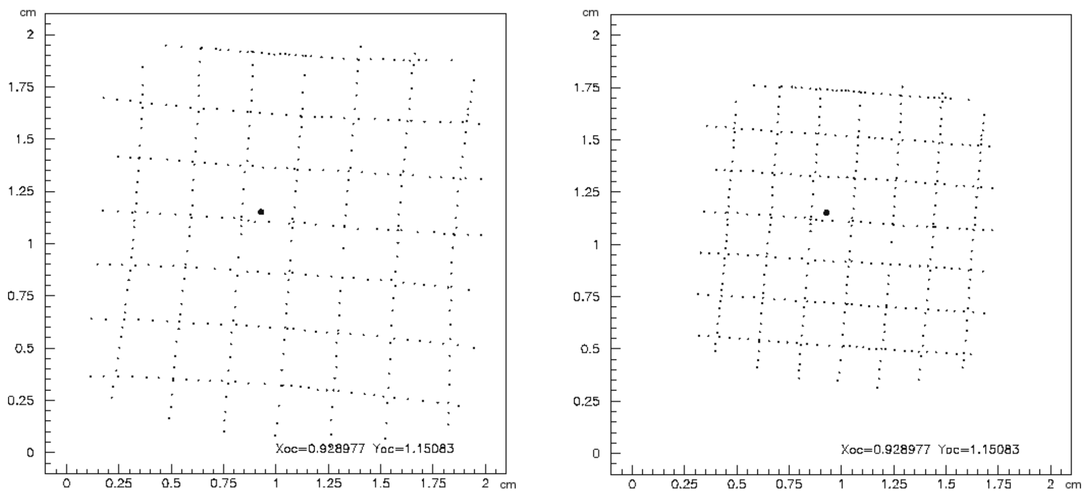
Abbildung 5.2: *Projektion des Bildes einer Myonspur auf die y-Achse. Aufgetragen sind die Punkte der Spur gewichtet mit ihrer Pulshöhe. Der deutliche Peak zeigt den Ort der Myonspur an. Alle Punkte innerhalb der Track-road von 150 μm werden für die Spurrekonstruktion benutzt.*

in Strahlrichtung rührt von der Tatsache her, daß die meisten Spuren nur einen kleinen Winkel zur Neutrinostrahl-Richtung aufweisen.

Die Ergebnisse können graphisch dargestellt oder in Form von ZEBRA-Bänken gespeichert werden. Durch die zusätzlich Übergabe einer ASCII-Datei mit Informationen über die zugehörigen CHORUS-Ereignisse ist es möglich, die Daten so in ZEBRA-Bänken abzuspeichern, daß sie gleichzeitig mit den zugehörigen Daten von CHORUS eingelesen und verarbeitet werden können.

5.2 Verzerrungskorrektur

Elektrostatische Bildverstärker, wie sie für die optoelektronische Auslesekette des Kapillartargets benutzt werden, verursachen Verzerrungen, die denen optischer Linsen ähneln. Um diese Verzerrungen und auch die Vergrößerung zurückrechnen zu können, müssen sie zunächst genau bestimmt werden. Dafür benötigt man am Eingangsfenster der Auslesekette einen Satz von Punkten, deren Abstände zueinander genau bekannt sind. Hierzu dient ein Referenzgitter mit 20 μm breiten



(a) Bild eines durch die Auslesekette verzerrten Gitters wie es vom CCD ausgelesen wird.

(b) Bild des selben Gitters nach der Verzerrungs- und Vergrößerungskorrektur. Dieses Bild entspricht dem im Bündel erzeugten Bild.

Abbildung 5.3: *Das durch die Auslesekette verzerrte Bild (a) muß so korrigiert werden, daß man das Originalbild, das im Kapillarenbündel erzeugt wurde (b), erhält.*

Linien in einem Abstand von 2 mm. Über dieses Gitter wird das Kapillartarget mit einer Leuchtdiode beleuchtet. Ein Beispiel eines derart erzeugten Bildes ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

Die Auswertung dieser Bilder erfolgt in zwei Schritten:

- Bestimmung des optischen Zentrums
- Bestimmung der Verzerrungsfunktion

Aufgrund der Ähnlichkeit der Verzerrungen zu denen optischer Linsen, können sie als radialsymmetrisch angenommen werden. Folglich muß es ein optisches Zentrum der Verzerrung geben. Ursprünglich parallele Geraden werden durch die Verzerrung zu einem Satz symmetrischer Kurven mit gemeinsamer Symmetrieachse. Bestimmt man zu unterschiedlichen Sätzen symmetrischer Kurven die Symmetrieachsen, so schneiden sich diese im optischen Zentrum. Ausgehend von diesem Punkt und mit den Informationen über das ursprüngliche Gitter werden nun die besten Parameter für die Verzerrungskorrektur bestimmt. Verschiedene Funktionen, die alle ähnliche Ergebnisse lieferten, wurden getestet [28]. Für die in ACTAR angewandten Korrekturen wird das kubische Polynom $ax^3 + bx^2 + cx$ benutzt. Mittels dieser Korrekturen konnten die Ergebnisse der Analysen deutlich verbessert werden. Die Effizienz für die Spurfindung stieg von 62% auf 83%, da durch die Auslesekette stark verzerrte Spuren mittels der Korrekturen "begradigt" und somit als Gerade gefittet werden können.

5.3 Das CHORAL-Programm

Zur *Offline* Datenanalyse der mit dem CHORUS-Detektor aufgenommenen Daten wird das CHORAL-Programm (*CHorus Offline Reconstruction and Analysis Library*) benutzt [31]. Es analysiert die Informationen aus allen Teildetektoren, fügt sie zusammen und stellt sie in Form von ZEBRA-Bänken zur Verfügung. So wird es möglich, die aufgenommenen Ereignisse zu rekonstruieren. Ein Beispiel eines vom CHORAL-Programm erzeugten Bildes eines Ereignisses zeigt Abbildung 5.4.

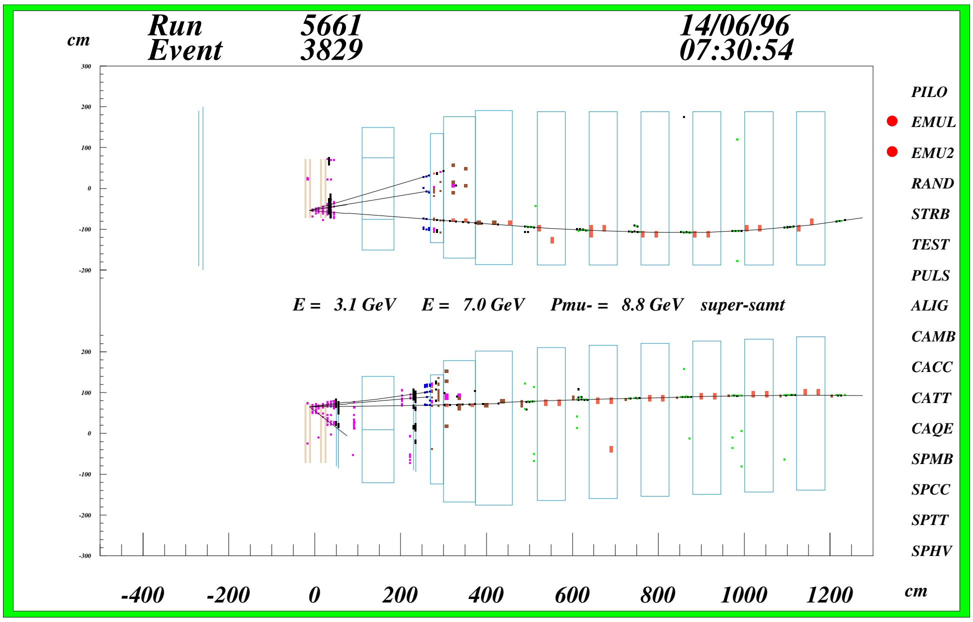


Abbildung 5.4: *Beispiel eines Ereignisses im CHORUS-Detektor. Die Darstellung enthält Informationen über den Ort der Teilchenspuren, über die Energie der entstandenen Myonen, sowie die in verschiedenen Detektorteilen deponierte Energie. Der obere Teil der Abbildung zeigt eine Projektion des erzeugten Bildes auf die x-y-Ebene, der untere Teil der Abbildung entspricht der Seitenansicht.*

Kapitel 6

Analyse der erfaßten Daten des Prototypen mit CCD-Auslese

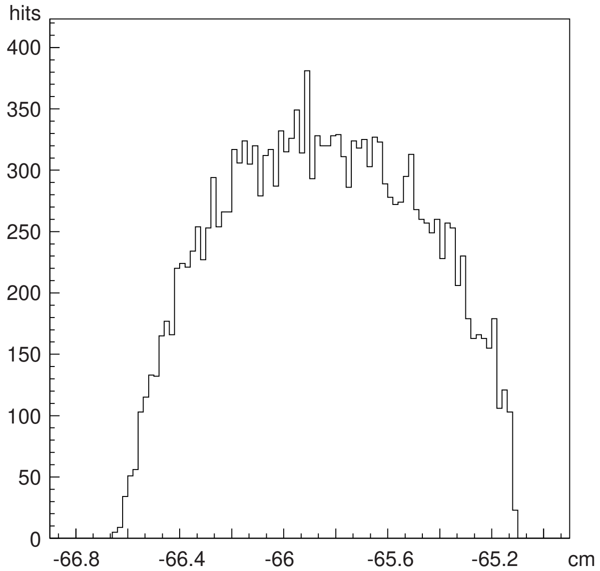
In diesem Abschnitt sollen Ergebnisse der Analyse der mit dem ersten Prototypen (Kapillartarget mit herkömmlicher optoelektronischer Auslesekette, senkrecht zum Neutrinostrahl) aufgenommenen Daten dargestellt werden. Für die Spur- und Vertexrekonstruktion wurden das oben beschriebene Programm ACTAR benutzt.

6.1 Effizienz der Auslesekette

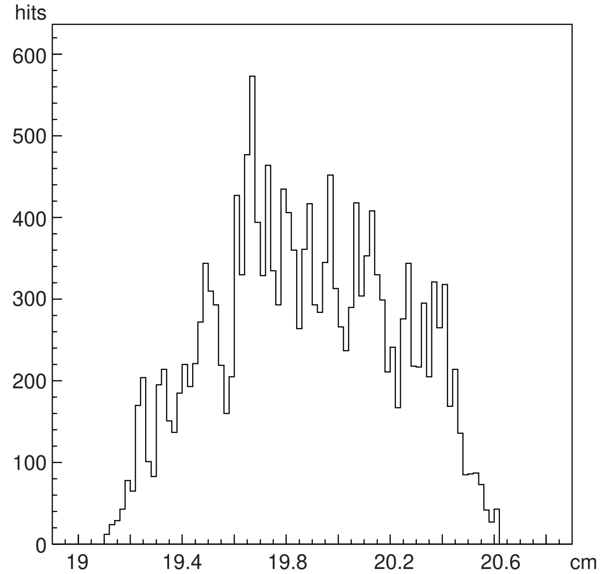
Viele der Ereignisse, die ausgelesen wurden, also eigentlich Spuren aufweisen sollten, zeigten nur leere Bilder. Diese Beobachtung läßt sich zum Teil mit dem experimentellen Aufbau erklären. Da die Szintillationszähler etwas breiter als das Kapillartarget sind, können auf diese Weise Ereignisse getriggert werden die ihren Ursprung nicht im Target haben.

Außerdem wiesen einige Ergebnisse der Datenanalyse Abweichungen von den erwarteten Resultaten auf: Die Abbildung 6.1 zeigt die x- bzw. y-Koordinaten der Hits, die zu rekonstruierten Spuren gehören. Wäre der gesamte quadratische Querschnitt des Bündels sichtbar, so wäre hier eine Gleichverteilung aller Werte zu erwarten. Deutlich sichtbar aber ist ein Abfall der Einträge zu den Außenseiten des Targets hin. Dieser Effekt ist durch den Aufbau bedingt.

Das Kapillartarget mit quadratischem Querschnitt von 3,4×3,4 cm^2 wird an einen elektrostatischen Bildverstärker mit kreisförmigem Querschnitt von



(a) x-Position der Hits



(b) y-Position der Hits

Abbildung 6.1: *Position der Hits, die im Kapillartarget rekonstruierten Spuren zugeordnet werden können. In der Mitte des Kapillartargets deutlich mehr Hits aufgezeichnet werden als an den Rändern. Könnte mit der Auslesekette der gesamte quadratische Querschnitt des Kapillarenbündels gesehen werden, so müßten sich hier Gleichverteilungen der Werte ergeben (Rechteckprofile).*

4 cm Durchmesser gekoppelt. Hierbei werden, selbst bei optimaler Anpassung des Bildverstärker an das Bündel, die Ecken des im Bündel erzeugten Bildes abgeschnitten. Ein weiterer Teil des Bildes geht am Übergang vom zweiten zum dritten Bildverstärker verloren, da auf einen Ausschnitt von 4,6 cm Durchmesser ein Verstärker folgt, dessen Eingangsfenster einen Durchmesser von 4 cm aufweist. Der letzte Bildverstärker in der Kette verkleinert das Bild um den Faktor 1,6 auf einen Durchmesser von 2,5 cm. Da der CCD, der dieses Bild auslesen soll, eine Größe von 19,5×19,5 mm^2 hat, kann er nicht das gesamte Bild erfassen. Der gesamte Aufbau der Auslesekette und die von den jeweiligen Bildverstärkern erfaßten Bildausschnitte finden sich in Abbildung 6.2.

