Kalibration und Steuerung der Bildverstärkerketten im CHORUS-Experiment

Diplomarbeit
von
Dirk Rondeshagen

vorgelegt am Institut für Kernphysik
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Januar 1994

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie

Neutrinos sind seit der Zeit Fermis und Paulis eng mit dem Verständnis der schwachen Wechselwirkung verbunden. Ihnen kommt eine Schlüsselrolle bei den Großen Vereinigungstheorien (Grand Unified Theories (GUT)) zu. Da Neutrinos ungeladene Leptonen sind, unterliegen sie nur der schwachen Wechselwirkung und sind dadurch von besonderem Interesse in der Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik sowie in der Kosmologie. Aufgrund ihres sehr kleinen Wechselwirkungsquerschnittes von $\sim 10^{-38}\mathrm{cm}^2/\mathrm{GeV}$ ist ein relativ hoher experimenteller Aufwand nötig, um Neutrinoereignisse nachzuweisen.

1.1 Grundlagen

Experimentell wurden zwei verschiedene Neutrinoarten nachgewiesen:

$$\nu_e \quad \text{und } \nu_\mu$$

Für ein drittes Neutrino, das ν_τ, gibt es durch den τ-Zerfall einen indirekten Nachweis.

Diese beobachteten Neutrinos sind alle linkshändig[1], die Antineutrinos rechtshändig[2]. Sollten die Antiteilchen der linkshändigen Neutrinos rechtshändig sein, so ergibt sich, daß ein Neutrino nicht durch Ladungskonjugation in ein Antiteilchen überführt werden kann.
Wäre das Neutrino ein Dirac-Teilchen, so ginge ein linkshändiges Teilchen in ein rechtshändiges Antiteilchen über. Beim Majorana-Teilchen wäre es dagegen sein eigenes Antiteilchen.
Die drei Neutrinosorten werden mit den anderen geladenen Leptonen in Familien eingeteilt:

$$\begin{pmatrix} \mathrm{e} \\ \nu_{\mathrm{e}} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

[1]Linkshändig: Spinrichtung ist der Impulsrichtung entgegengesetzt.
[2]Rechtshändig: Spinrichtung ist gleich der Impulsrichtung.

Im einfachsten GUT-Modell ergibt sich nur ein unabhängiges Neutrino, das linkshändig ist (hierbei wird nur eine Familie betrachtet). Es enthält also nur das eine bekannte Neutrino (linkshändiges Neutrino und sein rechtshändiges Antineutrino). Eine Diracmasse ist nicht möglich, da im minimalen Standardmodell kein ν_R existiert[3]. Das Neutrino bleibt masselos.

Im erweiterten Standardmodell existieren neben linkshändigen Neutrinos auch rechtshändige. ν_L und ν_R können zu einem Dirac-Feld[4] kombiniert werden:

$$\nu^D = \nu_L + \nu_R$$

Das Dirac-Feld ist zusammen mit den anderen Fermionen in einem Multiplett angeordnet. Dieses sind die Quarks und die Leptonen einer Familie.

$$\mathrm{F} = \begin{bmatrix} \mathrm{q}_1 \\ \mathrm{q}_2 \\ \mathrm{l} \\ \nu \end{bmatrix}$$

Dieses Multiplett besteht aus den Quarks (q_1 und q_2) und den Leptonen (l und ν) einer Familie, z.B. up-Quark, down-Quark, Elektron und Elektronneutrino. Im erweitertem Standardmodell existiert ein Dirac-Massenterm, der nicht unabhängig von den anderen (Dirac)-Fermionen-Massen ist. Dieser Dirac-Massenterm ist proportional zur u-Quark-Masse mit einem Proportionalitätsfaktor von ≈ 1.

$$\mathrm{m}_\nu^D \approx \mathrm{m}_u \approx 5\ \mathrm{MeV}$$

Eine derartig große Neutrinomasse ist natürlich völlig unrealistisch, da experimentell nur eine Masse von höchstes einigen eV in Frage kommt. Eine mögliche Erklärung ergibt sich dadurch, daß im erweiterten Standardmodell auch ein Majorana-Massenterm erlaubt ist. Es könnten sowohl Dirac-Masse für alle Fermionen als auch Majorana-Masse für das Neutrino erzeugt werden. Die Masse des leichten Neutrinos ist also um den Faktor $\mathrm{m}^D/\mathrm{m}^M$ gegenüber der ursprünglichen Dirac-Masse unterdrückt ($\mathrm{m}^M \sim 10^9$ GeV).

---

[3] Die Indizes in ν_L und ν_R bezeichnen links- und rechtshändige Neutrinos.

[4] Die hochstehenden Indizes bei ν^D und ν^M bezeichnen Dirac- und Majorana-Neutrinos

Hierbei würde sich neben dem leichten auch ein schweres Neutrino ergeben. Dieser von Gell-Mann, Ramond und Slansky [Gel79], Yanagida [Yan79] und Stech [Ste80] vorgeschlagene See-Saw-Mechanismus[5] beschreibt das Zustandekommen des leichten Neutrinos.

Die Massenhierarchie beschreibt einen Zusammenhang zwischen Neutrini-Massen, Leptonenmassen und den Massen von u-, c- und t-Quark.

$$\mathrm{m}_{\nu_e} : \mathrm{m}_{\nu_\mu} : \mathrm{m}_{\nu_\tau} = \mathrm{m}_e^2 : \mathrm{m}_\mu^2 : \mathrm{m}_\tau^2$$

oder

$$\mathrm{m}_{\nu_e} : \mathrm{m}_{\nu_\mu} : \mathrm{m}_{\nu_\tau} = \mathrm{m}_u^2 : \mathrm{m}_c^2 : \mathrm{m}_t^2$$

Neutrinos sind Hauptkandidaten für das beobachtete Massedefizit im Weltall (Beobachtungen über Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien). Neutrinos mit einer Masse von ~ 20 eV würden dieses Massendefizit erklären. Hierbei käme hauptsächlich das τ-Neutrino in Frage, da, durch den See-Saw-Mechanismus bedingt die beiden anderen Neutrinomassen wesentlich kleiner sind. Nach dem Big-Bang-Modell wird eine momentane Massendichte von 300 Neutrinos pro cm^3 angenommen. Mit dieser Masse könnte das Weltall geschlossen sein.

1.2 Neutrinooszillationen

Wenn Neutrinos eine Masse aufweisen, sind auch Neutrinooszillationen möglich. Hierbei sind Massen-Eigenzustände der Neutrinos nicht gleich Flavor-Eigenzustände. Die Flavor-Eigenzustände sind vielmehr Linearkombinationen der Massen-Eigenzustände. Zum Verständnis der Neutrinooszillationen muß die vorhandene Beschränkung auf eine Familie aufgegeben werden. Flavoreigenzustände sind definiert als Wechselwirkungszustände, was bedeutet, daß z.B. das Elektron-Neutrino definiert ist als Zustand, an dem nur der elektronische schwache Strom auftritt, nicht aber der myonische oder tauonische. Jeder Zustand $|\nu_l\rangle$ enthält mehrere Massenkomponenten $|\nu_i\rangle$. Der Index l steht für eine beliebige

[5] engl. see-saw : Wippe. Es ist ein bildlicher Ausdruck für das Zustandekommen der leichten Neutrinomasse. Je leichter das leichte Neutrino, desto schwerer muß das schwere-Neutrino sein.

Leptonenfamilie. Für das Elektron-Neutrino ergibt sich:

$$|\nu_e\rangle = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{U}_{ei}|\nu_i\rangle.$$

$|\nu_i\rangle$ sind Eigenzustände zur Massenmatrix (Masseneigenzustände) mit den zugehörigen Massen m_i und einer unitären Mischungsmatrix $\mathbf{U}$. Die Nichtidentität von Masseneigenzuständen und Flavoreigenzuständen führt zur Neutrinooszillation.

1.2.1 Stationärer Fall

Eine ν_e-Quelle am Ort $\vec{x} = 0$ emittiert kontinuierlich Elektron-Neutrinos mit einer definierten Energie E. Der dadurch erzeugte Neutrinozustand ist

$$|\nu(x)\rangle = \mathrm{e}^{-iEt} \sum_i \mathbf{U}_{e_i}|\nu_i\rangle \mathrm{e}^{+i\vec{p}_i\vec{x}}.$$

Nur für $\vec{x} = 0$ ist zunächst gewährleistet, daß die Phasenrelation dem Elektron-Neutrino entspricht. Für $\vec{x} \neq 0$ ist im allgemeinen $|\langle\nu_e||\nu(\vec{x},t)\rangle|^2 < 1$.

Für $m_i \ll E$ für alle i kann für den Impulsübertrag p_i die Näherung $p_i \sim E - \frac{m_i}{2E}$ verwendet werden. Für Punkte entlang der Impulsrichtung $\vec{p}$ im Abstand r von der Quelle ist der Neutrinozustand gegeben durch

$$|\nu(r,t)\rangle = \mathrm{e}^{-iEt}\mathrm{e}^{iEr} \sum_i \mathbf{U}_{ei}|\nu_i\rangle \mathrm{e}^{\frac{-im_i^2 r}{2E}}.$$

Die Wahrscheinlichkeitsamplitude, am Ort r ein Elektron-Neutrino zu finden, ist gegeben durch

$$\langle\nu_e||\nu(t,r)\rangle = \mathrm{e}^{-iE(t-r)} \sum_i \mathbf{U}_{ei}\mathbf{U}^*_{ei}\mathrm{e}^{-\frac{im_i^2}{(2E)}}$$

und die Wahrscheinlichkeit durch

$$\begin{aligned} P_{\nu_e\to\nu_e(r)} = |\langle\nu_e||\nu(t)\rangle|^2 &= \left\{\sum_i |\mathbf{U}_{ei}|^2 \mathrm{e}^{\frac{-im_i^2 r}{2E}}\right\}\left\{\sum_j |\mathbf{U}_{ej}|^2 \mathrm{e}^{\frac{-im_j^2 r}{2E}}\right\} \\ &= \sum_i |\mathbf{U}_{ei}|^4 + \sum_{i<j} |\mathbf{U}_{ei}\mathbf{U}_{ej}|^2 2\cos\left(\frac{2\pi r}{L_{ij}}\right) \end{aligned}$$

mit der Oszillationslänge

$$L_{ij} = \frac{4\pi E}{|m_i^2 - m_j^2|}.$$

Die Wahrscheinlichkeit, ein Neutrino aus einer anderen Familie anzutreffen, ist

$$\sum_{l \neq e} P_{\nu_e \to \nu_l}(r) = 1 - P_{\nu_e \to \nu_e}(r).$$

1.2.2 Zwei-Zustands-Mischung

Bei der Analyse experimenteller Daten beschränkt man sich meist auf eine Zwei-Zustands-Mischung. Die Mischungsmatrix ist dann gegeben durch:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \mathrm{e}^{i\rho} \\ -\sin\theta \mathrm{e}^{-i\rho} & \cos\theta \end{pmatrix}.$$

Dieser Mechanismus ist analog der Mischung bei Quarks (Kobayashi-Maskawa-Matrix). Wenn CP-Invarianz angenommen wird, läßt sich zeigen, daß der Phasenfaktor $\mathrm{e}^{i\rho}$ lediglich die Werte 1 oder i annehmen kann [Wol81]. Dieser Phasenfaktor ist zwar für die Neutrinooszillation ohne Bedeutung, spielt aber beim neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfall eine Rolle.

Ausgedrückt in den Masseneigenzuständen $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$ sind z.B. das Myon- und Tauneutrino gegeben durch

$$|\nu_\mu\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\tau\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle.$$

Die Wahrscheinlichkeit, wieder ein ν_l $(l = e, \mu, \tau)$ anzutreffen, ist also

$$P(\nu_l \to \nu_l, L) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1,27\Delta m^2[(\mathrm{eV/c^2})^2]L[\mathrm{km}]}{E[\mathrm{GeV}]}\right),$$

und für das Antreffen eines Neutrinos aus einer anderen Familie

$$P(\nu_l \to \nu_{l'}, L) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1,27\Delta m^2[(\mathrm{eV/c^2})^2]L[\mathrm{km}]}{E[\mathrm{GeV}]}\right).$$

Der Wert 1,27 ergibt sich aus den entsprechenden numerischen Werten von $\hbar$ und c.
Diese Wahrscheinlichkeite

$$P_{\nu_l \to \nu_l} \text{ und } P_{\nu_l \to \nu_{l'}}$$

oszillieren also mit der charakteristischen Länge L, woraus sich auch der Name Neutrinooszillationen ableitet. Die Amplitude der Oszillation ist abhängig vom Mischungswinkel und wird am größten für $\Theta = 45°$ (maximale Mischung).

Da im Falle nicht verschwindender Neutrinomasse i. a. $m_1 \neq m_2$ und auch $\theta \neq 0$ erwartet wird, bilden Neutrinooszillationen eine wichtige Testmöglichkeit, um nach einer Neutrinomasse zu suchen.

1.3 Experimentelle Möglichkeiten

Es stehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Messung von Neutrinooszillationen zur Verfügung. Dies sind die "Disappearance"- und "Appearance"-Experimente.

Bei Disappearance-Experimenten wird versucht, die Abnahme der Intensität einer Neutrinosorte im Neutrinostrahl nachzuweisen. Hierbei muß vorher die absolute Intensität des Neutrinostrahles bestimmt werden. Es werden zwei Detektoren verwendet, die in unterschiedlichen Entfernungen zur Quelle aufgestellt werden. Nach der Normierung des Neutrinoflusses werden die beiden Ergebnisse miteinander verglichen. Fehlerquellen sind z.B. durch ungenaue Kenntnis des Wechselwirkungsquerschnittes oder der Detektoreffizienz gegeben. Um eine gute Statistik zu erhalten, sind bei Disappearance-Experimenten eine große Zahl von Ereignissen erforderlich.

In einem Appearance-Experiment wird in einem anfangs reinen Strahl einer Neutrinosorte nach Oszillationsneutrinos einer anderen Sorte gesucht. Strahlverunreinigungen mit Neutrinos einer anderen Sorte stellen hier die Grenze der Nachweiswahrscheinlichkeit dar. Im Gegensatz zu Disappearance-Experimenten reichen hier wenige Ereignisse aus, um Neutrinooszillationen nachzuweisen.

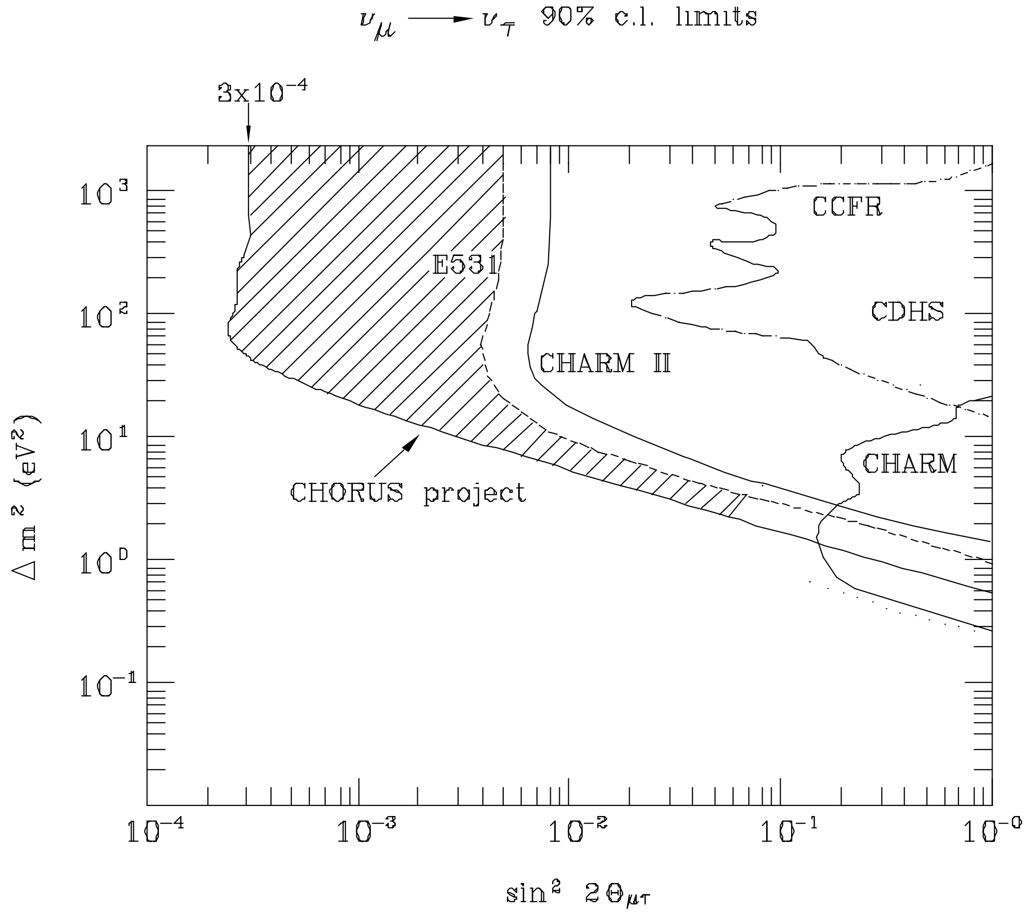

Abbildung 1.1: Ausschlußdiagramm für den Oszillationskanal $\nu_\mu \to \nu_\tau$

Die beiden Parameter Δm^2 und $\sin^2 2\theta$, die über die Formel

$$P(\nu_\mu \to \nu_\tau, L) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1,27 \Delta m^2 [(\mathrm{eV/c^2})^2] L[\mathrm{km}]}{E[\mathrm{GeV}]} \right)$$

miteinander verknüpft sind, ergeben eine Aussage über Neutrinooszillationen. Sie werden in sogenannten Ausschlußdiagrammen aufgetragen und bilden parametrisierte Flächen. Hierbei ist das Verhältnis L/E in den Messungen von entscheidender Bedeutung. Ein großes L/E bedeutet eine hohe Sensitivität bezüglich kleiner Δm^2, während ein kleines L/E eine hohe Sensitivität bezüglich $\sin^2 2\theta$ bedingt. Abb. 1.1 zeigt den Ausschlußbereich verschiedener Experimente. Es sind hierbei Grenzen von $\nu_\mu \to \nu_\tau$ Oszillationen aufgetragen. Das CHORUS-Experiment wird diesen Bereich um zwei Größenordnungen verbessern.

1.3.1 Empfindlichkeit verschiedener Experimente

Als Quellen für Neutrinos stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Jede dieser Quellen hat ihre Besonderheit, die für die Durchführung eines Experimentes von Wichtigkeit ist. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den Parameter Δm^2_{min} für verschiedene Typen von Neutrinoexperimenten und damit einen Vergleich der Empfindlichkeitsbereiche zum Nachweis von Neutrinooszillationen.

Neutrinoquelle	E_{min} [MeV]	r_{max} [m]	Δm^2_{min} $[(\text{eV})^2]$
Reaktor	1	10^2	$3 \cdot 10^{-2}$
Hochenergie-Beschleuniger	10^3	10^4	$3 \cdot 10^{-1}$
Sonne	$2 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{-12}$

Reaktorneutrinos

Mit einem Kernreaktor steht eine intensive terrestrische Quelle von $\bar{\nu}_e$-Neutrinos zur Verfügung, da durch den Spaltungsprozeß im Reaktor werden Elemente erzeugt, die durch einen Betazerfall Antineutrinos erzeugen:

$$^A_Z X_N \rightarrow {}_{Z+1}^{\;\;A} X_{N-1} + e + \bar{\nu}_e.$$

Reaktorexperimente sind empfindlich auf kleine Massendifferenzen Δm^2, da die Energie der Neutrinos klein ist ($\sim 1 - 2$ MeV). Sie haben allerdings den Nachteil, daß nur die Abnahme des $\bar{\nu}_e$-Flusses und nicht das Auftreten einer Oszillation selbst nachgewiesen werden kann (Disappearance-Experiment).

Überblick über Reaktor-Oszillationsexperimente:

Experiment	Reaktor-Leistung $[GW_{th}]$	Abstände der Detektoren [m]	Δm^2 $[(eV)^2]$ bei $\sin^2 2\theta$=0,25
Gösgen (Ch)	2,8	37,9 45,9 64,7	$\sim$ 0,3
Bugey (F)	2,8	13,6 18,3	$\sim$ 0,1
Savannah River (USA)	2,3	18,5 23,8	
Rovno (UdSSR)	1,38	18, 25	

Beschleunigerneutrinos

Durch Hochenergiebeschleuniger stehen infolge von π- und K-Zerfälle intensive ν_μ- und $\bar{\nu}_\mu$-Strahlen zur Verfügung:

$$
\begin{array}{lcll}
\pi^+ & \to & \mu^+\nu_\mu & 99,98\% \\
\pi^- & \to & \mu^-\bar{\nu}_\mu & 99,\% \\
\mathrm{K}^+ & \to & \mu^+\nu_\mu & 63,51\% \\
\mathrm{K}^- & \to & \mu^-\bar{\nu}_\mu & 63,51\%
\end{array}
$$

Beim Zerfall werden Myon-Neutrinos erzeugt. Hiermit lassen sich Oszillations-Experimente durchführen, bei denen nach Neutrinos eines anderen Flavors gesucht wird. Neutrino-Experimente an Hoch-Energie-Beschleunigern sind auf grund ihre Energie sensitiv auf kleine Mischungswinkel θ, jedoch weniger sensitiv auf kleine Massendifferenzen Δm^2.

Disappearance-Experimente:

Experiment	Beschleuniger	Targetmasse [t]	Δm^2 $[(eV)^2]$ bei $\sin^2 2\theta$ =0,25
CDHS (CERN)	SPS	100; 600	$\sim$ 0,3
CHARM (CERN)	PS	36; 102	$\sim$ 0,4
CCFR (Fermilab)		105; 444	$\sim$20

Appearance-Experimente:

Experiment	Beschleuniger	Targetmasse [kg]	Δm^2 $[(eV)^2]$ bei $\sin^2 2\theta$=0,25)
E531 (Fermilab)		83	$\sim$ 13
CHARM II (CERN)	SPS		$\sim$ 20
CHORUS (CERN)	SPS	800	$\sim$ 0,8

Sonnenneutrinos

Eine besonders interessante Quelle für Elektron-Neutrinos stellt die Sonne dar. Die Meßstrecke r, auf der sich Oszillationen auswirken können, ist der Abstand Sonne-Erde ($\approx 1,5 \times 10^{11}$m). Dadurch wirken sich schon extrem kleine Massendifferenzen aus.

Im Experiment von Davis [Dav68] [Dav84] ist es gelungen, Elektron-Neutrinos mittels der Kernreaktion ^{37}Cl$(\nu_e, e^-)^{37}$Ar nachzuweisen. Die ermittelte Rate von $1,95 \pm 0,3$ SNU[6] blieb um einen Faktor 3 unter dem Standard-Sonnenmodell. Eine Erklärung kann die Annahme von Neutrinooszillationen bieten. Das Defizit ist aber mit der Vakuumoszillation allein nicht zu erklären. Der Oszillationseffekt in Materie (Sonne) wäre zu berücksichtigen (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein-Effekt). Zur Beantwortung der Frage, ob das Standard-Sonnenmodell möglicherweise nicht korrekt ist oder ob Neutrinooszillation die Ursache des

[6]SNU (Solar Neutrino Unit). 1 SNU = 1 Einfang pro Sekunde bei 10^{36} Targetatomen.

Neutrinodefizites ist, werden noch weitere Solar-Neutrino-Experimente beitragen. Hier sind das GALLEX[7]-, das SAGE[8]-, das SNO[9]- und das Kamiokande[10]-Experiment zu nennen, von denen weitere Aufschlüsse über die Natur des Neutrinos erwartet werden.

[7]Gallium-Experiment [Ans92]
[8]Sowjetisch-Amerikanisches-Gallium-Experiment [Aba91]
[9]Sudbury Neutrino Observatory
[10]Kamioka-Mine, Japan [Hir90]

2. CHORUS

Das CHORUS-Experiment (**C**ern **H**ybrid **O**scillation **R**esearch ApparatUS) hat das Ziel, Neutrinooszillationen von $\nu_\mu \to \nu_\tau$ direkt nachzuweisen. Grundlegend für das Auffinden von Kandidaten für die Oszillationen ist das Selektieren der Ereignisse, die durch ν_μ und ν_τ induziert werden und ein τ^- im Endzustand enthalten. Da das τ^- sehr schnell zerfällt, werden dessen Zerfallsmodi untersucht.

$$
\begin{aligned}
\nu_{\mu(\tau)} N &\to \tau^- X \\
&\qquad \tau^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \\
&\qquad \tau^- \to \pi^- \nu_\tau \\
&\qquad \tau^- \to \pi^- \pi^+ \pi^- (n\pi^0 \nu_\tau)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\nu_\mu N &\to \mu^- X \\
&\to \nu_\mu X
\end{aligned}
$$

Um den dem Zerfallsknick des τ aufzufinden, verwendet man auf Grund seiner guten Auflösung eine Emulsion (Abb.2.2).

Der CHORUS-Detektor verbindet eine Vielzahl einzelner Komponenten, die zusammen eine Einheit bilden. Kernstück des Detektors ist ein Emulsionstarget, das in mehrere einzelne Platten aufgeteilt ist. Zwischen und hinter den Emulsionsplatten befinden sich Gruppen aus Szintillationsfasern (Target-Tracker), die die Teilchenspuren in die Emulsion zurückverfolgen. Diesen Target-Trackern folgt wieder eine Gruppe aus Szintillationsfasern (Diamond-Tracker), zwischen denen sich ein Magnet (Hexagonalmagnet) befindet. Mit dieser Kombination aus Diamond-Tracker und Hexagonalmagnet können Ladung und Impuls der Teilchen bestimmt werden. Es folgt ein ortsauflösendes Kalorimeter, das die Energie der Teilchen bestimmt. Als letzter Bestandteil folgt ein Myonenspektrometer, das die Spur der Myonen aufzeigt. Alle diese Informationen über Art der Teilchen, Energie, Ladung und räumliche

Lage dienen dazu, Kandidaten für ν_τ-induzierte Ereignisse in der Emulsion aufzufinden.

