

Entwicklung und Test
von Überwachungs- und Steuerungseinheiten
sowie Bestimmung von Betriebsparametern
des OPERA Precision Trackers

Diplomarbeit

vorgelegt von
Christoph Göllnitz



Institut für Experimentalphysik
der Universität Hamburg

Juni 2006

**Development and Test
of Monitoring and Control Devices
and Determination of Operational Parameters
of the OPERA Precision Tracker**

abstract

The present thesis was composed during the course of the OPERA experiment. The OPERA experiment was established to verify $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -oscillations with direct detection of taus in an appearance experiment for the first time. The Precision Tracker, an essential part of the myon spectrometer in the OPERA detector, has been developed and built in Hamburg. The Precision Tracker consists of about 10.000 drift tubes, that facilitates a track reconstruction of charged particles.

This thesis deals with parameters, which are necessary for the optimization and the operation of the drift tubes. A part of the so called *Slow Control* is described, with a focus on the control of the discriminator thresholds and a system for monitoring the temperature. Finally the influence of the deviation of the concentrical position of the signal wires inside the tubes to the efficiency and the resolution is determined (bending measurements).

**Entwicklung und Test
von Überwachungs- und Steuerungseinheiten
sowie Bestimmung von Betriebsparametern
des OPERA Precision Trackers**

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des OPERA-Experimentes verfasst. Bei OPERA sollen zum ersten Mal $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen durch direkte Detektion der entstehenden Tauonen in einem Appearance-Experiment nachgewiesen werden. In Hamburg wird für den OPERA-Detektor der Precision Tracker, ein wesentlicher Teil des Myonspektrometers, entwickelt und gebaut. Dieser Precision Tracker besteht aus etwa 10.000 Driftröhren, die eine Spurrekonstruktion geladener Teilchen ermöglichen.

Diese Arbeit behandelt Parameter, die zum Betrieb und zur Optimierung der Driftröhren erforderlich sind. Sie beschreibt einen Teil der sogenannten *Slow Control*, insbesondere die Steuerung der Diskriminatorschwellen sowie den Aufbau eines Systems zur Temperaturüberwachung. Abschließend wird der Einfluss der Abweichung der Signaldrähte aus der Mittelposition innerhalb der Driftröhren auf die Nachweiswahrscheinlichkeit und die Auflösung untersucht (Durchbiegungsmessungen).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Inhalt	3
2 Das OPERA-Experiment	5
2.1 Physikalische Motivation	5
2.2 Der CNGS-Neutrinostrahl	10
2.3 Der OPERA-Detektor	12
2.3.1 Das Target	12
2.3.2 Der Target Tracker	14
2.3.3 Myonspektrometer	15
2.4 Der Precision Tracker	17
2.4.1 Funktionsweise von Driftkammern	17
2.4.2 Geometrie des Precision Trackers	19
2.5 Tau-Nachweis	21
3 Diskriminatorschwellen	25
3.1 PT Slow Control	25
3.1.1 Gassystem	27
3.1.2 Hochspannung	27
3.1.3 Betriebsspannung	27
3.2 Opera Support Board OSUB	28
3.2.1 Programmierung und CAN-Netz	28
3.2.2 Steuern der Diskriminatorschwellen	30
3.2.3 Generieren der Testpulse	30
3.3 Minimierung des Hintergrundrauschens	31
4 Temperaturkontrolle an den Driftröhren	33
4.1 Einfluss der Temperatur auf die Driftröhren	33
4.2 Elektronische Temperaturmessung	34
4.3 Messungen per OSUB	35
4.4 Dreileitermessungen	37
4.4.1 Temperaturmessungen bei der Massenproduktion	38
4.4.2 Temperaturmessungen am Gran Sasso	41
5 Messungen am Teststand	43
5.1 Der große Teststand	43
5.1.1 Aufbau	44

5.1.2	Parameter des Teststands	45
5.1.3	Variation der Diskriminatorschwellen	47
5.1.4	Variation der Hochspannung am Draht	48
5.1.5	Variation der Betriebsspannung	49
5.2	Durchbiegungsmessungen	54
5.2.1	Aufbau	54
5.2.2	Messungen mit Driftröhren unterschiedlicher Durchbiegung. . .	56
6	Zusammenfassung	59
A	Abkürzungsverzeichnis	61
B	Liste der verwendeten Geräte	63
B.1	Großer Teststand	63
B.2	Temperaturkontrollsystem	64
C	Programmquelltexte	65
C.1	Programmstart beim OSUB	65
C.2	CAN-Verbindung herstellen	66
C.3	CAN-Nachricht senden	67
C.4	CAN-Nachricht empfangen	69
C.5	Programmstart vom Trigger Board	70
C.6	OTB Testpulse, TDC Status	71
C.7	OTB Reset	72
D	Berechnung Drahtdurchhang	73
	Literaturverzeichnis	74
	Danksagung	79

Abbildungsverzeichnis

1.1	Neutrinostrahl vom CERN zum Gran Sasso	2
2.1	Energiespektrum des Elektrons	6
2.2	Oszillationskurve von OPERA	9
2.3	CNGS-Beschleunigeranlage	10
2.4	Aufbau des OPERA-Detektors	12
2.5	Aufbau eines Bleibricks	13
2.6	Target Tracker	14
2.7	Aufbau eines Supermoduls	15
2.8	Schematischer Aufbau der Magnetspulen	15
2.9	Teilchenspur in einer Driftröhre	17
2.10	Geometrie der Driftröhrenmodule	19
2.11	Event in einem Driftröhrenmodul	19
2.12	Aufbau des Spektrometers	20
2.13	Zerfall des τ im Blei	22
3.1	Kombination von Hardware, SPS und Benutzeroberfläche	26
3.2	Struktur einer CAN-Nachricht	28
3.3	Aufbau eines CAN-Netzwerks	29
3.4	Diskriminatorschwelle	30
3.5	Multiplizität in Abhängigkeit von der Diskriminatorschwelle	31
4.1	Moduldurchbiegung durch Temperaturgradienten	34
4.2	Schaltplan der Temperaturmessung per OSUB	36
4.3	Kennlinie KTY81-110	37
4.4	Temperaturverlauf am Gran Sasso, Messung mit KTY81-110-Sensoren	38
4.5	Temperaturverlauf bei der Massenproduktion	39
4.6	Sensorkalibrierung	39
4.7	Temperaturverlauf am Gran Sasso, Messung mit Pt100-Sensoren 1	40
4.8	Temperaturverlauf am Gran Sasso, Messung mit Pt100-Sensoren 2	40
5.1	Elektronik am großen Teststand	44
5.2	Teststand, Skizze	45
5.3	Driftzeitspektrum	46
5.4	Treffer pro Kanal	47
5.5	Koinzidenzschaltung der Szintillatoren	48
5.6	Event im großen Teststand	48
5.7	Multiplizität	49
5.8	Multiplizität in Abhängigkeit von der Schwellenspannung	50
5.9	Auflösung und Nachweiswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Hochspannungen am Draht	50

5.10	Nachweiswahrscheinlichkeit und Multiplizität bei verschiedenen Hochspannungen am Draht	51
5.11	Auflösung und Multiplizität bei verschiedenen Hochspannungen am Draht	51
5.12	Auflösung bei verschiedenen Hochspannungen am Draht für Betriebsspannung von 3,0 V und 3,5 V	52
5.13	Auflösung und Crosstalk bei verschiedenen Hochspannungen am Draht mit Betriebsspannung von 3,5 V.	52
5.14	Auflösung und Crosstalk bei verschiedenen Hochspannungen am Draht mit Betriebsspannung von 3,0 V.	53
5.15	Event mit Crosstalk, Vierer-Muster	53
5.16	Event mit Crosstalk, Zweier- und Dreier-Muster	54
5.17	Höheneinstellung am großen Teststand	54
5.18	Moduldurchbiegung, absolute Messwerte	55
5.19	Moduldurchbiegung, normiert	55
5.20	Ergebnisse Druchbiegungsmessungen, Szintillator bei 1,2 m mit 100 mV Diskriminatorschwelle	56
5.21	Ergebnisse Druchbiegungsmessungen, Szintillator bei 1,2 m mit 50 mV Diskriminatorschwelle	57
5.22	Ergebnisse Druchbiegungsmessungen, Szintillator bei 3,1 m mit 50 mV Diskriminatorschwelle	58
D.1	Berechnung des Drahtdurchhangs, Skizze Kräftegleichgewicht	73
D.2	Berechnung des Drahtdurchhangs, Skizze Durchhang	73

Kapitel 1

Einführung

Im LNGS¹-Untergrundlabor im Gran Sasso Bergmassiv in Italien befindet sich zur Zeit das OPERA²-Experiment im Aufbau.

Ein hochenergetischer, fast reiner Myon-Neutrinostrahl wird vom CERN³ in Genf in Richtung der Halle C (eine von drei unterirdischen Hallen) des Untergrundlabors bei Assergi in Italien ausgerichtet (Abbildung 1.1). Der OPERA-Detektor soll Tauneutrinos im Myonneutrinostrahl durch Wechselwirkung mit Bleitarget⁴ in Fotoemulsionen nachweisen. Damit werden zum ersten Mal Neutrinooszillationen in einem *Appearance*⁵-Experiment gezeigt.

Die OPERA-Arbeitsgruppe der Universität in Hamburg entwickelt für den Detektor einen Teil des Myonspektrometers, den Precision Tracker (PT). Dieser besteht aus knapp 10.000 etwa 8 m langen Driftröhren, mit denen die Myonenspuren nachgewiesen werden.

Driftröhren arbeiten mit einem Ionisationsgas und besitzen Anode und Kathode mit angelegter Hochspannung. Durchfliegende geladene Teilchen ionisieren das Gas, entstehende Elektronen driften zum Draht und liefern ein Signal. Anhand der Driftzeiten kann der Ort des Teilchendurchgangs ermittelt werden. Mit Hilfe eines Magnetfeldes und einer bestimmten Positionierung der Driftröhren kann aus den Messungen des PT der Impuls und die Ladung der Myonen bestimmt werden.

In Hamburg werden zur Entwicklung und Optimierung Teststände betrieben. Es gibt einen Teststand mit kurzen Driftröhren (1 m) und einen mit Driftröhren aus der Massenproduktion (8 m), die ebenfalls in Hamburg erfolgt.

1.1 Motivation

Ziel des PT ist es, für die Impulsbestimmung eine ausreichende Spurauflösung zu erreichen, die durch viele Faktoren beeinflusst wird.

Dazu zählen unter anderem die Gasdichte des Kammergases, die Hochspannung am

¹Laboratori Nazionali del Gran Sasso

²Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus

³CERN ist die offizielle Abkürzung des Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire, einem Forschungsinstitut für Teilchenphysik in der Schweiz.

⁴target, engl. für: Zielscheibe; die Materie, die dem energiereichen Teilchenstrahl ausgesetzt wird, um bestimmte Reaktionen auszulösen.

⁵bisher wurden in sogenannten *Disappearance*-Experimenten durch das Defizit einzelner Neutrinoarten Oszillationen nachgewiesen.

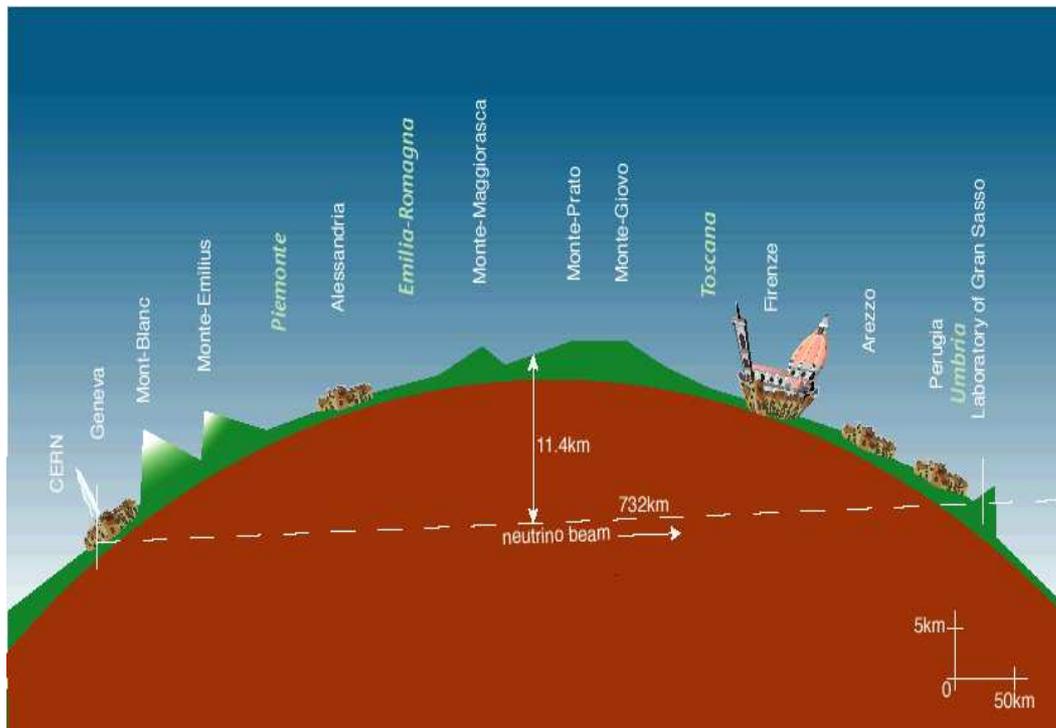


Abbildung 1.1: Der Neutrinostrahl vom CERN zum Gran Sasso überwindet eine Distanz von 732 km (Quelle: CERN CNCS). Diese Grafik ist nicht maßstabsgetreu.