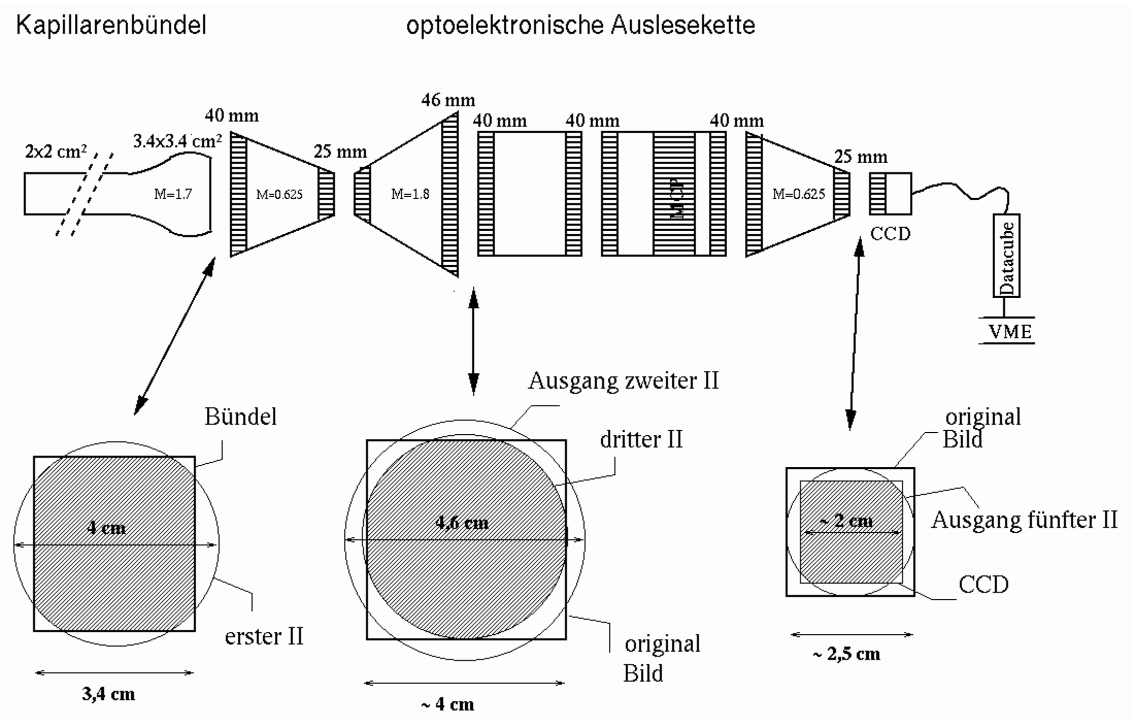


Abbildung 6.2: *Schematischer Aufbau der Auslesekette, darunter der Bildausschnitt, der von dem jeweiligen Bildverstärker erfaßt werden kann. Der schraffierte Bereich ist der jeweils erfaßte Teil des ursprünglichen Bildes. Das (äußere) Quadrat zeigt den Bereich des Bildes, das in den Kapillaren erzeugt wurde. Die Kreise stellen die Eintritts- bzw. Austrittsfenster der Bildverstärker dar.*

Abbildung 6.3 zeigt den auf dem CCD sichtbaren Bildausschnitt. Jeder Bildpunkt entspricht einem *Cluster*, der zu einer gefitteten Spur gehört. Insgesamt enthält das Diagramm die Daten von 1155 aufgezeichneten Ereignissen, in denen Einzelspuren rekonstruiert wurden. Das in Abbildung 6.3 dargestellte Bild deckt sich sehr gut mit den Überlegungen, die sich aus den Abmessungen der Bildverstärker ergeben, wie sie in Abbildung 6.2 dargestellt sind.

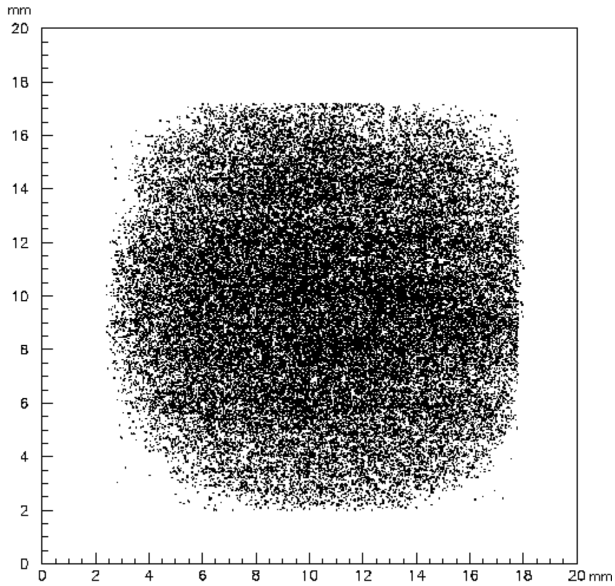


Abbildung 6.3: *Ausschnitt des durch die Auslesekette erfaßten Bildes. Jeder schwarze Punkt entspricht einem im Kapillartarget rekonstruierten Cluster. Es wurden 1155 Ereignisse, in denen eine Einzelspur rekonstruiert werden konnte, analysiert. Es wird deutlich sichtbar, daß nicht der gesamte Targetbereich von 20×20 mm^2 ausgelesen wird.*

6.2 Anbindung an CHORUS

Die im Kapillartarget aufgenommenen Spuren sollen mit denen des CHORUS-Detektors verbunden werden. Um dazu Spuren von einem Detektor in den anderen extrapolieren und mit den dort gefundenen Spuren vergleichen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie die Detektoren zueinander angeordnet sind und wie die für die Analysen benutzten Koordinatensysteme definiert sind.

Das CHORUS-Koordinatensystem ist folgendermaßen definiert: Die x-Richtung beschreibt die Richtung des Neutrinostrahls, die y-Richtung ist die horizontale Achse senkrecht zum Strahl, die z-Richtung entspricht der Vertikalen. Das System des Kapillartarget sollte ebenso definiert sein. Es stellt sich allerdings heraus, daß die Achsen nicht exakt übereinstimmen, sondern leicht gegeneinander gedreht sind.

Zusätzlich sind die Nullpunkte der Systeme in allen drei Richtungen gegeneinander verschoben. Der Nullpunkt des CHORUS-Detektors liegt innerhalb der Emulsion. Der Nullpunkt des Kapillartargets liegt in der Mitte der dem CHORUS-Detektor abgewandten Seite. Diese Verschiebung und Drehung muß nun zunächst bestimmt werden, um anschließend alle Daten in ein Koordinatensystem umrechnen und damit aneinander binden zu können.

6.2.1 Position des Kapillartargets im CHORUS-System

Zunächst wird die Verschiebung der Nullpunkte der Koordinatensysteme bestimmt; hierzu wurde der Ort des Kapillartargets vermessen. Das Target wurde an drei Punkten in unterschiedlicher Höhe vermessen, als Werte ergaben sich:

x(m)	y(m)	z(m)
-6,59373	0.19804	447,13131
-6,59577	0.19859	447,78125
-6,59717	0.20028	448,33110

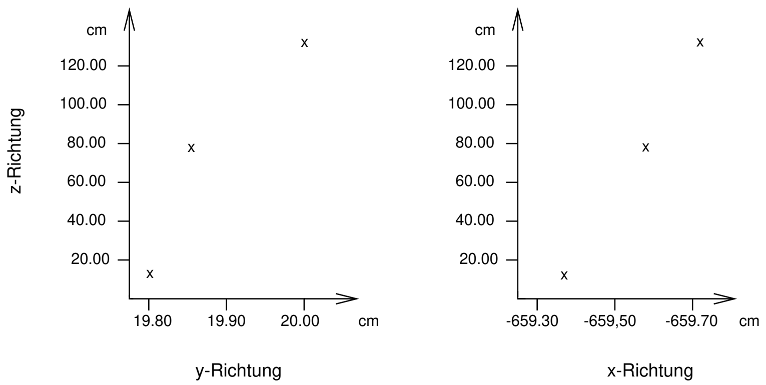


Abbildung 6.4: *Ergebnisse der Ortsvermessung des Kapillartargets. Zur übersichtlicheren Darstellung wird von den z-Werten 44700 cm subtrahiert.*

Die Ergebnisse beziehen sich auf das sogenannte BEBC[1]-Zentrum, einem in x- und y- Richtung festen Punkt der Detektorhalle, der z-Wert wird in Bezug auf die Lage des Berylliumtargets des Neutrinostrahls gemessen. Die Koordinaten

[1]Big European Bubble Chamber, größte je gebaute Blasenkammer zur Analyse von Neutrinoreaktionen. Die Neutrinoexperimente am CERN werden in der einst für BEBC gebauten Halle durchgeführt.

des CHORUS-Systems wurden bereits bestimmt, sie sind gegeben durch [31]:
$x_{CHORUS} = x_{BEBC} + 5,9266$ m
$y_{CHORUS} = y_{BEBC}$
$z_{CHORUS} = z_{BEBC} + 0,2532$ m

Das BEBC-Zentrum liegt in z-Richtung bei 447,8966 m.

Mit diesen Informationen kann die Position des Targets im CHORUS-System bestimmt werden. Es ergibt sich so für den Nullpunkt des Kapillartargets:
x_0= -670 mm, y_0= 198 mm, z_0= -765 mm

Die Ortsvermessungen des Kapillartargets (siehe Abbildung 6.4) zeigen Änderungen der x- und y-Werte mit zunehmender Höhe. Hieraus kann allerdings nicht ermittelt werden, ob dies nur aus einer Verdrillung des Bündels selbst oder auch aus einer Verkippung des Bündels gegen das CHORUS-System stammt. Deutlich wird allerdings eine leichte Torsion des Bündels, da die Änderung der x- und y-Werte nicht linear in z ist. Diese Verzerrung sowie die Verdrehung der z-Achse ist ohne Informationen eines weiteren Detektors nicht zu bestimmen, da sie von der z-Position des Ereignisses abhängt, über die das Kapillartarget keinerlei Information liefert. Diese dritte Ortskomponente kann der CHORUS-Detektor liefern. Allerdings setzt dies voraus, daß zusammengehörende Spuren als solche identifiziert werden. Das ist nötig, um die Spuren des CHORUS-Detektors in das Kapillartarget extrapolieren und so die z-Koordinate bestimmen zu können. Diese Korrekturen müssen für jedes Ereignis individuell berechnet werden.

6.2.2 Auffinden von Myonspuren

Um die oben beschriebene Verdrehung zu bestimmen, werden eindeutig zuzuordnende Spuren benötigt. Dafür werden während der Datennahme zusätzlich zu den Neutrinoereignissen Myonenspuren aufgenommen. Die aufgenommenen Daten enthalten keine Information darüber, ob es sich bei den jeweiligen Ereignissen um Neutrinoereignisse oder um Myonenspuren handelt. Daher müssen für die Auswertung zunächst die Myonenspuren im Kapillartarget als solche identifiziert werden. Aus diesem Grund werden zunächst alle Ereignisse herausgefiltert, für die im Kapillartarget eine Einzelspur gefunden wurde. Die zugehörigen Ereignisse im CHORUS-Detektor werden analysiert. In etwa 60% der analysierten Ereignisse wurde ein Myon identifiziert. Im nächsten Schritt wird nun geprüft, ob die im CHORUS-Detektor gefundene Myonspur sich in das Kapillartarget

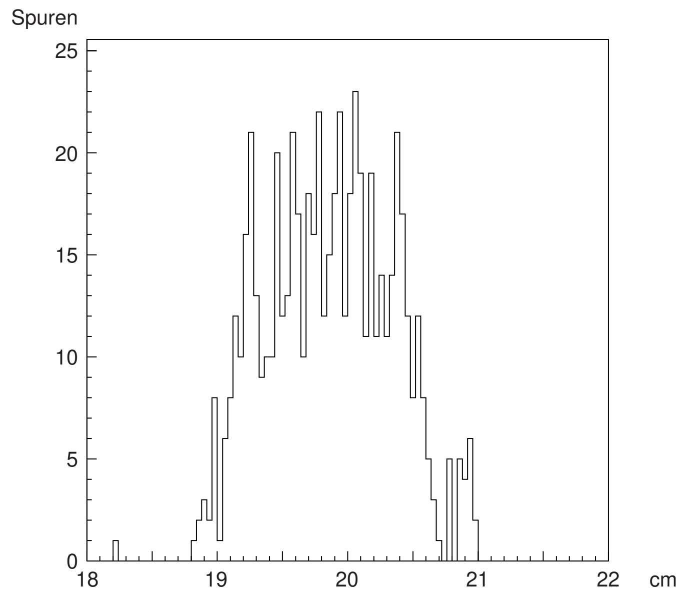


Abbildung 6.5: *y-Position des Kapillartargets im CHORUS-System. 610 Myonspuren wurden vom CHORUS-Detektor bis in das Kapillartarget extrapoliert, dargestellt sind ihre y-Koordinaten an einer festen x-Koordinate innerhalb des Kapillartargets.*

zurückverfolgen läßt. Nur wenn die extrapolierte Spur das Kapillartarget kreuzt, werden diese Ereignisse weiterverwandt. Beinahe 90% der Myonspuren bestanden auch dieses Kriterium. Die Anteile der Ereignisse, die die oben genannten Anforderungen erfüllen, gemessen an der Gesamtzahl aller vom Kapillartarget aufgenommenen Ereignisse betragen:

- Einzelspur im Kapillartarget und Myonspur in CHORUS: 24%
- extrapolierbare Myonspur von CHORUS ins Kapillartarget: 21%

Somit können etwa ein Fünftel aller aufgezeichneten Daten des Kapillartargets für die Anbindung der beiden Detektoren genutzt werden. Die Ergebnisse der Extrapolation der Myonspuren aus dem CHORUS-Detektor in das Kapillartarget sind in den Abbildungen 6.5 und 6.6 dargestellt. Für die Extrapolation wurde ein fester Ort (der Nullpunkt des Kapillartargets) gewählt.