2.1 Emulsionstarget

Das Emulsionstarget hat ein Gesamtvolumen von 230 l und eine Masse von 800 kg. Es ist segmentiert in 2×2 Stacks von je $1,44 \times 1,44$ m^2 mit einer Dicke von 2,75 cm. Jeder Stack besteht aus 8 Sektoren von $0,71 \times 0,36$ m^2 Fläche. Ein Sektor wiederum besteht aus 25 Emulsionsplatten (Sheets) mit einer Dicke von 550 μm. Diese Platten werden beidseitig auf eine 70 μm dicke Folie aufgebracht und hintereinander geschichtet. Zur späteren Analyse werden die Emulsionssektoren in 70×70 mm^2 große Stapel (Tower) zerschnitten (Abb. 2.3). Diese Mini-Plates werden dann ausgelesen. Die Teilchenspuren liegen fast immer senkrecht zu den Platten. Diese Konfiguration erlaubt ein schnelles semiautomatisches und teilweise auch vollautomatisches Auslesen (scanning), welches während der letzten zehn Jahre in Nagoya (Japan) entwickelt wurde.

Drei Hilfs-Emulsionsplatten (Wechsel-Sheets) werden vor dem ersten Target-Tracker angebracht. Die Spurmessung mit den Faser-Trackern liefert eine Vorhersage der Spurposition in den Sheets mit einer Genauigkeit von 300 μm^2 und einer Winkelauflösung von $\Delta\theta \sim 0,3$ mrad. Durch automatisches Scanning der Sheets wird die Spurposition auf eine Fläche von 1 μm^2 reduziert, mit einer Winkelauflösung beider Platten von $\Delta\theta \sim 0,2$ mrad. Diese Platten werden als Wechselplatten bezeichnet, da sie während der Strahlzeit alle drei Wochen ausgewechselt werden, um den entstehenden Untergrund in den Sheets möglichst gering zu halten. Jeder dieser Stacks wird vakuumverpackt. Die Wechselplatten werden in einen Rahmen eingesetzt, in dem sich auch die Szintillationsfaserdetektoren befinden.

Um die große Anzahl der Ereignisse in den Faser-Trackern, die der Emulsion folgen, zu handhaben, ist eine Distanz von 40 mm bzw. 50 mm zwischen der Target-Emulsion und den zwei Wechselplatten erforderlich. Zwei andere Emulsionsplatten, ähnlich denen der Wechselplatten, werden kurz vor dem Hauptteil der Emulsion angebracht. Eine

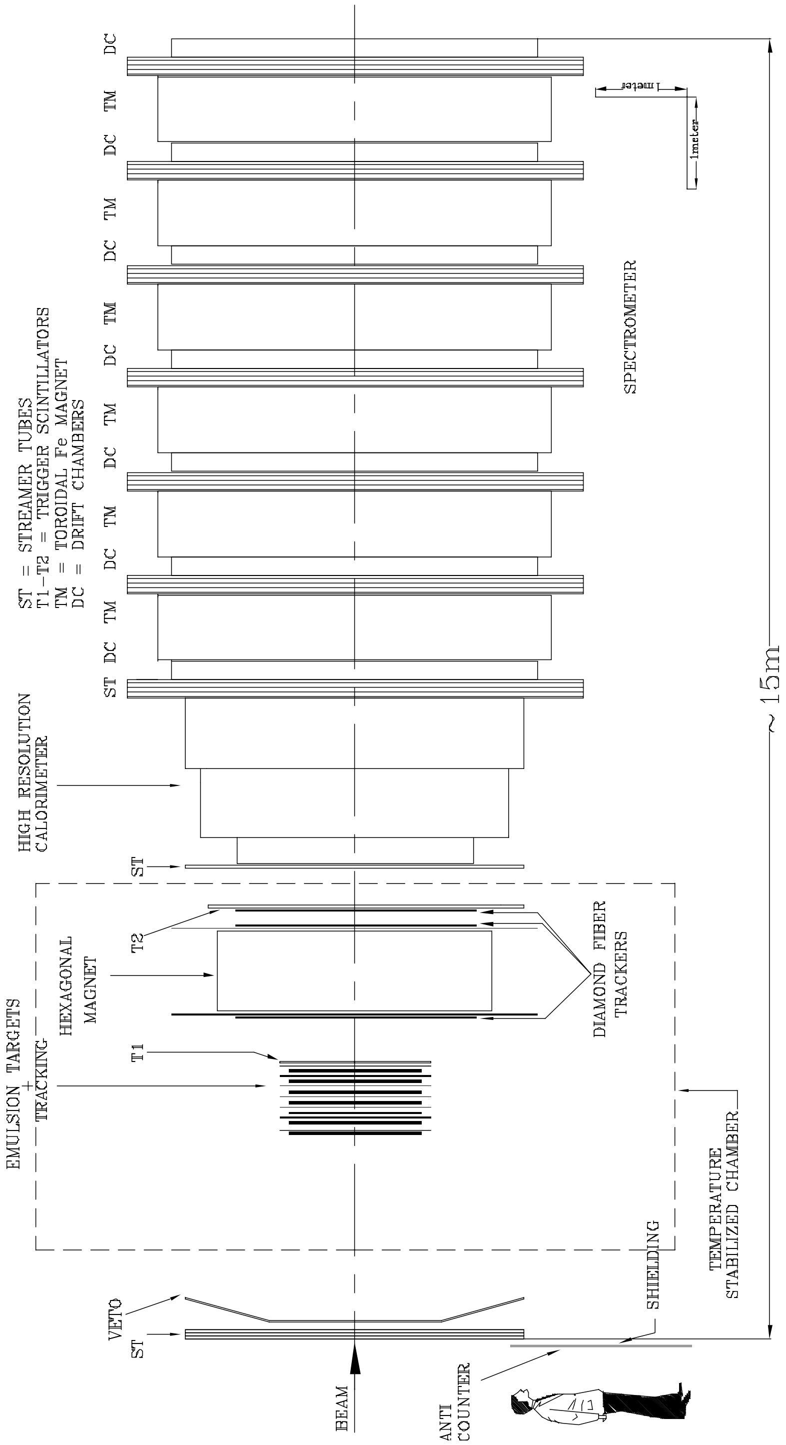

Abbildung 2.1: Der CHORUS-Detektor.

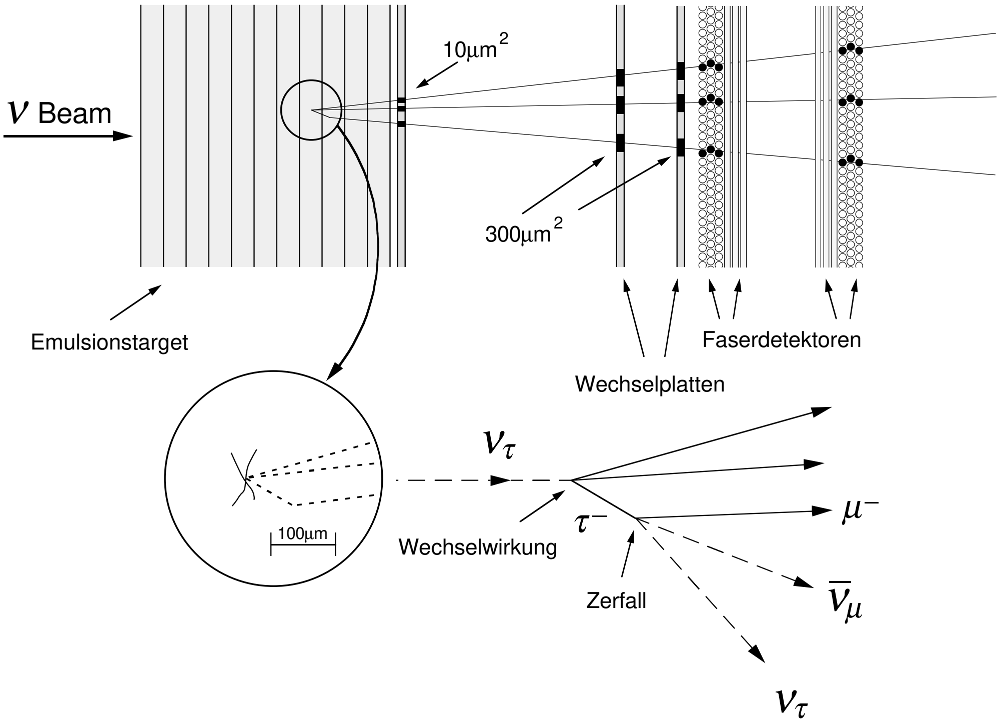

Abbildung 2.2: Spurrückverfolgung.

Scan-Fläche von (10 μm)^2 in diesen Sheets wird durch die Wechselplatten vorhergesagt. Die Spurposition wird auf eine Fläche von (1 μm)^2 eingeschränkt. Mit diesem Verfahren kann mit einer hohen Scanning-Effizienz erreicht werden.

Das Scannen erfolgt mit Hilfe eines computergesteuerten Mikroskopgestelles. Es wird auf den Austrittspunkt einer Spur positioniert, das System verfolgt diese Spur innerhalb der Emulsion bis zum Ereignis-Vertex ($\sim$ 15 Minuten) und sucht nach einem Zerfallsknick kleiner als 10 mrad entlang aller Spuren zwischen 20 μm und 3 mm vom Vertex entfernt ($\sim$ 5 Minuten). Ungefähr 40000 Ereignisse müssen auf diese Weise gescannt werden.

Der Alterungsprozeß stellt bei der Emulsion sowie bei den Szintillationsfasern ein Problem dar. Da dieser bei niedrigen Temperaturen verlangsamt wird, sind die Emulsionsplatten und auch die Szintillationsfaserdetektoren samt Hexagonalmagnet in einer Kühlbox untergebracht, die bei 5° C betrieben wird.

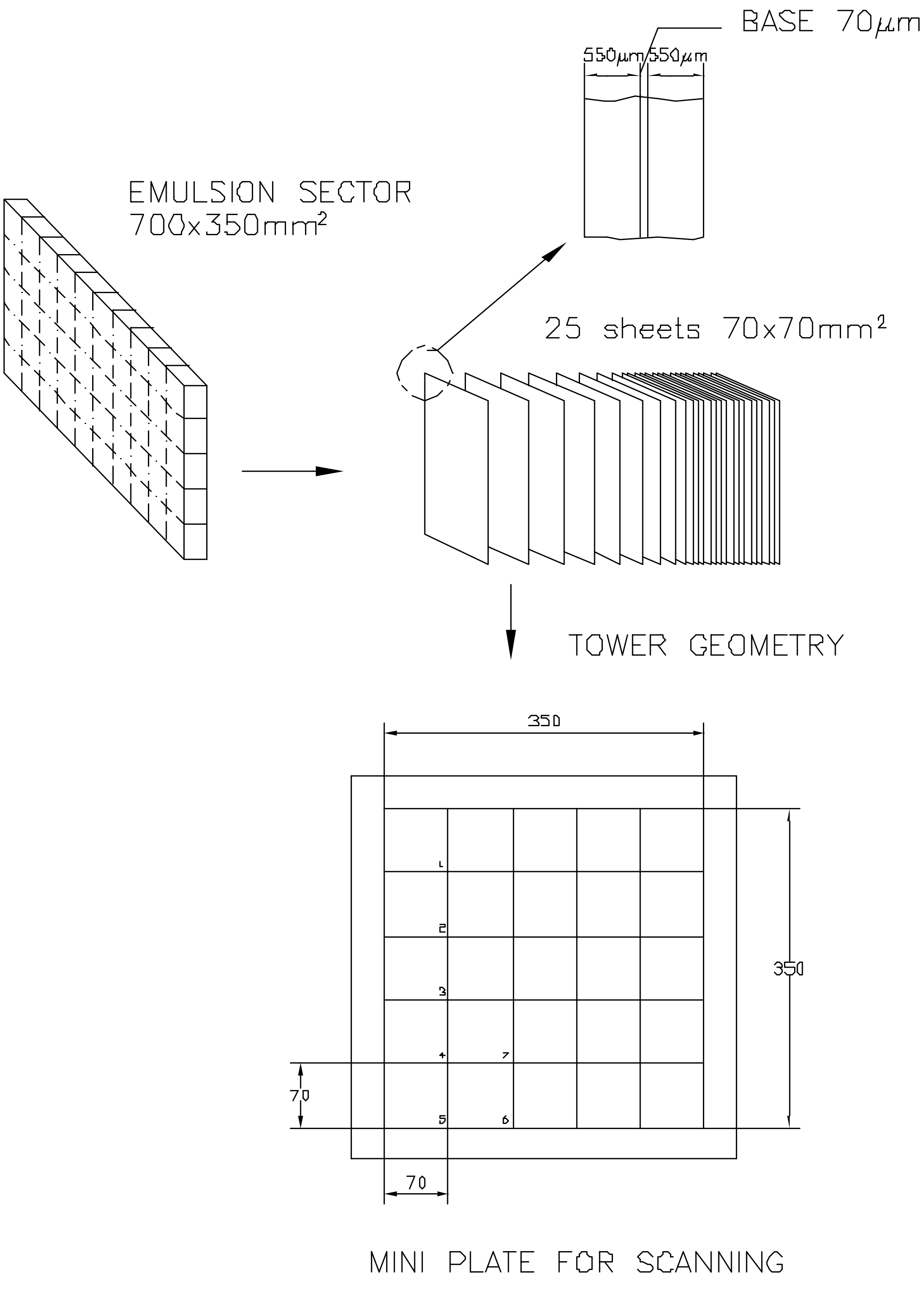

Abbildung 2.3: Aufteilung des Emulsionstargets.

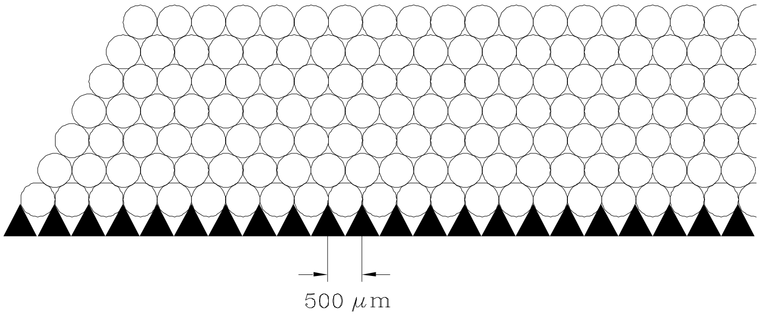

Abbildung 2.4: Der Aufbau eines Faserbündels.

2.2 Szintillations-Faser-Tracker

Dem Emulsionstarget folgt eine Gruppe von Szintillations-Faser-Detektoren (Tracker). Die Fasern dienen dazu, die Teilchenspuren mit großer Genauigkeit in die Emulsion zurückverfolgen zu können.

Jeder Tracker besteht aus sieben Lagen von 500 μm dicken Szintillationsfasern[1], die versetzt angeordnet sind (Abb. 2.4). Die einzelne Szintillationsfaser hat ein Cladding von 3 μm Dicke. Der Faser-Ribbon hat eine Gesamtdicke von 3,2 mm. Jede Lage wird mit einer weißen Farbe, die auf TiO_2 basiert, verklebt. Dieser Kleber dient gleichzeitig als Außenabsorber. Diese Anordnung ergibt eine gute Zweispurauflösung und ausreichende Präzision der Spurlokalisierung in der Emulsion.

Auf die einen Enden der Fasern wird ein Aluminiumspiegel mit $\sim 80\%$ Reflektivität aufgesputtert. Die anderen Enden der Ribbons werden poliert, wobei jeweils 16 Ribbons an die Bildverstärkerketten angekoppelt wird.

Zwei Emulsionslagen werden durch einen Szintillations-Faser-Tracker (Target-Tracker) getrennt, gefolgt von einer Driftstrecke, in der sich drei Target-Tracker befinden. Die erste dieser drei Ebenen ist so nahe wie möglich an den Wechselplatten angebracht (Abb. 2.5).

Jeder Szintillations-Faser-Tracker liefert eine Information in 4-Projektionen y, z, y', z', die eine eindeutige Identifizierung der Spuren ermöglicht. Die Projektionen y' und z' sind gegenüber den y- und z-

[1]Faser SCSF-38 (Kuraray, Japan)

Projektionen um einen Winkel von 8° gedreht. Diese Rotation wechselt zwischen $+8°$ und $-8°$ bei den aufeinanderfolgenden Trackerebenen. Spurerkennung ist mit Hilfe der drei Tracker im Driftraum gewährleistet.

Gute Zweispurauflösung ist erforderlich, damit die hohe Spurdichte in der Nähe des Vertexes aufgelöst werden kann. Durch die kompakte Bauweise des Tracker-Detektors wird eine große Genauigkeit bei der Extrapolation der Spuren über lange Strecken erreicht.

Drei weitere Tracker sind hinter den Target-Trackern angebracht. Sie sind der hexagonalen Form des Ablenkmagneten (Hexagonalmagnet) angepaßt und werden deshalb Diamond-Tracker genannt. Der erste Diamond-Tracker, der sich vor dem Magneten befindet, ist 40 cm vom letzten Target-Tracker entfernt, um eine hohe Winkelauflösung vor dem Magneten zu erreichen. Die Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld wird durch die zwei Diamond-Tracker, die hinter dem Magneten liegen, bestimmt. Vier Hilfs-Streamer-Tubes folgen den Trackern, um eine gute Mustererkennung und ein gutes Timing zu erreichen.

Jeder Diamond-Tracker besteht aus sechs dreieckförmigen Faser-Modulen (Abb. 2.6) und liefert Informationen von zwei Koordinaten pro Spur. Die Fasern sind in einem Winkel von 60° zueinander angebracht. Faserart und ihre Position zueinander sind identisch mit denen der Target-Tracker.

Die Leistungsfähigkeit der Faser-Ribbons wurde mit einem Pionenstrahl getestet. Es wurden hierbei drei Photoelektronen pro Millimeter durchquerter Faser am Ende gemessen. Es ergab sich eine Zweispurauflösung von 500 μm. Bei den Trackern sind mehr als 2500 km Fasern verwendet worden.

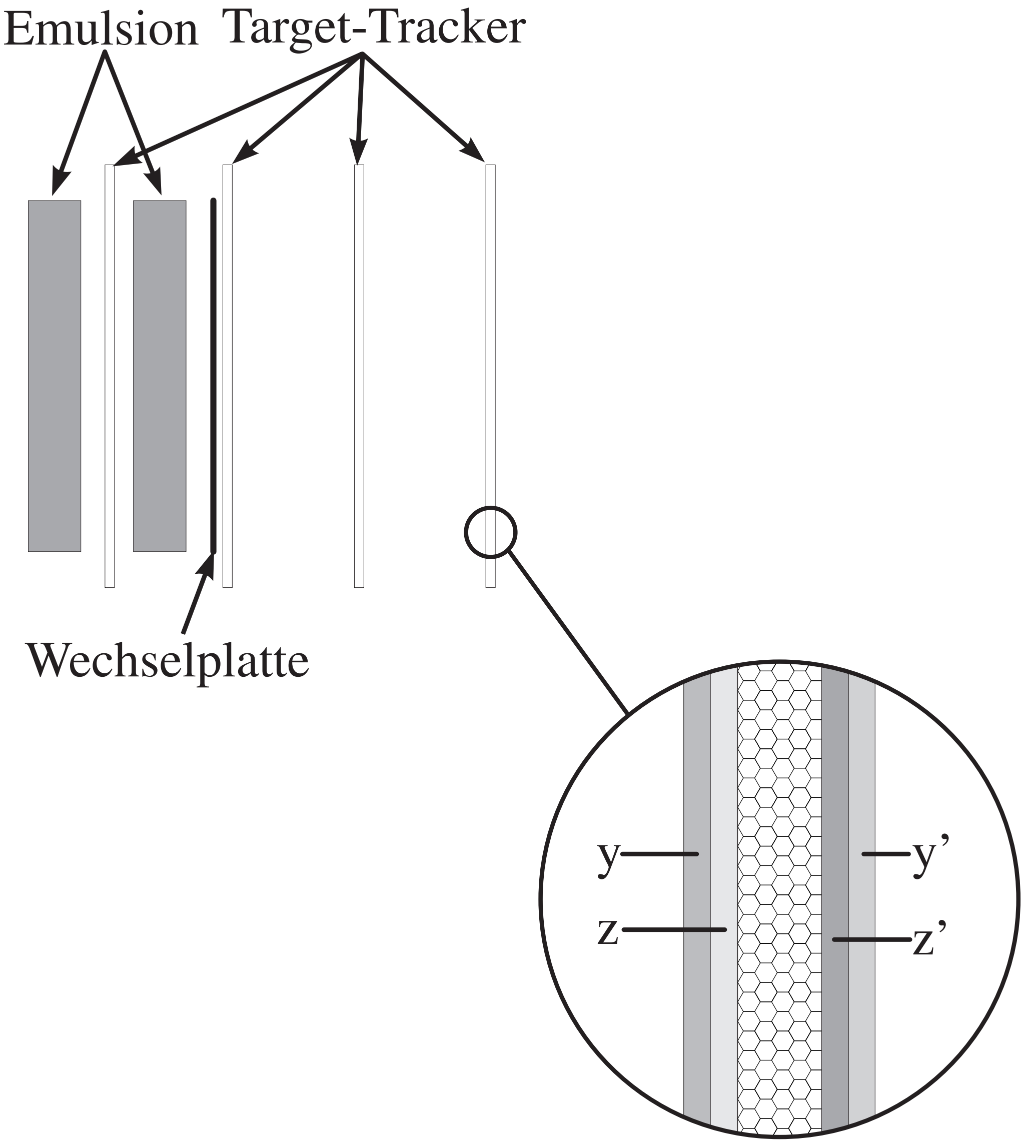

Abbildung 2.5: Die Lage der Target-Tracker.

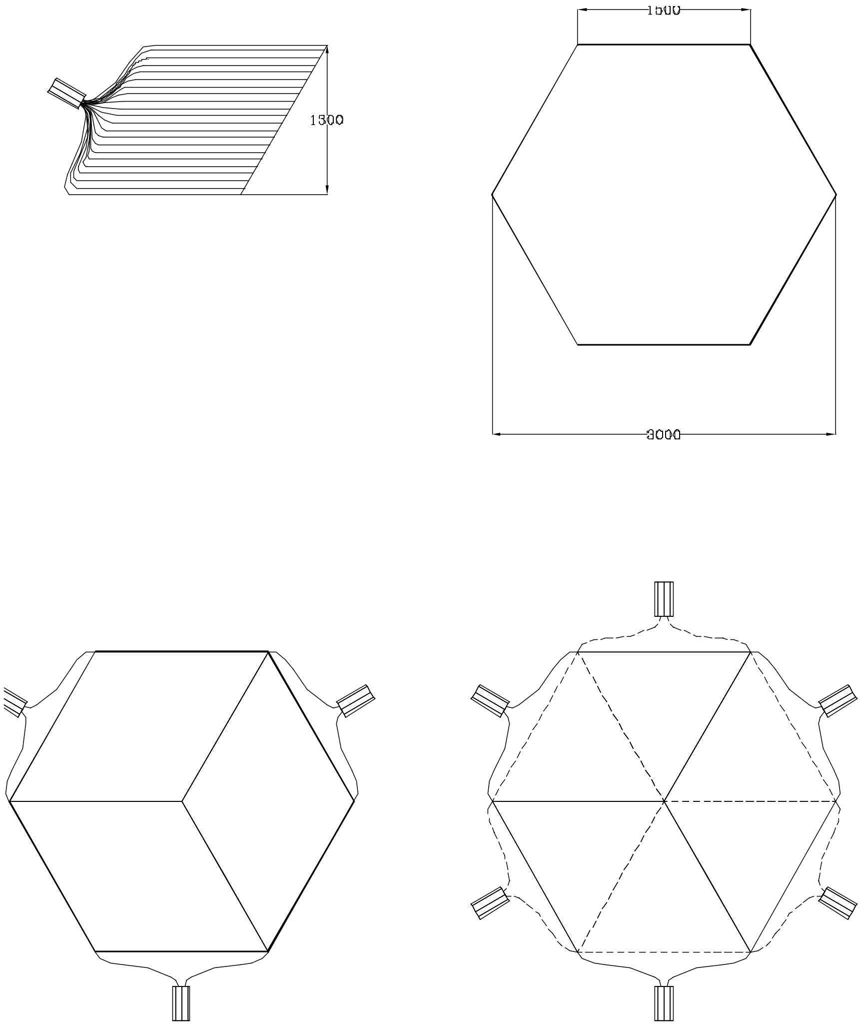

Abbildung 2.6: Der Aufbau eines Diamond-Trackers.