Draht, Betriebsspannung der Elektronik sowie die Drahtpositionen in den Driftröhren. Zur Funktion des Detektors ist es außerdem notwendig, nur Signale auszuwerten, die durch bekannte Reaktionen hervorgerufen werden. Diese Rauschunterdrückung wird durch Verwendung einer Diskriminatorschwelle (oft Threshold genannt) erreicht. Nur Signale oberhalb der Schwelle werden übertragen. Diese Schwelle wird durch das OPERA Support Board (OSUB) gesteuert, welches Teil der sogenannten *Slow Control* für den PT ist. Die *Slow Control*⁶ umfasst die Steuerung, Regelung und Überwachung der Detektorcomponenten.

Zur Bestimmung der Teilchenspuren muss außerdem die genaue Position der Driftröhren bekannt sein. Dabei ist die Position des Drahtes von entscheidender Bedeutung. Dieser ist fest an den Enden eingespannt. Sind jedoch die Röhren gegen den Draht verbogen, ändert sich das elektrische Feld innerhalb der Röhre. Eine Verschlechterung der Funktionalität kann nicht ausgeschlossen werden. Durchbiegungen können im wesentlichen durch thermische Schwankungen oder Zwangskräfte innerhalb der Konstruktion hervorgerufen werden. Messungen der Positionen der ersten installierten Driftröhrenmodule am Gran Sasso haben gezeigt, dass die Durchbiegungen stärker sind als zunächst angenommen.

Diese Arbeit beschreibt Parameter, die für den Betrieb und die Optimierung der Auflösung und Nachweiswahrscheinlichkeit des PT notwendig sind. Die Rauschunterdrückung durch Steuern von Schwellenspannungen sowie der Aufbau eines Temperaturkontrollsystems als Teil der *Slow Control* werden aufgezeigt. Außerdem wird die

⁶Der Begriff *Slow Control* ist üblich, da die Steuerung, Regelung und Überwachung der Detektorcomponenten relativ zur Datennahme langsam erfolgt.

Änderung der Detektorqualität bezüglich Auflösung und Nachweiswahrscheinlichkeit durch Messungen mit Driftröhren unterschiedlicher Abweichungen des Signaldrahts aus der Röhrenmitte untersucht.

1.2 Inhalt

Kapitel 2 gibt zunächst eine Übersicht über das gesamte OPERA-Experiment. Die physikalische Motivation und der Aufbau des OPERA-Detektors am Gran Sasso mit den einzelnen Detektorkomponenten sowie der Nachweis der Tauonen werden erläutert. Speziell der Precision Tracker und die allgemeine Funktionsweise von Driftkammern werden erklärt.

In Kapitel 3 wird die Konzeption der *Slow Control* vorgestellt, insbesondere die Funktionen des OPERA Support Boards OSUB. Die Programmierung für das OSUB ist Teil dieser Arbeit. Dessen wichtige Funktion des Steuerns der Diskriminatorschwellen wird durch Messungen untermauert.

Kapitel 4 zeigt den Aufbau eines Temperaturkontrollsystems mit Widerstandssensoren sowie Überlegungen zum Temperatureinfluss auf den Detektor. Temperaturgradienten innerhalb der Driftröhrengometrie und andere Zwangskräfte in der Konstruktion können zu Verbiegungen der Driftröhren führen.

Messungen mit Driftröhren unterschiedlicher Durchbiegung beinhaltet Kapitel 5. Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung werden in Abhängigkeit der Röhrendurchbiegungen bestimmt.

Abschließend gibt Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Kapitel 2

Das OPERA–Experiment

Dieses Kapitel stellt das gesamte OPERA–Experiment mit der physikalischen Motivation und dem experimentellen Aufbau vor. Mit OPERA sollen Neutrinooszillationen zum ersten Mal in einem sogenannten Appearance–Experiment nachgewiesen werden. Dabei wird die Umwandlung von Myonneutrinos in Tauoneutrinos gezeigt. Dafür werden ein möglichst reiner Myonneutrinostrahl und die Möglichkeit, nach einer bestimmten Strecke Tauonen nachzuweisen, benötigt. Als Neutrinostrahl dient der in Abschnitt 2.2 vorgestellte CNGS¹–Strahl. Der Nachweis der Tauonen erfolgt mit dem 732 km entfernten² OPERA–Detektor (Abschnitt 2.3). Ein Teil davon ist der Precision Tracker (PT), der in Hamburg entwickelt und gebaut wird. Dieser ist aus insgesamt etwa 10.000 Driftröhren aufgebaut. Die Funktionsweise von Driftröhren und speziell der Aufbau des PT behandelt Abschnitt 2.4. Wie die Tauonen im OPERA–Detektor nachgewiesen werden erklärt Abschnitt 2.5. Zunächst wird die physikalische Motivation erläutert (Abschnitt 2.1) beginnend mit einem historischen Abriss der Entdeckung des Neutrinos.

2.1 Physikalische Motivation

Wolfgang Pauli postulierte 1930 erstmals die Existenz des Neutrinos. Dadurch konnte das Energiespektrum beim β –Zerfall

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.1)$$

erklärt werden [Pau61]. Messungen zeigten ein kontinuierliches Energiespektrum des Elektrons (Abbildung 2.1). In einem reinen Zwei–Körper–Zerfall $(Z, A) \rightarrow (Z + 1, A) + e^-$ wäre dies monoenergetisch. Ein drittes ungeladenes Teilchen löste diesen Widerspruch. Der halbzahlige Spin des Neutrinos garantiert außerdem die Drehimpulserhaltung in dieser Reaktion. Die Kerne haben vor und nach dem β –Zerfall beide halbzahligen Spin beziehungsweise beide ganzzahligen Spin. Neben dem e^\pm muss also noch ein weiteres Teilchen mit Spin $J = 1/2$ entstehen.

Der experimentelle Nachweis des Neutrinos gelang erst 1956 durch Clyde L. Cowan und Frederick Reines anhand des inversen β –Zerfalls

¹CERN Neutrinos to Gran Sasso

²Bei einer solchen Entfernung zwischen Erzeugung und Detektion eines Teilchens ($L \sim 1000$ km) spricht man von *Long–Baseline–Experimenten*, bei Entfernungen $L \sim 10$ km von *Medium–Baseline* und bei $L \sim 1$ km von *Short–Baseline*.

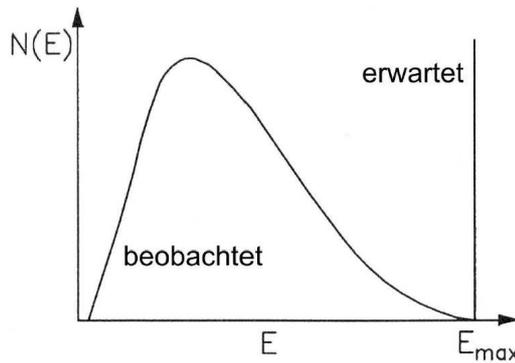


Abbildung 2.1: Energiepektrum $N(E)$ des Elektrons beim β -Zerfall. Gemessen wird ein kontinuierliches Spektrum. Im reinen Zwei-Körper-Zerfall erwartet man einen diskreten Wert.



an einem Kernreaktor [Rei56]. Die Teilchen wurden durch die Wechselwirkung mit Materie nachgewiesen.

Man unterscheidet Neutrinos aus künstlichen und natürlichen Quellen [Sch97]. Zu den Neutrinos aus künstlichen Quellen zählen Beschleuniger-Neutrinos, die bei Zerfällen von Pionen (π^\pm) und Kaonen (K^\pm) durch Wechselwirkung von beschleunigten Teilchen mit Materie entstehen, und Reaktor-Neutrinos, die beim β -Zerfall in Kernreaktoren erzeugt werden.

Bei den natürlichen Quellen handelt es sich hauptsächlich um atmosphärische Neutrinos, solare Neutrinos, Supernova-Neutrinos und kosmische Neutrinos. Kosmische Strahlung tritt mit Atomen der Erdatmosphäre in Wechselwirkung, so dass hochenergetische Luftschauer aus Pionen, Kaonen und anderen Teilchen entstehen. Atmosphärische Neutrinos bilden sich bei den darauf folgenden Zerfällen der Pionen und Kaonen. Bei Kernfusionsprozessen in der Sonne entstehen sogenannte solare Neutrinos hauptsächlich durch die Reaktion



Beim ersten Nachweis der Elektronenneutrinos durch Reines und Cowan wurden Reaktorneutrinos verwendet. Der Detektor bestand aus einem mit Kadmium-Chlorid in Wasserlösung ($CdCl_2 + H_2O$) gefüllten Tank zwischen Szintillationszählern mit Photomultipliern. Beim inversen β -Zerfall (Gleichung 2.2) entsteht ein Positron und ein Neutron. Das Positron annihiliert mit einem Elektron in zwei Photonen. Das Neutron wird durch Stöße abgebremst und schließlich von den Kadmium-Kernen eingefangen und angeregt. Diese senden dabei Photonen aus und gehen in den Grundzustand über. Das Signal der Neutronen kommt allerdings durch das Abbremsen um einige μs zeitversetzt an.

Das Myonneutrino wurde 1962 von L. Lederman, M. Schwartz und J. Steinberger nachgewiesen [Led62]. Folgende Reaktion wurde dabei genutzt:



Das Tauneutrino wurde erst 2000 von der DONUT³-Kollaboration nachgewiesen [Pat01].

³Direct Observation of the NU Tau

Aus diesen experimentellen Nachweisen kann man die Elektronen mit den Elektronenneutrinos, und Tauonen sowie Myonen mit deren Neutrinos analog in Verbindung bringen. Es gibt drei Leptonenfamilien, die folgende Teilchendoublets bilden:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Neutrinos wurden zunächst als masselos angenommen. Bei der experimentellen Bestimmung der Massen konnten nur Obergrenzen ermittelt werden.

Als das sogenannte solare Neutrino Defizit entdeckt wurde, diskutierte man zunehmend über eine Neutrinomasse. Dies bedeutet aber auch eine Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik, da die Neutrinos im Standardmodell mit fester Helizität auftreten, was nur möglich ist, wenn sie wie auch die Photonen die Masse $m_\nu = 0$ haben. Der Neutrinofluss der solaren Neutrinos, der auf der Erde ankommt, entspricht jedoch nur einem Bruchteil des Flusses, den man aufgrund der Leuchtkraft der Sonne erwartet. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Umwandlung von Elektronenneutrinos in Myonneutrinos. Diesen Prozess nennt man Oszillation. 2002 wurden Oszillationen von solaren Neutrinos durch das SNO⁴-Experiment nachgewiesen [Bel04].

In etwa 2 km Tiefe in einer Mine nahe Sudbury in Kanada wurde ein Wasser-Čerenkov-Detektor installiert. Der Granitfelsen um den Detektor schirmt das Experiment gegen kosmische Hintergrundstrahlung ab. Als Target dienen 1000 Tonnen schweres Wasser (D_2O). Die Elektronenneutrinos von der Sonne erreichen den Detektor und reagieren mit den Neutronen des Deuteriums d zu einem Proton und einem Elektron mit dem neutrinoinduzierten Betazerfall:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-. \quad (2.6)$$

Beim Durchgang der Elektronen durch das Wasser entsteht Čerenkov-Strahlung. Um den Detektor angebrachte Photomultiplier registrieren diese Strahlung. Zusätzlich zu diesen CC-Reaktionen⁵ der Elektronenneutrinos aus Gleichung 2.6 können alle Neutrino flavours ($x = e, \nu, \tau$) durch NC-Reaktionen⁶ mit

$$\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x, \quad (2.7)$$

beziehungsweise elastische Streuung (ES⁷) mit

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (2.8)$$

gezeigt werden. Bei den NC-Reaktionen werden beim Neutroneneinfang γ -Quanten emittiert, die an Elektronen streuen, wodurch wiederum Čerenkov-Licht entsteht. Bei SNO ist die Zugabe von $NaCl$ in das schwere Wasser möglich (*salt phase*). Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass ein Neutron bei NC-Reaktionen eingefangen wird. Das solare Neutrino Problem, welches besagt, dass weniger Elektronenneutrinos auf der Erde ankommen, als man anhand des Sonnenmodells erwartet, konnte hier erstmals durch Messungen des Neutrino flusses experimentell gezeigt werden. Ein Vergleich der Flüsse zeigt, dass nur 1/3 der Elektronenneutrinos von der Sonne detektiert werden, der Gesamtfluss aller Neutrino flavours aber stimmt.

⁴Sudbury Neutrino Observatory

⁵CC: charged current, bei diesen Reaktionen wird ein W^\pm -Boson ausgetauscht.

⁶NC: neutral current, bei dieser Reaktion wird ein Z^0 -Boson ausgetauscht.

⁷ES: elastic scattering, engl. für: Elastische Streuung

Die Flavoureigenzustände der Neutrinos sind nicht gleich den Masseneigenzuständen. Die Mischungen können mit einer Matrix beschrieben werden, analog zur Cabbibo–Kobayashi–Maskawa–Matrix (CKM) der Quarkzustandsmischungen. Diese Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata–Matrix (PMNS) für den zweidimensionalen Fall für Oszillationen zwischen ν_μ und ν_τ lautet:

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

wobei θ_{12} der Mischungswinkel zwischen den Masseneigenzuständen ν_1 und ν_2 mit den Massen m_1 und m_2 ist. Die Masseneigenzustände sind entartet. Es kommt bei vorhandenen Neutrinomassen zu Oszillationen der Flavoureigenzustände. Myon-, Elektron- und Tauneutrinos wandeln sich dabei zeitabhängig und reversibel ineinander um.