6.2.3 Spurauflösung

Informationen über die Auflösung der rekonstruierten Spuren sind notwendig, um die Ergebnisse des vorherigen Abschnitts richtig bewerten zu können. Da die

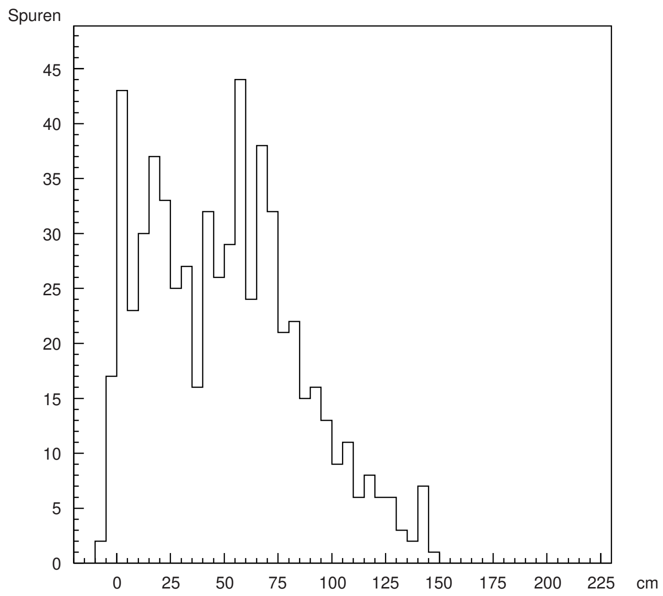


Abbildung 6.6: *z-Position des Kapillartargets im CHORUS-System. Myonspuren wurden vom CHORUS-Detektor bis in das Kapillartarget extrapoliert, dargestellt sind ihre z-Koordinaten an einer festen x-Koordinate (-67 cm). In den unteren Target-Bereichen werden mehr Myonen verzeichnet. Das ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß die Myonen, die aus dem Strahl stammen, stark in Bewegungsrichtung fokussiert sind.*

Fitting-Routine, die das ACTAR-Programm nutzt, als Ergebnisse nur die Parameter der Geradengleichung $y = ax + b$ sowie den Wert für χ^2 (Maß für die Güte des Geradenfits) ausgibt, war es nötig, zusätzliche Berechnungen anzustellen. Die Varianzen für die Steigung a der Geraden und den Schnittpunkt b der Geraden mit der y-Achse berechnen sich folgendermaßen [6]:

$$\sigma_a^2 = S_{xx}/\Delta \tag{6.1}$$

$$\sigma_b^2 = S/\Delta \tag{6.2}$$

$$\Delta = SS_{xx} - {S_x}^2 \tag{6.3}$$

mit:

$$S = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sigma_i^2} \qquad S_x = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i}{\sigma_i^2} \qquad S_{xx} = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \tag{6.4}$$

Hierbei bezeichnet x_i die x-Komponenten der Meßwerte, σ_i die jeweilige Unsicherheit der Messung der y-Koordinate (die x-Werte werden als exakt angesehen) und N die Anzahl der Meßwerte.

Hat man keinerlei Informationen über σ_i, so können die Fehler für a und b bestimmt werden (unter der Annahme, die Geradenfits seien gut), indem man σ_i=1 setzt und die so erhaltenen Werte für σ_a und σ_b anschließend mit $\sqrt{\chi^2/(N-2)}$ multipliziert [6]. χ^2 ergibt sich nach:

$$\chi^2(a,b) = \sum_{i=1}^{N}(\frac{y_i - a - bx_i}{\sigma_i})^2 \quad (6.5)$$

Hieraus ergibt sich im untersuchten Fall eine Winkelauflösung der Spur von σ_b=2,1 mrad, vergleiche hierzu auch Abbildung 6.7. Die Verteilung der σ_b-Werte sollte einer Gaußkurve entsprechen. Die Abweichungen für $\sigma_b > 3$ mrad ergeben sich aus Spuren, die entweder aus sehr wenigen Treffern bestehen oder aber aus Spuren, die fälschlicherweise als Einzelspuren angenommen wurden. Beispiele hierfür sind in der Abbildung 6.8 dargestellt.

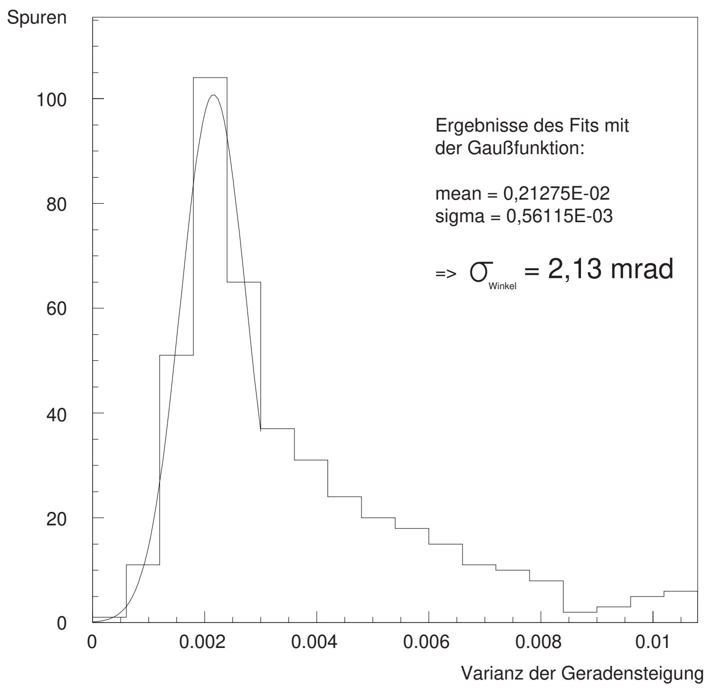
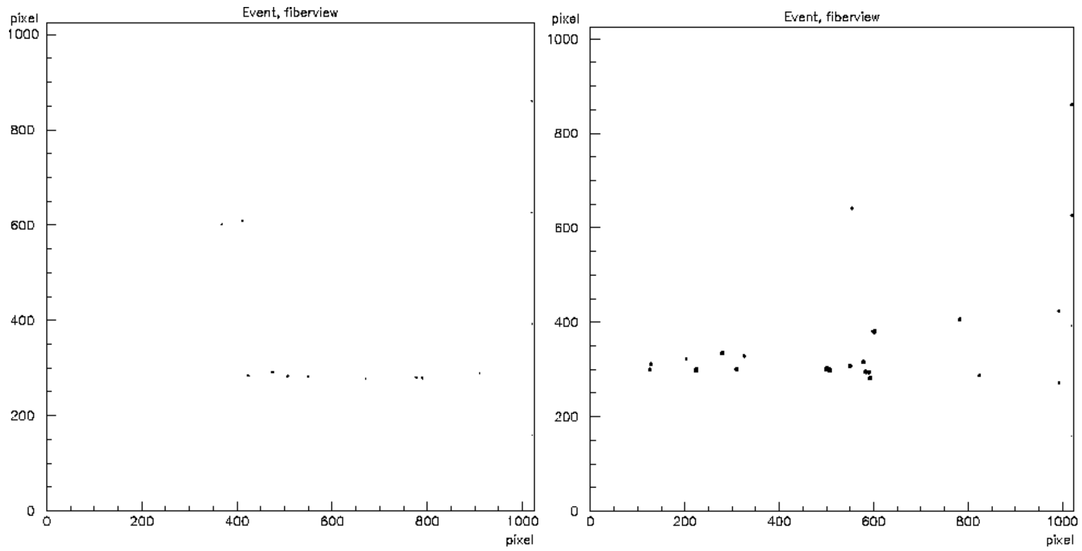


Abbildung 6.7: *Für 167 Myon-Spuren wurde die Spurauflösung berechnet. Hier dargestellt ist die Verteilung der Ergebnisse für σ_b, die sich ohne Kenntnis der Unsicherheiten der Messung der y-Koordinaten ergibt.*

Eine alternative Methode zur Bestimmung der Winkelauflösung ist die Annahme, die Meßungenauigkeit sei für alle Meßwerte gleich ($\sigma_i = c \ \forall i$) [6]. Es ergibt sich



(a) Beispiel einer Spur, die aus nur sehr wenigen Treffern besteht. Die Winkelauflösung der rekonstruierten Spur ist entsprechend schlecht (9,8 mrad).

(b) Beispiel eines Ereignisses, das fälschlicherweise als Einzelspur eines Myons identifiziert wurde. Es ist deutlich sichtbar, daß es sich um zwei Spuren handelt.

Abbildung 6.8: *Beispiele für Spuren, bei deren Rekonstruktion eine schlechte Winkelauflösung erzielt wurde. Im wesentlichen gibt es zwei mögliche Gründe für eine schlechte Auflösung. Entweder besteht die Spur nur aus sehr wenigen Treffern wie in Teilbild (a) oder sie ist fälschlicherweise als Einzelspur rekonstruiert worden, wie in Teilbild (b).*

so aus den Gleichungen 6.1 und 6.4:

$$\sigma_a^2 = \frac{c^2 \sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \tag{6.6}$$

$$\sigma_b^2 = \frac{c^2 N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \tag{6.7}$$

Die Meßungenauigkeit für die y-Werte ist in unserem Fall durch zwei Größe bestimmt:

Sie ist abhängig von den geometrischen Abmessungen der Kapillaren. Die Standardabweichung für y beträgt in einem Kreis r/2, für Kapillaren mit 20 μm Durchmesser also σ=5 μm.

Die zweite Größe, die in die Meßungenauigkeit eingeht, ist die sogenannte *Spot Size*. Durch die optoelektronische Auslesekette wird aus einem einzelnen Photoelektron am Eingangsfenster des ersten Bildverstärkers ein *Cluster* von Punkten am Ende der Auslesekette. Die *Spot Size* wird bestimmt durch den Abstand der einzelnen Pixel des Clusters vom Schwerpunkt des Clusters, gewichtet mit der Pulshöhe der Pixel [32]. Dieser Wert wurde zu 21 μm bestimmt [23].

Aus der Addition der Quadrate der Fehler ergibt sich für die Meßungenauigkeit der y-Werte σ_y=21,6 μm. Mit diesem Wert ergibt sich die in Abbildung 6.9 dargestellte Verteilungen für die Ungenauigkeit der Geradenparameter. Die Winkelauflösung beträgt 1,24 mrad.

Die so bestimmte Winkelauflösung ergibt einen deutlich besseren Wert, als die erste Methode. Offensichtlich spielen für die Meßunsicherheit von y außer den oben beschriebenen Größen weitere Faktoren eine Rolle, die hier nicht mit einbezogen wurden, wie z.B. die Verdrillung des Bündels.