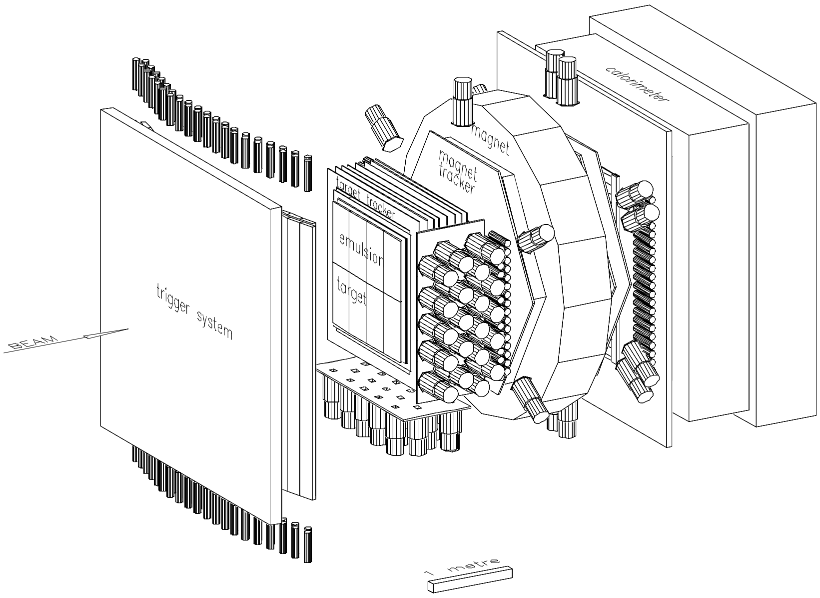

Abbildung 2.7: Vorderteil des Detektors.

2.3 Optische Auslese der Fasern

Die Faserribbons der Tracker werden zu Bündeln von jeweils 16 Ribbons zusammengefaßt (Abb. 2.9). Ingesamt entstehen 58 Bündel. Jedes dieser Faser-Bündel wird mit einer Bildverstärkerkette und einer CCD-Kamera ausgelesen. Mit Hilfe der Auslesedaten werden die Spuren in den Trackern rekonstruiert.

Eine Bildverstärkerkette setzt sich aus vier Einzelkomponenten zusammen (Abb. 2.8). Die erste Stufe ist ein elektrostatischer Bildverstärker[2], der einer Verkleinerung auf ein Viertel liefert, von 100 mm auf 25 mm Durchmesser. Diese Stufe hat nur eine kleine Verstärkung, aber eine hohe Quanteneffizienz. Die zweite Stufe ist ebenfalls ein elektrostatischer Verstärker[3] mit einem hohen Verstärkungsfaktor. Die Bildgröße wird nicht verändert. Es folgt ein Micro-Channel-Plate[4] (MCP) mit hohem Verstärkungsfaktor, das auch die Möglichkeit der Triggerung durch ein externes Gate-Signal bietet. Die letzte Bildverstärkerstufe[5] (elektrosta-

[2]Hamamatsu Typ: V5502UX
[3]Delft Electronische Producten (DEP) Typ: PP0030X
[4]Proxitronic Typ:BV 2563McX
[5]DEP Typ: XX1800C

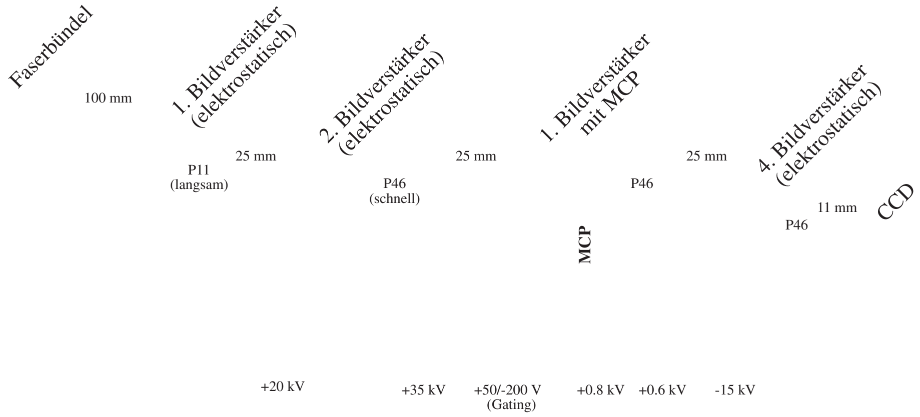

Abbildung 2.8: Eine optoelektronische Auslesekette.

tisch) verkleinert das Bild noch einmal von 25 mm auf 11 mm Durchmesser. An dieser letzten Stufe wird ein CCD (Charge Coupled Device) mit 550×288 Pixeln angekoppelt. Die Gesamtverkleinerung beträgt 9,1. Ein Pixel hat ein Fläche $16 \times 23\ \mu\text{m}^2$. Das bedeutet, daß auf eine Faser sechs Pixel entfallen.

In der ersten Stufe wird ein langsamer P11 Phosphor verwendet, der eine Abklingzeit von 50 μs hat, während der die Intensität auf 50 % abgesunken ist. Die anderen Komponenten besitzen einen schnellen P46 Phosphor, der eine schnelle Triggerung von 500 ns erlaubt. Bei einer Gatelänge von 20 μs werden 36 % des Lichtes am MCP gemessen (näherer Informationen siehe Kapitel Bildverstärker).

Ein "Beamburst" besteht aus zwei Spills von je 6 ms Dauer, in einem Abstand von 2,5 s. Die Abspeicherung des ersten Ereignisses aus einem Spill erfolgt in den internen Speicher des CCD. Das zweite Ereignis wird in dem sensitiven Bereich des Chips gespeichert. Die dabei entstehende Überlagerung von Ereignissen wird mit 6,5 % angenommen. Mit Hilfe anderer Detektorelemente kann diese Überlagerung wieder ausgeglichen werden.

Die Aufgabe der Auslese besteht darin, ein Pixel einer Faser zuzuordnen. Da das Bild der Fasern auf dem Weg zur CCD in den Bildverstärkern verzerrt wird, benötigt man ein Kalibrationssystem. Das Kalibrationssystem liefert Bildpunkte, deren Lage bekannt ist. Dazu werden zwischen 16 Lagen der Faserbündel fünf Schichten aus maxi-

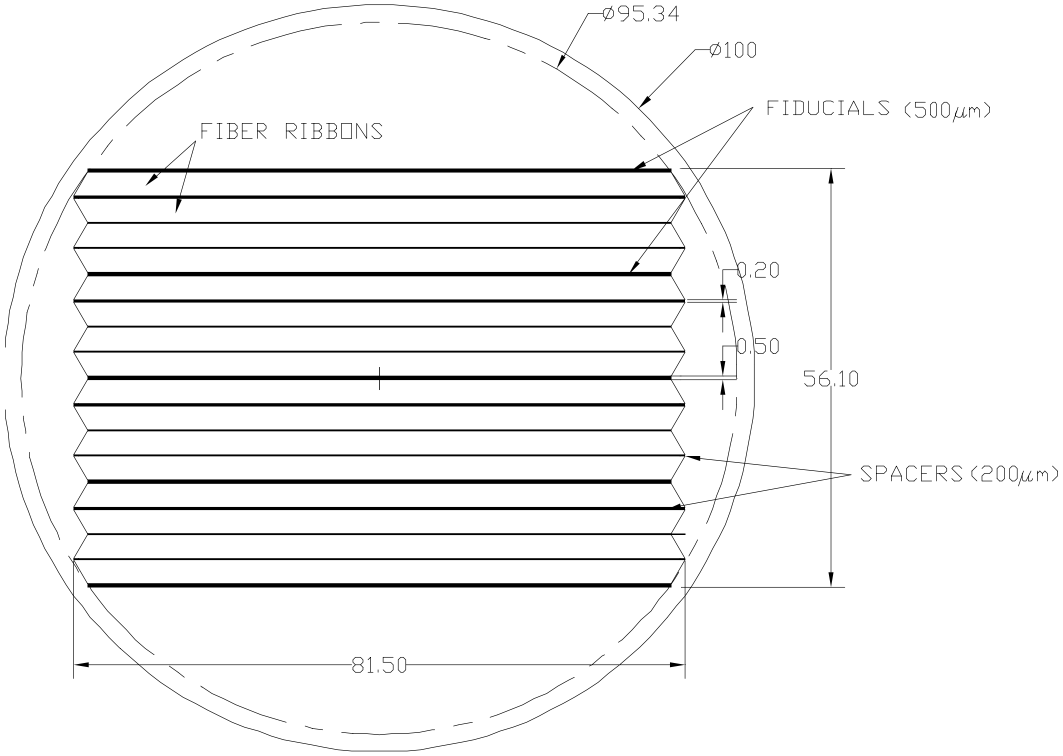

Abbildung 2.9: Anordnung der Faserbündel und der Kalibrationsfasern.

mal 0,5 mm dicken Platten (Flapper oder auch Fiducial) aus Araldit geklebt. In diesen Platten sind Lichtleiter mit einem Durchmesser von 127 μm eingegossen. Mit diesen fünf Flappern wird auf der CCD eine Matrix von 9×5 Lichtpunkten abgebildet. Da durch einen Fotoabdruck die Positionen dieser Lichtpunkte vor der Bildverstärkerkette bekannt sind, kann ein Pixel auf der CCD einer Szintillationfaser richtig zugeordnet werden. Die entstehende Verzerrung wird somit richtig herauskorrigiert.

2.4 Hexagonalmagnet

Der Ablenkmagnet (Hexagonalmagnet) ist zwischen der Targetregion und dem Kalorimeter angebracht. Er dient dazu, Ladung und Impuls der Teilchen mit Hilfe der Diamond-Tracker vor dem Kalorimeter zu bestimmen.

Bei dem Design des Magneten mußte darauf geachtet werden, daß keine zu großen Streufelder in der Nähe der elektrostatischen Bildverstärkerketten auftreten. Die Abmessungen des Magneten, d.h. seine Länge, beschränkt die Akzeptanz des Kalorimeters und des Myonenspektrometers. Aus diesem Grunde sollte seine Länge nicht zu groß sein. Ein größerer Magnet bedingt mehr Material und eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von Mehrfachstreuung.

Der konstruierte Magnet besteht aus 6 gleichseitigen Dreiecken mit 1,5 m Seitenlänge und 0,75 m Tiefe. Er ist in einen Zylinder eingebaut, der einen Durchmesser von 3,6 m besitzt (Abb. 2.10). Die Windungen bestehen aus Aluminiumblechen, die alle Flächen der Dreiecke überdecken. Das erzeugte homogene Feld liegt in jedem Dreieckssektor parallel zur Außenseite. Es weist keine Radialabhängigkeit auf.

Die Ein- und Austrittsfenster des Magneten weisen jeweils die Stärke von ≤ 4 % einer Strahlungslänge. Die sechs Speichen, die durch die Seiten angrenzender Dreiecke entstehen, bilden einen toten Bereich für die Impulsmessung. Bei einer Mittelung über Spuren geladener Teilchen mit Impulsen zwischen 2,5 und 10 GeV/c ergibt sich eine Akzeptanz des Magneten von 85 %.

Wegen der Zeitstruktur des Neutrinostrahles wird der Magnet mit einem Duty-Faktor von $\sim 4 \times 10^{-3}$ gepulst. Ein Feld von $0,12$ T wird bei einer Leistung von 15 kW erreicht. Da der Magnet sich direkt zwischen zwei Diamond-Trackern befindet, wurde er mit einem eigenen Kühlsystem ausgestattet. Der Magnet wird durch kalte Luft, die in seinem Inneren an den Wicklungen vorbeiströmt, gekühlt. Die erwärmte Luft wird von der Kühlbox nach außen geleitet.

Die Kombination der Meßfehler der Richtungmessung vor und hinter dem Magneten ergibt einen Fehler von

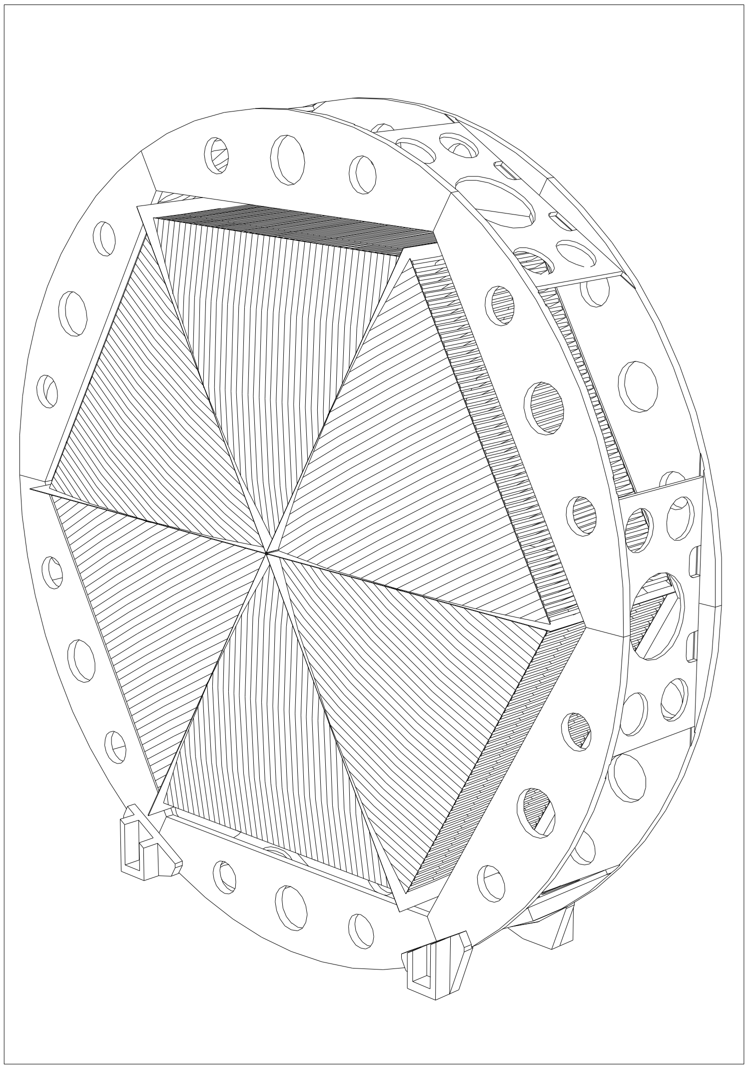

Abbildung 2.10: Der Hexagonalmagnet.

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{\text{Messung}} = 1,6\ \% \cdot p \qquad \text{(GeV/c)}.$$

Durch Mehrfachstreuung ergibt sich ein impulsunabhängiger Fehler von

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{\text{Mehrfachstreuung}} = 16\ \%.$$

Die Kombination dieser Fehler ergibt eine Impulsungenauigkeit, die zwischen 16 % (p=2 GeV/c) und 23 % (p=10 GeV/c) liegt. Diese reicht aber aus, um das Vorzeichen geladener Teilchen bis zu Energien von 10 GeV mit einer Genauigkeit von acht Standardabweichungen zu bestimmen. Diese Impulsmessung wird gebraucht, um den Transversalimpuls der Pionen und die Reichweite der niederenergetischen Myonen (1-2 GeV) zu bestimmen.

2.5 Hochauflösendes Kalorimeter

Es müssen grundsätzlich zwei Reaktionstypen unterschieden werden. Der effektivste Weg zur Unterscheidung der Reaktionen

1. Oszillationsreaktion

$$\begin{aligned}\nu_{\mu(\tau)}N &\to (\tau^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)X \\ &\to (\tau^- \to \pi^- \nu_\tau)X \\ &\to (\tau^- \to \pi^- \pi^+ \pi^- (n\pi^0)\nu_\tau)X\end{aligned}$$

2. Untergrund

$$\begin{aligned}\nu_\mu N &\to \mu^- X \\ &\to \nu_\mu X\end{aligned}$$

basiert auf der Identifizierung der fehlenden Transversalenergie, die ein in der Reaktion (1.) auftretendes Neutrino fortträgt und auf der charakteristischen Korrelation zwischen den Vektoren des Transversalimpulses und den hadronischen Richtungsvektoren des Endzustandes. Zur Bestimmung der Richtung des Hadronenschauers und des Energieflusses wurde ein hochauflösendes Kalorimeter gebaut.

Durch einzelne Hadronen im Kalorimeter induzierte Schauer können sich überlappen. Ihr Energieflußvektor kann dadurch nicht individuell gemessen werden. Es wird stattdessen der Energieflußvektor des gesamten Endzustandes gemessen. Hierbei wird der Schwerpunkt des Energieflusses im Kalorimeter bestimmt und mit der Vertexposition in Verbindung gebracht, die durch die Tracker gemessen wird.

Jede Kalorimeterplatte besteht aus Modulen, die zur Messung des Energieflußprofils in zwei orthogonalen Richtungen orientiert sind. Sie alternieren in horizontaler und vertikaler Richtung. Der Querschnitt dieser Module ist schmaler als die Schauerlänge der geladenen Hadronen. Dadurch wird der Fehler der Messung des Energieschwerpunktes durch die Fluktuation der Energiemessung gegeben. Es ist außerdem wichtig, daß die Ansprechwahrscheinlichkeit für geladene und neutrale Pionen gleich ist. Diese Forderungen nach hoher Auflösung und gleicher Ansprechwahrscheinlichkeit für neutrale und geladene Pionen können durch ein Blei-Szintillator-Kalorimeter erreicht werden.

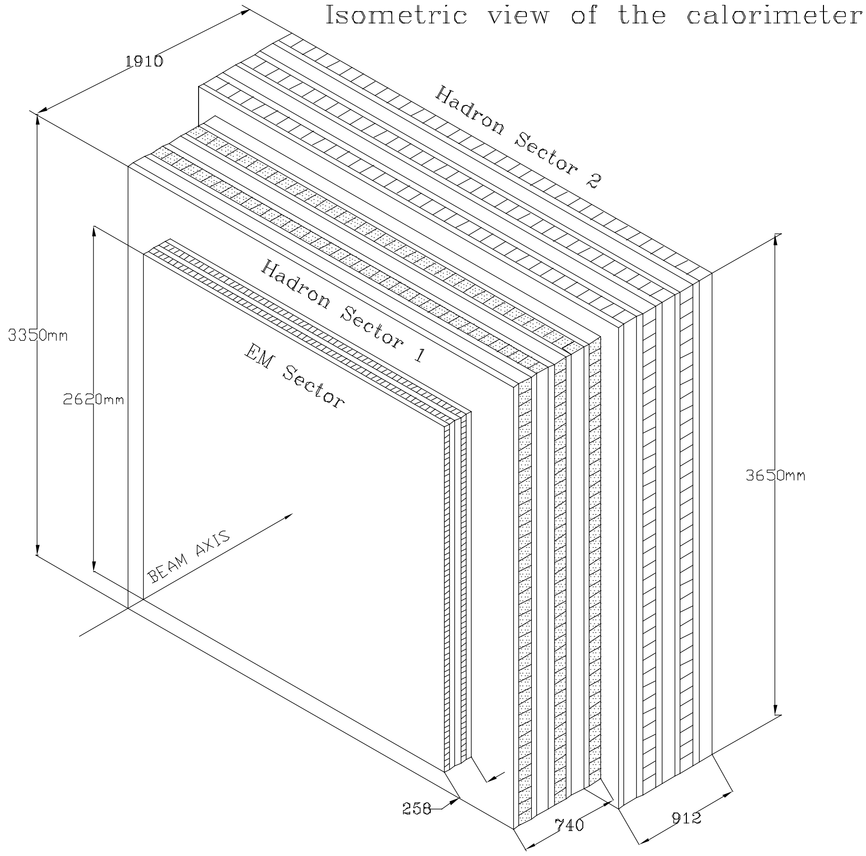

Abbildung 2.11: Das Kalorimeter.

Die Sekundärteilchen des τ-Zerfalles haben im Durchschnitt eine Energie kleiner als 5 GeV. 99 % (90 %) eines 5 GeV Hadronenschauers sind in 5,2 (3) Wechselwirkungslängen enthalten.

Das CHORUS-Kalorimeter besteht aus drei Sektoren (Abb. 2.11) mit abnehmender Granularität, die als EM, HAD1 und HAD2 bezeichnet werden (Abb. 2.12). Der erste Sektor liefert die Messung der Energie der elektromagnetischen Komponenten eines Ereignisses. Die ersten beiden (EM und HAD1) liefern eine Aussage über die hadronischen Komponenten der Ereignisse. Die dritte Sektion mißt die Energie, die in den ersten beiden Komponenten nicht erfaßt worden ist. Das Volumenverhältnis zwischen Blei und Szintillator beträgt in allen Sektoren 4:1. Die gesamte Tiefe beträgt 5,2 Strahlungslängen.

Die ersten beiden Sektoren (EM und HAD1) bestehen aus Blei und Szintillationsfasern (Spaghettikalorimeter). Sie können 90 % eines

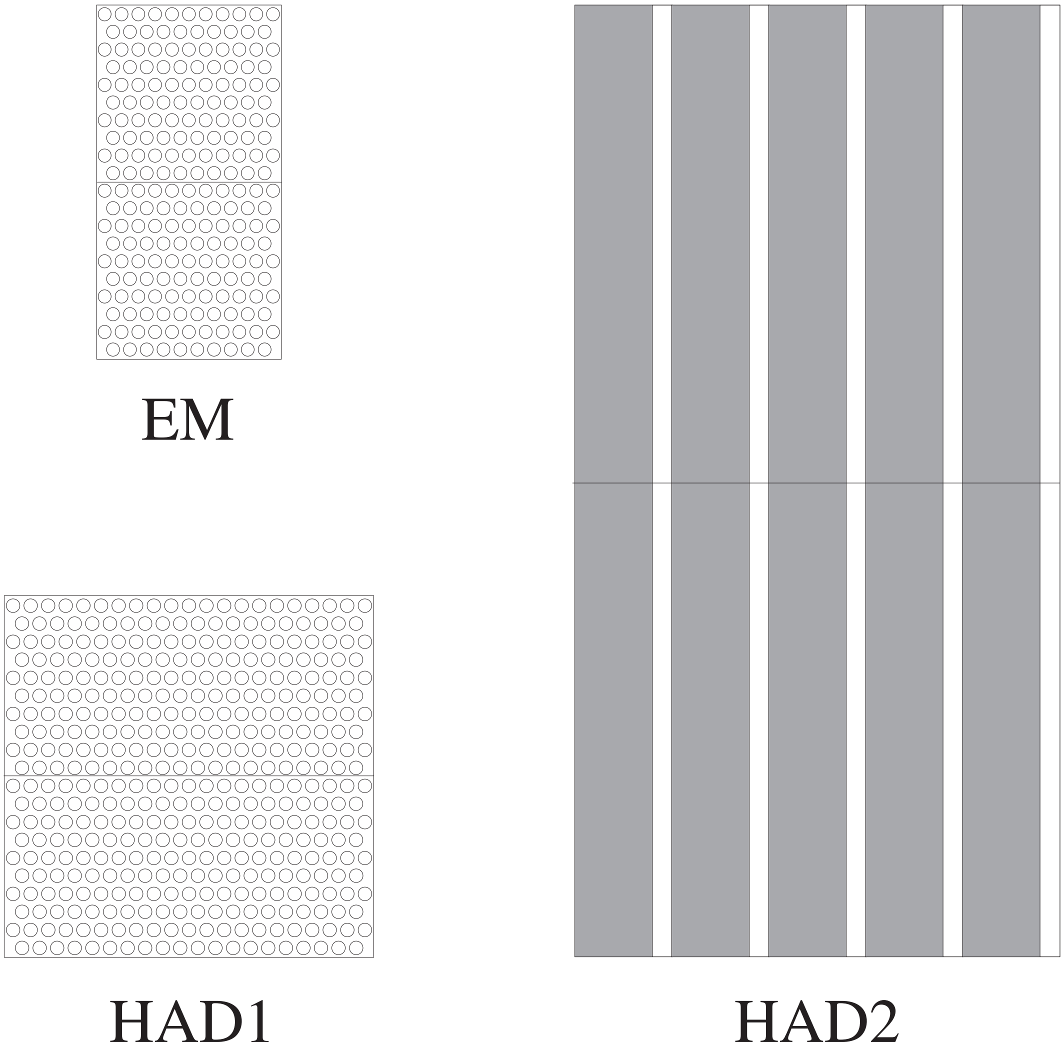

Abbildung 2.12: Die unterschiedlichen Kalorimetermodule.

5 GeV Hadronenschauers erfassen. Der dritte Sektor (HAD2) ist aus Blei und Szintillatorstreifen (Sandwich-Technik) aufgebaut, da am Ende des Schauers eine gröbere Orts- und Energieauflösung ausreichend ist. Das Kalorimeter besteht aus vertikalen und horizontalen Modulen mit Streamer-Kammern dazwischen. Dieser Spurdetektor ist notwendig, um eine Verbindung der Spuren im Myonenspektrometer zu den Szintillations-Faser-Trackern an der Frontseite des Kalorimeters herzustellen.

Das elektromagnetische Sektormodul (EM) besteht aus gezogenen Bleiplatten, in denen sich Rillen befinden. In diesen Rillen sind Szintillationsfasern von 1 mm Durchmesser eingelegt. Ein Modul besteht aus einem Stapel von 21 Platten mit einer Länge von 2620 mm und je 740 Fasern. Die Fasern sind so angeordnet, daß zwei Gruppen mit zwei unterschiedlichen Auslesezellen entstehen, die eine Querschnittsfläche von 40×40 mm^2 haben. Diese vier Gruppen sind über einen Plexiglas-Lichtleiter an einen Photomultiplier angekoppelt.

Der Aufbau eines HAD1-Moduls ist ähnlich dem eines EM-Moduls. Es besteht aus Bleiplatten, die hier 3350 mm lang sind. In einem Modul befinden sich 43 Platten und je 1554 Fasern. Die Querschnittsfläche bildet ungefähr ein Quadrat von 80×80 mm^2. Die Fasern sind wiederum gruppiert und über einen Lichtleiter an einen PM angekoppelt.

Das HAD2-Modul weist stattdessen eine Sandwichbauweise auf. Es besteht aus 16 mm dicken Bleiplatten mit 4 mm dicken Szintillatorstreifen, die je 3650 mm lang sind. Die Module werden ebenfalls in zwei Gruppen ausgelesen. Die Streifen an jeder Seite sind mit zwei PM's über Lichtleiter verbunden. Die einzelnen Gruppen sind in Stahlboxen untergebracht.