Ein Neutrino ν ($v_\nu \approx c$) mit der Masse m_ν hat die Energie

$$E_\nu = \sqrt{p^2 c^2 + m_\nu^2 c^4} \simeq pc + \frac{m_\nu^2 c^4}{2pc}. \quad (2.10)$$

Dabei sind die Massen m_1 und m_2 nicht gleich ($m_1 > m_2$). Aus der Matrix 2.9 kann man die Zeitentwicklung für ein Myonneutrino angeben mit:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -|\nu_1\rangle \cdot \sin(\theta) e^{-iE_1 t/\hbar} + |\nu_2\rangle \cos(\theta) e^{-iE_2 t/\hbar}. \quad (2.11)$$

Mit der Wahrscheinlichkeitsamplitude

$$a = \langle \nu_\tau | \nu_\mu(t) \rangle = -\sin \theta \cos \theta e^{-iE_1 t/\hbar} + \sin \theta \cos \theta e^{-iE_2 t/\hbar} \quad (2.12)$$

ist die Wahrscheinlichkeit P , zum Zeitpunkt t ein Tauneutrino zu finden:

$$P = |a|^2 = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta E t}{2\hbar}\right). \quad (2.13)$$

Aus Gleichung 2.10 folgt eine Energiedifferenz $\Delta E = E_1 - E_2$ für die unterschiedlichen Neutrinos von

$$\Delta E = \frac{(m_1^2 - m_2^2) c^4}{2pc} = \frac{\Delta m^2 c^4}{2pc}. \quad (2.14)$$

Mit $t = L/c$ ist die Oszillationswahrscheinlichkeit also durch folgende Gleichung gegeben:

$$P = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 c^4}{4\hbar c} \cdot \frac{L}{pc}\right). \quad (2.15)$$

Es ergibt sich die Darstellung:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{1,27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right). \quad (2.16)$$

Die Oszillationswahrscheinlichkeit hängt also neben der Strahlenergie E_ν von der Entfernung L zwischen Quelle und Detektor, dem Mischungswinkel θ und dem Quadrat der Massendifferenzen Δm^2 ab.

Bei OPERA beträgt die Entfernung $L = 732$ km. Nachteil dieser Position ist, dass nur wenige Myonneutrinos zu Tauneutrinos oszilliert sind und entsprechend eine geringe Rate zu erwarten ist, wie Abbildung 2.2 zu entnehmen ist. Man spricht

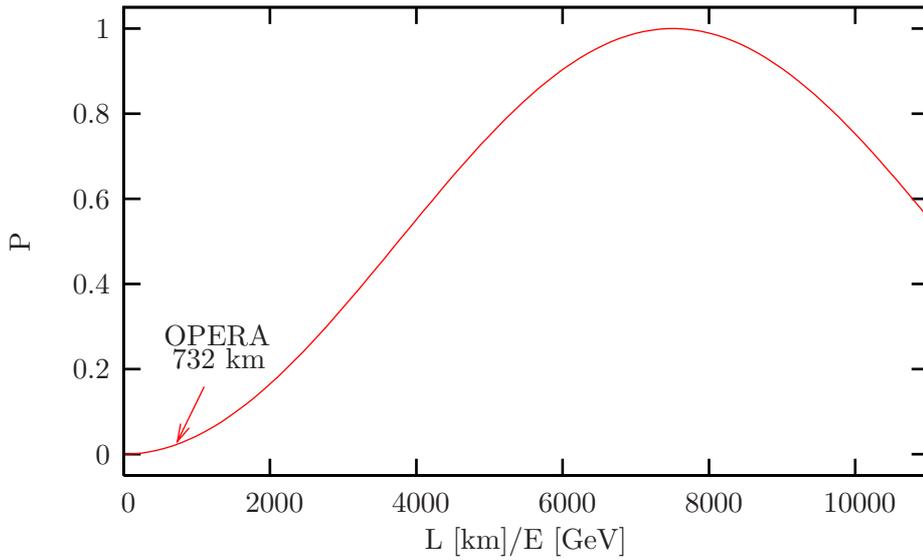


Abbildung 2.2: Oszillationswahrscheinlichkeit P für Neutrinooszillationen von ν_μ in ν_τ bei OPERA. Der Strahl hat eine Energie von 17 GeV.

hierbei auch von Off-Peak, da der Detektor weit neben dem Maximum der Oszillation liegt. Der Neutrinostrahl ist hier aber noch gut fokussiert, so dass viele Teilchen auf das Target treffen (siehe Abschnitt 2.5). Die Energie liegt mit 17 GeV oberhalb der Energie, die zur Tauerzeugung notwendig ist.

Bisher wurden nur Neutrinodefizite in sogenannten *Disappearance*-Experimenten wie am SNO untersucht. Mit OPERA soll zum ersten Mal die direkte Umwandlung von Myonenneutrinos in Taunenneutrinos gezeigt werden (*Appearance*). Dazu wird ein hochenergetischer Myonenneutrinostrahl am CERN in der Schweiz erzeugt (Abschnitt 2.2) und in Richtung des Gran Sasso Untergrundlabors in Italien geschickt. Dort trifft der Strahl im OPERA-Detektor (Abschnitt 2.3) auf ein Target (N), mit dem er wechselwirken kann.

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X. \quad (2.17)$$

Man unterscheidet drei wesentliche Zerfallskanäle des τ^- , den elektronischen, den myonischen und den hadronischen Zerfallskanal, mit jeweils einem Elektron, Myon beziehungsweise Hadron als geladenem Teilchen im Endzustand. Der elektronische Zerfallskanal hat wie der myonische eine BR⁸ von 18%. Für hadronische Zerfälle ist BR = 64%.

Auf die Zerfallskanäle und den Nachweis der τ^- -Leptonen geht Abschnitt 2.5 genauer ein.

⁸BR: **B**ranching **R**atio, engl. für: Verzweigungsverhältnis

2.2 Der CNGS-Neutrinostrahl

Für das OPERA-Experiment wird ein Myonenneutrinostrahl benötigt. Um die Umwandlung in Tauneutrinos nachweisen zu können, muss dieser möglichst frei von Verunreinigungen durch andere Neutrino-Flavours (insbesondere ν_τ) sein. Dieser CNGS Neutrinostrahl wird am SPS⁹-Beschleuniger des Forschungszentrums CERN erzeugt, der in Abbildung 2.3 zu sehen ist.

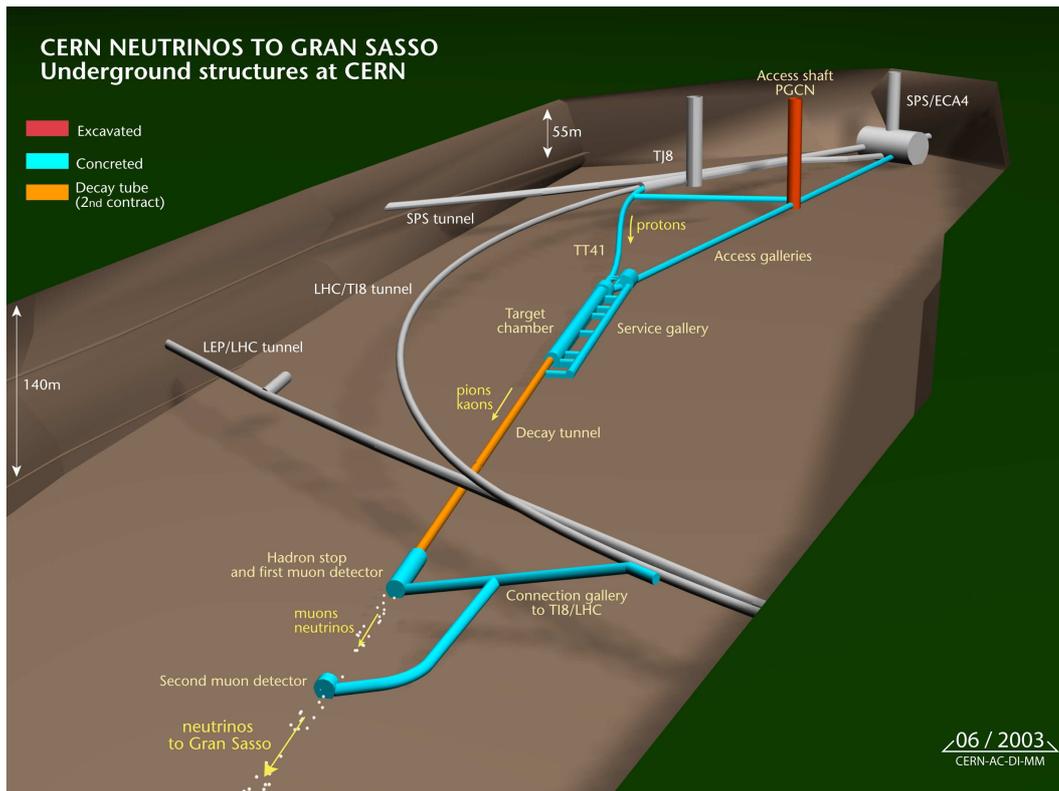


Abbildung 2.3: Beschleunigeranlage zur Erzeugung eines reinen Myonenneutrinostrahls am CERN in Genf (Quelle: CERN CNGS).

Dabei werden Protonen mit einer Energie von 400 GeV auf ein Graphittarget geschossen. Der Protonenstrahl ist dabei in Richtung des Gran Sasso Untergrundlabors in Italien gerichtet. Bei der Wechselwirkung mit dem Graphit entstehen positiv geladene Pionen (π^+) und Kaonen (K^+), die mit einem magnetischen Linsensystem, dem sogenannten Horn, in einem Strahl gebündelt werden. Es gibt zwei Hörner hintereinander. Das erste fokussiert die niederenergetischen Teilchen und das zweite (Reflektor) den hochenergetischen Anteil. Negativ geladene Teilchen werden durch das Linsensystem herausgefiltert. In einem Zerfallstunnel, der etwa 1000 m lang ist, zerfallen die π^+ und K^+ im wesentlichen in Myonen und Myonenneutrinos. Der Zerfallstunnel ist evakuiert, um Wechselwirkung mit Restgasen gering zu halten und so möglichst viele Neutrinos in Strahlrichtung zu erzeugen. Verschiedene Zerfälle und deren Häufigkeit zeigt Tabelle 2.1. Nicht alle Protonen, Kaonen und Pionen sind am Ende des Tunnels zerfallen. Diese übrigen Teilchen werden von einem Eisen-Graphit-Schild aufgefangen.

⁹Super Proton Synchrotron

Zerfall	Häufigkeit [%]
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	99,988
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	63,39
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	21,03
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	1,76
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	5,59
$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$	4,93
$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	3,30

Tabelle 2.1: Einige Zerfälle der Kaonen und Pionen am CNGS-Zerfallstunnel mit deren Häufigkeit [Eid04].

Der Fluss der Myonen wird in einem Myondetektor gemessen, um daraus Hinweise für den Neutrinostrahl zu erhalten. Die Myonen werden aufgrund ihrer großen Durchdringungsfähigkeit in Materie erst anschließend im Gestein absorbiert. Nur die Neutrinos durchdringen die Erde und gelangen zum 732 km entfernten Untergrundlabor im Gran-Sasso-Massiv. Auf dem Weg dorthin wandeln sich die ν_μ teilweise in andere Neutrinoarten, im wesentlichen in ν_τ um (siehe Abschnitt 2.1). Diese sollen im OPERA-Detektor nachgewiesen werden, der im Untergrundlabor LNGS¹⁰, einem Labor des INFN¹¹, im Aufbau ist. Der massive Fels, der das Untergrundlabor umgibt, sorgt für eine Abschirmung des Detektors von der Höhenstrahlung. Die Ei-

$\langle E \rangle_{\nu_\mu}$	17 GeV
Rate	$4,5 \cdot 10^{19}$ pot ¹² /Jahr
ν_e/ν_μ	0,8 %
$\bar{\nu}_\mu/\nu_\mu$	2,0 %
$\bar{\nu}_e/\nu_\mu$	0,05 %
ν_τ/ν_μ und $\bar{\nu}_\tau/\nu_\mu$	vernachlässigbar

Tabelle 2.2: Die Eigenschaften – insbesondere die Verunreinigungen durch andere Neutrino-Flavours – des Myonenneutrinostrahls.

genschaften des CNGS-Strahls zeigt Tabelle 2.2. Der CNGS-Neutrinostrahl hat eine mittlere Energie von 17 GeV. Er ist ein annähernd reiner Myonenneutrinostrahl. Die Verunreinigung durch (Anti-)Tauneutrinos ist vernachlässigbar. Für die Erzeugung von τ -Leptonen wird aufgrund der hohen Masse eine Schwellenenergie von 3,4 GeV benötigt. Im Minimum haben die Myonenneutrinos eine Energie von etwa 5 GeV, so dass eine ausreichende Energie für Tauonen bei Wechselwirkungen zur Verfügung steht. Die Rate von $4,5 \cdot 10^{19}$ pot/Jahr (siehe Tabelle 2.2) bezieht sich auf eine geplante Strahlzeit von 200 Tagen im Jahr. Der Beginn des Strahlbetriebs ist, wie auch die Datennahme am OPERA-Detektor in Italien, für August 2006¹³ geplant.