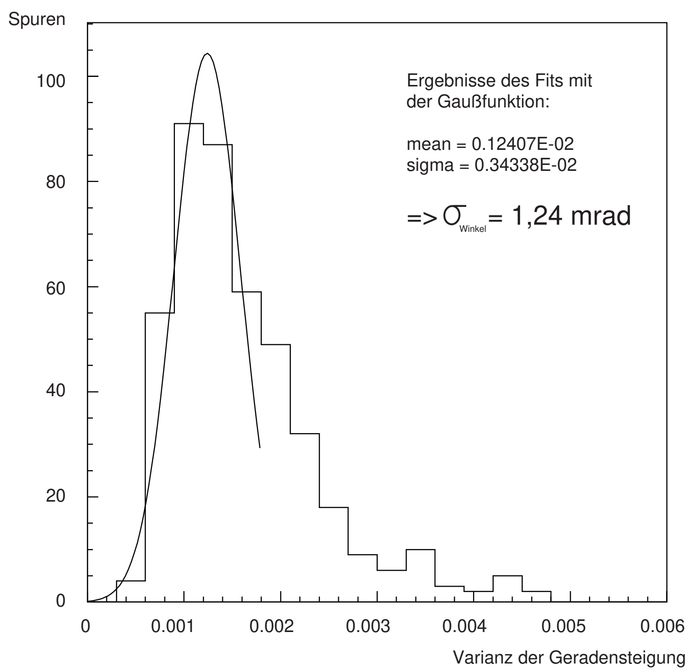


Abbildung 6.9: *Verteilung des Fehlers für den Geradenparameter b, berechnet nach Gleichung (6.7). In die Berechnung gingen 167 Myonspuren ein. Die Verteilung entspricht nicht der erwarteten Gaußverteilung, da einige Spuren nur aus sehr wenigen Punkten bestehen oder fälschlicherweise als Einzelspuren rekonstruiert wurden.*

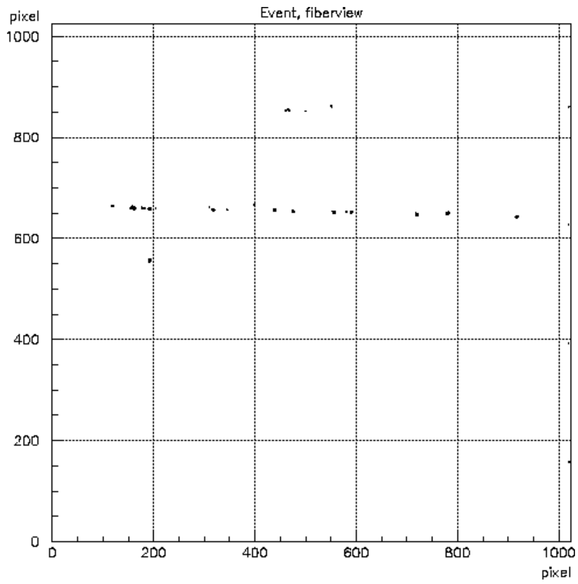
6.2.4 Rotation des Kapillartargets gegenüber dem CHORUS-Detektor

Vergleicht man die Bilder der Ereignisse, die sowohl vom CHORUS-Detektor als auch vom Kapillartarget aufgenommen wurden (z.B. Abb. 6.10), wird deutlich, daß die x-y-Ebenen der beiden Systeme leicht gegeneinander rotiert sind. Angenommen, dies sei die einzige Drehung des Kapillartargets gegenüber dem CHORUS-Detektor, so ist es möglich, diese aus den vorhandenen Daten zu bestimmen.

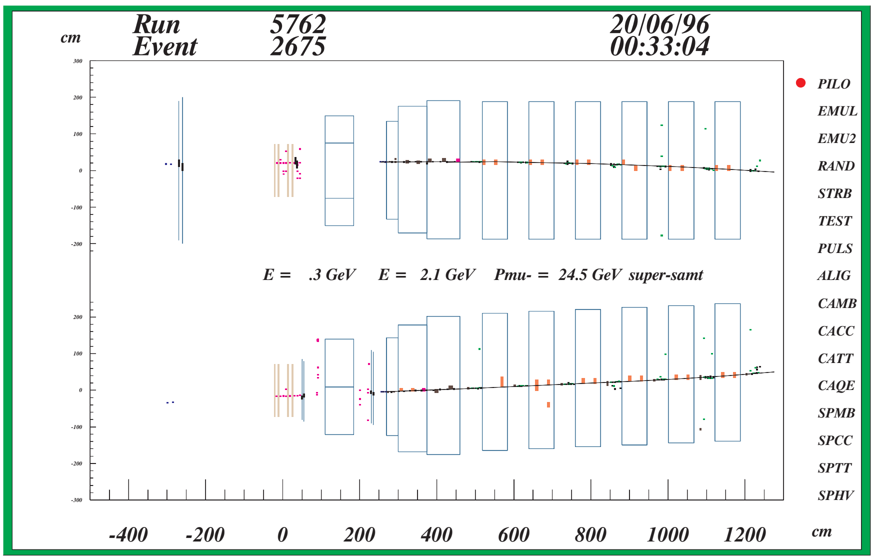
Die von ACTAR rekonstruierten Spuren sind durch ihre Steigung in der x'-y'-Ebene und den Schnittpunkt mit der y-Achse gegeben. Die dreidimensionalen von CHORAL rekonstruierten Spuren, werden durch zwei Projektionen (auf die x-y-Ebene und auf die x-z-Ebene) gekennzeichnet. Das entspricht zwei Steigungen und den Schnittpunkten mit der y- bzw. z-Achse. Für die Untersuchung der Rotation der x-y-Ebenen wurden die Daten des Kapillartargets und die Ergebnisse in der x-y-Projektion von CHORUS benutzt. Insgesamt wurden 610 Myonspuren untersucht, hieraus ergibt sich die in Abbildung 6.11(a) dargestellte Verteilung. Das Anfitten einer Gaußkurve ergibt ein Maximum bei 27,3 mrad mit einer Standardabweichung von 7 mrad.

Betrachtet man den Rotationswinkel in Abhängigkeit von der Anzahl der für die Spurrekonstruktion benutzten Cluster (Abb. 6.12), so wird deutlich, daß Ergebnisse für Spuren, die aus mehr als 30 Clustern bestehen erheblich besser sind. Ursache hierfür ist die deutlich bessere Winkelauflösung der durch mehr Cluster gegebenen Spuren und die geringere Wahrscheinlichkeit einer Fehlrekonstruktion. Benutzt man daher für die Untersuchung des Rotationswinkels nur Spuren, die von ACTAR mit einer Winkelauflösung besser als 2 mrad rekonstruiert wurden, so verbessert sich das Ergebnis wesentlich. Eine Untersuchung mit 133 Spuren ergab einen Rotationswinkel von 23,7 mrad mit einer Standardabweichung von 3 mrad (siehe Abbildung 6.11(b)). Entsprechend dieser Ergebnisse wird für weitere Analysen an alle Spuren eine Steigungskorrektur von 24 mrad angebracht.

Die Ergebnisse der Analysen mit Spuren besser 2 mrad decken sich gut mit den Erwartungen, die sich aus der Winkelauflösung der Faserdetektoren von CHORUS (2 mrad, [14]) und der Winkelauflösung des Kapillartargets (2 mrad, Abschnitt 6.2.3) ergeben. Während der Auswertung fiel auf, daß der Rotationswinkel mit Änderung der z-Position der Spuren leicht variiert (siehe Abbildung 6.13). Dies legt ebenfalls die Vermutung nahe, daß das Kapillartarget leicht tordiert ist.

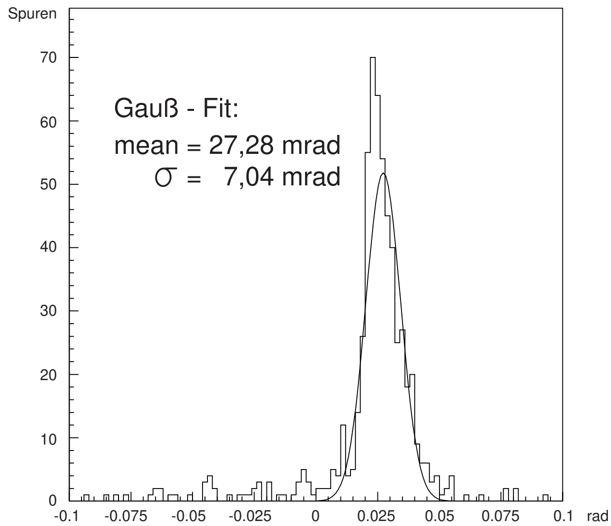


(a) Bild der Spur eines Myons, die mit dem Kapillartarget aufgenommen wurde. Zu sehen ist die x'-y'-Ebene.

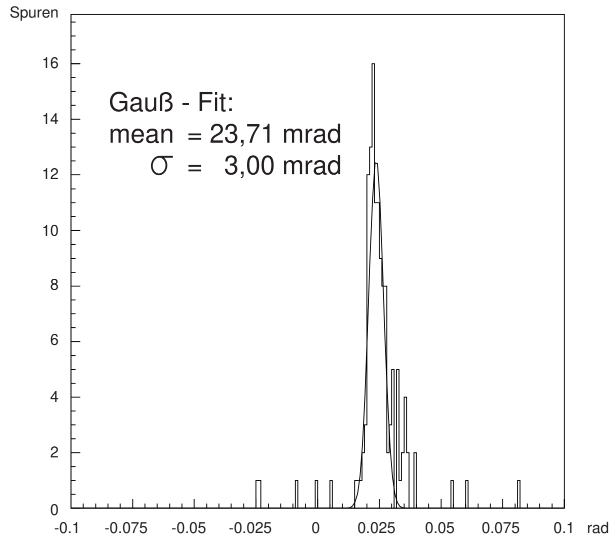


(b) Spur desselben Myons, die vom CHORUS-Detektor aufgezeichnet wurde. Das obere Teilbild zeigt die Spuren in der Sicht von oben (x-y-Ebene), das untere Teilbild zeigt die gleichen Spur von der Seite aus gesehen(x-z-Ebene)

Abbildung 6.10: *Typisches Ereignis, das für die Anbindung des Kapillartargets an den CHORUS-Detektor verwendet wird.*



(a) Untersuchung des Rotationswinkels von 610 Myonspuren



(b) Untersuchung des Rotationswinkels, in die 133 Spuren, die von ACTAR mit einer Winkelauflösung besser 2 mrad rekonstruiert worden, eingingen.

Abbildung 6.11: *Rotation der im Kapillartarget rekonstruierten Spuren gegenüber den in CHORAL gefundenen.*

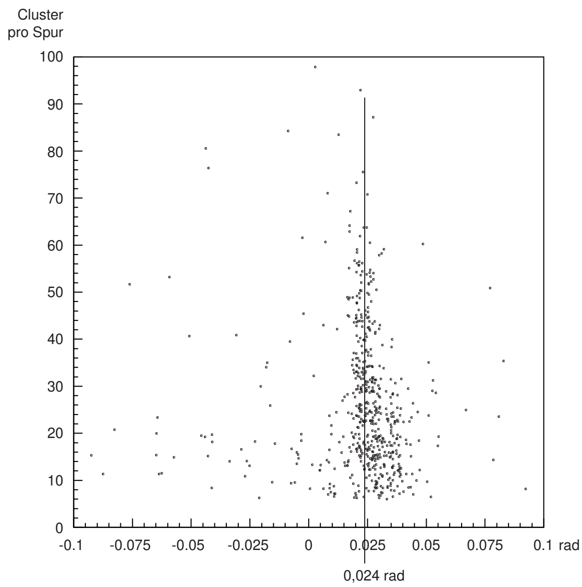


Abbildung 6.12: *Rotation der im Kapillartarget rekonstruierten Spuren gegenüber den in CHORAL gefundenen, aufgetragen gegen die Anzahl der Cluster pro Spur im Kapillartarget.*

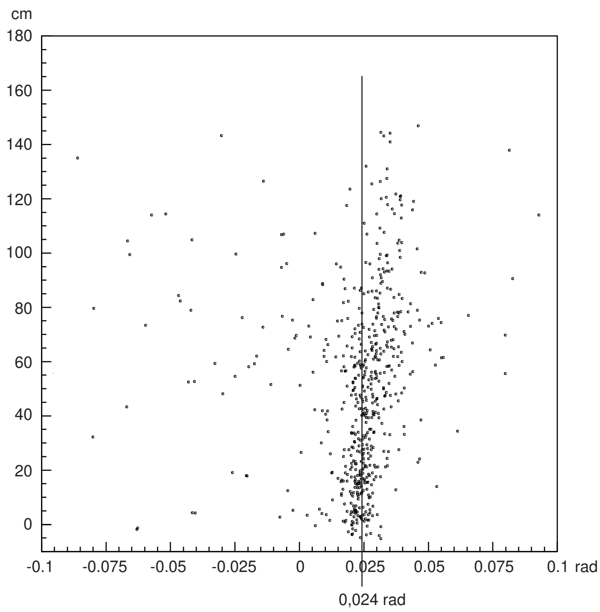


Abbildung 6.13: *Rotation der im Kapillartarget rekonstruierten Spuren gegenüber den in CHORAL gefundenen, aufgetragen gegen die z-Position der Spuren im Kapillartarget.*

6.2.5 Verbesserung der Anbindung

In dem vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, wie die Rotation um eine Achse (z-Achse) korrigiert wurde. Um nun auch Rotationen um die anderen Achsen (x- oder y-Achse) zu bestimmen, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Ein Ansatz, die gesamte Rotation des Targets auf einmal zu bestimmen, beruht auf folgender Überlegung:

Die mit dem Kapillartarget aufgenommenen Spuren gehen aus den von CHORAL rekonstruierten hervor, indem sie zunächst rotiert und anschließend auf die neue x-y-Ebene projiziert werden. Diese Transformation wird durch die Gleichung (6.8) wiedergegeben. θ, ϕ und ψ in (6.9) bezeichnen die Eulerschen Winkel [1].