Eine Gruppe von zwei Streamer-Kammern ist hinter jeder zweiten Ebene des EM und hinter jeder Ebene der HAD1- und HAD2-Sektoren angebracht. Sie sind horizontal und vertikal orientiert. Es ergeben sich elf Gruppen. Ingesamt werden 7500 Streamer-Kammern digital ausgelesen.

Die Energieauflösung für elektromagnetische und hadronische Schauer wurde an einem Prototyp eines Blei-Szintillationsfaser-Kalorimeters bei der SPACAL[6]-Collaboration gemessen. Für Elektronen ergab sich eine Energieauflösung von

$$\Delta E_e/E \simeq 13\ \%/\sqrt{E}\ (\mathrm{GeV})$$

und für Pionen

$$\Delta E_\pi/E \simeq 30\ \%/\sqrt{E}\ (\mathrm{GeV}).$$

Für die e/π-Seperation kann eine Genauigkeit von $\sim 10^{-3}$ erzielt werden. Diese wird durch die Schauercharakteristik und durch das Energieverhältnis in den elekromagnetischen und den hadronischen Sektoren

[6] Spaghetti-Calorimeter

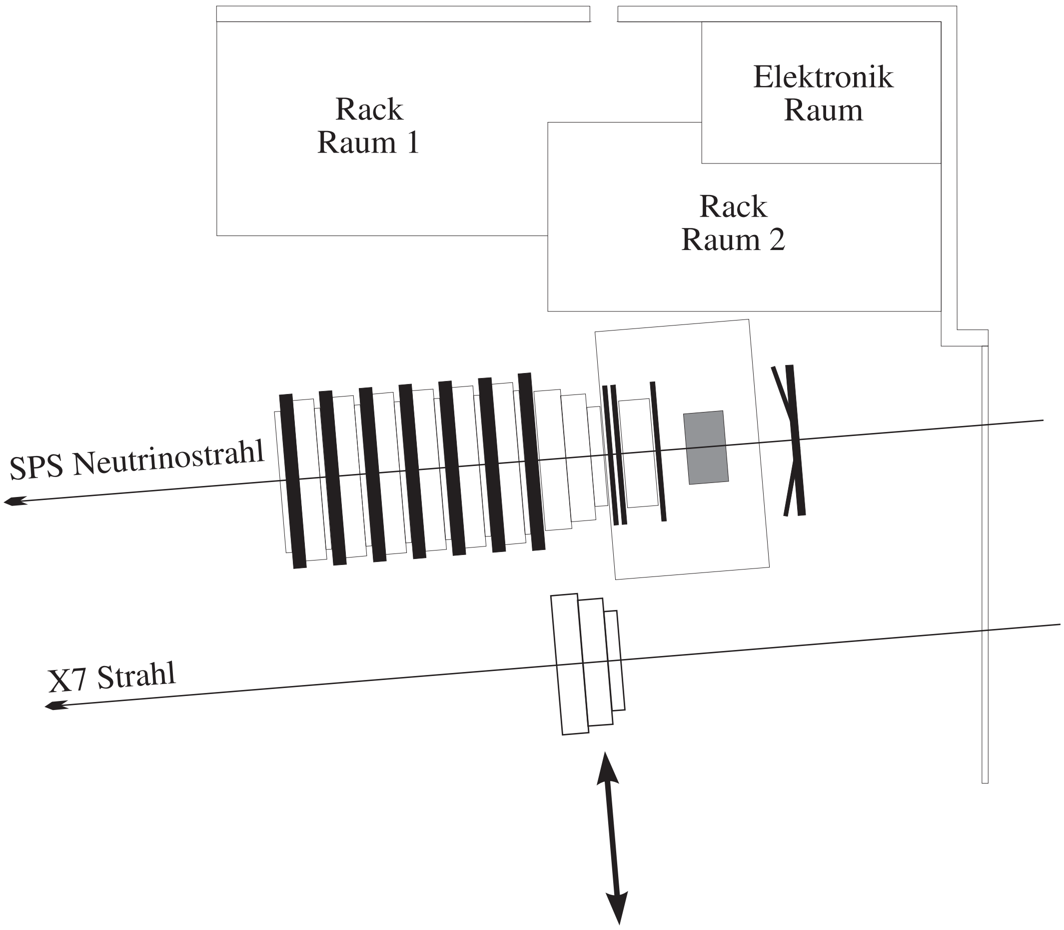

Abbildung 2.13: Die Lage des Detektors in der BEBC-Halle.

des Kalorimeters erreicht. Spuren von Elektronen, die von konvertierten Photonen stammen, können so ausgeschlossen werden. Die Position des Schwerpunktes des Hadronenschauers kann mit einer Auflösung von $\sigma \sim 1,5$ cm bei einer Energie von 5 GeV bestimmt werden. Kombiniert man dieses mit der gemessenen Vertex-Position, die mit einer Genauigkeit von $\sim 0,3$ cm bestimmt werden kann, erhält man eine Winkelauflösung von $\sigma \sim 10$ mrad bei 5 GeV.

Die Kalibration und Überwachung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Module wird dadurch erreicht, daß man zwischen den Neutrino-Spills Ereignisse kosmischer Strahlung mißt. Das Kalorimeter ist auf Schienen aufgesetzt, die es ihm ermöglichen, aus der Strahlachse zu fahren (Abb. 2.13). Durch Einschieben in den SPS X7-Strahl kann eine Energieeichung mit Elektronen und Pionen vorgenommen werden.

2.6 Myonenspektrometer

Das Myonenspektrometer besteht aus sechs zirkular magnetisierten Eisenmodulen von 375 cm Durchmesser und sieben Tracking-Sektionen: eine vor, fünf in den Lücken zwischen den Eisenmodulen und eine dahinter (Abb. 2.14). Jedes Magnetmodul besteht aus 20 Eisenplatten von 2,5 cm Dicke. Die Wicklungen laufen durch ein zentrales Loch von 8 cm Durchmesser nach außen. Das Magnetfeld im Eisen beträgt ~ 2 T. In den Lücken zwischen den Platten befinden sich Szintillationszähler, die aus 8 mm dicken und 15 cm breiten Streifen bestehen. Sie sind abwechselnd in horizontaler und vertikaler Richtung angebracht und werden in Fünfergruppen an einen Photomultiplier angekoppelt. Die Reichweite der Myonen im Eisen kann mit einer Schrittweite von 12,5 cm bestimmt werden.

Jede Tracking-Sektion besteht aus einer Driftkammer und acht Streamer-Kammern. Jedes Driftkammer-Modul ist mit drei Ebenen aus Drähten, die in $0°$, $+60°$ und $-60°$ bezüglich der Horizontalen angebracht sind, versehen. Die Streamer-Kammern haben einen Drahtabstand von 1 cm und einen Kathodenabstand von 2,1 cm. Driftzeitmessungen werden mit Gruppen von acht Drähten durchgeführt, die eine Auflösung von 1 mm ergeben.

Jede Tracking-Ebene liefert Messungen von 19 Koordinaten, welche zusammen den 3-dimensionalen Bahnvektor jeder Spur festlegen. Durch einen Fit des Bahnvektors entlang der Myonenspur kann der Impuls bestimmt werden. Die Auflösung ist abhängig von der Anzahl der durchquerten Module. Ein 20 GeV/c Myon, das alle sechs Module durchquert, wird mit einer Auflösung von 15 % gemessen. Bei einer Durchquerung nur eines Moduls beträgt die Auflösung 30 %.

Die Szintillationszähler in den Zwischenräumen des Eisenmagneten haben vier Funktionen: Sie liefern ein Triggersignal beim Durchqueren der Teilchen, ergänzen die Messung der Hadronenenergie, die nicht im Kalorimeter dissipiert worden ist, liefern die Reichweite gestoppter Myonen in einem Modul und messen den Energieverlust durch Bremsstrahlung in den Eisenmodulen.

Die magnetisierten Eisenmodule und die hexagonalen Driftkammern

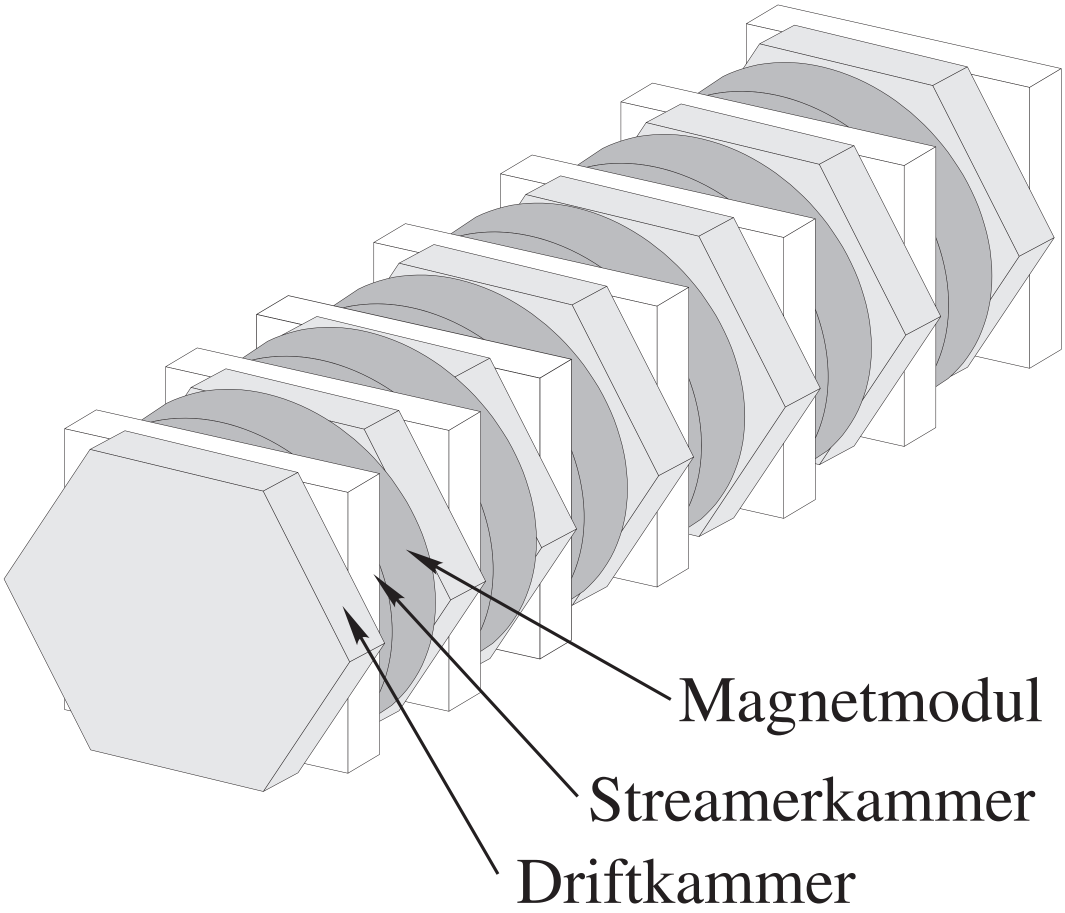

Abbildung 2.14: Das Myonenspektrometer.

stammen aus der CDHS[7]-Collaboration und die sieben Pakete von acht Streamer-Kammern aus der CHARM II[8]-Collaboration. Die Streamer-Kammern sind für Driftzeitmessungen und analoge Auslese der Kathodenstrips ausgerüstet. Diese modifizierte Version des Myonenspektrometers erlaubt die Feststellung von Spurvektoren in den Zwischenräumen der Magneten und damit eine Verbesserung des Myonenfits bei niederenergetischen Myonen.

Es werden alle Kombinationen der Punkte, die durch die digitale Auslese gegeben sind, berechnet und der Vektor ausgewählt, der die kleinste Invarianz aufweist. Die Streamer-Kammern werden analog ausgelesen. Durch diese Kombination von analoger und digitaler Auslese ergibt sich

[7] CERN, Dortmund, Heidelberg, Saclay
[8] CERN, Hamburg, Amsterdam, Rom, München

eine präzise Definition des Vektors. Dieses erhöht die Spurauffindung in der Emulsion.

2.7 Trigger

Die Hauptaufgabe des Triggers ist die Selektion aller neutrinoinduzierten Ereignisse im Target und der Ausschluß des Untergrundes durch kosmische Strahlung, Strahlmyonen und Neutrinoreaktionen außerhalb des Targets. Außerdem wird der Trigger zur Kalibration und zur Ausrichtung des Detektors benötigt. Die angenommene Neutrinoereignisrate beträgt 0,7 Ereignisse pro Spill.

Der Neutrinoreaktions-Trigger benötigt Informationen zweier Hodoskop-Module. Eines (T1) dicht hinter der Targetregion und eines (T2) vor dem Kalorimeter. T1 ist aus zwei Lagen mit 15 dünnen Szintillatorstreifen von 10 cm Breite und 160 cm Länge in horizontaler Orientierung aufgebaut. Die zwei Lagen überlappen sich und bilden eine Fläche von 160×160 cm^2. Die Dicke ist minimiert, so daß der Verlust an Spurpräzision durch Mehrfachstreuung vermieden wird. Aus demselben Grund sind die Platten so dicht wie möglich an dem letzten Tracker in der Targetregion angebracht. T2 besteht aus zwei Lagen mit 20 Streifen von 20 cm Breite und 200 cm Länge, die ebenfalls horizontal orientiert sind.

Ein Vetosystem (V) befindet sich 2 m vor der Targetregion und besteht aus zwei Platten von zwanzig 20 cm breiten Szintillatoren, die vertikal orientiert sind (Abb 2.1. Sie bilden eine Fläche von $4 \times 3,2$ m^2. Eine zusätzliche Platte mit 32 Szintillatoren soll Ereignisse, die außerhalb des Detektors stattgefunden haben, selektieren.

Das Neutrino-Triggersignal ist definiert als eine Kombination von Pulsen der beiden Hodoskope T1 und T2, wobei der Winkel der Spur nicht größer sein darf als 14° zum Neutrinostrahl. Das Veto-Triggersignal ist aus einer Kombination von Veto-Zähler-Pulsen und Pulsen vom T1 zusammengesetzt, mit genauer zeitlicher Abstimmung, um Vetosignale durch Rückstreuung zu vermeiden. Alle Szintillatorstreifen von T1 und V werden an beiden Enden von Photomultipliern ausgelesen, um diese Timing-Anforderung zu erfüllen. Durch den Laufzeitunterschied der Pulse in einem Streifen läßt sich der genaue Zeitpunkt des Teilchendurchganges bestimmen. Die Größe der Veto-Zähler wurde so gewählt, daß die gesamte Fläche abgedeckt wird, die durch die Winkelakzeptanz des Hodoskop-Triggers entsteht.

Der Myonenfluß in der BEBC[9]-Halle wurde während des Betriebes des Neutrino-Strahles mit $N_\mu \cong 500/m^2$ für einen Zyklus von 2×10^{13} Protonen gemessen. Die Abschirmung der BEBC-Halle ist schwach und wurde deshalb durch eine Eisenabschirmung vor dem Detektor verstärkt. Dadurch wird der Myonenfluß um den Faktor $\sim$10 reduziert. Der Abstand zwischen Abschirmung und Detektor beträgt 10 m. Um den Untergrund in der Emulsion möglichst gering zu halten und damit auch die Spurdichte, muß die Anzahl der einfallenden Myonen so klein wie möglich gehalten werden. Nach Ausschluß der Strahl-Myonen besteht der Untergrund hauptsächlich aus Neutrinoereignissen, die im Material um den Detektor stattfinden, wie z.B. Stützen oder Fußboden. Diese Ereignisse können die Trigger-Bedingungen erfüllen, wenn mehrere Spuren im Hodoskop einen schmalen Winkel vortäuschen. Der Untergrund durch Wechselwirkung kosmischer Strahlung wird als klein angenommen.

[9]Big European Bubble Chamber

2.8 Datenerfassung

Die Ereignisrate im Experiment ist sehr klein, im Durchschnitt kleiner als ein Ereignis pro Neutrino-Burst. Jedes Ereignis enthält aber eine große Menge von Rohdaten ($\sim$ 20 MByte Opto-Daten und $\sim$ 10 kByte Daten des Kalorimeters, des Spektrometers und der Streamer-Kammern). Um diese große Datenmenge gut zu handhaben, ist eine Komprimierung auf wenige Hundert Kilobyte notwendig. Man benötigt eine effektive Methode für die Reduzierung der Daten. Die Anforderung, drei oder vier Ereignisse pro Burst auszulesen, bestimmt das obere Limit der Auslesezeit zu einigen Hundert Millisekunden. Das Datenvolumen wird durch Kalibration und Triggeranforderungen zwischen den Neutrinobursts ungefähr verdoppelt.

Die Datenaufnahme basiert auf einer VME-Bus-Hardware mit CPU's, die unter einem OS-9-System läuft. Das Herz des Systems ist eine Eventbuilder-CPU und eine duale 3480 Cartridge-Einheit, die über ein SCSI-Bus verbunden sind. Seine Aufgaben sind das Sammeln von Ereignissen der umgewandelten Daten aus anderen Crates, Datenspeicherung auf Cartridge-Einheiten und Probedatenanalyse für Überwachungszwecke. Der Ereignisdatenfluß wird über ein VIC-Bus (Vertical Intercrate Bus) bewerkstelligt.

Das Videosignal der Faser-Tracker wird in den CCD-Kameras digitalisiert und von speziellen CPU's verarbeitet. Jede CPU bearbeitet zwei Kameras.

Alle ADC- und TDC-Kanäle sind mit Vielfach-Ereignisbuffern ausgestattet und haben schnelle Umwandlungszeiten, die kleiner als 20 μsec sind. Ereignisse werden während der Neutrino-Bursts im Buffer gespeichert. Die Auslese erfolgt zwischen den Bursts und an deren Ende.

Die Datenqualität wird durch UNIX-Workstations, die über Ethernet mit allen VME-Crates verbunden sind, überwacht. Auf ihr werden Daten analysiert, On-Line-Kalibration ausgeführt und Diagramme, die auf den OS-9-Systemen erstellt wurden, darstellen. Wichtige Daten werden ständig auf dem Bildschirm der Workstation dargestellt.

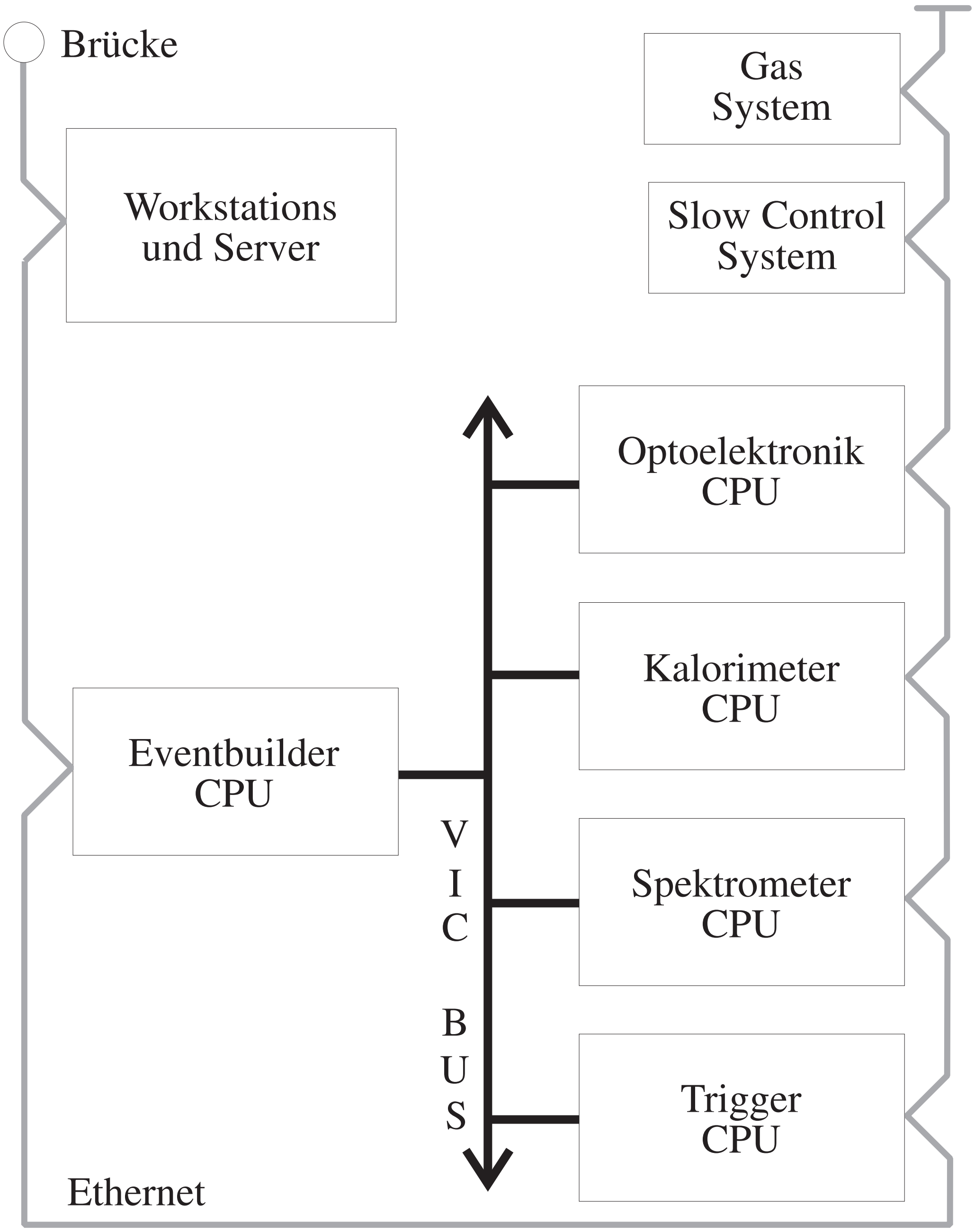

Abbildung 2.15: Das CHORUS Datenerfassungssystem.

3. Kalibrationssystem

Die einzelnen Faser-Ribbons der Target- und Diamondtracker werden an ihrem einen Ende (Ausleseseite) in Gruppen zu 16 übereinander geschichtet und verklebt (Abb. 3.1).

Auf diese Weise entstehen 58 Trackerbündel. Die Auslese jedes Trackerbündels erfolgt über eine Bildverstärkerkette und eine CCD-Kamera. Das Bild der Faserribbons wird in der Bildverstärkerkette verzerrt (Abb. 3.2). Diese Verzerrung wird noch durch ein permanentes Magnetfeld[1] in der Experimentierhalle verstärkt. Für eine gute Ortsauflösung des Experimentes ist es erforderlich, daß jedem Pixel auf der CCD-Kamera eindeutig eine Faser zugeordnet werden kann. Um diese Zuordnung zu erreichen, wurde ein Kalibrationssystem entwickelt. Es werden Lichtpunkte (Kalibrationspunkte) zwischen den einzelnen Szintillationsfaserribbons gesetzt. Ist die Lage der Kalibrationspunkte vor der Bildverstärkerkette bestimmt, so kann in der Datenbearbeitung die Verzerrung herauskorrigiert werden. Die Bestimmung der Lage vor dem Bildverstärker erfolgt durch einen Fotoabdruck, der anschließend digitalisiert wird.

Das Kalibrationssystem besteht aus drei Komponenten: Diese sind die LED-Pulser-Einheit, die Ankoppeleinheit und die "Flapper". Ein Flapper ist eine dünne Platte aus Epoxidharz, in der neun Lichtleiterfasern eingegossen sind. Fünf Flapper werden mit 16 Faserribbons so verklebt, daß durch die Kalibrationsfasern ein 5×9 Matrix aus Lichtpunkten entsteht. Die Anordnung der Flapper ist in Abb. 3.1 zu erkennen.

Durch einen LED-Pulser wird Licht in die Kalibrationsfasern der Flapper geleitet. Da Pulser und Flapper räumlich auseinander liegen, muß über ein Lichtleiterkabel die Verbindung geschaffen werden. Das Ein-

[1] Durch den gepulsten Magneten des BEBC-Experimentes wurden die Wände der Halle magnetisiert. Dieses Magnetfeld ist stark genug, daß das Bild in den Bildverstärkern noch zusätzlich gedreht wird. Aus diesem Grunde wurden die Bildverstärkerketten mit Metallkappen zur Abschirmung versehen. Die Computermonitore mußten ebenfalls gegen das Magnetfeld abgeschirmt werden, da das Monitorbild verzerrt wurde.