¹⁰Laboratori Nazionali del Gran Sasso

¹¹Istituto nazionale di fisica nucleare

¹³Stand: Mai 2006

2.3 Der OPERA-Detektor

In Halle C des LNGS-Untergrundlabors befindet sich zur Zeit der OPERA-Detektor im Aufbau. Der OPERA-Detektor ist in zwei identische Supermodule (SM) unterteilt, die in Strahlrichtung gesehen hintereinander angeordnet sind. Den schematischen Aufbau des Detektors zeigt Abbildung 2.4. Durch die Lage im Gran Sasso Bergmassiv wird der Detektor von kosmischen Teilchen abgeschirmt. Wegen der schwachen Wechselwirkung und einer geringen Rate der erwarteten Neutrinoereignisse ist diese Abschirmung notwendig. Der gesamte Detektor hat eine Masse von etwa 5500 t. Jedes

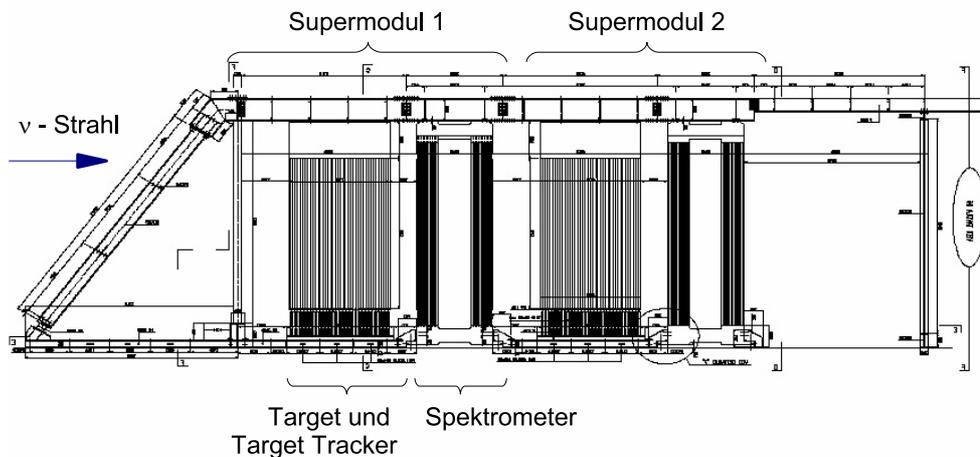


Abbildung 2.4: Der schematische Aufbau des OPERA-Detektors

Supermodul beinhaltet das Target mit dem Target Tracker sowie das dahinterliegende Spektrometer. Im Target werden die Teilchenspuren mit einer guten Ortsauflösung nachgewiesen. Das elektronische Spektrometer untersucht die Kinematik der Zerfallsprodukte. Die einzelnen Komponenten werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Bei OPERA handelt es sich um einen sogenannten Hybrid-Detektor, da aktive Komponenten (Spektrometer) mit passiven (Target) kombiniert werden.

2.3.1 Das Target

Als Target dienen bei OPERA Bleiwürfel (sogenannte Bricks). Solche ECC^{14} -Bricks sind auch schon bei DONUT erfolgreich verwendet worden. Den Aufbau zeigt Abbildung 2.5.

Ein Brick besteht aus 1 mm dicken Bleiplatten und dazwischenliegenden Kernspuremulsionsschichten. Zwei Emulsionsschichten werden mit Kunststoff getrennt. Ein Brick beinhaltet insgesamt 56 Bleiplatten und ist aufgrund der Lichtempfindlichkeit der Emulsionen in Aluminium eingewickelt. Zur Vermeidung chemischer Reaktionen sind die Würfel vakuumverpackt. Die Emulsionen werden in Japan entwickelt.

¹⁴Emulsion Cloud Chamber, engl. für: Emulsions-Nebelkammer

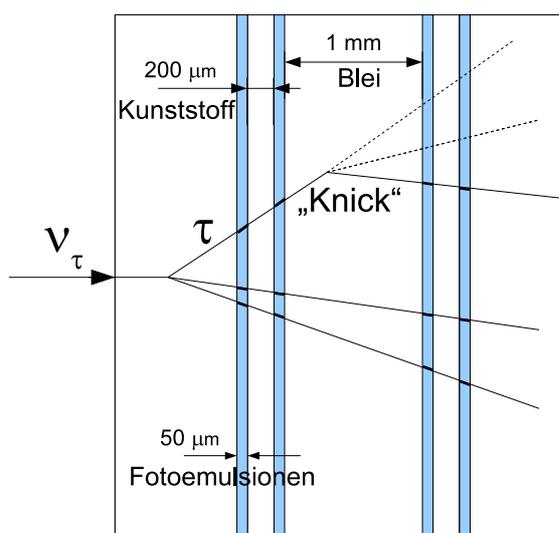


Abbildung 2.5: Aufbau der Bleibricks. Zwischen den Bleiplatten befinden sich Kernspuremulsionsschichten. Zu sehen ist außerdem der Zerfall eines τ , der in Abschnitt 2.5 genauer erläutert wird.

Spuren kosmischer Strahlung werden entfernt. Das Zusammensetzen zu den endgültigen Bricks erfolgt im LNGS in der BAM¹⁵, einer automatisierten Produktion im Untergrundlabor.

Die ECC-Bricks sind im Detektor in 24 Wände mit jeweils etwa 3000 Bricks angeordnet, die eine Fläche von $6,7 \text{ m} \times 6,7 \text{ m}$ bedecken. Zwischen den Wänden befinden sich jeweils die Target Tracker (Abschnitt 2.3.2). Die Targetmasse zu Beginn des Experiments beträgt etwa 1600 t. Hinzu kommt die Masse der Eisenmagneten innerhalb des Spektrometers (vergleiche Abschnitt 2.3.3). Durch diese große Masse will man möglichst viele Taureaktionen nachweisen, die in Abschnitt 2.5 beschrieben werden.

Neben dem Target befinden sich pro Supermodul zwei Roboter auf jeder Seite, das sogenannte BMS¹⁶. Dieses sortiert ECC-Bricks, in denen eine Reaktion stattgefunden hat, aus. Dafür werden alle Bricks in einer Lage herausgezogen, bis zum Brick, in dem ein Tauspuren vermutet werden. Dieser wird aussortiert und die zwischengelagerten Bricks wieder in den Detektor gefahren. Es ist nicht vorgesehen aussortierte Bricks wieder zu ersetzen, so dass die Targetmasse während der fünfjährigen Laufzeit (um etwa 100 t) abnimmt.

Die Emulsionsschichten bestehen aus Silberbromid. Silberatome werden beim Durchgang geladener Teilchen ionisiert. Werden die Fotoemulsionen später entwickelt, werden diese Stellen durch Schwärzung unter dem Mikroskop sichtbar. Es wird eine Ortsauflösung von 400 nm (und eine Winkelauflösung von 2mrad) erreicht. Die Auswertung erfolgt durch automatisiertes Scannen in mehreren Scanlaboren. Vorher werden die kompletten Bricks kosmischer Strahlung ausgesetzt, die gerade Spuren in den Emulsionen hervorruft. Diese stellen Referenzwerte dar, um die Position der Emulsionen zueinander für die Spurrekonstruktion zu ermitteln.

Als Auslöser für das Aussortieren dienen die Target Tracker (Abschnitt 2.3.2). Bis zu 30 Bricks werden pro Tag aus dem Detektor entfernt. Um möglichst wenig Emulsionen untersuchen zu müssen, wird zunächst das sogenannte *Changeable Sheet*, die Fotoemulsion an der ersten Stelle in Strahlrichtung gesehen, auf Spuren untersucht. Wird in dieser Emulsion keine Spur gefunden, muss der Brick nicht weiter ausgewertet werden und kann im Detektor weiterverwendet werden.

¹⁵Brick Assembly Machine

¹⁶Brick Manipulation System

2.3.2 Der Target Tracker

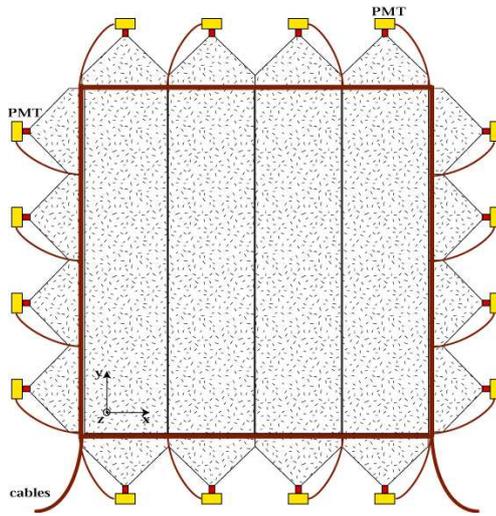


Abbildung 2.6: Target Tracker. Schematischer Aufbau der Szintillatoren. Diese bedecken eine Fläche von $6,7 \times 6,7 \text{ m}^2$. Die Signale werden an den Seiten durch Photomultiplier ausgelesen.

Da die Bricks selbst keine Information darüber liefern, ob und wann ein Brick getroffen wurde, befinden sich zwischen den Brickwänden die Target Tracker. Es handelt sich dabei um Plastikszintillatoren, die jeweils die gesamte Fläche der Bricks abdecken und mittels Photomultipliern ausgelesen werden. Die Target Tracker zeigen an, ob in einem Brick möglicherweise ein gesuchtes Ereignis (Event) stattgefunden hat. Dadurch, dass sich zwischen jeder Brickwand ein Target Tracker befindet, ist ein exaktes Auffinden des Bricks mit einem vermuteten Vertex möglich. Anschließend wird die BMS veranlasst, diesen Brick auszusortieren (Abschnitt 2.3.1). Durch die Target Tracker ist außerdem das Zeitsignal vorhanden, das nötig ist, um einer Teilchenspur in den Emulsionen die Ergebnisse aus dem Myonspektrometer zuzuordnen. Abbildung 2.6 zeigt schematisch den Aufbau einer Wand des Target Trackers.

2.3.3 Myonspektrometer

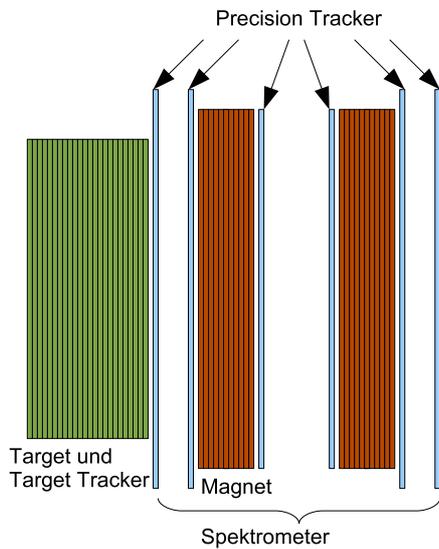


Abbildung 2.7: Skizze eines Supermoduls. Hinter dem Target mit dem Target Tracker befindet sich das Spektrometer. Es setzt sich im wesentlichen aus den Wänden aus Driftröhren, dem sogenannten PT, und den Magnetspulen zusammen. Innerhalb der Magnetspule und neben den PT, befinden sich RPCs.

In jedem Supermodul (Abbildung 2.7) befindet sich hinter dem Target mit den Target Trackern das Myonspektrometer. Dieses beinhaltet neben einem Eisenmagneten RPCs¹⁷, XPCs¹⁸ und den Precision Tracker (PT), der aus Driftröhren aufgebaut ist.

Die Dipolmagneten haben eine magnetische Flussdichte von 1,55 T, die mit Kup-

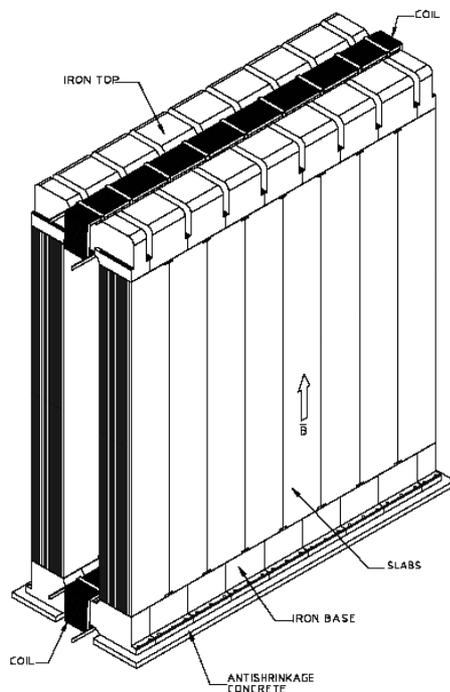


Abbildung 2.8: Konstruktion der Magnetspulen.

ferspulen im unteren und oberen Bereich der Spulen erzeugt werden. Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau der Magnete eines Supermoduls. Die Feldlinien verlaufen von

¹⁷Resistive Plate Chambers

¹⁸XPCs sind RPCs mit X-förmiger Struktur.

oben nach unten und sind in den beiden Wänden entgegengesetzt gerichtet. Dadurch werden durchfliegenden geladenen Teilchen zweimal abgelenkt und über den Winkel der Teilchenbahn eine Ladungs- und Impulsbestimmung ermöglicht (siehe Abschnitt 2.4). Die Seiten der Eisenmagnete bestehen aus jeweils zwölf Eisenplatten. Dazwischen befinden sich RPCs. Diese bestehen aus 2 mm dicken Platten aus dem Kunststoff Bakelit, die als Kathode und Anode fungieren und mit einer Hochspannung von 8 kV betrieben werden. Dazwischen befindet sich ein Gasgemisch (Argon/Isobuthan/Tetrafluorethan). Durchfliegende geladene Teilchen ionisieren dieses Gas und es kommt wie in Driftkammern zur Entladung zwischen den Platten. Durch einen hohen Widerstandswert von Bakelit fließen die Ladungen nur langsam ab, so dass kurzzeitig keine weiteren Teilchen an der gleichen Stelle im RPC nachgewiesen werden können. Die Signale müssen nicht weiter verstärkt werden, da sie mit etwa 100 mV groß genug sind. Sie werden über Elektroden ausgelesen, die sich alle 3 cm an den Seiten befinden. Eine RPC-Wand besteht aus insgesamt 21 einzelnen RPC-Elementen, jeweils drei in der Breite und sieben in der Höhe. In jedem Supermodul befindet sich vor dem ersten PT und vor dem Magneten außerdem XPSs. Sie funktionieren genau wie RPCs, sind aber X-förmig, also um 45 Grad gedreht, und bestehen nicht aus Kunststoff, sondern Glas. Dadurch wird eine genauere Spurrekonstruktion ermöglicht. Mit den RPCs werden die Teilchenspuren im Detektor aufgezeichnet. Die RPCs und XPCs dienen dem PT außerdem als Trigger [Fel05]. Für Teilchenwechselwirkung innerhalb des Eisenmagneten können nur die RPC-Signale zur Auswertung herangezogen werden. Bei Hadronen kann dabei die Energie bestimmt werden. Eine exakte Rekonstruktion von Myonspuren erfolgt durch eine Anordnung von etwa 10.000 Driftröhren, dem PT. In jedem Supermodul gibt es sechs Wände mit jeweils vier Lagen aus Driftröhren. Die Funktionsweise des PTs, insbesondere die Funktionsweise von Driftröhren und den genauen Aufbau des PTs, erklärt Abschnitt 2.4 separat.