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot R \cdot \begin{pmatrix} x_{CHORAL} \\ y_{CHORAL} \\ z_{CHORAL} \end{pmatrix} \tag{6.8}$$

mit:

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \tag{6.9}$$

und:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \cos\psi\cos\phi - \cos\theta\sin\phi\sin\psi \\
a_{12} &= -\sin\psi\cos\phi - \cos\theta\sin\phi\cos\psi \\
a_{13} &= \sin\phi\sin\theta \\
a_{21} &= \cos\psi\sin\phi + \cos\theta\cos\phi\sin\psi \\
a_{22} &= -\sin\psi\sin\phi + \cos\theta\cos\phi\cos\psi \\
a_{23} &= -\cos\phi\sin\theta \\
a_{31} &= \sin\theta\sin\psi \\
a_{32} &= \sin\theta\cos\psi \\
a_{33} &= \cos\theta
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Eine geschlossene Lösung wäre hier nur möglich, wenn die gemessenen Spuren exakt bekannt wären. Da experimentell bestimmte Daten immer mit einem Meßfehler behaftet sind, ist eine statistische Auswertung erforderlich. Von CHORAL sind die Steigungen der Spurprojektionen auf die x-y-Ebene ($a_y = \frac{y_{CHORAL}}{x_{CHORAL}}$) und auf die x-z-Ebene ($a_z = \frac{z_{CHORAL}}{x_{CHORAL}}$) gegeben. Von ACTAR ist die Steigung der Spurprojektion auf die x′-y′-Ebene gegeben. Die x′-y′-Ebene bezeichnet die leicht gegen die x-y-Ebene von CHORAL rotierte Ebene, auf die die Abbildung des Kapillartargets projiziert wird. Die Ortsinformationen, die durch den Schnittpunkt der Spuren mit der y- bzw. z-Achse gegeben sind, werden für diese Analyse nicht benötigt.

Da im folgenden nur Steigungen betrachtet werden, ist der Betrag des Vektors nicht interessant. Es kann daher ohne Beschränkung der Allgemeinheit x=1 gesetzt werden. Hieraus ergibt sich $y_{CHORAL} = a_y$ und $z_{CHORAL} = a_z$. Setzt man dies in die Gleichung (6.8) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} x' =&(\cos\psi\cos\phi - \cos\theta\sin\phi\sin\psi) \\ &- (\cos\phi\sin\psi + \cos\theta\cos\psi\sin\phi)a_y \\ &+ (\sin\phi\sin\theta)a_z \end{aligned} \tag{6.11}$$

$$\begin{aligned} y' =&(\sin\phi\cos\psi + \cos\theta\sin\psi\cos\phi) \\ &+ (-\sin\psi\sin\phi + \cos\theta\cos\phi\cos\psi)a_y \\ &- (\cos\phi\sin\theta)a_z \end{aligned} \tag{6.12}$$

Der Quotient aus y′ und x′ entspricht nun der von ACTAR bestimmten Steigung in der x′-y′-Ebene.

Um die drei Winkel ϕ, ψ und θ zu bestimmen, wird ein Minimierungsprogramm basierend auf dem Programmpaket MINUIT [30] angewandt. Hierbei wird das Quadrat der Differenz zwischen der von ACTAR bestimmten Steigung und der Steigung, die durch Rotation und Projektion aus den CHORAL-Daten resultiert, durch Variation der Rotationswinkel minimiert.

Da bisher nur Strahlmyonen für die Anbindung aufgenommen wurden und diese sich alle in sehr ähnlicher Richtung bewegen, weisen die Spuren nur geringe Unterschiede auf. Mit diesen Spuren ist die oben beschriebene Minimierung daher nicht sinnvoll durchzuführen. Um eine Bestimmung aller Rotationen vorzunehmen und damit eine weitere Verbesserung der Spuranbindung zu erhalten, wäre es notwendig, gemeinsam mit CHORUS auch Spuren aus anderen Richtungen aufzunehmen. Prinzipiell wäre es auch möglich, für diese Minimierung Spuren aus

Neutrinoereignissen zu benutzen. Ein Nachteil ist hier allerdings, daß die Spurauflösung für Neutrinoereignisse in der Regel schlechter ist, als die für Einzelspuren von Myonen. Zudem liegen zur Zeit nicht ausreichend viele gut rekonstruierte Ereignisse vor, die für diese Minimierung benutzt werden könnten.

6.3 Anbindung von Neutrinoereignissen

Mit dem oben beschriebenen Wissen über die Lage des Kapillartargets im CHORUS-System ist es nun möglich, bei Ereignissen mit mehreren Spuren, die von einem Vertex ausgehen, wie es für Neutrino-induzierte Ereignisse die Regel ist, die zugehörigen Spuren im CHORUS-Detektor aufzufinden. Es ist möglich, die einzelnen Teilchen, die diese Spuren hinterlassen haben, zu identifizieren und die Ereignisse zu analysieren.

Hierzu wird folgendermaßen verfahren (siehe auch Abbildung 6.14): Zunächst wird überprüft, ob von CHORAL ein oder mehrere Vertizes rekonstruiert wurden. Ist das der Fall, wird der Vertex gesucht, der am nächsten zu dem von ACTAR gefundenen Vertex liegt. Dieser wird auf seinen Abstand zum Kapillartarget-Vertex hin untersucht. Nur wenn der Vertex innerhalb eines Bereiches von 10 cm in x-Richtung und von 2,5 cm in y-Richtung um den Kapillartarget-Vertex liegt, wird die Routine zur Spuranbindung durchlaufen. Diese Werte werden aus der Verteilung der Abweichung der in CHORAL und ACTAR bestimmten Vertizes bestimmt (Abb. 6.15(a) und 6.15(b)). Der deutlich größere Fehler in Strahlrichtung liegt daran, daß die in CHORAL für den Vertexfit benutzten Spuren in der Regel sehr kleine Steigungen besitzen. Eine kleine Abweichung in y verursacht so einen deutlich größeren Fehler in x.

Liegt der Vertex nicht innerhalb dieses Bereichs wird er verworfen, da er entweder von einem sekundären Ereignis stammt, (z.B. durch Streuung in den Spurerkennungsdetektoren oder der Emulsion oder durch Zerfälle kurzlebiger Teilchen) oder auf einer Fehlrekonstruktion durch das CHORAL-Programm beruht. Die Spuren des so gefundenen Vertex werden mit allen Spuren des von ACTAR rekonstruierten Vertex verglichen. Hierzu werden die in Abschnitt 6.2.4 beschriebenen Korrekturen an alle Spuren angebracht, die von ACTAR als zum Vertex gehörig gefunden wurden. Eine CHORAL-Spur wird als zu einer Kapillartarget-Spur gehörig definiert, sobald sie einen Winkelunterschied kleiner als 25 mrad aufweist und es keine Spur mit einen kleineren Winkelunterschied gibt.

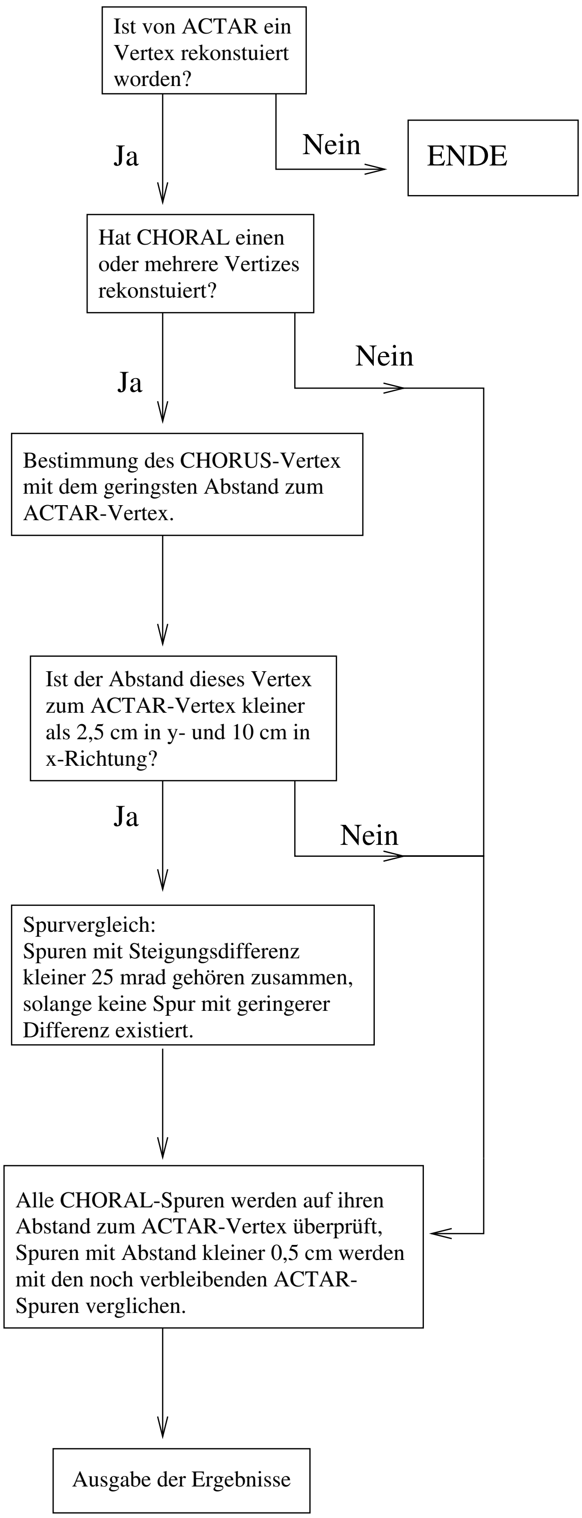
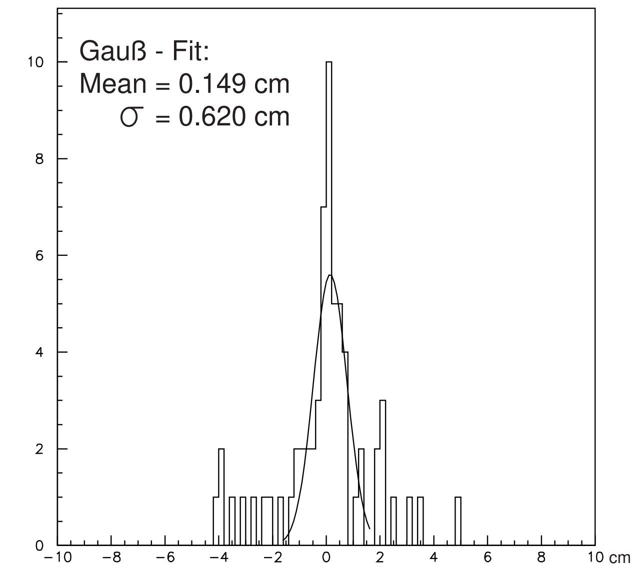
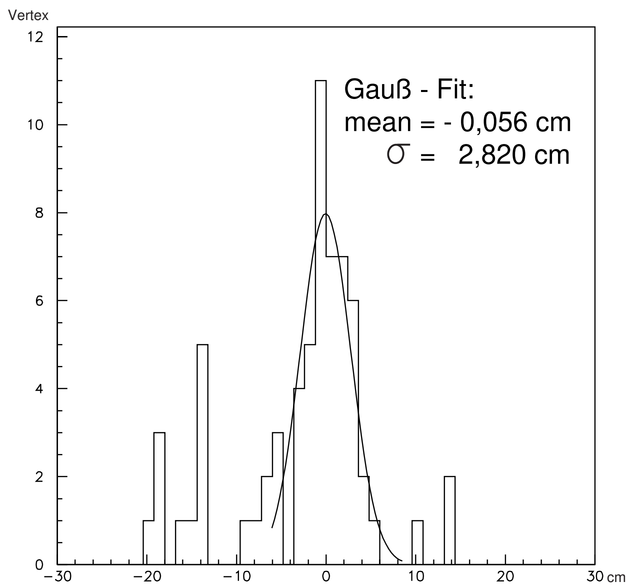


Abbildung 6.14: *Schematische Darstellung des Programmablaufs zur Anbindung von Neutrinoereignissen, die sowohl mit dem Kapillartarget als auch mit dem CHORUS-Detektor aufgenommen wurden.*



(a) Abstand in y-Richtung. Der Fit mit einer Gaußkurve ergibt ein Standardabweichung von 0,6 cm. Die Vertexunterschiede größer 2,5 cm stammen von falsch rekonstruierten Vertizes in CHORAL oder von einem sekundären Ereignis.



(b) Abstand in Strahlrichtung (x-Richtung). Der Gaußfit ergab hier eine Standardabweichung von 2,8 cm.