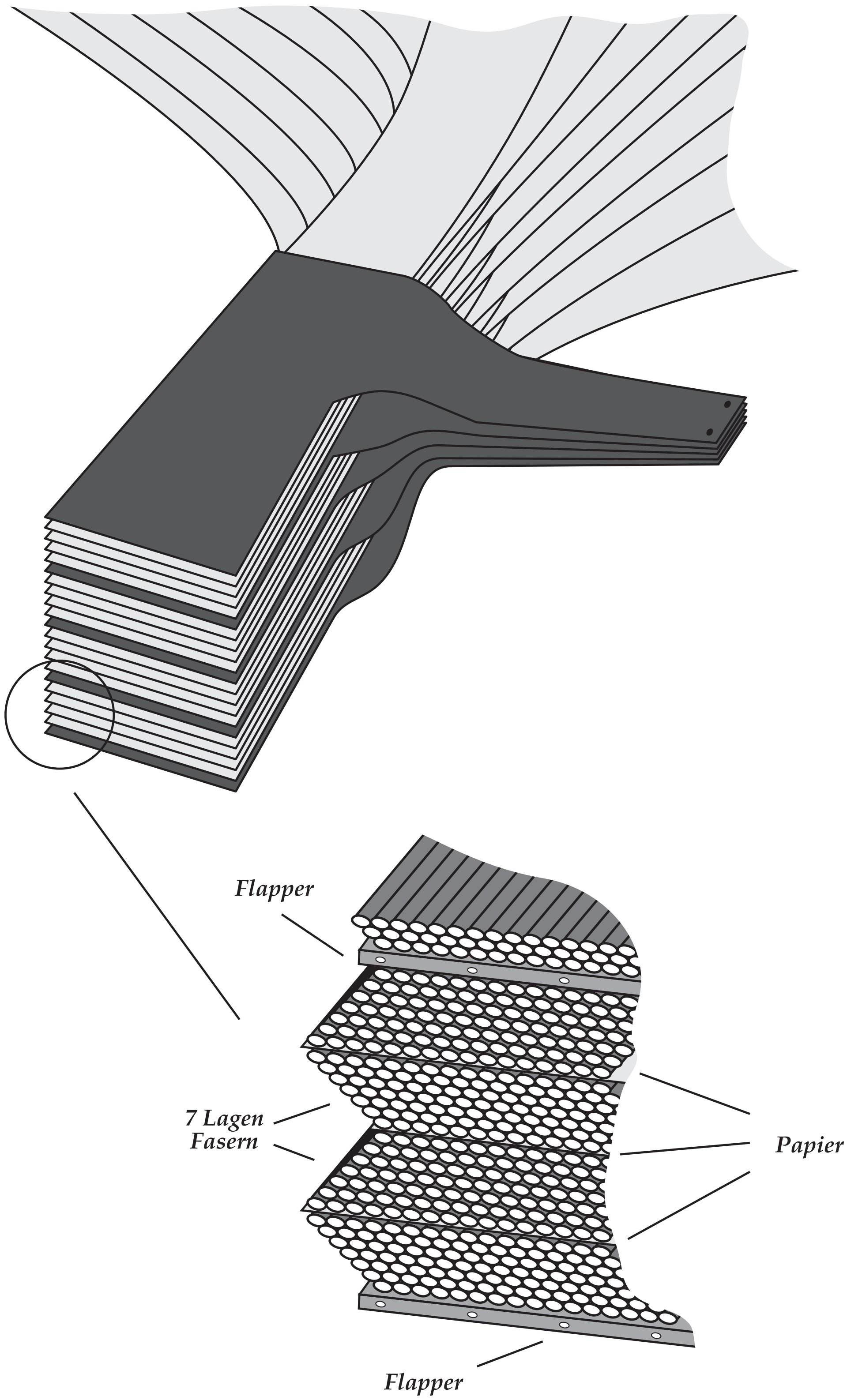

Abbildung 3.1: Aufbau des Trackers (Ausleseseite).

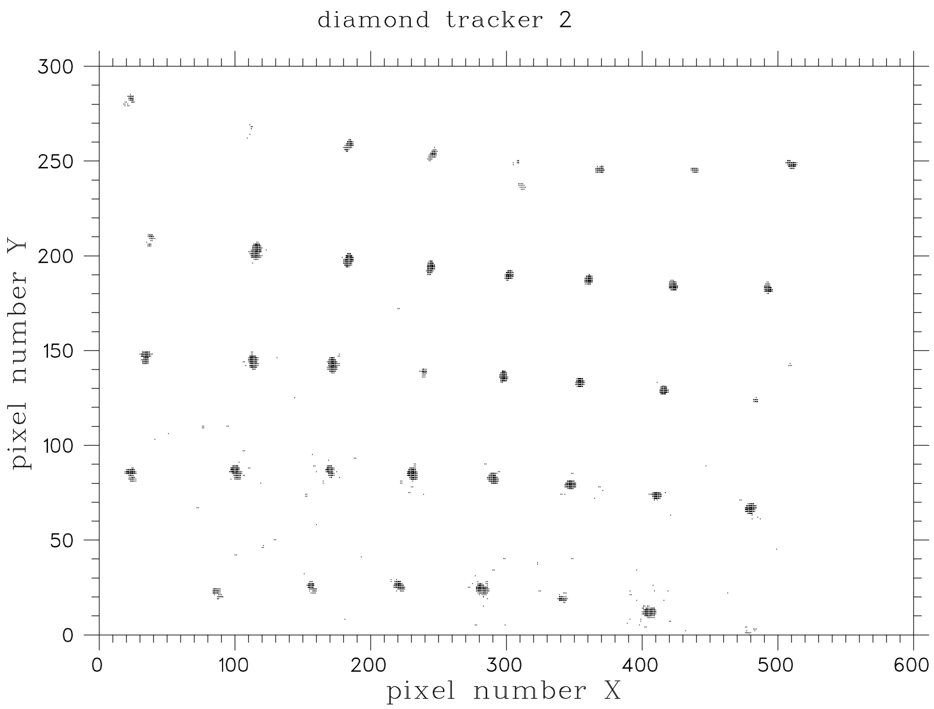

Abbildung 3.2: Aufnahme der Kalibrationspunkte durch die CCD (Verzerrung).

und Auskoppeln des Lichtes und das mechanische Ankoppeln der Lichtleiter mußte auf möglichst einfache Weise gelöst werden. Hierfür wurde eine Ankoppeleinheit entwickelt. Sie verbindet das Lichtleiterkabel mit den Flappern und erfüllt gleichzeitig noch eine strahlenoptische Funktion.

3.1 Flapper

3.1.1 Anforderungen

Es ist wichtig, daß relativ viele Kalibrationspunkte erzeugt werden, die gleichmäßig verteilt sind, damit die unterschiedliche Verzerrung im gesamten Bildbereich erfaßt werden kann. Da die Verzerrungen am Rand stärker sind als im Mittelbereich, sind diese Randpositionen von besonderem Interesse. Ebenso wichtig ist auch, daß die Kalibrationspunkte relativ klein sind, damit möglichst wenig Pixel der CCD durch einen Kalibrationspunkt angesprochen werden. Mit diesen Anforderungen mußte nun ein System entwickelt werden, das es erlaubt, Kalibrationspunkte zu setzen.

Annähernd gleiche Intensitäten der Fasern sind eine weitere wichtige Anforderung. Es werden nicht nur Informationen über die Verzerrung benötigt, sondern auch über die Intensität der Kalibrationsfasern. Da durch Alterungsprozesse der Szintillationsfasern deren Intensität verschlechtert wird, ist eine Intensitätsreferenz notwendig. Diese wird ebenfalls durch das Kalibrationssystem erreicht. Da der LED-Pulser geregelt betrieben wird, kann garantiert werden, daß die Referenzintensität konstant bleibt. Es können so Aussagen über den Alterungsprozeß gemacht werden. Ein möglichst einheitliches Intensitätsniveau der Kalibrationsfasern ist dafür notwendig.

3.1.2 Grundkonzeption

Da in den Ribbons selbst keine Fasern zur Kalibration zur Verfügung stehen, mußten diese außerhalb des Ribbons angebracht werden. Einzelne Fasern, die direkt verklebt werden, wären sehr schwierig zu positionieren, da beim Einklebevorgang keine feste Lage garantiert werden könnte. Bei mehreren Lagen, die gleichzeitig übereinander geklebt würden, stiege die Wahrscheinlichkeit des Verrutschens einzelner Fasern. Es bestünde auch die Gefahr, daß beschädigte Fasern verklebt oder Fasern beim Klebevorgang beschädigt würden. Eine einmal mit dem Ribbon verklebte Faser wäre nicht mehr zu ersetzen. Ein weiteres Problem ergibt sich beim Herausführen der Fasern aus dem Trackerbündel. Da sie sehr dünn sind, sollten sie nicht als freie Enden nach außen geführt werden, da sie sehr leicht abgerissen werden könnten. Eine große Ausfallquote von Kalibrationsfasern wäre nicht zu vermeiden.

Es wird deshalb ein System benötigt, das eine relativ einfache Handhabung beim Klebevorgang mit den Ribbons gewährleistet und die Gefahr der Beschädigung der Fasern vor, während und nach dem Bearbeiten möglichst klein hält. Aus diesen Anforderungen ergab sich ein modulares System.

Dünne Platten, in denen sich Lichtleiter befinden, erfüllen diese Bedingungen. Sie können problemlos zwischen die Faserribbons gelegt und verklebt werden. Durch eine optische Kontrolle, in der Licht von einer Seite in die Fasern der Platten eingekoppelt wird, kann können defekte Fasern aufgefunden werden. Platten mit beschädigten Fasern können aussortiert werden.

Die Gefahr des Abreißens einzelner freier Fasern wird dadurch ausgeschlossen, daß sie vollständig in dieser Platte verbleiben. Somit wird ein größtmöglicher Schutz der Fasern erreicht.

Um ein modulares System zu erhalten, könnten einzelne Fasern auf eine dünne Platte aufgeklebt und mit den Ribbons weiter verarbeitet werden. Beim Aufkleben ergäbe sich das Problem der Positionierung der Fasern. Dies wäre die gleiche Problematik wie beim direkten Aufkleben der Fasern auf den Ribbon. Ein weiterer Nachteil wäre, daß die Fasern an der Oberfläche der Platte liegen und nicht innerhalb. Bei dieser Lage könnte es passieren, daß Fasern beschädigt würden, sei es durch die Handhabung beim Verkleben mit den Ribbons oder, was wahrscheinlicher ist, beim späteren Abfräsen der verklebten Ausleseseite des Trackerbündels.

Eine Fasereinbettung in die Platte selbst wäre ein guter Schutz. Dies

könnte man dadurch erreichen, daß in eine bestehende Platte Rillen zur Einbettung der Fasern gefräst werden.
Besser ist es, die Fasern direkt in die Platte einzugießen, d.h. die Fasern werden vom Plattenmaterial umschlossen. Hierzu muß eine Gußform hergestellt werden, die eine gute Positionierung der Fasern erlaubt. Es muß auch gewährleistet sein, daß beim Ausgießen die Positionen nicht verändert werden. Dies könnte geschehen, da die Gußmasse durch ihre Viskosität die Fasern verschiebt. Die Gußform muß an den Enden kleine Schlitze aufweisen, in die die Faserenden eingelegt werden können. Hiermit sind die Enden fixiert. Die vorgegebene Form dieser Platte wurde in eine Gußform als Negativ eingefräst.

3.1.3 Gußform

Die Gußform wurde aus Plexiglas hergestellt. Dadurch war die Möglichkeit gegeben, auftretende Probleme direkt zu beobachten. Das ständige Beobachten des Gußvorganges war für ein einwandfreies Ergebnis erforderlich. Eine gute Bearbeitung des Plexiglases mit der Fräsmaschine war ebenfalls gewährleistet, so daß dieses Material einen idealen Werkstoff für die Anforderungen darstellte.

Die Gußform besteht aus zwei Platten, die aufeinander geschraubt wurden. In eine der Platten ist die Flapperform, die eine Tiefe von 0,5 mm hat, eingefräst, die andere ist plan. Außer der Form selbst werden kleine Schlitze mit eingefräst. In diese wurden die Lichtleiterenden eingelegt, damit eine gute Positionierung ermöglicht wird. An der Einkoppelseite ist dieser Schlitz etwas größer, da hier alle Fasern eines Flappers eingelegt wurden (Abb. 3.3). Somit wurde erreicht, daß die Fasern am Einkoppelende eng und im gewünschten mittleren Bereich des Flappers lagen.

Erste Versuche mit der Gußform ohne Fasern ergaben, daß die Gußmasse am besten mit einer Spritze direkt von oben eingefüllt werden kann (Gußform steht Hochkant). Da die Gußmasse nach unten floß, war es erforderlich, an den unteren Ecken Entlüftungskanäle mit einzuarbeiten, damit die eingeschlossene Luft aus der Form entweichen konnte. Ein gutes Einfüllen wurde durch einen Sammelkanal erreicht, der an der Oberkante eingefräst wurde. Harz wurde hier eingespritzt, damit ein

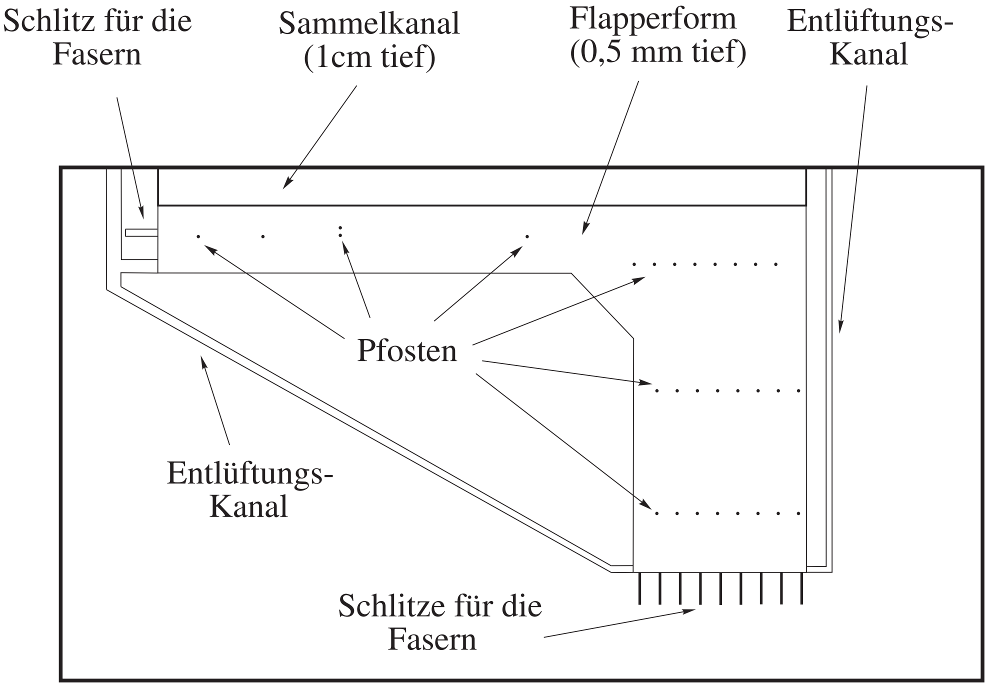

Abbildung 3.3: Gußform.

kleiner Vorrat vorhanden war, der es gewährleistete, daß kontinuierlich Gießmasse nachfließen konnte. Hierdurch wurden Lufteinschlüsse vermieden, die dadurch entstanden, daß Gießharz nicht mehr rechtzeitig nachfließen konnte. Beim direkten Einspritzen in die Form von 0,5 mm Tiefe ohne Sammelkanal wäre der Gießvorgang sehr schlecht zu handhaben gewesen, da zu wenig Masse eingespritzt werden kann.
Der Übergang vom schmalen Einkoppelende des Flappers zum breiten Auskoppelende wurde nicht als Ecke belassen, sondern durch eine Schräge verbunden, so daß keine Bruchstelle enstehen konnte (Abb. 3.3). Dadurch ist später eine bessere Handhabung möglich.

Um eine bessere Faserführung zu erreichen, wurden kleine Pfosten in die Form eingebracht. Da die fertigen Flapper eine Dicke von 0,5 mm nicht überschreiten durften, war erstens ein exaktes Einfräsen der Form erforderlich, was bei CNC-Maschinen kein Problem ist, und zweitens sollten beide Platten, die aneinander geschraubt wurden, vorher plan abgefräst werden. Damit wurde ein genaueres Aufeinanderliegen der Formen erreicht. Zum Verbinden der beiden Platten mußte eine ausreichende Anzahl Schrauben verwendet werden. Hierdurch wurde verhindert, daß

Gießmasse zwischen die Platten einfließen konnte. Bei Beachtung dieser drei Anforderungen konnte die Dicke reproduzierbar eingehalten werden.

3.1.4 Gießvorgang

Die Präparation der Gußform war wichtig, damit der Gießling unbeschädigt aus der Form entnommen werden konnte. Dafür wurde ein Trennwachs verwendet, das aufgesprüht und anschließend poliert wurde. Als Gußmasse wurde ein Epoxidharz verwendet. Das Harz wurde mit Härter vermischt und durch Farbpaste schwarz eingefärbt. Das Einfärben ist notwendig, damit kein Übersprechen der Lichtleiter zu den Ribbons auftreten kann und die einzelnen Ribbons optisch voneinander getrennt sind. Es wurden Materialien von Cyba-Geigy verwendet:

- Harz: Araldite D
- Härter : HY951
- Farbpaste: DW0137
- Trennmittel: QZ5111

Das Harz mußte mehrer Stunden aushärten. Nach Entnahme des Flappers aus der From mußte das alte Wachs aus der Form entfernt werden. Dies wurde durch Schmelzen des Wachses mit einem Warmluftgebläse und anschließendes Entfernen mit einem Papiertuch erreicht.

Erste Versuche mit der Gußform zeigten, daß dieses Verfahren zu Flappern ohne Lufteinschlüssen führte. Hierbei wurde nur das Gießen selbst getestet, also ohne Verwendung von Fasern. Ein Mischungsverhältnis von 5 Gewichtsanteilen Harz und 1 Teil Härter führte zu guten Ergebnissen. Es war wichtig, die Gewichtsanteile genau zu bestimmen, da bei zuviel oder zuwenig Härter die Flapper sehr weich wurden.

In der nächsten Teststufe wurden Fasern mit in die Gußform eingelegt. Hierbei traten Probleme auf, die durch die Fasern selbst verursacht wurden. Es war wichtig, eine gute Gießtechnik zu finden, da mit den eingelegten Fasern verstärkt Lufteinschlüsse auftraten, die in der Nähe enstanden. Es mußte darauf geachtet werden, daß sich das Gußharz langsam vorarbeitete und sich nicht von zwei Seiten Luft einschließen konnte.

Ein Problem ergab sich dadurch, daß der Faserstrang am Einkoppelende auf der gesamten Länge der flachen Seite zusammengeführt wurde. Es entstand dadurch eine Barriere von Unter- und Oberseite des Faserstranges. Das Gießharz konnte auf der Oberseite schneller fließen als auf der Unterseite. An manchen Stellen brach das Harz zwischen den Fasern nach unten durch und schloß Luft von zwei Seiten ein, so daß es nicht mehr entweichen konnte.

Es erwies sich als günstig, von der Oberseite des Auskoppelendes aus zu beginnen und das Harz langsam zur langen schmalen Einkoppelseite fließen zu lassen. Dieses war erforderlich, weil das Eingießen von der Einkoppelseite aus wegen des Eindringens von Gießmasse durch den Faserstrang Lufteinschlüsse im unteren Bereich zur Folge gehabt hätte. Es erwies sich als günstig, die Gießform schräg zu stellen, so daß die Einkoppelseite leicht angehoben wurde. Dadurch konnte erreicht werden, daß das Harz in der Oberseite im Vergleich zur Unterseite nicht zu schnell voreilte.

Ein anderes Problem war der Übergang von der breiten Auskoppelseite zum schmalen Einkoppelende hin. Hier konnten sich Luftblasen bilden, da dieser Übergang sehr leicht von Gießharz eingeschlossen werden konnte. Die Gießmasse vom oberen Sammelkanal durfte nicht zu schnell die Kante erreichen, da sie sonst die Ecke von zwei Seiten einschließen konnte und es keine Möglichkeit mehr gab, daß der Lufteinschluß zum Entlüftungskanal oder nach oben hin entweichen konnte. Es mußte sehr langsam nachgefüllt werden, so daß eine einheitliche kurze Gußfront entstand.

Das Gußharz sollte immer langsam die Luft vor sich herschieben, damit sie immer nach außen entweichen konnte. So konnte vermieden werden, daß Luft von zwei Seiten eingeschlossen wurde. Direkt am Einkoppelende wurden kleine Lufteinschlüsse beobachtet. Diese konnten beseitigt werden, indem in der Nähe des Faserbündels ein weiterer Entlüftungskanal in die Gußform eingefräst wurde. Kleine Lufteinschlüsse, die sich nun immer noch dort befanden, konnten durch eine Spritze mit Kanüle durch den Entlüftungskanal herausgesaugt werden. Hierbei sollte sich aber schon Gußmaterial im Entlüftungskanal befunden haben, damit die Blasen gut herausgezogen werden konnten. Lufteinschlüsse in der Nähe der Sammelkante konnten mit einem Papierstück, das spitz zugeschnitten war, herausgezogen werden. Es war aber darauf zu achten, daß die Fasern nicht verschoben oder beschädigt wurden.

Es hatte sich gezeigt, daß bei fortschreitender Produktion die Gußform Mikrorisse aufwies, und zwar an den Stellen, an denen es mit dem Harz in Verbindung kam. Es enstanden am Ende der Produktion verstärkt Lufteinschlüsse mitten im Flapper, ohne daß ein ersichtlicher Grund dafür gefunden werden konnte. Die Vermutung lag nahe, daß diese Mikrorisse ein gutes Fließverhalten nicht mehr gewährleisteten, obwohl sich über der Form noch eine dünne Trennwachsschicht befand.

3.1.5 Kalibrationsfasern im Flapper

Wichtig für eine homogene Intensitätsverteilung der Kalibrationsfasern in den verklebten Flappern sind folgende Punkte:

- Enge und mittige Führung der Fasern im Einkoppelbereich
- Homogene Ausleuchtung der Kalibrationsfasern im Einkoppelbereich
- Senkrechte Führung der Fasern an der Auskoppelseite
- Gut polierte Faseroberflächen

Da bei den ersten Prototypen die Gußform keinen Schlitz am Einkoppelende aufwies, konnte keine enge Führung und gewünschte mittlere Lage des Kalibrationsfaserbündels erreicht werden. Da die Ankoppeleinheit nur einen begrenzten Bereich homogen ausleuchten kann, ist eine enge und mittige Führung unbedingt erforderlich. Fasern, die aus dieser Führung herausfallen, werden nicht mehr homogen ausgeleuchtet. Somit sinkt die Intensität am anderen Faserende. Durch einen Schlitz in der Gußform konnten die Faserenden mittig fixiert werden. Kleine Pfosten entlang des Einkoppelbereiches garantierten eine mittige Führung über eine lange Strecke.

Ebenso wichtig wie die möglichst homogene Ausleuchtung der Kalibrationsfasern im Einkoppelbereich der Flapper war die Auswahl des Fasermaterials. Beim Abfräsen brachen teilweise Glasfasern einige Millimeter innerhalb der Faser, so daß die Transmission verschlechtert wurde. Die großen Intensitätsunterschiede der einzelnen Fasern, die in Abb. 3.8 zu erkennen sind, waren darauf zurückzuführen. Es ist außerdem zu erkennen, daß die beiden äußeren Flapper (Nr. 1 und Nr. 5) ein erheblich geringeres Intensitätsniveau aufweisen als die anderen Flapper. Dieses wurde durch die inhomogene Ausleuchtung des Einkoppelbereiches verursacht, da bei dieser Messung das Ankoppelstück den Strahl nicht aufweitete.

Da die Ausleseseite der Faser-Ribbons mit den Flappern (siehe Abb 3.1) zur Ankopplung an die Bildverstärkerketten mit einem Fräskopf plan abgearbeitet wurden, wären Glasfasern nicht geeignet gewesen. Besser geeignet waren Plastikfasern, die problemlos bearbeitet werden konnten.

Versuche mit Plastikfasern ergaben eine bessere Intensitätsverteilung innerhalb der einzelnen Flapper. Der Intensitätsabfall der beiden Randflapper war jedoch noch vorhanden, da die Ankoppeleinheit nicht verändert wurde. Da das Ergebnis immer noch nicht zufriedenstellend war, wurde die Lage der Fasern im Flapper überprüft. Dazu wurde die Gußmasse nicht schwarz eingefärbt, sondern durchsichtig belassen, damit die Lage der Fasern sichtbar blieb. Es war zu erkennen, daß die Fasern beim Gießen teilweise erheblich verschoben wurden. Die Endlagen der Fasern blieben zwar erhalten, aber sie traten nicht senkrecht zur Auskoppelkante aus. Da die einzelnen Fasern unterschiedliche Winkel zur Auskoppelseite bildeten, ergaben sich Intensitätsunterschiede. Deshalb mußte erreicht werden, daß die Fasern senkrecht zur Auskoppelseite verlaufen. Um einen gute Faserpositionierung nach dem Ausgießen zu gewährleisten, wurden in die Gußformen kleine Pfosten eingebracht, um ein Verschieben der Fasern zu verhindern. Das Modifizieren der Gußform erbrachte ein gutes Ergebnis. Alle Fasern liefen senkrecht zur Auskoppelseite aus.

Damit die größtmögliche Menge Lichtes ein- und ausgekoppelt werden kann, ist eine einwandfrei polierte Oberfläche der Fasern notwendig. Die

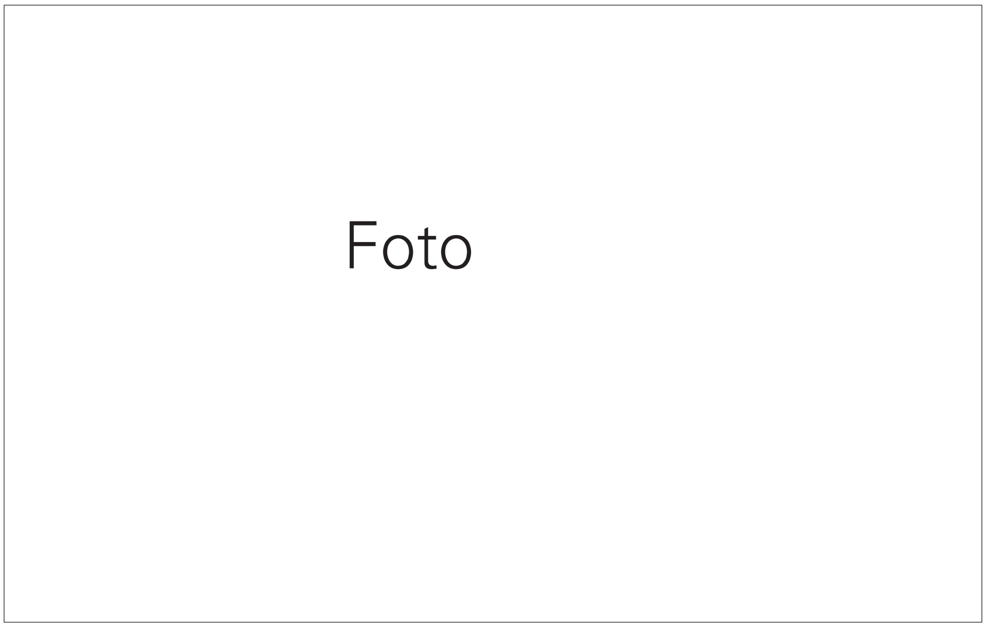

Abbildung 3.4: Kalibrationsfaseroberfläche mit einem Metallfräser bearbeitet (Mikroskopaufnahme).