2.4 Der Precision Tracker

Mit dem Precision Tracker (PT) im OPERA–Detektor sollen die Spuren geladener Teilchen, der Myonen, nachgewiesen werden. Durch ein angelegtes Magnetfeld kann man daraus den Impuls der Teilchen bestimmen. Der PT besteht aus 7,9 m langen Driftröhren, die einen Teil des Myonspektrometers darstellen. Wie schon in Abbildung 2.7 zu sehen ist, befinden sich in jedem Supermodul sechs Wände mit jeweils vier Lagen aus Driftröhren. Im gesamten OPERA–Detektor gibt es etwa 10.000 Driftröhren. Der PT wird in Hamburg entwickelt und gebaut. Die Funktionsweise von Driftröhren wird in Abschnitt 2.4.1 näher erläutert. Den Aufbau und die Anordnung der Driftröhren im PT sowie die Impulsbestimmung durch die Teilchenspuren behandelt Abschnitt 2.4.2.

2.4.1 Funktionsweise von Driftkammern

Driftkammern funktionieren ähnlich wie Geiger–Müller–Zählrohre. Allerdings ermitteln Driftkammern nicht die Anzahl ionisierender Teilchen und somit die Aktivität der Strahlung, sondern den Ort des Teilchendurchgangs durch die Kammer. Dazu werden die Driftzeiten, also die Zeiten zwischen Teilchendurchgang und Signal am Draht, gemessen.

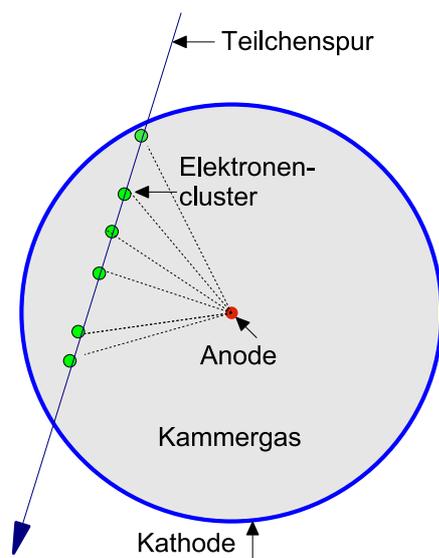


Abbildung 2.9: Teilchenspur durch eine Driftröhre. Der Hochspannungsdraht in der Mitte fungiert als Anode, die Aluminiumröhre entsprechend als Kathode. Auf der Teilchenspur entstehen durch die Ionisation des Kammergases Elektronencluster.

Driftkammern sind mit einem Ionisationsgas¹⁹ gefüllt. Wenn ein geladenes Teilchen die Kammer durchquert, ionisiert es die Atome und Moleküle des Gases entlang seiner Trajektorie. Bei dieser Primäronisation werden energiereiche Elektronen freigesetzt. Solche angeregten Hüllenelektronen können den Atomverband verlassen. Weitere Atome und Moleküle in der Nähe werden ionisiert. Durch direkte Stöße erzeugte Elektronen heißen δ –Elektronen. Diese freigesetzten Sekundärelektronen bilden Elektronengruppen, die Elektronencluster²⁰ genannt werden. Durch einen Anodendraht werden die Elektronen angezogen. Die Elektronencluster driften entlang

¹⁹Ionisationsgas beim PT ist das Gasmisch Ar(80%)CO₂(20%)

²⁰Cluster, engl. für: Anhäufung, Gruppe

der elektrischen Feldlinien. Durch die sogenannte Gasverstärkung bekommen die Elektronen genügend hohe Energien, so dass weitere Gasatome ionisiert werden. In der Nähe des Signaldrahtes erfahren die Elektronen eine starke Beschleunigung. Auf dem Draht entsteht ein messbares Signal.

Wesentlich für Messungen mit Driftkammern ist daher das Verständnis der Teilchenwechselwirkung im Gas. Die Bethe-Bloch-Gleichung 2.18 gibt den differentiellen Energieverlust dE pro Weglänge dx für geladene Teilchen an [Bet30].

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \frac{\alpha^2 \hbar^2}{m_e} N_0 \frac{Z}{A} \rho \frac{1}{\beta^2} z^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right]. \quad (2.18)$$

- α Feinstrukturkonstante
- m_e Elektronenmasse
- N_0 Avogadrokonstante
- Z Ordnungszahl des Materials
- A Massezahl des Materials
- ρ Massendichte
- ze Ladung des bewegten Teilchens
- βc Geschwindigkeit des ionisierenden Teilchens
- I effektives Ionisationspotential des Gases

Elektronen haben einen zusätzlichen Energieverlust durch Bremsstrahlung. Beim PT ist der Energieverlust im wesentlichen vom Ionisationspotential und der Gasdichte abhängig. Das Ionisationspotential für Argon beträgt 15,76 eV und für CO_2 13,81 eV.

Beim Durchflug eines Teilchens durch eine Driftkammer wird das Ionisationsgas, das oft auch Kammergas genannt wird, ionisiert. Es entstehen sogenannte Cluster. Diese beinhalten Elektronen-Ionen-Paare. Die Ionen driften zur Kathode, die Elektronen zur Anode.

Die Cluster werden durch Primärionisation gebildet. Näherungsweise kann die Zahl der Cluster pro Weglänge $n_{\text{primär}}$ in lineare Abhängigkeit von der mittleren Ordnungszahl des Gases oder Gasgemisches \bar{Z} gebracht werden.

$$n_{\text{primär}} = 1,45 \cdot \bar{Z}. \quad (2.19)$$

Wenn die primären Teilchen eine größere Energie haben als das Ionisationspotential des Gases, können weitere sekundäre Ionisationen erfolgen. Die Totalionisation n_{total} ergibt sich dann aus der effektiven mittleren Energie W und dem totalen Energieverlust ΔE :

$$n_{\text{total}} = \frac{\Delta E}{W}. \quad (2.20)$$

Ein Hochspannungsdraht innerhalb der Driftkammer dient als Anode (Abbildung 2.9). Die elektrischen Feldlinien verlaufen also radial um die Anode zur Kammerwand, die als Kathode fungiert. Für das elektrische Feld gilt bei dieser Anordnung:

$$E(r) = \frac{V}{\ln(r_K/r_A)} \frac{1}{r}, \quad (2.21)$$

wobei r_K der Kathoden- und r_A der Anodenradius ist. V gibt das Potential an.

Entlang der elektrischen Feldlinien driften die Elektronen. Im Draht werden sie zunehmend vervielfältigt. Die Äquipotentiallinien des Feldes werden hier dichter. Die Elektronen gewinnen zwischen Stößen mit Gasmolekülen genug Energie, um neue Ion–Elektron–Paare zu bilden. Diesen Prozess nennt man Gasverstärkung. Da das Signal der Primärelektronen zu gering ist, um registriert zu werden, ist die Gasverstärkung wesentlich für die Funktionalität von Driftkammern. Um eine ausreichende Feldenergie zu haben, damit weitere Gasatome ionisiert werden können, werden Feldstärken $> 50 \text{ kV/cm}$ benötigt [Per98].

2.4.2 Geometrie des Precision Trackers

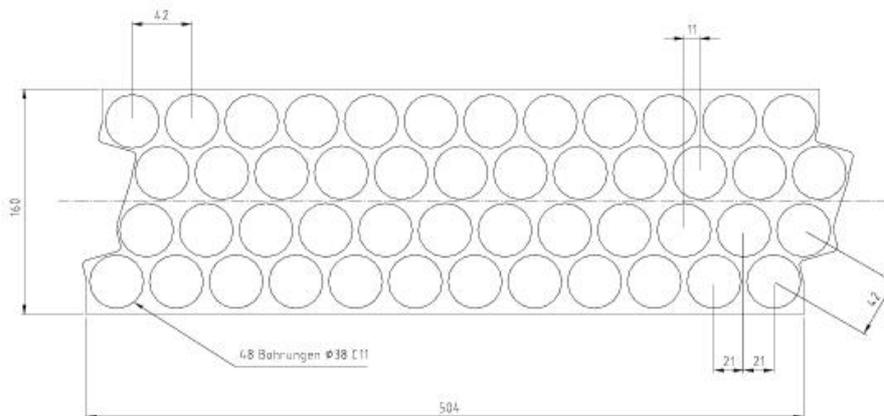


Abbildung 2.10: Die Anordnung der Röhren in einem Modul, wie man sie anhand der Konstruktionszeichnung erkennen kann. Durchfliegende Teilchen treffen immer mindestens drei der vier Rohrebenen.

Eine Form von Driftkammern sind Driftröhren. Beim OPERA PT werden 7,9 m lange Driftröhren aus Aluminium verwendet. Sie sind pro Supermodul in sechs Wänden angeordnet. Es befinden sich zwei solche Wände vor, zwei innerhalb und zwei hinter dem Magneten. Die Driftröhren innerhalb der Magneten sind aus Platzgründen um 15 cm verkürzt. Im gesamten Detektor gibt es zwölf PT–Wände. Die Driftröhren sind in Modulen angeordnet. 48 Röhren in vier Lagen aus jeweils zwölf

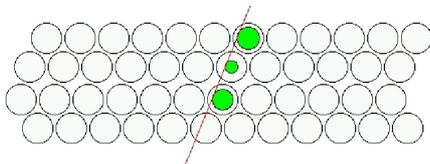


Abbildung 2.11: Ein Event in einem Modul. In diesem *Eventdisplay* wird der Teilchendurchgang graphisch dargestellt.

Röhren bilden ein solches Modul (Abbildung 2.10). Durch die spezielle Anordnung werden beim Teilchendurchgang immer mindestens drei der vier Rohrebenen eines Moduls getroffen, unabhängig davon, in welchem Winkel ein Teilchen die Module passiert. Die PTs in Targetnähe (PT 1, 6 und 7) bestehen aus 15 Modulen, alle übrigen aus 17 Modulen. Insgesamt gibt es also 198 Module im OPERA–Detektor. Diese Module werden auch an den Testständen in Hamburg verwendet.

Die Röhren haben einen äußeren Durchmesser von 38 mm und die Röhrenwand eine Dicke von $850 \mu\text{m}$ [Zim05].

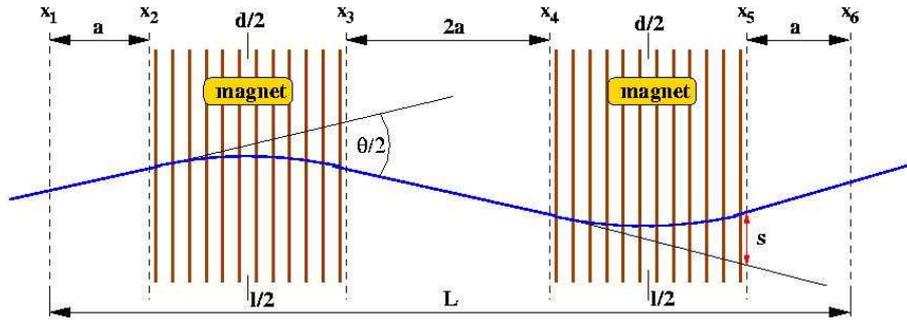


Abbildung 2.12: Schematischer Aufbau eines Spektrometers. Zu sehen ist die Position der PT-Driftröhren (x_1 bis x_6). Zwei Lagen sind vor, zwei im und zwei hinter dem Magneten. Durch die entgegengesetzt gerichteten Magnetfeldlinien werden die Teilchen auf ihrer Bahn zweimal abgelenkt. Aus der Ortsbestimmung durch den PT kann also der Winkel ermittelt werden.