Abbildung 6.15: *Abstand der von CHORAL und ACTAR rekonstuierten Vertizes voneinander. Es sind die Ergebnisse von 72 Ereignissen dargestellt.*

Häufig kommt es vor, daß der von CHORAL gefundene Vertex aus weniger Spuren gebildet wird, als der von ACTAR rekonstruierte Vertex. Dies liegt zum einen daran, daß nur Teilchen, die das Kapillartarget in Vorwärtsrichtung unter einem Winkel kleiner 30° und größer -30° verlassen, innerhalb der Winkelakzeptanz des CHORUS-Detektors liegen. Zum anderen werden von CHORAL bisweilen nicht alle zum Vertex gehörigen Spuren gefunden, da sie die Vertexkriterien nicht erfüllen. Dies begründet sich dadurch, daß diese Kriterien optimiert sind, um Vertizes innerhalb der Emulsion zu finden und nicht im Kapillartarget. Aus diesem Grund werden anschließend alle nicht zum Vertex gehörigen CHORUS-Spuren auf ihren Abstand zum Kapillartarget-Vertex überprüft. Ist dieser kleiner 0,5 cm, so wird diese Spur als mögliche Vertexspur eingestuft. Die so gefundenen Spuren werden mit den noch verbliebenen Vertexspuren des Kapillartargets verglichen, erfüllen sie die oben genannten Kriterien, so werden sie als zu der entsprechenden Kapillartarget-Spur gehörig definiert.

6.4 Einige Beispiele

In diesem Abschnitt werden einige Beispiele für Ereignisse dargestellt, die auf die oben beschriebene Weise angebunden wurden.

Abb. 6.16 zeigt ein vom Kapillartarget aufgenommenes Neutrinoereignis und das entsprechende Ereignis im CHORUS-Detektor. Von ACTAR wurden sechs Spuren rekonstruiert. Die besonders kurze aus sehr vielen Hits bestehende Spur rührt vermutlich von einem Kernaufbruch her. Drei der sechs Spuren konnten an Spuren angebunden werden, die im CHORUS-Detektor rekonstruiert wurden. Zwei dieser Spuren gehören zu unterschiedlich geladenen Myonen. Die anderen drei Teilchen können im CHORUS-Detektor nicht nachgewiesen werden, da sie nicht innerhalb der Winkelakzeptanz liegen. Bei der weiteren Analyse fällt auf, daß die Spur des positiv geladenen Myons nicht direkt vom Vertex stammt. Sie ist die Tochterspur eines zerfallenen Teilchens, das am ursprünglichen Vertex entstanden ist. Dieser Zerfallsvertex ist als leichter Knick (*Decay Kink*) in der Spur zu erkennen, der von einem neutralen Teilchen herrührt. Die Trefferdichte dieser Spur unterscheidet sich deutlich vor und nach dem Knick. Unter der Annahme, beide Teilchen seien schwach ionisierend, deutet dies auf eine deutlich unterschiedliche Impulskomponente in z-Richtung hin. Aus der Trefferdichte und der Spurlänge läßt sich der Winkel beider Trajektorien zueinander zu $\alpha \approx 50°$ und somit die Zerfallslänge des Primärteilchens zu 7,1 mm bestimmen.

Die zusätzlichen Informationen des CHORUS-Kalorimeters zeigen einen Schauer mit einer Energie von 70 GeV. Dies weist auf ein hadronisches ungeladenes Teilchen hin, das von dem gleichen Vertex stammt wie die Spuren der drei geladenen Teilchen. Die Energie des vom sekundären Vertex stammenden positiven Myons wird im Muonspektrometer zu 48,5 Gev bestimmt, hinzu kommen 2 GeV, die das Myon beim Durchqueren des Kalorimeters verloren hat. Interpretiert man dieses Ereignis als Erzeugung eines D^+, das in $\bar{K}^0\mu^+\nu_\mu$ zerfällt (BR=$7{,}0^{+3{,}0}_{-2{,}0}$ %), so ergibt sich für das D^+ eine Energie von 120 Gev zuzüglich der Energie des erzeugten Neutrinos. Nimmt man eine Energie von etwa 30 GeV für das Neutrino an, so ergibt sich für das D^+ eine mittlere Zerfallslänge von 25 mm.

Aus der im Kapillartarget bestimmten Zerfallslänge von 7,1 mm ergibt sich eine Lebensdauer von $3{\cdot}10^{-13}$ s für das D^+. Dieser Wert entspricht einem Drittel der mittleren Lebensdauer ($\tau = (1,057 \pm 0,015) \times 10^{-12}$ s). Dieses Ergebnis unterstützt die Vermutung, daß es sich um den Zerfall eines D^+ handelt.

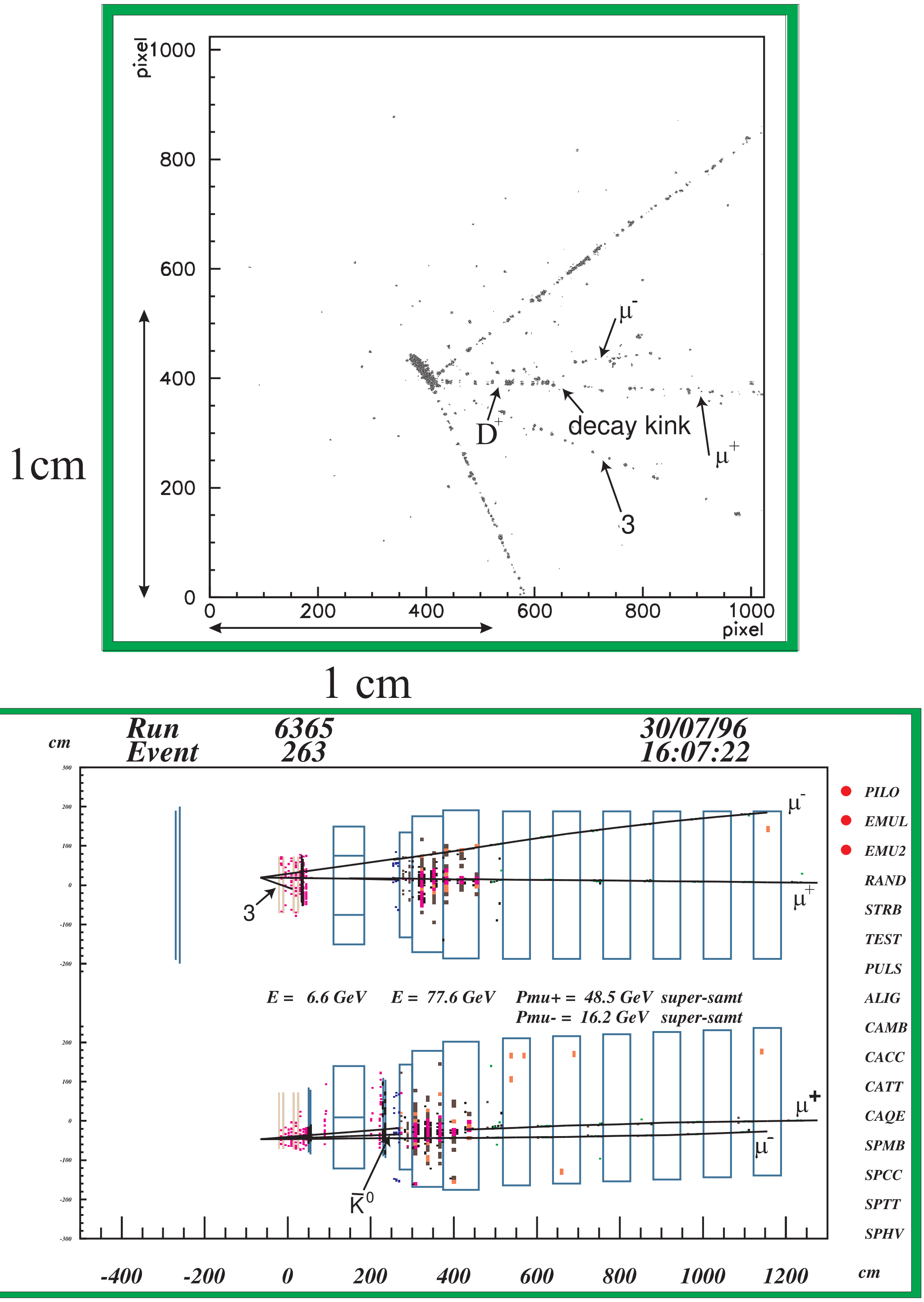


Abbildung 6.16: *Ein Neutrinoereignis im Kapillartarget und das zugehörige Ereignis im CHORUS-Detektor. Das Neutrino kommt von links, in der Reaktion entsteht ein D^+, das nach $3{\cdot}10^{-13}$ s in $\bar{K}^0\mu^+\nu_\mu$ (BR=$7{,}0^{+3,0}_{-2,0}$ %) zerfällt.*

Nebenstehend ist ein weiteres Neutrinoereignis im Kapillartarget gezeigt. Oben links ist das Bild des Kapillartargets gezeigt, unten das gleiche Ereignis im CHORUS-Detektor. Außerdem ist ein Zoom dargestellt, der die Region der Spurerkennungsdetektoren vergrößert zeigt.

Von ACTAR konnten in diesem Ereignis sechs zum Vertex gehörige Spuren identifiziert werden. CHORAL hat ein Vertex aus drei Spuren an der Position des Kapillartargets rekonstruiert. Zwei dieser Spuren konnten an die Spuren 2 und 3 des Kapillartargets angebunden werden. Zwei weitere vom Vertex stammende Spuren konnten im zweiten Schritt der Spuranbindung gefunden werden. Es handelt sich hierbei um die Spuren 1 und 4. Aufgrund der sehr geringen Winkel der Spuren gegen die x-Achse sind die Fehler der Rekonstruktion des Vertex in der x-Koordinate groß. Da CHORAL darauf ausgelegt ist, Spuren innerhalb der Emulsion wiederzufinden, sind die Vertexrekonstruktionsroutinen nicht für die Erkennung eines Vertex im Kapillartarget optimiert. Durch die größere Entfernung wirken sich Fehler in der Spurerkennung stärker auf den Ort des rekonstruierten Vertex aus. Um hier Abhilfe zu schaffen, müßten die Schwellen zur Akzeptanz eines Vertex im Rekonstruktionsprogramm CHORAL geändert werden. Aus organisatorischen und zeitlichen Gründen konnten diese Änderungen bisher nicht vorgenommen werden.

Eine der vier gefundenen Spuren gehört zu einem negativ geladenen Myon mit einer Energie von 22,1 GeV. Bei den anderen Teilchen handelt es sich um Hadronen oder Elektronen, die im Kalorimeter gestoppt werden. Die Spuren 5 und 6 erreichen den CHORUS-Detektor nicht, da sie das Kapillartarget unter zu großem Winkel verlassen.

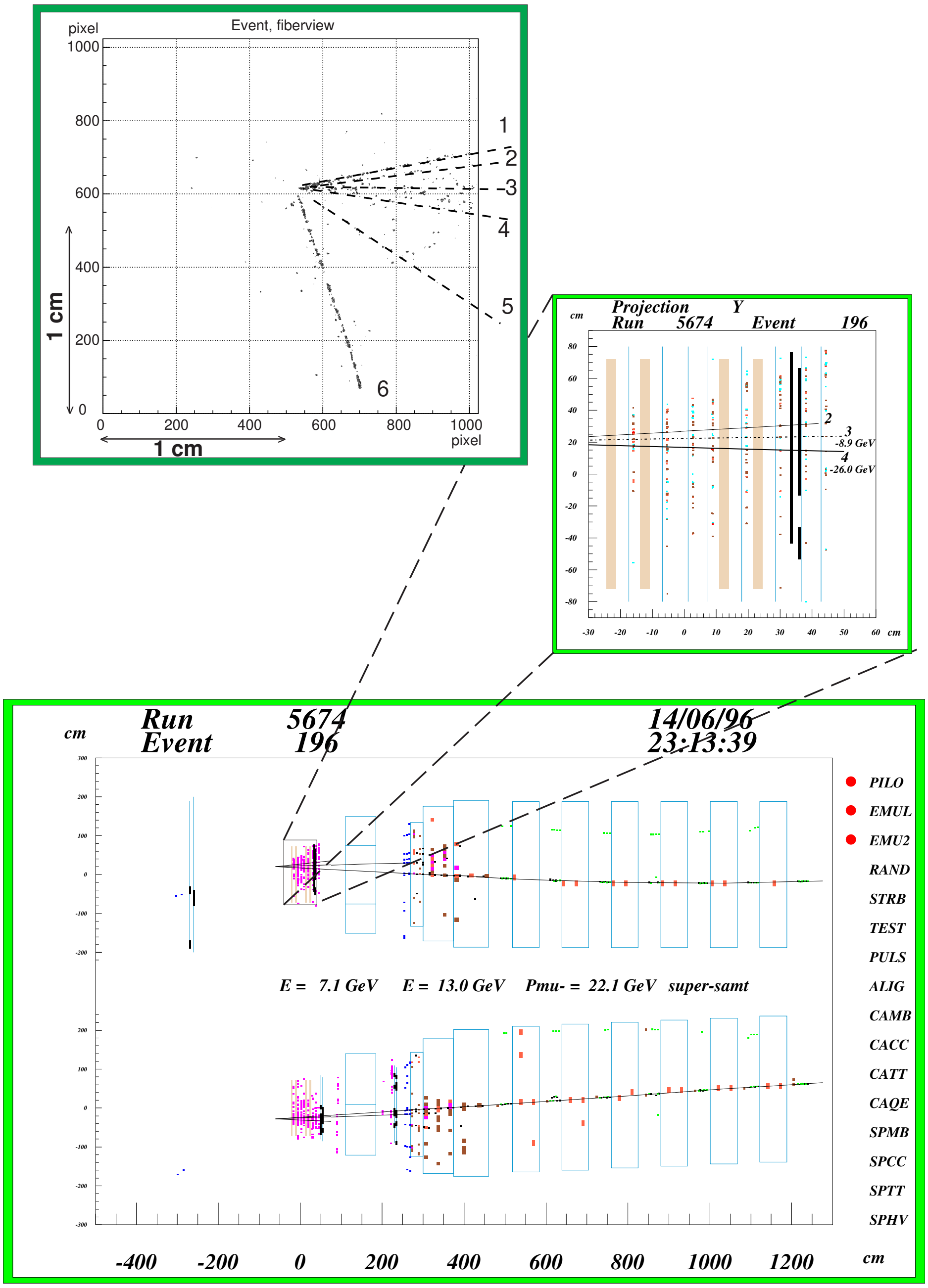
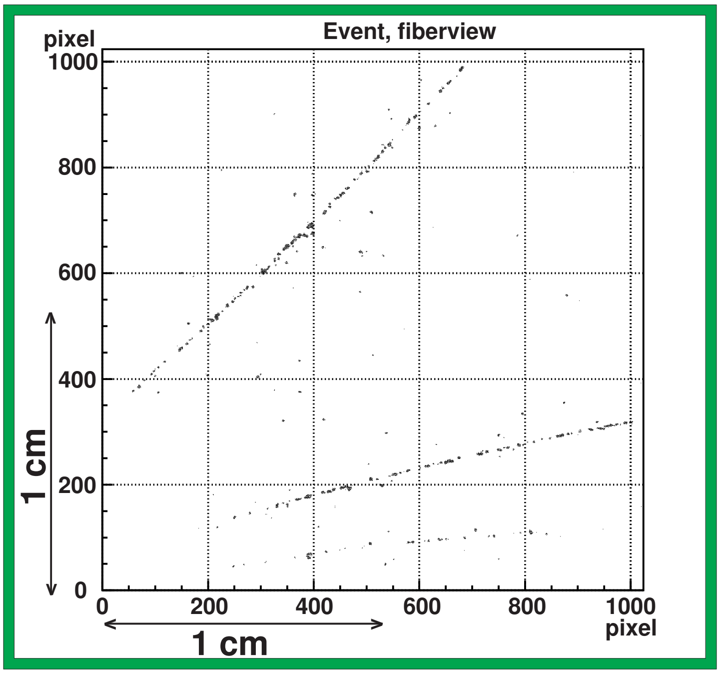