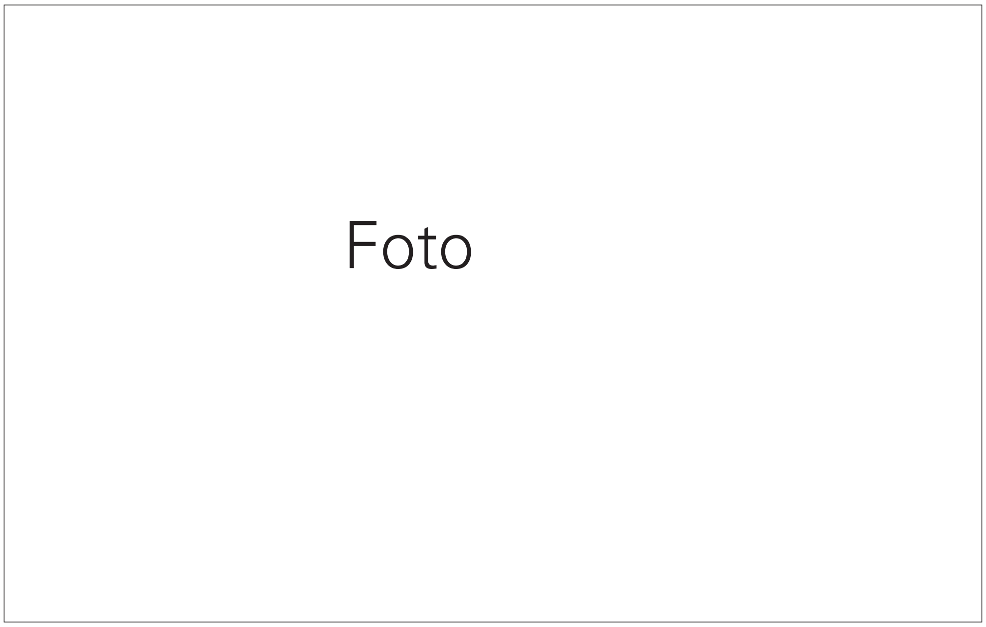

Abbildung 3.5: Kalibrationsfaseroberfläche mit einem Metallfräser bearbeitet und grob poliert (Mikroskopaufnahme).

Foto

Abbildung 3.6: Kalibrationsfaseroberfläche mit einem Diamantschneidpolierer bearbeitet (Mikroskopaufnahme).

Schneidqualität mußte überprüft werden. Es wurden Flapper mit einem Metallfräser plan abgearbeitet und mit dem Mikroskop bezüglich der Schneidqualität überprüft. Es war zu erkennen, daß die Faseroberfläche nicht rund und plan herausgearbeitet war (Abb. 3.4). Um die Fasern richtig herauszuarbeiten, mußten sie noch poliert werden. Nach grobem Polieren waren die runden Flächen der Fasern zu erkennen (Abb. 3.5). Da aber ein weiterer separater Arbeitsgang auf einer Poliermaschine notwendig gewesen wäre, mußte ein anderer Weg gefunden werden. Ein Diamantschneidpolierer vereinigte zwei Arbeitsgänge in einem: Die Fasern wurden geschnitten und gleichzeitig poliert. Separates Polieren auf einer Poliermaschine wäre mit den Trackern auch sehr schwierig handhabbar gewesen. Die Schneidqualität des Schneidpolierers erwies sich als sehr gut. Die Fasern waren rund herausgearbeitet und die Oberfäche plan abgearbeitet, ohne Riefen aufzuweisen (Abb. 3.6).

Die richtige Wahl der Fasern, die geeignete Bearbeitung und die richtige Fixierung in der Gußform garantierten erst im Zusammenspiel ein gutes Ergebnis.
Die Handhabung der Kalibrationsfasern ist schwierig, da sie nur einen

Durchmesser von 127 μm haben. Beim Einlegen ist deshalb ein sorgfältiger Umgang mit ihnen notwendig.

Bei der Produktion der Flapper entstand ein Ausschuß von ungefähr 50 %. Dieses hatte mehrer Ursachen. Eingelegte Fasern wurden beim Zusammenschrauben der Formen an den Pfosten beschädigt. Dies konnte nach einiger Zeit fast völlig ausgeschlossen werden. Ein andere Grund war, daß einzelne Fasern aus der engen Führung an der Einkoppelseite herausvielen und somit aussortiert wurden, da sie nicht mehr für eine homogene Ausleuchtung geeignet waren. Große Lufteinschlüsse, die nicht beseitigt werden konnten, waren ein weiterer Grund für das aussortieren. Flapper zerbrachen auch bei der Herausnahme aus der Gußform. Einige Flapper wurden aussortiert, da bei ihnen eine oder mehrer Fasern nicht oder nur sehr schlecht transmittierten. Es wurde darauf geachtet, daß der Licht-Output bei allen Fasern annähernd gleich gut waren.

3.2 LED-Pulser

Da das Kalibrationssystem gepulst betrieben wird, mußte ein LED-Pulser entwickelt werden. Er ist als Platineneinschub mit Frontplatte im Euroformat ausgelegt. Auf dieser befinden sich die Pulserelektronik, die Regelelektronik und die Leuchtdiode (LED) selbst. Die LED ist in einer lichtdicht abgeschlossenen Box untergebracht, in der nur ein Stecksystem für den Lichtleiter vorgesehen ist. Hiermit wird verhindert, daß Licht von außen durch das Lichtleiterkabel zum Eingang des Bildverstärkers gelangt.

In der Box befindet sich eine PIN-Diode. Sie ist Hauptbestandteil des Regelelektronikkreises und überwacht die Intensität der LED. Das Regelniveau kann durch ein Drehpotentiometer, das von der Frontseite der Platine erreichbar ist, eingestellt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch eine externe Spannung den Regelbereich von außen zu steuern. Dadurch ist eine Computersteuerung möglich, von der im Experiment Gebrauch gemacht wird. Mit einem Digital-Analog-Converter (DAC) wird über ein OS-9-System die Intensität für jede der 58 Pulsereinheiten individuell geregelt.

Der LED-Pulser ist mit einem internen Trigger ausgestattet, kann aber auf einen externen Trigger umgeschaltet werden. Das Umschalten erfolgt durch Schalter, die sich auf der Frontplatte befinden. Der interne Triggermodus liefert wahlweise eine Signallänge von 20 μsec oder 500 nsec bei einer Frequenz von 14 kHz. Im externen Triggermodus kann ein NIM-Trigger mit beliebiger Länge verwendet werden. Das Triggersystem des Experimentes liefert ein 20 μsec langes NIM-Signal.

3.3 Stecksystem

Das Lichtleiterkabel sollte durch ein Stecksystem mit dem LED-Pulser und den Flappern verbunden werden. Hierfür bot sich ein System der Firma Hirschmann an, da es einfach zu handhaben ist. Das Stecksystem besteht aus einem Stecker OVKS 3,0-B und einer Diodenhalterung, die mit der entsprechenden Kupplung ausgestattet ist. Die Lichtleiterkabel wurden mit Steckern, die LED-Boxen und die Flapper mit Diodenhalterungen versehen.

Die Diodenhalterung mußte noch modifiziert werden, so daß ein Ankoppelstück aus Plexiglas eingepaßt werden konnte und somit eine Verbindung zu den Flappern hergestellt wird. Die Modifikation der Diodenhalterung bestand darin, daß ein Schlitz von 8 mm Breite und 3,85 mm Tiefe eingefräst wurde, in den das Ankoppelstück aufgenommen wurde.

3.4 Ankoppeleinheit

Die Aufgabe bestand darin, eine mechanische Verbindung der Flapper mit dem Stecksystem (Diodenhalterung) herzustellen. Diese Halterung muß optisch durchlässig sein, damit Licht in die Kalibrationsfasern eingekoppelt werden kann. Es wurde Plexiglas verwendet, da es mechanisch gut zu bearbeiten und optisch durchlässig ist. Aus einem Quaderstück wurde an dessen einem Ende eine Zylinderform herausgearbeitet und somit der Innenseite der modifizierten Diodenhalterung angepaßt (Abb. 3.7).

Am anderen Ende wurde ein Schlitz von ausreichender Breite eingefräst, so daß 5 Flapper aufgenommen werden konnten. Dieses war für

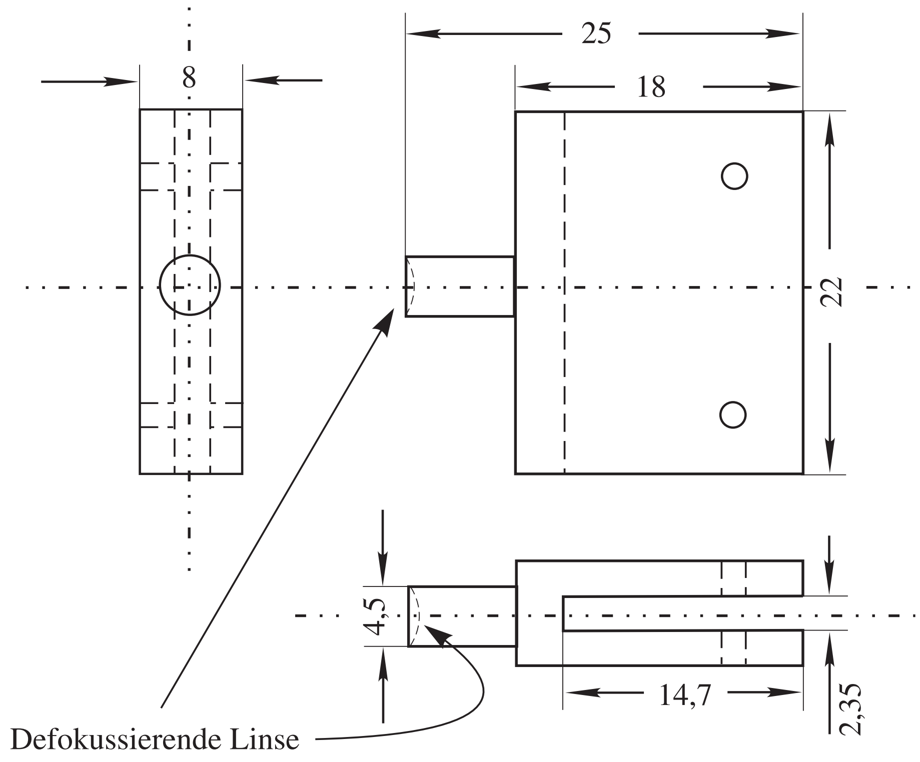

Abbildung 3.7: Ankoppeleinheit.

eine möglichst stabile Verbindung sowohl zu den Flappern als auch zu der Diodenhalterung notwendig. Das Ankoppelstück ist mit der Diodenhalterung verklebt, so daß eine Einheit gebildet wird. Dieses Ankoppelstück erfüllt nicht nur eine rein mechanische Aufgabe, sondern es beinhaltet noch ein zusätzliches optisches Element. Dieses ist eine defokussierende Linse, die das Licht, das aus dem Lichtfaserkabel vom LED-Pulser kommend austritt, aufweitet und somit eine homogenere Ausleuchtung der Kalibrationsfasern in den Flappern ermöglicht. Diese Linse wurde in den zylindrischen Teil des Ankoppelstückes mit eingearbeitet.

Erste Ausführungen mit einer planen Fläche an dem zylindrischen Teil der Einkoppelseite ergaben eine schlechte Ausleuchtung der Fasern in den Flappern. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß der effektive Faserdurchmesser kleiner ist als die Ausdehnung der Kalibrationsfasern. Diese inhomogene Ausleuchtung ist in Abb. 3.8 und Abb. 3.9 gut zu erkennen. Die beiden Randflapper (Nr. 1 und 5) zeigen eine deutlich geringere Intensität auf als die mittleren. Es mußte versucht werden,

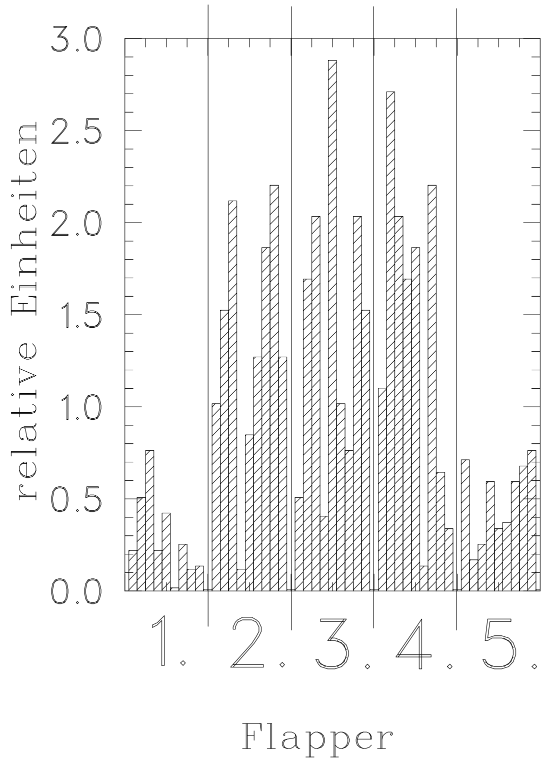

Abbildung 3.8: Intensitätsverteilung mit Glasfasern. Jeder Kanal zeigt die relative Intensität eines Kalibrationspunktes. Die Lage der einzelnen Flapper ist in Abb. 3.1 zu erkennen.

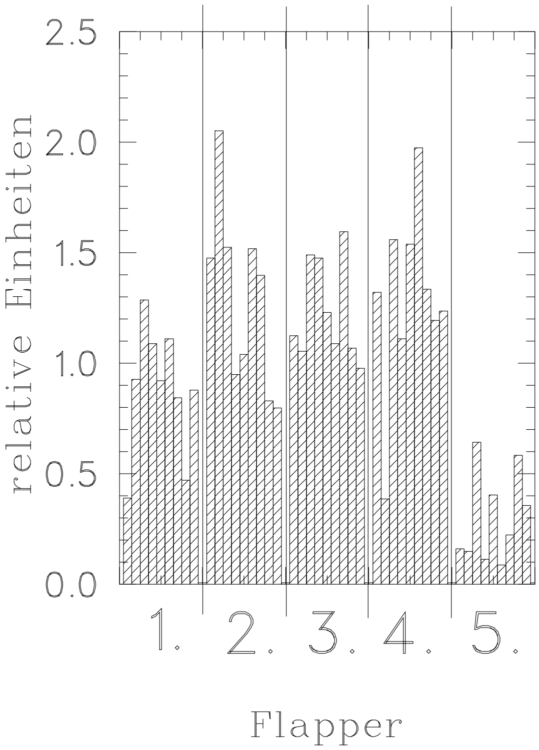

Abbildung 3.9: Intensitätsverteilung mit Plastikfasern.

eine homogenere Ausleuchtung in dem Bereich der Kalibrationsfasern zu erreichen, um den Licht-Output dieser Fasern in den Intensitäten anzugleichen.

Eine homogenere Ausleuchtung sollte darüber erreicht werden, daß entweder das Licht aus dem Lichtleiterkabel durch ein diffuses Plexiglasstück hindurchtritt und aufgeweitet wird oder durch eine sphärische Oberfläche der Ankoppeleinheit, die den Strahl ebenfalls aufweitet. Mehrere Testreihen, bei denen verschiedene Kugelflächen in die Eintrittsseite des Plexiglases eingearbeitet worden waren, ergaben, daß die Oberfläche mit einem Innenradius von 3 mm ein zufriedenstellendes Ergebnis lieferte. Hier bildet die eine Seite des Ankoppelstückes eine defokussierende Linse, die den eintretenden Lichtstrahl aufweitet (Abb. 3.11).

Ebenso wichtig wie die Aufweitung des Strahles war die exakte mechanische Einpassung der Flapper in das Ankoppelstück. Es mußte darauf geachtet werden, daß die Flapper plan mit der Innenseite des Ankoppelstückes abschlossen und die Lichtleiter auch mittig im An-

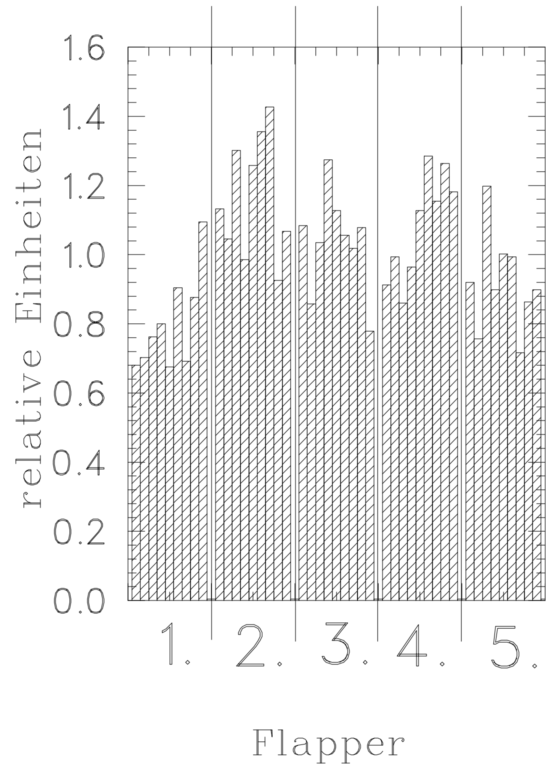

Abbildung 3.10: Intensitätsverteilung mit Plastikfasern. Ankoppelstück ist als defokussierende Linse ausgelegt.

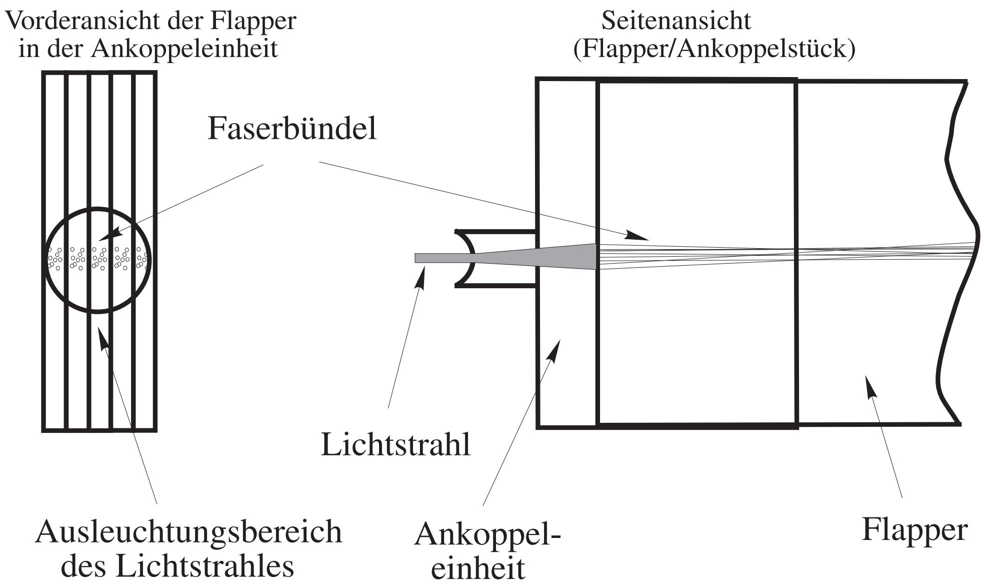

Abbildung 3.11: Ausleuchtung der Kalibrationsfasern. Der ankommende Lichtstrahl wird durch das Ankoppelstück aufgeweitet.

koppelstück lagen und damit mittig zum Lichtleiterkabel, um eine homogene Ausleuchtung zu erhalten. Flapper und Ankoppelstück sind miteinander verschraubt. Für deren exakte Einpassung wurde für die Flapper eine Bohrschablone angefertigt. Hiermit ist gewährleistet, daß die Fasern durch die Bohrungen bezüglich der Strahlachse eine mittige Lage erhielten und direkt mit der Innenseite des Ankoppelstückes abschließen. Um einen guten optischen Übergang von der Innenseite des Ankoppelstückes zum Flapper zu erreichen, wurde hier optisches Fett verwendet. Beim Ankoppelstück ist darauf zu achten, daß die bearbeiteten Ein- und Auskoppelflächen eine polierte Oberfläche aufweisen.

Auf ein diffuses Ankoppelstück wurde verzichtet, da der Intensitätsverlust zu groß war.
Einwandfreie Flapper und die richtige Aufweitung des Lichtes lieferten ein zufriedenstellendes Ergebnis in der Intensitätsverteilung. In Abb. 3.10 ist die Verbesserung der Homogenität zu erkennen. Die Auslese eines Kalibrationspunktes durch die CCD ist in Abb. 3.12 ersichtlich. Es ist zu erkennen, daß nur wenige Pixel der CCD angesprochen werden.

3.5 Lichtleiterkabel

Die Verbindung zwischen dem LED-Pulser und den Flappern erfolgt über ein Lichtleiterkabel, das aus einem Faserbündel mit 480 Einzelfasern besteht. Dieses ist wichtig, da hiermit eine homogenere Ausleuchtung durch das Lichtleiterkabel erreicht wird. Eine einzelne Faser mit gleich großem Gesamtdurchmesser erreicht dieses nicht, da hierbei in der Faser ein schwarzer Core entsteht. Die Intensität nimmt vom Rand der Faser nach innen ab.
Die einzelnen Fasern im Bündel haben einen Durchmesser von 53 μm. Sie bestehen aus Glas und bilden zusammen einen effektiven Durchmesser von 1,1 mm. Die räumlichen Gegebenheiten erforderten eine Lichtleiterkabellänge von etwa 30 m. Von besonderer Wichtigkeit ist, daß die einzelnen Fasern im Bündel nicht zu viel Bruch aufweisen, d.h. es sollten alle Einzelfasern Licht transmittieren. Ist der Bruchanteil zu groß, verschlechtert sich die homogene Ausleuchtung des Faserbereiches im

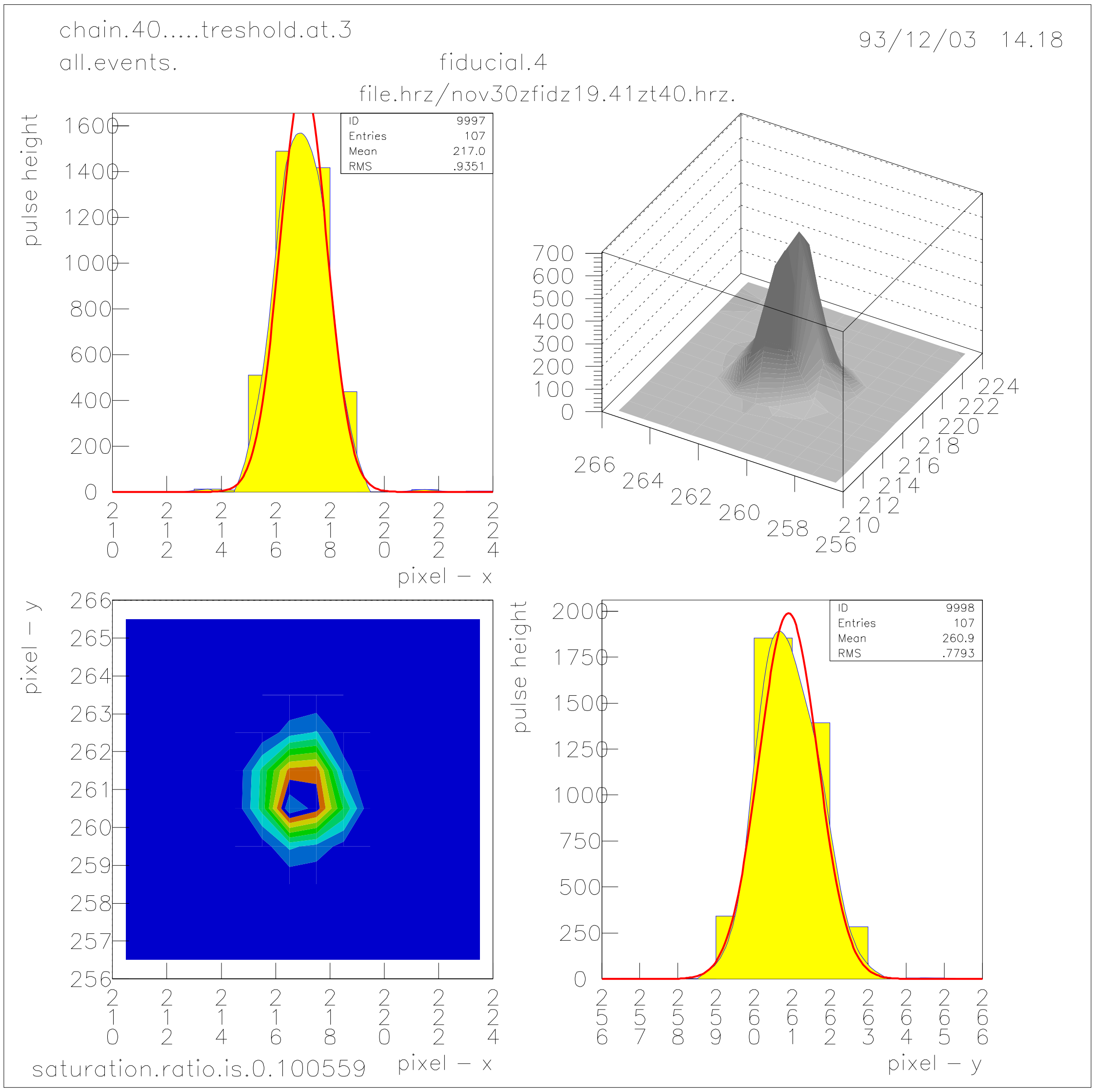

Abbildung 3.12: Aufnahme eines Kalibrationspunktes durch die CCD.