Abbildung 2.12 zeigt die Anordnung der PT-Wände innerhalb eines Supermoduls. An den Positionen x_1 bis x_6 sind entsprechend die PT 1 bis PT 6. Im zweiten Supermodul ist die Anordnung analog. Die Magnetfeldlinien verlaufen in den beiden Eisenkernen entgegengesetzt. Durch dieses Feld werden die Teilchen zweimal abgelenkt. Über den Winkel ϑ kann der Impuls der Teilchen bestimmt werden. Als Ionisationsgas wird ein Gasgemisch aus 80% Ar und 20% CO_2 verwendet. Nach [Zim05] soll der PT im gegebenen Energiebereich eine Impulsauflösung von $\Delta p/p \leq 0,25$ haben. Der Winkel ϑ , der durch die Lorentzkraft entsteht, berechnet sich mit

$$\vartheta = \frac{qBd}{p}, \quad (2.22)$$

wobei $d = 1,2$ m die Dicke des gesamten Eisenmagneten, B die magnetische Feldstärke ($B = 1,55$ T), q die Teilchenladung und p der Teilchenimpuls ist.

Für die Impulsauflösung gilt nach [Zim05]:

$$\frac{\Delta p}{p} \approx \frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{1}{eBd} \sqrt{6 \left(\frac{\epsilon p}{a} \right)^2 + \frac{d}{X_0} \left(\frac{14 \text{ MeV}}{c} \right)^2}. \quad (2.23)$$

mit den Bezeichnungen aus Abbildung 2.12, der Strahlungslänge X_0 und einem Gesamtfehler der Ortbestimmung ϵ . Dieser darf $636 \mu\text{m}$ nicht überschreiten. Der intrinsische Fehler durch die Driftzeitmessung beträgt etwa $300 \mu\text{m}$. Der Fehler der Drahtposition kann mit etwa $150 \mu\text{m}$ angegeben werden. Entsprechend darf der Fehler aus der Ausrichtung (*Alignment*) der Detektor-Module nicht $250 \mu\text{m}$ übersteigen.

2.5 Tau-Nachweis

Bei OPERA sollen Neutrinooszillationen $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ direkt nachgewiesen werden. Man sucht nach der CC-Reaktion der im Myonneutrinostrahl entstandenen Tauneutrinos $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$. Als Target (N) dient dabei Blei. Die Teilchenspuren werden in Emulsionen nachgewiesen (vergleiche Abschnitt 2.3). Der Nachweis des ν_τ erfolgt durch den direkten Nachweis des τ -Leptons. Dessen Zerfallslänge beträgt etwa $600 \mu\text{m}$. Man unterscheidet drei wesentliche Zerfallskanäle des τ^- , den elektronischen, myonischen und hadronischen Zerfallskanal:

$$\begin{aligned}\tau^- &\rightarrow e^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_e, \\ \tau^- &\rightarrow \mu^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu, \\ \tau^- &\rightarrow h^- + \nu_\tau (+n\pi^0),\end{aligned}\tag{2.24}$$

wobei h für eine hadronische Komponente steht. Im OPERA-Detektor erwartet man etwa 31.000 Neutrinoereignisse (vergleiche Tabelle 2.3). Dies gilt für die geplante Strahlrate ($4,5 \cdot 10^{19}$ pot/Jahr), eine mittlere Targetmasse von 1,6 kt und eine Laufzeit von fünf Jahren. Für OPERA ist wichtig, eine signifikante Zahl von τ -Leptonen

Ereignis	Anzahl
$\nu_\mu CC$	23300
$\nu_\mu NC$	7000
$\bar{\nu}_\mu CC$	490
$\nu_e CC$	186
$\bar{\nu}_e CC$	16

Tabelle 2.3: Anzahl der bei OPERA erwarteten Neutrinoereignisse.

nachzuweisen. Diese hängt vom Mischungswinkel und der Massendifferenz ab. Bei voller Mischung erhält man die Werte aus Tabelle 2.4. Die Anzahl der nachgewiese-

Δm^2	Anzahl ν_τ CC-Reaktionen
$1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	24
$2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	95
$3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	214

Tabelle 2.4: Anzahl der bei OPERA erwarteten τ -Neutrinoereignisse für verschiedene Massendifferenzen.

nen τ -Leptonen hängt wiederum von der Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektors ab. Diese ist für die Zerfallskanäle in Tabelle 2.5 angegeben. Die Zahl der Neutrinoereignisse mit ν_τ bei Verbesserungen des Neutrinostrahls, einer höheren Wahrscheinlichkeit des Auffindens der Bricks und einer Untergrundreduzierung zeigt Tabelle 2.6. Ein Großteil der Neutrinoereignisse findet im Target statt. Die durch die Oszillation entstandenen Tauneutrinos reagieren mit dem Blei im Detektor in CC-Reaktionen zu Tauonen. Dieses Lepton zerfällt nach etwa $600 \mu\text{m}$ weiter. Durch diese kurze Zerfallslänge kommt es zu zwei unterschiedlichen Aufzeichnungen in den Emulsionen. Abbildung 2.13 verdeutlicht, dass bei kurzen Zerfällen (*short decay*) Entstehung und Zerfall des τ in der gleichen Bleiplatte stattfindet und bei langen Zerfällen (*long decay*) das Lepton erst in der folgenden Schicht zerfällt. Bei den langen Zerfällen kann man den charakteristischen Knick in der Teilchenspur erkennen und dessen Winkel

Zerfall	DIS lang	QE lang	DIS kurz	gesamt
$\tau \rightarrow e$	2,7	2,3	1,3	3,4
$\tau \rightarrow \mu$	2,4	2,5	0,7	2,8
$\tau \rightarrow h$	2,8	3,5	-	2,9
total	8,0	8,3	1,3	9,1

Tabelle 2.5: Die τ -Nachweiswahrscheinlichkeiten in % für die verschiedenen Zerfallskanäle des Tau nach [Zim06]. DIS (Deep Inelastic Scattering, engl. tiefinelastische Streuung) bezeichnet die tiefinelastische Streuung, QS (Quasi Elastic Scattering, engl. quasielastische Streuung) die quasielastische Streuung. Die Angaben *kurz* und *lang* geben an, ob ein τ in der gleichen Bleiplatte zerfällt, in der es auch entsteht und so einen kurzen Zerfallsweg hat, oder ob es erst in der folgenden Bleiplatte zerfällt (langer Zerfallsweg). Die Gesamtwahrscheinlichkeit, im OPERA-Detektor ein τ -Lepton nachzuweisen, ist 9,1%.

Δm^2	$1,9 \times 10^{-19} \text{ eV}^2$	$2,4 \times 10^{-19} \text{ eV}^2$	$3,0 \times 10^{-19} \text{ eV}^2$	BKGD
1,8 kt nominal	6,6 (10)	10,5 (15,8)	16,4 (24,6)	0,7 (1,1)
+ IBF + 3-PD	8,0 (12,1)	12,8 (19,2)	19,9 (29,9)	1,0 (1,5)
+ BKGD-Red.	8,0 (12,1)	12,8 (19,2)	19,9 (29,9)	0,8 (1,2)

Tabelle 2.6: Anzahl der bei OPERA erwarteten τ -Neutrinoereignisse für verschiedene Massendifferenzen. Die Zahl in Klammern gibt die Werte für eine um Faktor 1,5 verbesserte Strahlintensität an. IBF (improved brick finding) bedeutet die Verbesserung beim Auffinden der Bricks mit einem τ -Ereignis. 3-PD (3-prong decay) ist der τ -Zerfall in drei geladene Teilchen. BKGD-Red. (background) bedeutet eine Reduzierung des Untergrunds durch verbesserte Analyse.

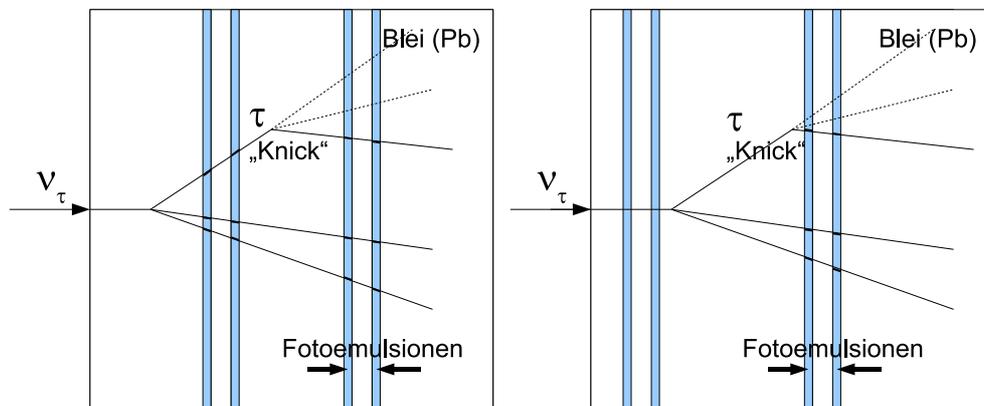


Abbildung 2.13: Zerfall des τ im Blei. Zu sehen ist der charakteristische Knick in der Teilchenspur. Links gezeigt ist ein sogenannter langer Zerfall (*long decay*). Finden Entstehung und Zerfall des τ innerhalb von einer Bleiplatte statt, spricht man hingegen von einem kurzen Zerfall (*short decay*) wie in der rechten Abbildung zu sehen ist.

bestimmen. Diese Winkelbestimmung ist bei den kurzen Zerfällen nicht möglich. Es entstehen Myonen, Elektronen oder Hadronen (siehe Gleichungen 2.24). Im Folgenden werden diese drei Zerfallskanäle in Bezug auf Energie- und Impulsbestimmung betrachtet.

Myonischer Zerfallskanal

Beim Leptonzerfall entstehende Myonen durchdringen den Detektor am weitesten. Wechselwirkung mit dem Target findet nur selten statt. Zur Impulsbestimmung der Myonen ist daher der PT im Myonspektrometer installiert. Die Myonen werden dazu durch Magnetfelder abgelenkt, um über den Ablenkwinkel auf den Impuls schließen zu können (vergleiche Abschnitt 2.4.2).

Elektronischer Zerfallskanal

Durch den Zerfall des Tauon entstehende Elektronen geben Energie durch Bremsstrahlung ab.

$$E(x) = E_0 \cdot \exp\left(\frac{-x}{X_0}\right). \quad (2.25)$$

Die Energie E nimmt exponentiell mit der Strecke x ab. E_0 bezeichnet die Anfangsenergie, X_0 die Strahlungslänge. Die Strahlungslänge ist die typische Länge, innerhalb derer ein hochenergetisches Teilchen die Hälfte seiner Energie durch Bremsstrahlung beziehungsweise Paarbildung verloren hat. Sie ist abhängig von Material und Dichte. Für Blei beträgt die Strahlungslänge etwa 5,6 mm. Entsprechend können die primären Elektronen innerhalb der Bricks elektromagnetische Schauer bilden. Durch die Anzahl der Spuren kann auf die Energie der Elektronen geschlossen werden. Ein Vergleich der Winkel der Teilchenspuren vor und nach dem Schauer ermöglicht Rückschlüsse auf den Teilchenimpuls.

Hadronischer Zerfallskanal

Entstehende Pionen und Kaonen (sowie weitere Hadronen) führen zur Schauerbildung im Target. Man kann den hadronischen vom elektronischen Zerfallskanal unterscheiden, da die Hadronen Energie im wesentlichen durch Ionisation verlieren:

$$E(x) = E_0 \cdot \left(1 - \frac{dE}{dx}x\right). \quad (2.26)$$

Analog zum elektronischen Zerfallskanal kann aus dem Schauer auf Impuls und Energie des primären Teilchens geschlossen werden.

Untergrundereignisse

Aufgrund der geringen Anzahl von relevanten Neutrinoereignissen (vergleiche Tabelle 2.6) müssen insbesondere auch Untergrundereignisse erkannt und von Tauneutrinoereignissen unterschieden werden. Zu diesen Untergrundereignissen zählen im wesentlichen [Ope00]:

- ν_τ -Verunreinigungen im Myonneutrinostrahl
- Produktion von Mesonen mit Charm-Quark aus Myonneutrinos
- Produktion von π^0 und e^-
- Streuung von Myonen
- Hadronische Reinteraktion

Der CNGS-Neutrinostrahl ist ein annähernd reiner Myonenneutrinostrahl. ν_τ -Ereignisse aus Verunreinigungen durch Tauneutrinos im CNGS-Strahl können nicht von Ereignissen unterschieden werden, die aus Tauneutrinos resultieren, die durch Oszillationen entstanden sind. Die Anzahl ist allerdings vernachlässigbar (vergleiche Tabelle 2.2). Verschiedene Reaktionen können zu Signalen führen, die mit dem charakteristischen Knick in der τ -Spur verwechselt werden können (vergleiche Abbildung 2.13). Dazu zählen die Produktion von Mesonen mit Charm-Quark, Pionen und Elektronen sowie Myonenstreuung und hadronische Reinteraktion. Mesonen mit Charm-Quark entstehen durch Wechselwirkung von Myonenneutrinos (NC und CC) mit Blei. Zur Unterscheidung von Tauneutrinoereignissen müssen die primären Myonen beziehungsweise das Meson zweifelsfrei bestimmt werden. In ν_e -Reaktionen (CC) können Elektronen entstehen. Es kann zu Vielfachstreuung an Bleiatomen kommen. Im CNGS-Strahl ist allerdings nur eine geringe Verunreinigung von ν_e vorhanden (vergleiche Tabelle 2.2). In ν_μ -Reaktionen (NC) können Pionen (π^-) entstehen, die nach Ladungsaustausch ($\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$) in ein Elektron und ein Positron zerfallen. Myonen aus ν_μ -Reaktionen (CC) können durch Streuung zu Signalen führen, die einem Tauereignis ähneln. Auch Hadronen können Vielfachstreuung eingehen und bei fehlender Detektion des primären Myons zu Fehlinterpretationen führen. Auf die möglichen Untergrundereignisse geht [Ope00] näher ein.