Abbildung 6.17: *Neutrinoereignis im Kapillartarget (oben links). Darunter das zugehörige Ereignis im CHORUS-Detektor. Oben rechts ein vergrößerter Ausschnitt der Region der Spurerkennungsdetektoren.*

Wie bereits in Abschnitt 4.4 beschrieben, wurde vor dem Kapillartarget ein Hilfstarget aus 2 kg Blei installiert. Die Absicht war zu untersuchen, ob Vertizes außerhalb des sichbaren Bereichs erkannt und rekonstruiert werden können.

Ein solches Ereignis ist in Abbildung 6.18 zu sehen. ACTAR konnte einen Vertex mit drei Spuren 0,51 cm vor dem Kapillartarget und somit im Inneren des Bleitargets rekonstruieren. Im CHORUS-Detektor wurden zwei vom Vertex stammende Spuren rekonstruiert. Der Abstand der von ACTAR und CHORAL rekonstruierten Vertizes beträgt etwa 0,7 mm. Dieses verglichen mit Abbildung 6.15(a) gute Ergebnis, ist auf den relativ großen Winkel zwischen den beiden von CHORAL rekonstruierten Spuren zurückzuführen.

Nur das Teilchen, das die mittlere der drei Spuren im Kapillartarget hinterlassen hat, wurde auch im CHORUS-Detektor gefunden, die Trajektroien der anderen beiden Teilchen lagen nicht in der Winkelakzeptanz. Das im CHORUS-Detektor nachgewiesene Myon hat das Kapillartarget nicht gekreuzt.



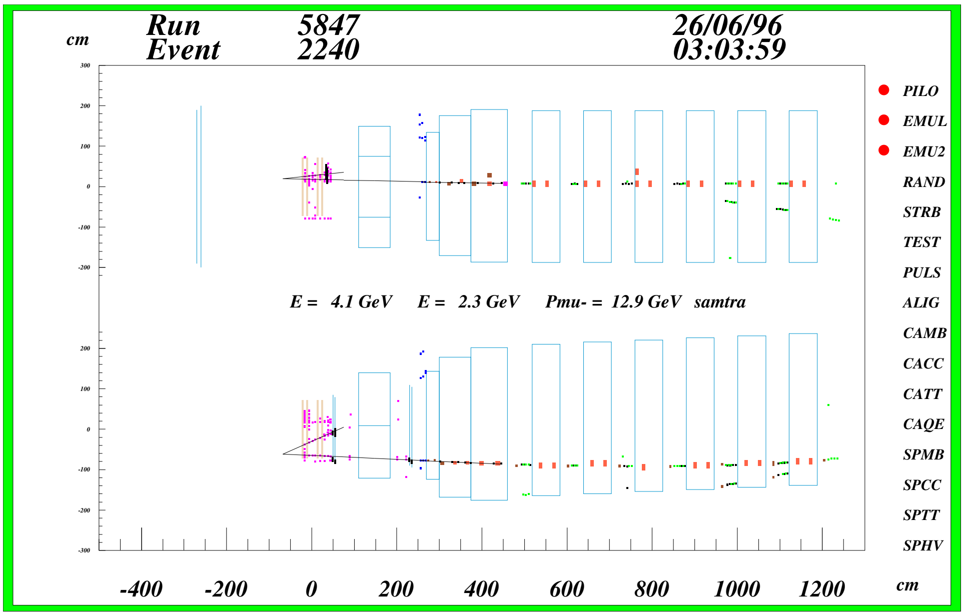


Abbildung 6.18: *Hier zu sehen sind die Spuren eines Ereignisses, das im Hilfstarget aus Blei stattfand. Im Kapillartarget sind nur drei vom Vertex ausgehenden Spuren sichtbar, nicht der Vertex selber. Auch im CHORUS-Detektor sind zwei dieser Spuren deutlich sichtbar, eine der beiden ist die Spur eines Myons.*

Kapitel 7

Ergebnisse des mit EBCCD ausgelesenen Kapillartargets

Für das durch EBCCD ausgelesene Kapillartarget existiert noch kein Programm zur Anbindung der Ereignisse an den CHORUS-Detektor. Es sollen daher lediglich zwei Beispiele von Ereignissen in diesem Kapillartarget gezeigt werden.

In Abbildung 7.1 ist ein Ereignis gezeigt, das mit dem durch EBCCD ausgelesenen Kapillartarget aufgenommen wurde. Dieses Kapillartarget befindet sich longitudinal im Neutrinostrahl.

In der Vergrößerung ist der Vertex klar zu erkennen, es gibt keinerlei Verschmierungen in der Nähe des Vertex, wie man es bisher von Ereignissen in Glasfasern kennt [20].

Bei der sehr kurzen Spur handelt es sich wahrscheinlich um ein Myon, das nahezu geradlinig durch das Target fliegt. Oberhalb des ersten Vertex ist ein zweiter Zerfallsknick sichtbar, die von dort ausgehende Spur eines stark ionisierenden Teilchens zeigt an einigen Stellen leichte Verzerrungen. Diese sind auf Mängel im Kapillarenbündel zurückzuführen.

Das Bild zeigt, daß auch die für dieses Kapillartarget gewählte Richtung längs des Strahls sehr deutliche Spuren liefert und sogar die sehr kurze Spur gut zu erkennen ist. Da bisher kein Programm existiert, daß einen Sekundärvertex der im Kapillartarget aufgezeichneten Ereignisse rekonstruieren könnte, konnte dieses Ereignis bisher nicht weiter analysiert werden.

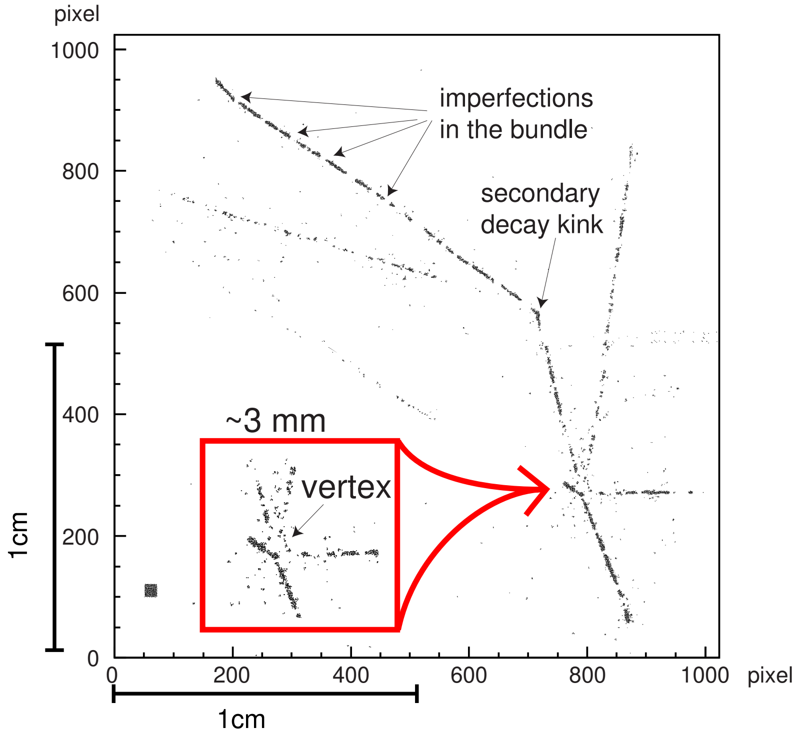
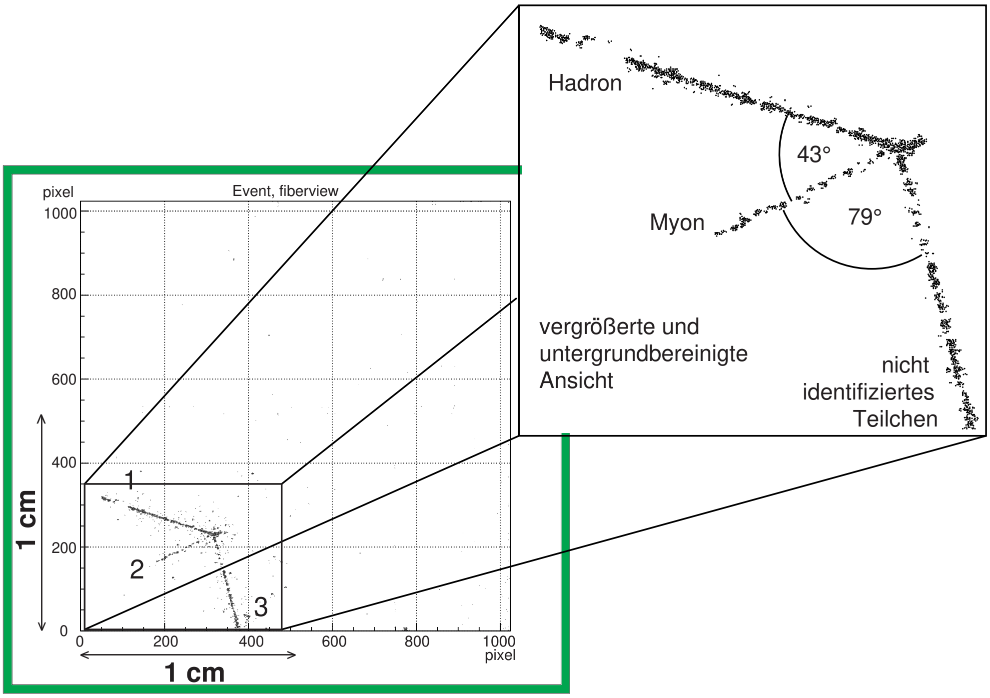


Abbildung 7.1: *Neutrinoereignis im Kapillartarget, das Target steht longitudinal zum Neutrinostrahl. Der Vertex ist sehr klar zu erkennen, es gibt keinerlei "Verschmierungen" um den Vertex. Außerdem sind leichte Fehler im Bündel in Form von leichten Verzerrungen der Spur sichtbar.*