Flapper. Diese war bei einer Faserlieferung der Firma GP-Fibre-Optics der Fall, so daß diese Fasern zurück gegeben wurden.

4. Bildverstärker

Ein Bildverstärker (image intensifier) ist ein optoelektronisches Gerät, das ein Bild mit schwacher Intensität verstärkt. Das Grundprinzip besteht darin, daß Photonen in einer Photokathode Elektronen erzeugen. Diese werden beschleunigt und erzeugen in einer Phosphorschicht eine vervielfachte Anzahl von Photonen.

Elektrostatisch-fokussierende Bildverstärker werden in zwei Generationen unterteilt:

Erste Generation	Einstufiger	Inverter-Typ
		Nahfokus-Typ
	Kaskaden	Inverter-Typ
		Nahfokus-Typ
Zweite Generation	Einstufiger	Inverter-MCP-Typ
		Nahfokus-MCP-Typ
	Kaskaden	Inverter-MCP-Typ
		Nahfokus-MCP-Typ

4.1 Bildverstärker der ersten Generation

Nach der Art der Elektronenoptik (elektrische Feldverteilung zwischen Photokathode und Phosphorschirm) werden Bildverstärker in Nahfokus-Bildverstärker und Inverter-Bildverstärker unterteilt.

Abb. 4.1 zeigt einen elektrostatisch-fokussierenden einstufigen Inverter-Bildverstärker, der die prinzipielle Arbeitsweise der Bildverstärker deutlich macht. Er besteht aus drei Grundkomponenten:

1. Fotoempfindliche Schicht
2. Beschleunigungsfeld
3. Fluoreszenzschirm

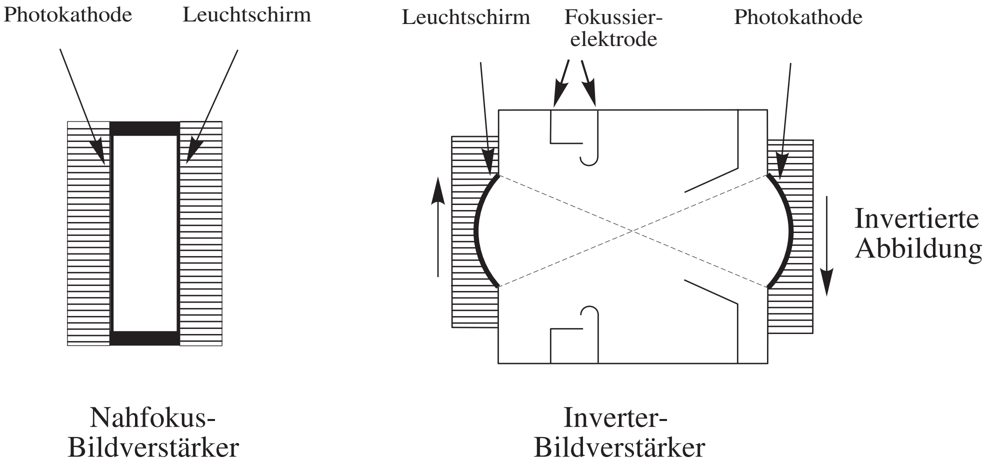

Abbildung 4.1: Bildverstärker der ersten Generation.

Photonen fallen durch das Eingangsfenster des Bildverstärkers auf eine Multialkali-Photokathode. Elektronen werden aus dieser Schicht ausgelöst und durch ein elektrisches Feld auf eine Phosphorschicht beschleunigt. Sie erzeugen ein verstärktes Photonenbild, das durch ein Fenster nach außen transmittiert. Bei dieser Bauart kann durch die Form des Feldes auch der Maßstab der Abbildung verändert werden.

Der Verstärkungsfaktor des Bildes hängt hauptsächlich von der Sensitivität der Photokathode, der Beschleunigungsspannung und dem Vergrößerungsfaktor der Röhre ab. Typische Verstärkungsfaktoren dieser Bildverstärker liegen zwischen 100 und 2000. Der Nachteil ist die Bildverzerrung, die bei diesen Typen auftritt. Um diese zu vermeiden, wurden Bildverstärker mit kurzen Abmessungen konstruiert, die sogenannten Nahfokus-Bildverstärker. Da hier die Beschleunigungsstrecke kurz ist, wird eine verzerrungsarme Abbildung erreicht, aber auch eine geringere Verstärkung. Hiermit ist auch nur eine 1:1 Abbildung möglich. Nahfokus-Bildverstärker sind aufgrund ihrer Abmessungen weniger empfindlich gegen äußere Felder. Um Verstärkungen von 50000 oder größer zu erreichen, werden Stufen der Bildverstärker in Kaskaden zusammengeschaltet (Abb. 4.2). Dieses wurde durch die Entwicklung hochauflösender vakuumdichter Faseroptikfenster möglich. Ein Faseroptikfenster ist notwendig, damit das Bild auf dem nächsten direkt angekoppelten Bildverstärker abgebildet werden kann und um die Auflösung des Bildes nicht zu beeinträchtigen.

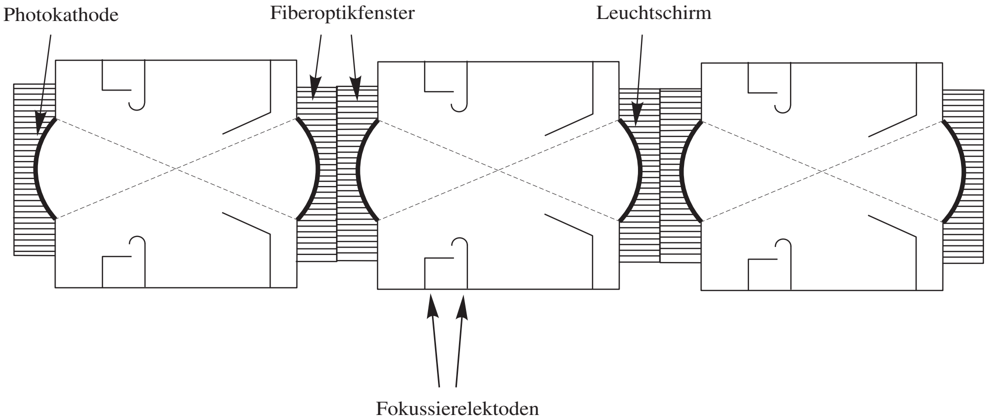

Abbildung 4.2: Kaskaden-Bildverstärker.

4.2 Bildverstärker der zweiten Generation

Bei Bildverstärkern der zweiten Generation werden durch Mikrokanalplatten (micro channel plate (MCP)) hohe Verstärkungen erreicht. Der Aufbau ist derselbe wie bei denen der ersten Generation. Der Hauptunterschied liegt in der Elektronenvervielfachung. Bei den Geräten der ersten Generation werden die Elektronen nur beschleunigt und produzieren bei ihrem Auftreffen auf die Phosphorschicht eine Vielzahl von Photonen. In Geräten der zweiten Generation werden die einzelnen Elektronen im MCP vervielfacht. Daher werden keine hohen Beschleunigungsspannungen benötigt. Durch diese Elektronenvervielfachung wird ein hoher Verstärkungsfaktor erreicht.

Ein MCP ist eine Anordnung winziger Kanäle in einer Bleiglasplatte. Die Innenflächen der Kanäle sind mit Halbleitermaterialien bedampft und bilden dadurch eine kontinuierliche Dynodenstruktur. Damit wird ein konstanter Potentialgradient in den Kanälen erzeugt. Elektronen treten in einen Kanal ein, werden durch ein axiales Feld beschleunigt und treffen auf die Innenwand. Hier produzieren sie Sekundärelektronen, die wieder beschleunigt werden und Elektronen auslösen. Dieser Prozeß wird viele Male wiederholt, so daß eine große Anzahl von Elektronen an den Kanalenden austritt. Die Elektronenverstärkung der Kanäle hängt von der angelegten Spannung, dem Längen-Durchmesser-Verhältnis der Kanäle und von der Sekundäremissionscharakteristik der

Kanalwände ab. MCP's werden mit einem Mittelpunkt-zu-Mittelpunkt-Abstand der einzelnen Kanäle von bis zu 15 μm hergestellt. Theoretisch ist es möglich, diesen noch zu reduzieren und dadurch eine bessere Auflösung zu erreichen. Dieses stellt aber ein technologisches Problem dar.
Die erzielbare Bildschärfe und der Dynamikbereich sind geringer als bei Bildverstärkern der ersten Generation. Die Lichtverstärkung reicht jedoch von 10000 bei einem MCP bis zu 10^7 bei Verwendung zweier MCP's. Eine Anordnung mehrerer MCP's in einem Bildverstärker ist mit der Kaskadenanordnung bei Geräten der ersten Generation vergleichbar.

Intensitätsunterschiede am Phosphorschirm werden durch Elektronen verursacht, die die Kanäle durchqueren, ohne mit den Wänden in Wechselwirkung zu treten. Durch Schrägstellung des MCP's oder durch schräge Kanalführung kann dieses vermieden werden.
Die Bildung von Ionen stellt ein weiteres Problem dar. Positive Ionen werden zur Photokathode hin beschleunigt und beschädigen sie. Die Lebensdauer des Gerätes wird hierdurch verkürzt. Dieses kann durch eine dünne Schicht aus Aluminium, die direkt vor dem MCP angebracht wird, verhindert werden. Während Photoelektronen die Schicht durchdringen können, werden positive Ionen aus den MCP-Kanälen hier absorbiert. Die Aluminiumschicht erhöht den Rauschfaktor. Zudem werden freigesetzte Sekundärelektronen durch das Feld auf das Material zwischen den Kanälen beschleunigt. Sie treten in angrenzende Kanäle ein, werden vervielfacht und erhöhen zusätzlich den Rauschfaktor.

Beim Nahfokus-MCP-Bildverstärker ist das MCP dicht vor der Photokathode in einem Abstand von wenigen zehntel Millimetern angebracht. Seine großen Vorteile sind die flache Bauweise und sein niedriges Gewicht. Die Herstellung dieses Types ist schwierig, da eine teure Vakuumtechnik notwendig ist. Die Lebensdauer dieser Geräte ist vergleichsweise kurz, da Ionen, die im MCP freigesetzt werden, direkt die Photokathode erreichen. Ein sehr dünner Aluminiumoxidfilm verringert den Ionenstrom zur Photokathode, ohne die Leistungsfähigkeit zu beeinflussen und ohne die niederenergetischen Elektronen zu absorbieren.

Beim Inverter-MCP-Bildverstärker ist das MCP ebenfalls direkt vor

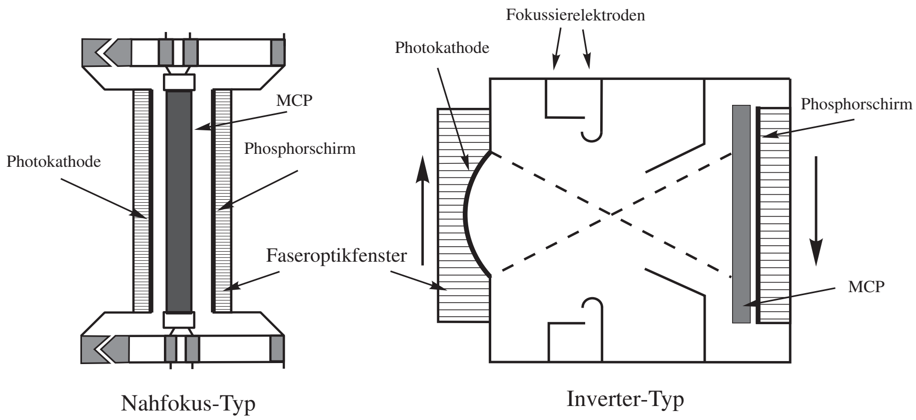

Abbildung 4.3: Bildverstärker der zweiten Generation.

dem Phosphorschirm aufgebracht. Zwischen Photokathode und MCP liegt eine Beschleunigungsstrecke. Photoelektronen werden an der Photokathode erzeugt, beschleunigt, fokussiert und treffen auf das MCP. Hier tritt eine erhebliche Verstärkung auf. Anschließend werden die Elektronen auf den Phosphorschirm beschleunigt.

Neuentwicklungen führten zu sogenannten Bildverstärkern der dritten Generation. Diese sind Nahfokus-MCP-Bildverstärker mit Gallium-Arsenid-Photokathoden (Lichtempfindlichkeit $\sim$1200μA/lm). Der Vorteil liegt in der hohen Quantenausbeute im Rot- und Nahen Infrarot-Bereich.

4.3 CHORUS-Bildverstärker

4.3.1 Aufbau der Bildverstärkerkette

Verschiedene Anforderungen wurden an die Bildverstärkerkette des CHORUS-Experimentes gestellt. Damit möglichst viele Fasern der Tracker an eine Bildverstärkerkette angekoppelt werden können, wurde ein Durchmesser von 100 mm gewählt. Diese wurde in Abwegung der Kosten mit der Auflösung der CCD gewählt. Unter der Auflösung der CCD ist die Anzahl der Pixel, die auf eine Faser entfällt, zu verstehen. Durch die vorgegebene Größe der CCD mußte das Bild von 100 mm auf 11 mm Durchmesser verkleinert werden. Die spektrale Empfindlichkeit der ersten Photokathode mußte dem Spektralbereich

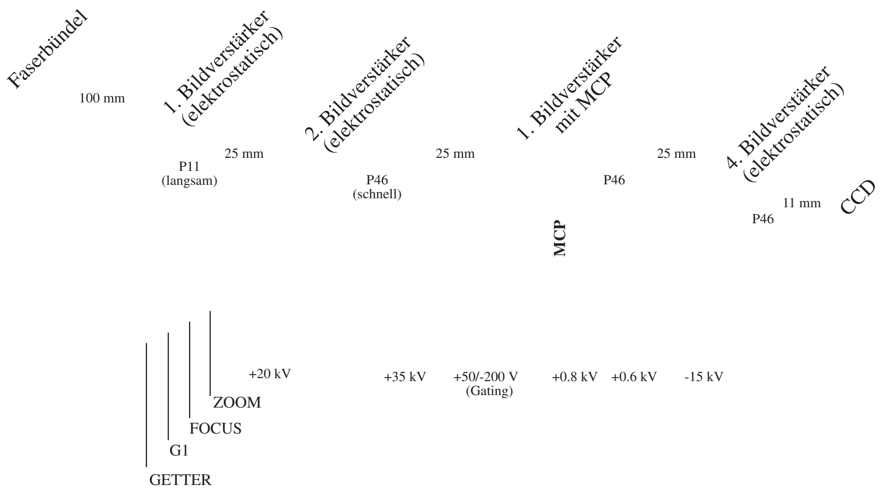

Abbildung 4.4: CHORUS-Bildverstärkerkette.

der Szintillationsfasern angepaßt werden. Die Quanteneffizienz der Photonen/Elektronenumwandlung sollte möglichst hoch sein. Und es mußte eine ausreichende Verstärkung in der Bildverstärkerkette erreicht werden.

Da kein einzelner Bildverstärker zur Verfügung stand, der diese Verkleinerung von 100 mm auf 11 mm erreichen konnte, mußte eine Gerätekombination gefunden werden.

Mit zwei Bildverstärkern kann aber eine Gesamtverkleinerung von 100 mm auf 11 mm erreicht werden. In deren erster Stufe wird das Bild von 100 mm auf 25 mm und in der zweiten Stufe von 25 mm auf 11 mm verkleinert. Mit diesen beiden Bildverstärkern ist aber keine ausreichende Verstärkung möglich. Es war deshalb erforderlich, noch eine dritte Verstärkerstufe einzubauen. Hierfür wurde ein MCP-Bildverstärker ausgewählt. Es erwies sich als besser, das MCP nicht mit maximaler Verstärkung zu betreiben, sondern stattdessen eine weitere Bildverstärkerstufe als Vorverstärker für das MCP zu verwenden. Dazu wurde ein elektrostatischer Bildverstärker verwendet, der den Maßstab unverändert läßt. Damit ergab sich eine vierstufige Bildverstärkerkette (Abb 4.4).

Als erste Stufe wurde ein elektrostatischer Bildverstärker V5502UX von Hamamatsu verwendet. Er besitzt 5 Elektrodenanschlüsse:

1. 20 kV
2. ZOOM
3. FOCUS
4. G1
5. GETTER

Die 20 kV-Elektrode liefert die Beschleunigungsspannung für die Elektronen. Durch den Aufbau der Elektroden wird das Feld so konfiguriert, daß eine Verkleinerung des Bildes erreicht wird. Mit der Zoom-Kathode ist man in der Lage, den Abbildungsmaßstab in gewissen Grenzen zu variieren. Deshalb ist eine gesonderte Nachfokussierung notwendig. Mit der Focus-Elektrode kann für jeden Abbildungsmaßstab die Fokalebene auf den Phosphorschirm eingestellt werden. Zur Unterstützung dient die G1-Elektrode.

Positive Ionen im Bildverstärker werden durch ein Gitter (Getter-Elektrode) abgefangen. Es wird eine Photonenverstärkung von ~ 10 erreicht. Das Bild wird von 100 mm auf 25 mm verkleinert.

Die zweite Stufe ist ebenfalls ein elektrostatischer Bildverstärker. Es handelt sich um einen DEP PP0030X mit einem Durchmesser von 25 mm. Seine Aufgabe besteht darin, eine Vorverstärkung für den MCP zu liefern. Das Beschleunigungsfeld wird durch eine Potentialdifferenz von 15 kV erreicht. Die Abbildungsgröße wird nicht verändert. Die Photonenverstärkung beträgt ~ 6.

Die dritte Stufe ist ein Proxitronic BV2563McX Bildverstärker. Dieser Typ ist ein MCP-Bildverstärker mit einer Photonenverstärkung von ~ 1000. Das MCP selbst wird mit einer Potentialdifferenz von 750 V betrieben, wobei der Eingang des MCP auf Masse gelegt ist. Am Eingangsfenster auf der Innernseite des Bildverstärkers ist eine Elektrode angebracht. Mit ihr ist man in der Lage, den Durchgang der Elektronen zu steuern (gating). Wird eine Spannung von -200 V angelegt, werden die entstehenden Elektronen abgefangen, da ein entgegengesetztes Feld zwischen Photokathode und MCP erzeugt wird. Beim Anlegen einer Spannung von +50 V können die Elektronen passieren und werden auf das MCP beschleunigt. Es ist ein Gating von 20 μsec Länge möglich.

Die minimale Pulslänge beträgt 40 nsec. Diese Steuerung ist wichtig für die optoelektronische Auslese und für die Selektion von Ereignissen (Trigger).
Elektronen, die das MCP verlassen, werden weiter auf die Phosphorschicht (0,6 kV) beschleunigt.

Die vierte Stufe ist wieder ein elektrostatischer Bildverstärker, der das Bild von 25 mm auf die endgültigen 11 mm verkleinert. Es handelt sich um einen DEP XX1800C. Die Spannung für das Beschleunigungsfeld beträgt 15 kV. Diese Stufe erbringt eine Photonenverstärkung $\sim 6-7$.

Die Hochspannungsversorgungen für die Bildverstärker beinhaltet einige technische Schwierigkeiten. Aus Sicherheitsgründen ist die Photokathode des ersten Bildverstärkers und der Phosphorschirm des vierten Bildverstärkers auf Masse gelegt. An die Photokathode des zweiten Stufe wird ein Potential von 20 kV angelegt. Somit wird erreicht, daß zwischen dem ersten und zweiten Bildverstärker keine Potentialdifferenz entsteht. Dies ist notwendig, da das dünne Faseroptikfenster zwischen diesen Stufen nicht für hohe Potentialunterschiede ausgelegt ist, da es sonst zu Spannungsdurchbrüchen kommt. Um die Beschleunigungspannung der zweiten Stufe von 15 kV zu erreichen, mußte ein Potential von 35 kV an den Phosphorschirm gelegt werden. Bei der Verwendung der 35 kV müssen die Kabelenden sauber und kurz abisoliert werden und einwandfrei an die Anschlüsse der Bildverstärker angebracht werden, da es sonst zu Spannungsüberschlägen kommt. Die Gefahr, daß Kriechströme sowohl auf den Leitungen, als auch an den Verbindungsstellen auftreten, ist groß. Die Handhabung der 35 kV stellt ein nicht triviales Problem dar. Bei den Leitungen der Spannungsversorgung traten bei Luftfeuchtigkeit Leuchterscheinungen auf. Um diese Spannungen zu handhaben ist auf alle Fälle ein sorgfältiges Arbeiten unerläßlich.

Der Zwischenraum der zweiten und dritten Stufe ist auf Massepotential gelegt. Hiermit wird ein Spannungsdurchbruch zu den -200 V verhindert und somit das MCP vor Zerstörung geschützt.

Die Photokathode der vierten Stufe wird auf ein Potential von -15 kV gelegt. Dieses ist deshalb notwendig, um die richtige Beschleunigungsspannung zu erhalten, da der Phosphorschirm auf Masse liegt muß.

Tabelle 4.1: Fenstermaterialien nach [Fun93].

Material	Durchlässigkeitsbereich
MgF_2	von 110 nm bis zum Nahen Infrarot (NIR)
Quarz	von 165 nm bis zum NIR
Hartglas	von 300 nm bis zum NIR
Faseroptik	von 380 nm bis zum NIR

Tabelle 4.2: Photokathodentypen (auf Quarz) nach [Fun93].

Kathodenmaterial	Durchlässigkeitsbereich	Lichtempfindlichkeit
S25-Pk	von 165 nm bis 850 nm (Max. bei 460 nm)	350 μm/lm
S20-Pk	von 165 nm bis 750 nm (Max. bei 430 nm)	200 μm/lm
Bialkali-Pk	von 165 nm bis 550 nm (Max. bei 420 nm)	60 μm/lm
RbTe-Pk	165 nm bis 300 nm (Max. bei 220 nm)	

4.3.2 Photokathode

Die Empfindlichkeit der Photokathode ändert sich mit der Wellenlänge. Sie ist abhängig vom Photokathodenmaterial und dem Fenster, das auf die Photokathode aufgesetzt ist.

Gebräuchliche Fenster- und Photokathodenmaterialien sind in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 aufgeführt.

Bei der Wahl der Photokathoden spielen neben der spektralen Empfindlichkeit auch die Quantenausbeute und die Dunkelemission eine Rolle.

S25-Pk haben bei Raumtemperatur eine typische Dunkelemissionsrate von 1000 Elektronen/cm^2/sec, S20-Pk ca. 100 el/cm^2/sec und Bialkali-Pk ca. 10 el/cm^2/sec. RbTe-Pk liegen bei 3 el/cm^2/sec. Eine deutliche Senkung des Dunkelstromes wird bei einer Kühlung auf -20°C erreicht.

Die Nachweiseffizienz der Photonen der Fasertracker hängt wesentlich von der Quanteneffizienz der ersten Bildverstärkerstufe ab. Sie beträgt $\sim$25% bei 430 nm. Da die Szintillationsfasern der Tracker eine spektra-

Tabelle 4.3: Phosphormaterialien nach [Fun93].

Type	Lichtemission				Nachleuchtdauer	
	Bereich		Maximum	Farbe	Abfall	Abfall
	von	bis	bei		von 90% auf 10% innerhalb	von 10% auf 1% innerhalb
P20	470 nm	725 nm	517 nm	gelb-grün	4 ms	55 ms
P20AF	470 nm	725 nm	518 nm	blau-grün	14 ms	185 ms
P11	380 nm	570 nm	452 nm	blau	3 ms	37 ms
P43	370 nm	680 nm	544 nm	grün	1 ms	1,6 ms
P46	470 nm	670 nm	513 nm	gelb-grün	0,3 μm	90 μm
P47	360 nm	600 nm	434 nm	blau	55 ns	2,9 μs

le Verteilung mit einem Maximum bei 410 nm haben, mußte die erste Photokathode diesem angepaßt werden. Eine möglichst hohe Quanteneffizienz ist notwendig, da nur wenige Photonen in einer Szintillationsfaser erzeugt werden. Die Quanteneffizienz der zweiten Stufe beträgt ungefähr 14% bei 480 nm. Die der dritten und vierten Stufe ungefähr 11% bei 530 nm.

4.3.3 Phosphorschirm

Bei der Auswahl der Leuchtschirme sind drei Kriterien wichtig:

1. Spektraler Emissionsbereich
2. Effizienz
3. Nachleuchtdauer

Daten der verschiedenen Phosphorschirme sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Die Effizienz hängt auch vom Aufbau der Leuchtschirme ab, z.B. von der Korngröße, der Schichtdicke, der Aluminiumreflexschicht, sowie von den Fertigungsschritten, z.B. Temperatur- und Ausheizprozessen oder Vergiftungen durch Alkalien.