Kapitel 3

Diskriminatorschwellen

Dieses Kapitel gibt zunächst eine Übersicht über den Aufbau der *Slow Control* des PT, die zur Regelung, Steuerung und Überwachung der einzelnen Detektorkomponenten dient (Kapitel 3.1). Beim PT ist diese zu einem großen Teil mit *Beckhoff Automation Technology* realisiert worden, beziehungsweise befindet sich noch im Aufbau.

Im Abschnitt 3.2 wird das OPERA Support Board (OSUB) mit seinen Funktionen und der Programmierung näher erläutert. Teil dieser Arbeit ist die Programmierung für das OSUB. Das OSUB wird in Hamburg speziell für den OPERA PT entwickelt, um die Preamplifierboards an den Modulen zu steuern und zu überwachen. Wichtigste Funktion des OSUB ist das Setzen von Schwellen auf Diskriminatoren, um das Signal-Rausch-Verhältniss bei den Messungen zu optimieren.

Die Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses von den Diskriminatorschwellen untersucht Abschnitt 3.3.

3.1 PT Slow Control

Die PT *Slow Control* umfasst vier separate Bereiche:

- Regelung und Überwachung des **Gassystems** zur permanenten Versorgung der Driftröhrenmodule mit einem Gasgemisch aus 80% Argon (Ar) und 20% Kohlenstoffdioxid (CO₂), Sicherstellung der korrekten Gasmischung und Überwachung der Gasqualität, beispielsweise in Bezug auf Sauerstoffverunreinigungen und Undichtigkeit.
- Steuerung und Überwachung der **Hochspannung**. Sie umfasst die Spannungsversorgung der Signaldrähte in den Modulen mit positiver Hochspannung. Ab einem bestimmten Stromabfall an den Drähten wird die Hochspannung automatisch ausgeschaltet (Trip) und anschließend wieder hochgefahren.
- Überwachung der **Betriebsspannung**. Sie besteht aus der Spannungsversorgung der Elektronik an den Modulen, insbesondere der Diskriminatoren auf den Vorverstärkerplatinen, und der Spannungsversorgung der Überrahmen, den sogenannten Crates.
- OPERA Support Board (**OSUB**) zum Setzen der Diskriminatorschwellen, Temperaturmessungen und Generieren von Testpulsen.

Im Folgenden wird die für alle Bereiche zugrunde liegende Programmierungstechnik näher erläutert und anschließend die Bereiche Gassystem, Hochspannung und

Betriebsspannung erklärt. Auf die Programmierung und die Funktionen des OSUB geht Abschnitt 3.2 separat ein. Die Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses von den Diskriminatorschwellen behandelt Abschnitt 3.3.

Mit Komponenten der Firma Beckhoff werden PC-basierte Steuerungs- und Regelungstechniken realisiert. Dazu gehört neben Industrie-PC I/O- und Feldbuskomponenten eine Automatisierungssoftware. Bei Beckhoff heißt diese Software TwinCAT¹. Es handelt sich um eine Speicherprogrammierbare Steuerung² (SPS), die zur Steuerung und Regelung benutzt wird. Vorteil von TwinCAT ist die Möglichkeit, im laufenden Betrieb Änderungen am Programm vorzunehmen. Mit dem System Manager werden die Programmvariablen mit den Hardwarekomponenten verknüpft. Darüberhinaus bieten zusätzliche Programmpakete weitere Funktionen. Mit Scope View werden Variablen direkt dargestellt und können als Textdatei gespeichert und weiter ausgewertet werden. Die Datenanbindung an Bedienoberflächen ist gegeben. Die grafischen

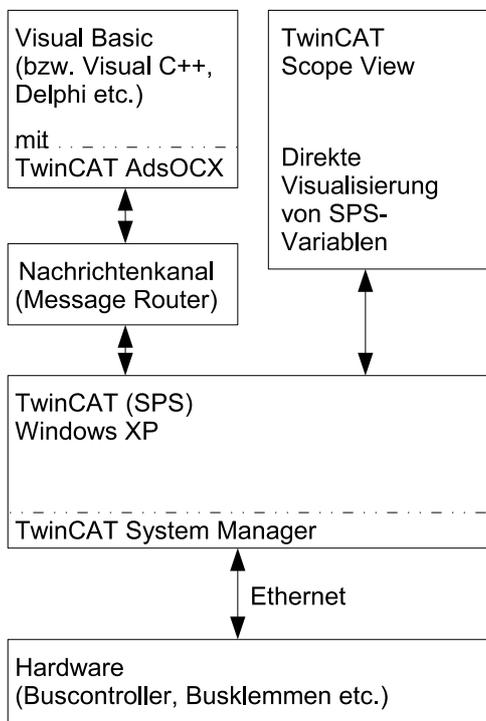


Abbildung 3.1: Kombination von Hardware, SPS und Benutzeroberfläche. Der System Manager verbindet die Variablen der SPS mit Buscontrollern und angeschlossenen Klemmen etc., die per Ethernet erreicht werden. Die Kombination mit einer Benutzeroberfläche, die beispielsweise in Visual Basic programmiert wird, erfolgt durch die AdsOCX, mit der die entsprechenden Variablen verknüpft werden. Scope View ermöglicht die direkte Visualisierung der SPS-Variablen.

Oberflächen der *Slow Control* werden in *Visual Basic*³ geschrieben [Mon03]. Die Kombination von Beckhoffsteuerung und *Visual Basic* (VB) erfolgt durch ein AdsOCX⁴. Damit werden die jeweiligen Variablen verknüpft. Beckhoff-Variablen können also in VB gelesen werden und umgekehrt Variablen, beispielsweise zur Steuerung von Magnetventilen im Gassystem, in die Beckhoff-SPS geschrieben werden.

¹The **Windows Control and Automation Technology**

²Oft wird auch die engl. Abkürzung PLC für **Programmable Logic Controller** verwendet.

³Programmierungsumgebung der Firma Microsoft, Version 6.0

⁴**A**utomation **D**evice **S**pecification **O**LE **C**ontrol **e**Xtension

3.1.1 Gassystem

Zum Betrieb des PT ist es notwendig, die Röhren permanent mit einer korrekten Gasmischung aus 80% Argon und 20% CO₂ zu versorgen. Gleichzeitig muss die Gasdichtigkeit gewährleistet sein und das Eindringen von Sauerstoff verhindert werden. In der Datenbank protokolliert werden Massendurchsatz, Druck, Gastemperatur und Sauerstoffgehalt in den Röhren. Der genaue Aufbau des Gassystems am Gran Sasso beschreibt [Fer06].

Für die Teststände in Hamburg existieren Prototypen des Gassystems, in denen ebenfalls 80% Argon und 20% CO₂ gemischt werden. Angeschlossen werden die entsprechenden Gasflaschen mit einem Druckminderer und per Beckhoff gesteuerten Massenflussmetern. Am Teststand werden zwei Module betrieben, die mit Gasschläuchen hintereinander geschaltet sind. Ein mit Öl gefüllter Bubbler am Ausgang zeigt, ob ein ausreichender Gasfluss vorhanden ist. Das Gassystem erzeugt einen Überdruck (gegenüber Atmosphärendruck) von etwa 100 mbar.

3.1.2 Hochspannung

Die Drähte in den Driftröhren werden mit Hochspannung versorgt. Am Gran Sasso bedient ein Mehrkanalgerät (SY 2527 Universal Multichannel Power Supply System von der Firma CAEN) alle Drähte mit Hochspannung. Die Spannungsversorgung wird per Ethernet gesteuert und kontrolliert. Übersteigt der Stromabfall an den Drähten einen bestimmten Wert, wird die Hochspannung automatisch heruntergefahren. Alle Parameter werden automatisch in die Datenbank geschrieben.

Die zwölf Drähte aus einer Lage von Röhren in einem Modul werden über das Hochspannungsboard zusammengefasst und von einem Hochspannungskabel bedient. Entsprechend werden pro Modul vier Kabel zur Versorgung mit Hochspannung verlegt. Der Aufbau an den Testständen erfolgt analog. Hier sind an die zwei verwendeten Module insgesamt acht Hochspannungskabel gelötet, die über eine Hochspannungsverteilung von einem Hochspannungsgerät versorgt werden.

3.1.3 Betriebsspannung

Von den Hochspannungsboards auf den Modulen werden Drahtsignale auf die Preamplifierboards (Vorverstärkerplatinen) geleitet. Auf diesen sind neben den Verstärkern die Diskriminatoren integriert, die nur die Signale ab der Diskriminatorschwelle weitergeben (Abschnitt 3.2). Die Preamplifierboards benötigen dafür eine zuverlässige Spannungsversorgung ($\approx 3,5$ V). Der Status der Spannungsversorgung (Strom, Gerätestatus) kann per CAN⁵ ausgelesen und anschließend in die Datenbank geschrieben werden. Besonders Fehler in der Spannungsversorgung müssen hier erkannt werden, da fehlende Spannungsversorgung die Funktionalität der Boards unterbricht. Schon bei kurzen Unterbrechungen der Betriebsspannung bleibt die Diskriminatorschwelle nicht gespeichert und Messungen werden so unmöglich.

⁵Controller Area Network

3.2 Opera Support Board OSUB

Das OPERA Support Board (OSUB) wird von der Universität Hamburg entwickelt, um die Preamplifierboards zu steuern beziehungsweise zu überwachen. Es erfüllt vier Funktionen:

- **Status** der Steckverbindungen der Preamplifierboards zur Überprüfung, dass die Anschlüsse korrekt sind.
- **Temperaturmessung**: an die Preamplifierboards können Temperatursensoren angeschlossen werden (vergleiche Abschnitt 4.3).
- Einstellen von **Diskriminatorschwellen** zur Minimierung des Hintergrundrauschens. Die Funktion der Diskriminatorschwellen erklärt Abschnitt 3.2.2. Messungen der Abhängigkeit des Signal–Rausch–Verhältnisses von der Schwellenspannung zeigt Abschnitt 3.3.
- **Testpulse** generieren, um die Funktion der Auslesekanäle zu testen, Laufzeiten innerhalb der gesamten Verkabelung der Elektronik zu überprüfen und eventuelles Übersprechen, sogenannten Crosstalk, in der Elektronik zu erkennen.

Mit einem OSUB werden die Preamplifierboards per CAN gesteuert und ausgelesen. Über Breitbandkabel sind acht Preamplifierboards an ein OSUB angeschlossen. Mit einem OSUB werden also zwei Module bedient. Die OSUBs befinden sich in Überrahmen, den sogenannten Crates. Die Crates sind so vorbereitet, dass bis zu neun OSUBs Platz finden, also je Crate eine Wand des PT versorgt ist.

3.2.1 Programmierung und CAN–Netz

1	11	1 1 1	4	0 ... 64	15	1 1 1	7	3				
Start of Frame	Identifier	Remote Transmission Bit Identifier Extension Bit	Reserve	Datenlängengebiet	Datenfeld	CRC-Prüfsumme	CRC-Delimiter	Bestätigungs-Slot	Bestätigungs-Delimiter	End of Frame	Intermission	Bus Idle

Abbildung 3.2: Typischer Aufbau einer CAN–Nachricht mit Angabe der Bitlänge. Der Identifier ist standardmäßig 11 Bit lang. Das Datenlängengebiet gibt die Länge des Datenblockes an, der bis zu 64 Bit lang sein kann.

Die Funktionen des OSUBs werden per CAN gesteuert. Das CAN-Protokoll wurde in den 80er Jahren von der Firma Bosch zunächst für die Vernetzung von Steuergeräten im Automobilbereich entwickelt, um Gewichtsreduzierungen durch weniger Kabel zu erreichen [Bos91]. Für weitere Automatisierungsprozesse wird CAN permanent weiterentwickelt [Cia06]. Es ist mittlerweile in vielen Anwendungsbereichen in Wirtschaft und Forschung zu finden. Ein CAN–Netzwerk wird als Linienstruktur aufgebaut [Ets94]. Stichleitungen sind nur bedingt möglich. Bei einem Highspeed–Bus müssen zusätzlich zwei Abschlusswiderstände⁶ von je 120 Ω verwendet werden. Solche Abschlusswiderstände können mit einem Pin auf dem OSUB angeklemt werden, also jeweils auf dem ersten und letzten OSUB einer Linienstruktur, das dem *Higher*

⁶zwischen CAN_{HIGH} und CAN_{LOW}

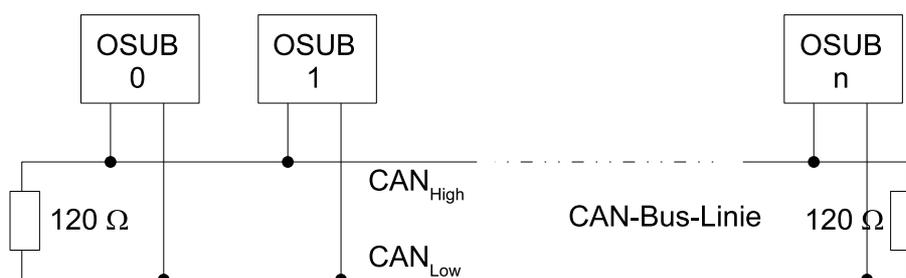


Abbildung 3.3: Aufbau eines CAN-Netztes mit OSUBs.