Abbildung 7.2 zeigt ein Neutrinoereignis im Kapillartarget sowie das zugehörige CHORUS-Ereignis. Das Ereignis im Kapillartarget zeigt drei deutliche Spuren, die von einem Vertex ausgehen. Der Untergrund seitlich der Spuren stammt vermutlich von höherenergetischen Photonen, die nicht durch Totalreflexion in den Kapillaren eingefangen werden und so in benachbarten Kapillaren den Szintillator anregen können. Um einen solchen *Cross Talk* zu unterbinden müßte jede einzelne Kapillare mit einem EMA umgeben sein. In der vergrößerten Ansicht, in der auch der Untergrund herausgefiltert wurde, ist noch eine sehr kurze vierte Spur sichtbar. Diese stammt wahrscheinlich von einem Kernaufbruch. Die schwächste Spur (in der Abbildung Spur 2) stammt vermutlich von einem Myon. Diese Spur endet innerhalb des Bildes, was bedeutet, daß dieses Teilchen das Kapillartarget bis zum Ende durchquert hat und nicht seitlich aus ihm ausgetreten ist. Diese Spur muß daher im CHORUS-Detektor nachgewiesen werden können. Auch Teilchen 1 ist nicht seitlich aus dem Kapillartarget ausgetreten, die Spur endet



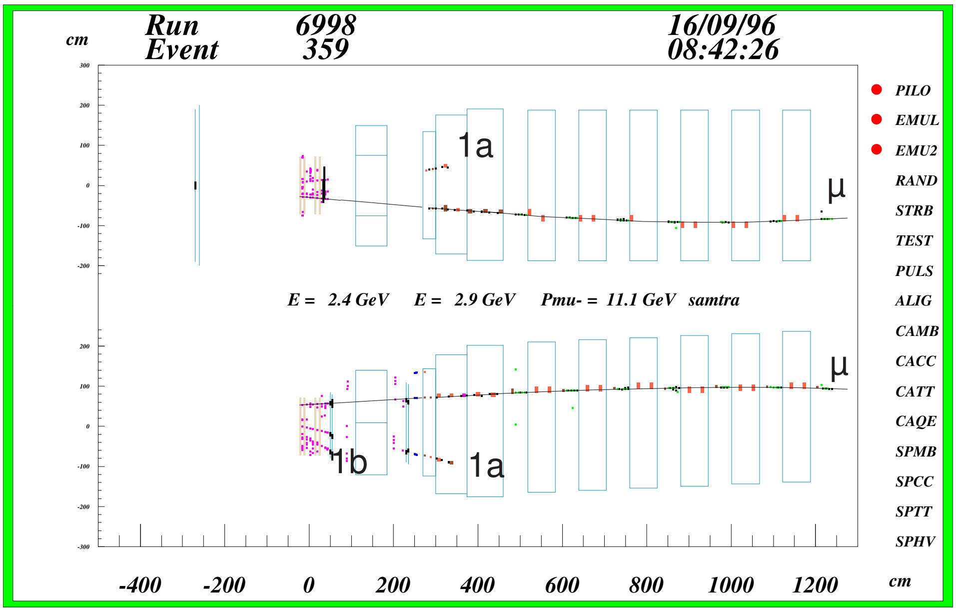


Abbildung 7.2: *Neutrinoereignis im Kapillartarget, das parallel zum Strahl orientiert ist. Oben das Bild des Kapillartargets sowie eine untergrundbereinigte Vergrößerung, darunter das gleiche Ereignis im CHORUS-Detektor.*

kurz vor dem Rand des Bildes. Anders Teilchen 3, es verläßt das Kapillartarget seitlich. Es ist daher möglich, daß es nicht in der Winkelakzeptanz des CHORUS-Detektors liegt.

Im CHORUS-Detektor wurden ein Myon und die Spuren zweier weiterer Teilchen nachgewiesen. Zum Vergleich der Spuren mit denen des Kapillartargets ist die Projektion der CHORUS-Spuren auf die y-z-Ebene nötig. Diese Projektion entspricht dem vom Kapillartarget aufgezeichneten Bild. Der Winkel zwischen Myonspur und Spur 1a beträgt in CHORUS in dieser Projektion 33°, der Winkel zu Spur 1b beträgt etwa 65°, der Winkel der beiden Spuren zueinander beträgt 32°. Der Winkel zwischen Spur 1 und Spur 2 im Kapillartarget beträgt 43°. Das läßt darauf schließen, daß es sich weder bei Spur 1a noch bei Spur 1b im CHORUS-Detektor um die Spur des Teilchens 1 im Kapillartarget handelt, sondern vielmehr um die Zerfallsprodukte dieses Teilchens.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der RD46-Kollaboration am CERN angefertigt. Es wurde der derzeitige Stand der Entwicklung eines Kapillartargets mit optoelektronischer Auslesekette dargestellt und die Möglichkeit der Anbindung eines Prototypen an den CHORUS-Detektor gezeigt.

Die Rotation des Kapillartargets gegenüber dem CHORUS-Detektor konnte in der x-y-Ebene bestimmt werden. Eine genauere Bestimmung der Rotation in anderen Ebenen scheint in Anbetracht der guten Ergebnisse der Spuranbindung nicht nötig zu sein. Bei den Untersuchungen fiel allerdings auf, daß das Kapillartarget eine leichte Torsion aufweist. Besonders im Hinblick auf die Möglichkeit, Kapillartargets in longitudinaler Richtung im Neutrinostrahl zu installieren, sollten genauere Untersuchungen dieser Torsion unternommen werden. Bei der longitudinalen Orientierung des Kapillartargets legen die Teilchen längere Strecken im Kapillarenbündel zurück, die Torsionen könnten daher die Spurauflösung deutlich beeinträchtigen.

Es konnte gezeigt werden, daß der Vertex eines Neutrinoereignisses auch bei longitudinaler Orientierung des Kapillartargets sehr deutlich erkennbar ist und keinerlei Verunreinigung des Vertex sichtbar sind, wie es bei Glasfasern bisher der Fall war ([20]). Um auch diese Ereignisse an den CHORUS-Detektor anbinden zu können, sind Spuren mit stärkerer Steigung als die der Strahlmyonen nötig, da diese Myonen das Kapillartarget nahezu geradlinig durchfliegen und so nur sehr kurze oder sogar nur punktförmige Spuren hinterlassen würden.

Für eine Analyse von Ereignissen mit sekundärem Vertex ist es notwendig, die Spurrekonstruktionsprogramme dahingehend zu erweitern, daß diese erkannt werden können. Hierzu könnte es sich als durchaus sinnvoll erweisen, bei der Analyse einzelner Ereignisse auf das Clustering zu verzichten und alle Pixel beizubehalten, da hier die exakten Ergebnisse im Vordergrund stehen und nicht wie bisher die Notwenigkeit besteht, möglichst viele Ereignisse zu analysieren.

Es konnte gezeigt werden, daß sich ein Kapillartarget als Spurerkennungsdetektor eignet und auch als Vertexdetektor nutzbar ist. Ein deutlicher Vorteil gegenüber anderen Vertexdetektoren ist seine gute Strahlenhärte, die den Einsatz z.B. in Experimenten zur B-Physik möglich und empfehlenswert macht.

Literaturverzeichnis

[1] Honerkamp, Römer, *Klassische Theoretische Physik*, 2. Auflage, Springer Verlag 1989

[2] T. Mayer-Kuckuk, *Kernphysik*, B. G. Teubner, 1992

[3] D.H. Perkins, *Hochenergiephysik*, Addison-Wesley, 1990

[4] Povh, Rith, Scholz, Zetsche, *Teilchen und Kerne*, 4. Auflage, Springer Verlag 1997

[5] K. Winter, *Neutrino physics*, Cambridge University Press 1991

[6] Press, Flannery, Teukolsky, Vetterling, *Numerical Recipes (FORTRAN Version)*, Cambridge University Press 1989, Seiten 504ff

[7] J.R. Taylor, *Fehleranalyse*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1988

[8] E. Lohrmann, *Hochenergiephysik*, B.G. Teubner Stuttgart, 1992

[9] C. Zorn, Plastic and Liquid Organic Szintillators in: *Instrumentation in High Energy Physics*, Editor: Fabio Sauli, 1993, S.218-279

[10] K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, B.G. Teubner Stuttgart 1992

[11] R. M. Barnett et al., Particle Physics Booklet, American Institute of Physics, Juli 1996

[12] G. Acqustapace et al, The West Area neutrino facility for CHORUS and NOMAD experiments (94-97), CERN-ECP/95-014, Juli 1995

[13] E. Eskut et al, The CHORUS Experiment to search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations, CERN-PPE/97-33, März 1997

[14] P. Annis et al., The CHORUS Scintillating Fiber Tracker and Opto-electronic Readout System, CERN-PPE/97-100, Juli 1997

[15] G. Brooijmans, The alignment of the CHORUS target trackers, CHORUS internal report, Januar 1996

[16] R. van Dantzig et al., High resolution tracking devices based on capillaries filled with liquid scintillator, CERN/LHCC 95-7, 1995

[17] J. Konijn, RD46 Status Report, CERN/LHCC 97-38, Juni 1997

[18] M. Glaubman, Application of plastic scintillationg fibers in L3
S. Reucroft, Scintillating fiber applications in the TEXAS-SSC experiment,
Proceeding of Workshop on Application of Scintillating Fibers in Particle Physics, Blossin 1990
P. Annis et al., The CHORUS Scintillating Fiber Tracker and Opto-electronic Readout System, CERN-PPE/97-100, Juli 1997

[19] W. Siegmund et al., Glass capillary production possibilities, Proceeding of Workshop on Application of Scintillating Fibers in Particle Physics, Blossin, 1990

[20] C.Roda, Use of a scintillationg fibre microvertex detector in a fixed target experiment, Proceeding of Workshop on Application of Scintillating Fibers in Particle Physics, Blossin, 1990

[21] S.V. Golovkin et al., Radiation damage studies of new liquid scintillators and liquid-core scintillating fibers, IHEP 94-33, Mai 1994

[22] S. Buontempo et al., Development of large-volume, high-resolution tracking detectors based on capillaries filled with liquid scintillator, NIM **A360**(1995)7

[23] S. Buontempo et al., Experimental results from a large volume active target made of glass capillaries and liquid scintillator, NIM **A367**(1995)377

[24] Golovkin et al., Influence of Neutral Gas Atmospheres and Temperature on New Liquid Scintillators Light Outputs, IHEP 97-12, 1997

[25] A. Atamanov et al., Investigations on capillaries filled with liquid scintillators for high resolution particle tracking, NIM **A300**(1991)53

[26] P. Annis et al., A Single-Photon Multichannel Detector: the Megapixel EBCCD, proceeding SCIFI 1997

[27] S. Buontempo et al., The Megapixel EBCCD: a high-resolution imaging tube sensitive to single photons, CERN-EP/98-36, Februar 1998

[28] P. Annis, private Mitteilung

[29] ZEBRA, CERN Program Library, Februar 1995

[30] MINUIT, CERN Program Library, Mai 1992

[31] J. Brunner, CHORAL-Manual, August 1996

[32] M. Gruwé, Design and tests of the optoelectronic chains for the CHORUS neutrino oscillation experiment, Dissertation an der Université Libre de Bruxelles, November 194

[33] K. Höpfner, Development of a novel detector for tau-neutrino interactions, Dissertation an der Humbolt-Universität, Berlin, Oktober 1995

[34] T. Wolff, Test und Betrieb eines Glaskapillarendetektors mit einer optoelektronischen Auslesekette, Diplomarbeit an der WWU Münster, April 1996

[35] E. Pesen, NÖTRİNO FİZİĞİ İÇİN IŞIK VEREN FİBER DETEKTÖR, Diplomarbeit an der METU Ankara, September 1992

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während meiner Diplomarbeitszeit unterstützt und so zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben, besonders denen, die ich im folgenden vergessen haben sollte.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Frekers für die Möglichkeit, in einer internationalen Kollaboration an einem interessanten Thema zu arbeiten, sowie die Ermöglichung längerer Aufenthalte am CERN.

Ich danke meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe Prof. Frekers für das angenehme Arbeitsklima und für zahlreiche interessante Gespräche zu physikalischen, gesellschaftlichen und computerspezifischen Themen. Insbesondere danke ich Dirk Rondeshagen, der sich auch nach der tausendsten Frage noch Zeit für mich genommen hat, und Thomas Wolff für die ausdauernde Unterstützung.

Ich danke allen Mitgliedern der RD46-Kollaboration für das mir entgegengebrachte Vertrauen, besonders Kerstin Höpfner für viele konstruktive Gespräche, Patrio Annis für die Einführung in das Gebiet der Verzerrungskorrekturen und Pasquale Migliozzi für die gute Zusammenarbeit beim Erstellen der durch CHORAL einzulesenden Datenfiles.

Ich danke den Mitgliedern der CHORUS-Kollaboration, die eine angenehme Arbeitsathmosphäre am CERN schafften und immer bereit waren, Fragen zu beantworten. Besonderer Dank gilt Jürgen Brunner für die unermüdliche Hilfe bei Fragen zu CHORAL und Helge Meinhardt für die Lösung zahlreicher Computerproblemen.

Außerdem möchte ich Verena Horneffer und Heinz-Hermann Adam für das Korrekturlesen dieser Arbeit und die damit verbundenen Nachhilfestunden zur Rechtschreibung und zum deutschen Satzbau danken.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Freund Dirk, der mich während der gesamten Diplomarbeitszeit unterstützt und meine Launen so tapfer ertragen hat.

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit ohne fremde Hilfe verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, im April 1998