Wichtig für einen triggerbaren Betrieb der Kette ist die Auswahl der Phosphorschirme. Bei Verwendung von P46-Schirmen (schneller Phosphor) ergibt sich ein Problem: Die Lichtmenge, die noch im Triggerzeitraum aufgenommen wird, ist sehr gering, da der Hauptanteil der Intensität außerhalb liegt. Um diesen Anteil zu erhöhen mußte das

Abklingen der Intensität verlangsamt werden. Dies wird durch einen P11-Phosphor, der eine langsame Abklingzeit aufweist, erreicht. Die erste Bildverstärkerstufe ist mit diesem langsamen P11-Phosphor, dessen Abklingzeit 50 μs beträgt, bis die Intensität auf 50 % abgesunken ist, ausgestattet. Die anderen sind mit mit einem schnellen P46-Phosphor, der eine schnelle Triggerung von 500 ns erlaubt, ausgerüstet. Bei einer Triggerzeit von 20 μs wurde eine Lichtmenge von 36 % am Eingang des MCP gemessen. Dieses ist ausreichend für Auslese mit einer CCD.

5. Steuerung der Bildverstärkerketten

Bei den Bildverstärkerketten ist eine große Anzahl von Kanälen zu setzen und zu überwachen. Jede Kette besitzt 7 Kanäle, so daß bei 58 entstehenden Ketten 406 Kanäle zu setzen und zu kontrollieren wären. Da aber einige Kanäle zusammengefaßt sind ergeben sich nur 198 Kanäle. Die benötigten Hochspannungen werden durch C.A.E.N.-Crates zur Verfügung gestellt. Die Spannungen sind nach einer bestimmten Reihenfolge hochzufahren, die sich nach dem Aufbau der Bildverstärkerkette richtet. Es wird beim letzten Kanal (-15 kV-Versorgung) des vierten Bildverstärkers begonnen. Nacheinander werden alle davorliegenden Kanäle hochgefahren. Das Herunterfahren der Hochspannungen geschieht in entgegengesetzter Reihenfolge. Durch diese Reihenfolge ist sichergestellt, daß eventuell auftretende Probleme rechtzeitig erkannt werden, da das entstehende Bild durch die CCD aufgenommen wird und über den Bildschirm beobachtet werden kann. Diese Probleme könnten z.B. die Spannungslosigkeit eines Kanales sein. Hierbei würde beim weiteren Hochfahren der anderen Kanäle kein Bild auf dem Monitor zu erkennen sein. Da jeder Kanal einzeln eingeschaltet werden muß, bestand die Aufgabe darin, ein Programm zu erstellen, das das Hoch- und Herunterfahren, das Setzen von Parametern und die Statusabfrage übernimmt. Die Kontrolle der Strom- und Spannungswerte ist eigentlich eine Aufgabe des "Slow-Control"-Systems [Bon93]. Da es aber zum Testen und Überwachen für die Optoelektronikgruppe erforderlich ist, den Status abfragen zu können, wurde neben dem Setzen auch die Kontrolle der Kanäle in das Steuerprogramm implementiert. Diese Kontrolle ist keine permanente Überwachung, sondern nur eine gelegentliche Abfrage des Status. Sie beschränkt sich aber nicht nur auf das Auslesen der Strom- und Spannungswerte, wie beim Slow-Control-System, sondern es werden alle einstellbaren Parameter abgefragt.

5.1 Hardwarevoraussetzungen

Zum Betreiben der Bildverstärker wird das C.A.E.N. Hochspannungssystem SY 127 verwendet. Ingesamt sechs Hochspannungscrates, die mit maximal je 40 Ausgangskanälen bestückt werden können, sind eingesetzt. Die Ansteuerung erfolgt über eine CPU, die sich in einem VME-Crate befindet. Als Betriebssystem wird OS-9 verwendet. Über ein C.A.E.N. A200 VME Interface findet die Kommunikation mit dem HV-Crate statt. Da die Programmierung systemnah erfolgt, bot sich die Programmiersprache C an. Es wurde der GNU-C++ Compiler auf dem OS-9 System verwendet.

Die HV-Crates bieten die Möglichkeit, verschiedene HV-Module zu betreiben. Da unterschiedliche Spannungen und Ströme für die einzelnen Bildverstärkerkanäle benötigt werden, sind die HV-Crates mit 8 verschiedenen Modultypen bestückt:

Typ	U_{max}	I_{max}	Kanalanzahl	Auflösung
A329	15 kV	1 mA	2	4 V; 1 μA
A332	6 kV	1 mA	4	2 V; 1 μA
A333	4/3 kV	2/3 mA	4	1 V; 1 μA
A431	8 kV	200 μA	4	2 V; 0,1 μA
A432	6 kV	200 μA	4	2 V; 0,1 μA
A434	2 kV	200 μA	4	0,5 V; 0,1 μA
A435	200 V	200 μA	4	0,1 V; 0,1 μA
A230	Spezial I/O Modul			

Das A230-Modul ist ein spezielles I/O-Modul, das ein externes 35 kV HV-Gerät anspricht. Hiermit ist die Möglichkeit gegeben, externe Geräte vom C.A.E.N. HV-Crate aus zu betreiben. Die anderen Module sind Einschübe für das HV-Crate und können ohne weiteren Aufwand betrieben werden.

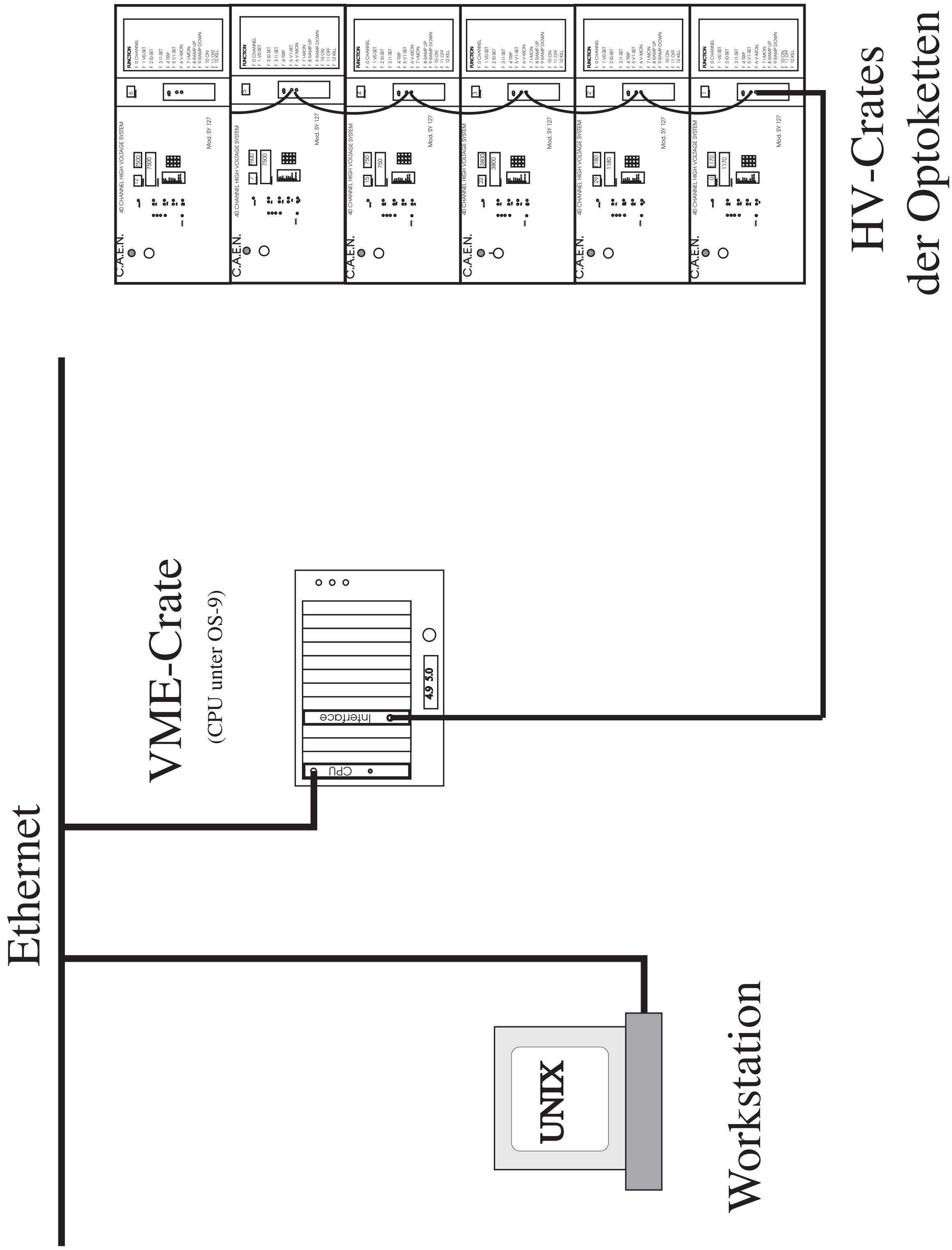

Abbildung 5.1: Systemaufbau zur Ansteuerung der Bildverstärker.

5.2 Ansteuerung

Das Ansprechen der einzelnen Kanäle der Crates, d.h. die Schreib- und Leseoperationen, erfolgen über mehrere Schritte.

Das Setzen der Parameter geschieht über 4 Schritte:

1. Auswählen des Ziels (select target).
2. Lesen des Fehlerbits (read error flag).
3. Schreiben der Daten (write data).
4. Lesen des Fehlerbits (read error flag).

Beim Auswählen des Zieles werden das entsprechende Crate und der entsprechende Kanal selektiert. Durch Lesen des Fehlerbits wird die korrekte Ausführung des ersten Schrittes überprüft. Nach erfolgreichem Selektieren des Zieles können Daten in den entsprechenden Adreßbereich des Crates geschrieben werden.
Das Schreiben von Daten gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt werden die gewünschten Daten in den entsprechenden Adreßbereich geschrieben. Im zweiten wird in einem anderen Adreßbereich angegeben, um welche Daten es sich handelt, d.h. z.B. Daten für die Ramp-Up-Rate oder den Wert der maximalen Spannung (V0). Hiermit sind die zu schreibenden Daten eindeutig zugeordnet. Die erfolgreiche Durchführung wird durch Abfragen des Fehlerbits überprüft.
Durch das Lesen des Fehlerbits wird sichergestellt, daß die vorherige Operation korrekt ausgeführt worden ist. Ist dies nicht der Fall, muß sie wiederholt werden. Das Steuerprogramm ist so konzipiert, daß nach einer bestimmten Anzahl von Fehlversuchen eine Fehlermeldung ausgegeben wird. Das Programm wird daraufhin abgebrochen.

Das Lesen der Werte erfolgt ebenfalls über 4 Schritte:

1. Auswählen des Ziels (select target).
2. Lesen des Fehlerbits (read error flag).
3. Starten der Auslese (start readout).

4. Auslesen der Werte (read value).

Als erstes muß wieder das Ziel selektiert und durch Lesen des Fehlerbits deren korrekte Durchführung überprüft werden. Das Auslesen der Daten gliedert sich in zwei Schritte. Es wird mit "Starten der Auslese" begonnen. Hierbei wird der auszulesende Parameter angegeben, z.B. der gemessene Strom- oder Spannungswert oder die eingestellte Ramp-Up-Rate. Nach dem Auswählen können die Daten aus dem entsprechenden Adreßbereich ausgelesen werden. Die korrekte Durchführung dieser Operation wird wiederum durch Abfragen des Fehlerbits überprüft.

Bei diesen Operationen werden Daten aus bestimmten Adreßbereichen des Systems gelesen bzw. hineingeschrieben. Dies sind 16-Bit Daten, aus denen wiederum die entsprechenden Informationen selektiert und zugeordnet werden müssen. Beim Schreibvorgang wird ebenfalls ein 16-Bit Wort in den Adreßbereich geschrieben.

Die gelesenen oder zu schreibenden Daten entsprechen noch nicht den realen Spannungs- oder Stromwerten. Um die richtigen Werte zu erhalten, werden noch zwei Multiplikationsfaktoren benötigt. Durch das Auflösungsvermögen der Module sind die Multiplikationsfaktoren gegeben. Hierzu wird im Crate das entsprechende Modul ausgelesen und vom Programm dem Modultyp zugeordnet. Ist der Multiplikationsfaktor bestimmt, werden die Daten entsprechend multipliziert.

Das Ein- und Ausschalten der HV geschieht nicht schlagartig, sondern mit einer eingestellten Rampencharakteristik. Dieses Hoch- und Herunterfahren der Spannung geschieht für jeden Kanal nacheinander. Ist ein Kanal der Bildverstärkerkette angeschaltet, wird der Ramp-Up-Status überprüft. Solange diese Ramp-Up-Phase nicht abgeschlossen ist, wird mit dem Anschalten des folgenden Kanales gewartet. So wird mit allen weiteren Kanälen verfahren.
Das Herunterfahren der Kanäle geschieht in analoger Weise, wobei ebenfalls der Ramp-Status überprüft wird.

5.3 Aufbau des Programmes

Das Steuerprogramm für die HV wurde so aufgebaut, daß verschiedene Funktionen ausgeführt werden können:

1. Hoch- und Herunterfahren der HV.
2. Setzen der Parameter für jeden Kanal.
3. Statusanzeige.

Diese Funktionen sollen auf möglichst einfache Weise ausführbar sein. Es wurde ein Programm erstellt, das über Menüs die gewünschten Funktionen aufrufen kann. Durch Wechseln in ein entsprechendes Untermenü kann die gewünschte Funktion ausgeführt werden.

5.4 Steuerprogramm

Die Bedienung des Steuerprogrammes für die Bildverstärkerketten erfolgt auf einfache Weise. Beim Start wird ein Menü zur Verfügung gestellt:

- 0: exit
- 1: Switch ON menu
- 2: Switch OFF menu
- 3: Show status menu
- 4: Initialisation menu
- 5: By hand menu

Das gewünschte Untermenü wird durch Eingabe der entsprechenden Nummer aufgerufen. Durch eine anschließende Abfrage wird sichergestellt, daß Funktionen nicht versehentlich ausgeführt werden. Wird die Sicherheitsabfrage positiv beantwortet, erscheinen die Funktionen des gewählten Untermenüs.

Das **switch ON submenu** besteht aus 8 Funktionen[1]:

- 0: return to main menu
- 1: switch ON HG1
- 2: switch ON HD1
- 3: switch ON HD2
- 4: switch ON HD3
- 5: switch ON BD1
- 6: switch ON BD2
- 7: switch ON all chains

Es können einzelne Gruppen oder alle Kanäle hochgefahren werden. Man verfährt nach der beschriebenen Überprüfung des Ramp-Status. Während der Ramp-Phase wird das Überprüfen durch "waiting" angezeigt. Anschließend werden die entsprechende Crate- und Kanalnummer mit dem logischen Namen und dem entsprechenden Status angezeigt. Bei der Anzeige des Status wird dieser ausgelesen und damit überprüft, ob der Status nach dem Anschalten tatsächlich "ON" oder "OFF" ist. Dieses kann für den Fall wichtig sein, daß das Crate "disabled" ist, da dann der Status "OFF" erscheint. Es kann aber auch ein anderer Fehler vorliegen, der dann in dieser Phase erkannt werden kann.

Das **switch OFF submenu** ist ähnlich aufgebaut und wird analog bedient.

[1]Die Bezeichnungen HG1, HD1, HD2 usw. sind Abkürzungen für verschiedene Gruppen von Bildverstärkern. Die Bezeichnungen wurden von den Positionen der Gruppen abgleitet.
HG - haut gauche : oben links
HD - haut droite : oben rechts
BD - bas droite : unten rechts
Die Zahlen numerieren die Gruppen entsprechend durch.

Das **show status submenu** stellt 9 Funktionen zur Verfügung:

- 0: return to main menu
- 1: show parameter HG1
- 2: show parameter HD1
- 3: show parameter HG2
- 4: show parameter HG3
- 5: show parameter BD1
- 6: show parameter BD2
- 7: show parameter 35 kV
- 8: show parameter All

Hiermit können alle wichtigen Informationen abgefragt werden. Die 35 kV Versorgung wurde als gesonderte Abfrage aufgestellt, da es notwendig sein kann, einen schnellen Überblick zu erhalten.

Die Ausgabe erfolgt in Tabellenform:

name	crate	chan	VMON	IMON	V0	I0	RUP	RDW	TRIP	STATUS
DEPHG1	5	29	-14992.0	0.0	-15000	-20	-500	-500	20	ON
MCP111	5	0	749.5	11.7	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP211	5	1	749.5	11.8	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP311	5	2	749.5	9.4	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP121	5	3	749.5	11.8	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP321	5	4	749.5	9.6	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP223	5	5	749.5	12.4	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP113	5	6	749.0	10.8	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP313	5	7	749.0	15.1	750.0	20.0	250	250	20	ON
MCP213	5	20	749.0	10.1	750.0	20.0	250	250	20	ON
SCRHG1	5	20	4490.0	2.1	4500.0	20.0	500	500	20	ON
F111	1	0	1170.0	2.0	1170.0	20.0	500	500	20	ON
F211	1	1	1070.0	0.0	1070.0	20.0	500	500	20	ON
F311	1	2	1250.0	0.0	1250.0	20.0	500	500	20	ON
F121	1	3	1190.0	0.0	1190.0	20.0	500	500	20	ON
F321	1	4	1229.0	2.0	1230.0	20.0	500	500	20	ON
F223	1	5	1180.0	0.0	1180.0	20.0	500	500	20	ON
F113	1	6	1210.0	0.0	1210.0	20.0	500	500	20	ON
F212	1	7	1230.0	2.0	1230.0	20.0	500	500	20	ON
F313	1	8	1190.0	0.0	1190.0	20.0	500	500	20	ON
G1HG1	3	24	109.7	0.0	110.0	20.0	500	500	20	ON
GETTHG1	3	32	2496.0	0.0	2500.0	20.0	500	500	20	ON
Z111	3	0	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z211	3	1	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z311	3	2	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z121	3	3	3790.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z321	3	4	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z121	3	5	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z113	3	6	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z313	3	7	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
Z213	3	8	3788.0	0.0	3800.0	20.0	500	500	20	ON
35HG1	1	28	35000	102.1	35000	125.0	42.7	1709.4	20	ON

Die Ausgabe gibt einen Überblick aller Werte der entsprechenden Gruppe. VMON und IMON sind die gemessenen Spannungs- und Stromwerte. Die anderen Werte sind die momentanen Parametereinstellungen.

Das **initialisation submenu** stellt zwei Funktionen zur Verfügung:

- 0: return to main menu
- 1: initialisation

Mit diesem Menü werden die Parameter für alle Kanäle gesetzt. Dieses kann erforderlich werden, wenn z.B. Änderungen der Parameter vorgenommen wurden oder das HV-Crate seine Werte durch einen Systemausfall verloren hat. So können sämtliche Parameter schnell und sicher wieder gesetzt werden.

Mit dem **by hand submenu** ist man in der Lage, einzelne Kanäle gesondert zu bearbeiten, sei es das Hoch- oder Herunterfahren, das Anzeigen des Status oder das Verändern der Parameter für einzelne Kanäle. Dies kann beim Austesten einzelner Bildverstärker vorteilhaft sein.
Das Untermenü stellt 5 Funktionen zu Verfügung:

- 0: return to main menu
- 1; switch ON one channel
- 2: switch OFF one channel
- 3: change parameter of one channel
- 4: show status of one channel

5.5 Konfigurationsdatei

Jeder Kanal benötigt mehrere Parameterdaten. Da sich während des Betriebes Kanalzuordnungen oder Einstellungsparameter ändern können, wurden Konfigurationsdateien angelegt. Diese erleichtern das

Ändern von Einstellungen, da sie nicht im Programm selbst vorgenommen werden müssen, sondern nur in der Konfigurationsdatei. Bei Veränderungen braucht das Programm daher nicht neu kompiliert zu zuwerden. Eine einfache und übersichtliche Handhabung ist gewährleistet.

Die Konfigurationsdatei enthält alle Einstellungsparameter für jeden einzelnen Kanal der Bildverstärkerketten.

Diese sind:

- Logischer Kanalname
- Cratenummer
- Kanalnummer
- Maximale Spannung
- Maximaler Strom
- Ramp-Up-Rate
- Rump-Down-Rate
- Trip-Rate

Der Kopf der Konfigurationsdatei enthält Informationen über das Entstehungsdatum und einen Tabellenkopf für die Konfigurationsparameter. Da ingesamt 6 Gruppen von Bildverstärkerketten zusammengefaßt sind, ist für jede Gruppe eine gesonderte Konfigurationsdatei angelegt. Dies verbessert die Überschaubarkeit der einzelnen Daten. Alle Operationen, wie das Hoch- und Herunterfahren, das Konfigurieren und die Statusabfrage, erfolgen über das vorherige Auslesen dieser Dateien.

5.6 Semaphore

Da das Ansprechen der HV-Crates über ein Interface geschieht, wurde zur Verhinderung von zwei oder mehreren gleichzeitigen Zugriffen auf dieses Interface ein Semaphore gesetzt. Hiermit werden Fehlsetzungen oder sogar Systemabstürze vermieden. Beim Semaphore handelt es sich um eine Systemvariable, die beim Ausführen einer Unterfunktion des Steuerprogrammes von diesem gesetzt wird. Solange diese Systemvariable gesetzt ist, kann nur das Programm Funktionen ausführen, das das Semaphore gesetzt hat. Da das Interface auch vom Slow-Control-System benutzt wird, ist mit ihr die Verwendung des Semaphore vereinbart. Beim Beenden jeder Funktion oder beim Abbruch des Programmes durch einen programmierten Fehlerausstieg wird dieses Bit wieder zurückgesetzt. Es wurde vermieden, das Semaphore schon beim Programmstart zu aktivieren, da es dann passieren kann, daß das Programm aufgerufen wird und für längere Zeit keine Funktion ausführt. Somit ist für die Slow Control ein kurzzeitiges Auslesen der Crates möglich. Da bei deren Auslesen das Semaphore immer nur kurzzeitig gesetzt ist, besteht für die Optoelektronik immer die Möglichkeit der Ausführung des Steuerprogrammes.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben:

Meinen Eltern für die stete Unterstützung während meines ganzen Studiums.

Herrn Prof. Dr. D. Frekers für die Betreuung meiner Diplomarbeit und für die Ermöglichung der Aufenthalte am CERN.

Matthias Hartig für seine stete Diskussionsbereitschaft und Geduld.

Dirk Bonekämper, Martin Geldermann und Rüdiger Weiß für die kollegiale Zusammenarbeit.

Helmut Baumeister für die wertvollen Tips und die tatkräfte Hilfe während der gesamten Zeit.

Maike Kottig und Arthur Kuschneruk für deren tatkräftigen Hilfe während der Produktionszeit der Flapper.

Dem Leiter der Mechanik-Werkstatt Herrn N. Bücker sowie den Mitarbeitern A. Brömmelhaus, M. Drüge, K. Hegemann, R. Ulber und K. Winkler für die prompten Erledigungen der mechanischen Anfertigungen.

Norbert Heine für die Hilfe bei der Anfertigung von Bildern.

Den Kollegen der Kaffeerunde Wolfgang Grundschöttel, Werner Hassenmaier, Hans-Werner Ortjohann, Ferdinand Paetsch und Wolfgang Verhoeven.

Den Kollegen der CHORUS-Collaboration, besonders denen der Optoelektronikgruppe.
Hier möchte ich mich namentlich bedanken bei Jean-Paul Fabre, Magali Gruwé, Gustaaf Brooijmans, Peter Lendermann, Reena Meijer Drees, Chantal Mommaert, Pierre Vilain, Gaston Wilquet und Henry Wong.

Herrn H. von Heynitz und dem Leiter der Elektro-Werkstatt Herrn W. Gerdes sowie M. Balgenort, B. Beinert, H. Essing, K. J. Schulte.

Detlef Stolze für den Korrektureifer, den er beim Durchsichten meiner Arbeit aufgebracht hat.

Karsten Steffens für sein Interesse und seine Korrekturhinweise.

Meiner Schwester Heike Rondeshagen für ihre Korrekturen in der An-

fangsphase.

Sowie bei M. Latt, U. Mayer und A. Wagstaff.

Hiermit versichere ich, daß ich diese Arbeit selber verfaßt und keine weiteren Hilfmittel außer den hier angegebenen verwendet habe.

Münster, Januar 1994

Literaturverzeichnis

[Aba91] A. Abazov, Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 3332

[Ans92] P. Anselmann, Phys. Rev. Lett. **285** (1992) 376

[Bon93] D. Bonekämper, *Ein Slow-Control-System für das CHORUS-Experiment*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Münster, 1993

[Dav68] L. Davis, D. Harmer, und K. Hoffmann, Phys. Rev. Lett. **20** (1968) 1205

[Dav84] L. Davis, B. Cleveland, und J. Rowley, Herausg., *Conf. on the Interaction between Particle and Nuclear Physics*, Steamboat Springs, 23.-30. Mai 1984

[Fun93] H. Funk, *Einführung in die Bildverstärkertechnik*, Proxitronic, 64625 Bensheim, Mai 1993

[Gel79] M. Gell-Mann, P. Ramond, und S. Slansky, *Supergravity*, North Holland, Amsterdam, 1979

[Hir90] K. Hirata, Phys. Rev. Lett. **65** (1990) 1301

[Ste80] B. Stech, *Unification of Fundamental Particle Interaction*, Plenium Press, N.Y., 1980

[Wol81] C. Wolfenstein, Phys. Lett. B **107** (1981) 77

[Yan79] T. Yanagida, Herausg., *Workshop Unified Theory and the Baryon Number of the Universe, KEK*, 1979