Level Protocol folgt. Alle Crates am OPERA PT werden in die Linienstruktur integriert. Das letzte OSUB in der Linie bekommt einen Abschlusswiderstand [SvS05]. Den Aufbau der Linienstruktur verdeutlicht Abbildung 3.3.

Am PT werden die CAN-Nachrichten von einem PC mit einem USB⁷-Adapter an das CAN-Netzwerk gesendet. Dieser Adapter sendet die Signale vom PC über einen CAN-Transceiver in das Netz. Auf dem PC läuft dafür ein VB-Programm, das die CAN-Informationen generiert.

Ein eingebundenes Programmmodul gibt das Format der Nachrichten vor und ermöglicht die Kommunikation mit dem Adapter. Diese Module sind Bestandteil der Installationssoftware für den Adapter [Pea06]. Die Informationen werden in Form von Datenübertragungsblöcken⁸ übertragen, unter anderem dem Identifier und dem Datenblock. Daneben wird auch die Länge des Datenblockes übermittelt. Dadurch ist das Ende einer Nachricht klar definiert. Der Identifier ID des OSUBs ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$ID = C \cdot h100 + S \cdot h10 + F \quad (3.1)$$

mit C = Crate Address, S = Slot Address und F = Function. h gibt einen hexadezimalen Wert an.

Der Identifier hat standardmäßig 11 Bit. Bit 0 bis 3 geben nach Gleichung 3.1 die Funktion, 4 bis 7 die Slot Position und 8 bis 10 das Crate an. Das CAN-Netzwerk arbeitet mit einer Baudrate⁹ von 125 kHz. Die Crate Address wird durch einen hexa-

Nummer	Funktion
1	Temperaturmessung
2	Schreiben von Schwellenspannungen
3	Status der Boards
4	Generierung von Testpulsen

Tabelle 3.1: Funktionsnummern der OSUB-Funktionen [SvS05].

dezimalen Drehschalter am OSUB eingestellt. Alle OSUBs in einem Crate erhalten so die gleiche Crate Address. Die Slot Address ist durch die Slotposition im Crate

⁷Universal Serial Bus

⁸sogenannten Frames

⁹Die Baudrate gibt an, wieviele Bits pro Sekunde übertragen werden.

bestimmt. Im Identifier ist die Funktion integriert (Gleichung 3.1). Die vier Funktionen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Im Datenblock der CAN-Nachricht befinden sich entsprechend genaue Informationen wie Temperaturen oder Schwellenwerte.

Mit einem OSUB werden acht Preamplifierboards angesprochen. Auf diesen befinden sich Anschlüsse für Temperatursensoren. Die Temperaturmessung per OSUB behandelt Abschnitt 4.3. Mit der OSUB-Funktion 3 (siehe Tabelle 3.1) wird neben dem Status der Verbindung zum Preamplifierboard (Plug Status) die Firmware (Firmware Release) und Fehlerbytes (CAN Error) ausgelesen [SvS05]. Die folgenden Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3 gehen auf die Funktion der Diskriminatorschwellen beziehungsweise des Testpulssystems näher ein. Exemplarische Programmteile zeigt Anhang C.

3.2.2 Steuern der Diskriminatorschwellen

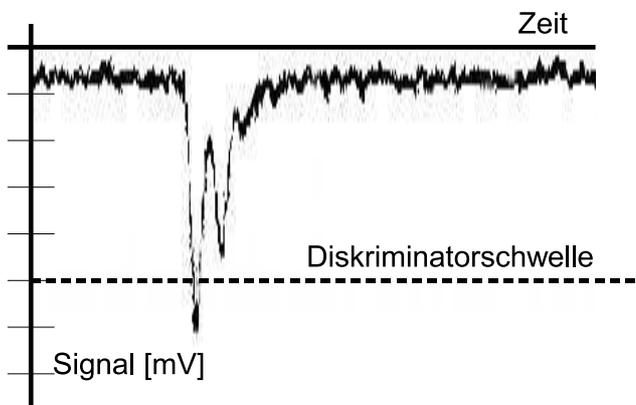


Abbildung 3.4: Durch die Diskriminatorschwellen werden nur ausreichend hohe Signale aufgezeichnet.

Die Diskriminatorschwellen – oft vereinfacht Schwellenspannungen oder Schwellen genannt – werden gesetzt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu optimieren. Auf den Signaldrähten kommen permanent Signale unterschiedlicher Stärke an. Die Diskriminatoren (lat. *discriminare* = trennen) geben nur Signale weiter, die größer als die Schwellenspannung sind. Die größeren Signale entstehen durch Ionisationsprozesse im Gas, die durch die zu messenden Teilchen hervorgerufen werden. Abbildung 3.4 verdeutlicht die Funktionsweise der Diskriminatorschwellen. Sie werden für jeden Detektor kanal mit dem OSUB gesteuert. Entsprechende CAN-Nachrichten beinhalten die Identifizierungsadresse (vergleiche Abschnitt 3.2.1) und einen Schwellenwert. Es kann jeder einzelne Kanal, alle zwölf Kanäle einer Modulebene oder alle angeschlossenen Boards eines Moduls angesprochen werden. Werden beispielsweise die Schwellen nur auf einer Modulebene neu geschrieben, wird im Datenblock neben dem Schwellenwert auch die Nummer des Preampboards gesendet, mit dem die entsprechenden Röhren verbunden sind. Beim Setzen von Schwellen auf einzelnen Röhren wird außerdem die Nummer der Röhre in den Datenblock eingebunden.

3.2.3 Generieren der Testpulse

Um die Signallaufzeiten in der Elektronik zu testen, werden Testpulse von den Boards generiert. Dabei werden die geraden und ungeraden Kanalnummern separat angesprochen. So kann eventuelles Übersprechen (Crosstalk) in der Elektronik erkannt werden. Die Generierung der Testpulse wird in 255 Schritten von jeweils 5 ns zwischen Start- und Stop-Signal eingestellt. Es kann also zwischen 0 und 1275 ns variiert werden.

Außerdem wird durch die Testpulse die Kanalfunktion getestet, da generierte Testpulse in jedem Fall in der Ausleseelektronik ankommen müssen.

3.3 Minimierung des Hintergrundrauschens

Die wichtigste Funktion des OSUB ist das Setzen von Schwellenspannungen auf den Vorverstärkerplatinen (Abschnitt 3.2.2). Erst ab der eingestellten Schwelle werden Spannungen am Signaldraht zur Ausleseelektronik weitergeleitet. Ohne diese Selektionierung wird neben den Signalen, die durch die Teilchen hervorgerufen werden, auch das Hintergrundrauschen aufgezeichnet. Für die Spurrekonstruktion ist es wichtig, dass dieses Hintergrundrauschen minimiert wird. Gleichzeitig darf die Schwelle aber auch nicht zu hoch sein, um eine ausreichende Nachweiswahrscheinlichkeit zu bekommen. Eine zu hohe Diskriminatorschwelle führt dazu, dass auch Teilchensignale nicht weitergeleitet werden und die Rekonstruktion von Teilchenspuren wird entsprechend schwieriger. Abbildung 5.8 zeigt, wie viele Kanäle in Abhängigkeit von der Schwellenspannung ein Signal abgeben. Die Zahl der Röhren, die bei einem Teilchendurchgang ein Signal liefern, ist die Multiplizität.

Am Teststand werden zwei Driftröhren-Module aus der PT-Massenproduktion übereinander verwendet. Entsprechend gibt es acht Ebenen mit Driftröhren (vergleiche Abschnitt 2.4.2). Der genaue Aufbau des Teststands sowie weitere Messungen der Multiplizität in Abhängigkeit der Diskriminatorschwelle ist in Kapitel 5 beschrieben. Da hier mit einer Hochspannung von 2350 V an den Moduldrähten gearbeitet wird, erwartet man im Idealfall, dass bei einem Ereignis acht Röhren, also in jeder Ebene eine, getroffen werden.

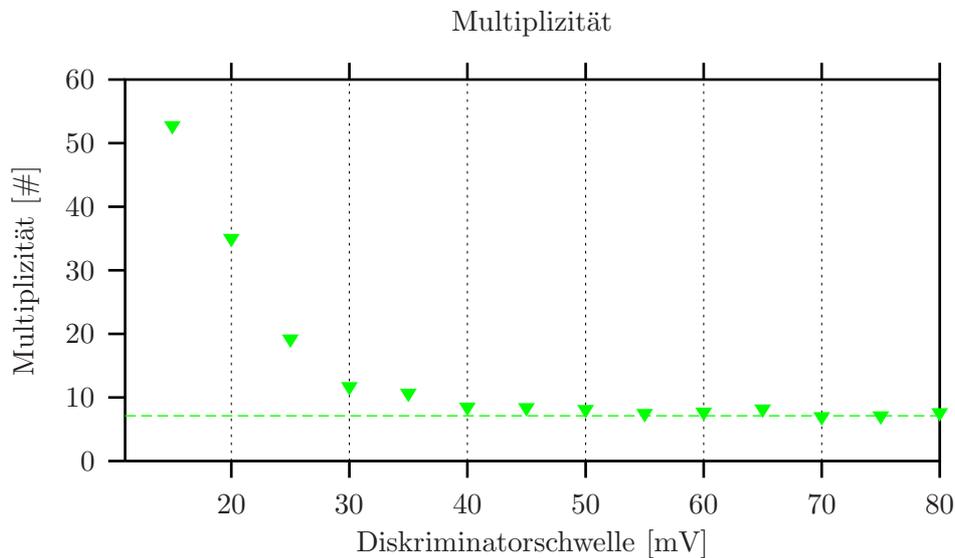


Abbildung 3.5: Multiplizität in Abhängigkeit von der Diskriminatorschwelle.

Bei niedrigeren Schwellenwerten werden kleine Spannungsschwankungen als Signal wahrgenommen und die Multiplizität nimmt entsprechend zu. Die Messung in Abbildung 5.8 bestätigt diese Erwartung. Ohne eine Schwellenspannung, also beim Aufzeichnen aller kommenden Signale, rauschen alle Röhren. Die Anzahl der Röhren die ein Signal abgeben, wenn ein Teilchen durch die Module fliegt, nimmt hierbei mit

zunehmender Schwellenspannung exponentiell ab. Ab einer Diskriminatorschwelle von etwa 50 mV pendelt sich die Trefferzahl bei etwa acht ein. Es werden also im wesentlichen nur noch die Signale aufgezeichnet, die zu einer Teilchenspur gehören. Der Wert von 50 mV bestätigt sich wiederholt als Idealwert für die Schwellenspannung in diesem Messaufbau. Sollten einzelne Röhren im laufenden Experiment dennoch ein stärkeres Rauschverhalten zeigen oder unerwartet wenige Signale durchgeben, können die Schwellen auf diesen Röhren entsprechend angepasst werden.

Kapitel 4

Temperaturkontrolle an den Driftröhren

In diesem Kapitel wird die Konzeptionen zur Temperaturüberwachung am OPERA PT vorgestellt und zunächst deren Notwendigkeit erläutert. Die Temperaturaufzeichnung erfolgt zum einen direkt über das OSUB (Kapitel 4.3) und zum anderen mit Pt100-Sensoren über ein Beckhoffsystem (Kapitel 4.4). Dabei werden Temperaturmessungen aus der Massenproduktion in Hamburg und vom Detektor im Gan Sasso sowie Messungen zur Kalibration der Temperatursensoren gezeigt.

4.1 Einfluss der Temperatur auf die Driftröhren

Die Temperatur spielt bei Driftröhrensystemen aus verschiedenen Gründen eine Rolle. Die Gasdichte und somit die Spurauflösung ist temperaturabhängig [Sew06]. Entsprechend wird der Gasfluss geregelt. Außerdem kann es durch Temperaturschwankungen und -gradienten zu Verbiegungen der Driftröhren kommen. Die Auswirkungen dieser Verbiegungen auf die Nachweiswahrscheinlichkeit und die Auflösung der PT-Module untersucht Kapitel 5. Insbesondere bei den Driftröhren innerhalb der Magneten (vergleiche Kapitel 2.4.2), wo eine größere Wärmeentwicklung zu erwarten ist, sind Temperaturgradienten nicht auszuschließen.

Ein System zur Temperaturüberwachung ist also notwendig. Dabei müssen auch Temperaturgradienten im Bereich von einem Kelvin erkannt werden, da auch schon kleine Gradienten zu Verbiegungen führen.

An den Driftröhren vom OPERA PT kann man berechnen, welcher Temperaturgradient innerhalb eines Moduls zu welcher Durchbiegung führt. Dabei ist der Gradient in Strahlrichtung relevant. Die Tiefe der Module beträgt in Strahlrichtung $b = 151,5$ mm. Die Röhren haben eine Länge von 7900 mm (L_1). Die Längendifferenz ist $\Delta l = L_1 - L_2$, wobei L_2 die Länge der durch die Temperatur verkürzten Röhre darstellt. Die Verbiegung d der Röhren ergibt sich aus

$$d = \frac{L_1}{\alpha} \left(1 - \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right). \quad (4.1)$$

Betrachtet man die Moduldicke b als Differenz der Radien der Verbiegung r_1 und r_2 und Δl als Längenänderung durch den Temperaturgradienten mit

$$\Delta l = \Delta T \cdot \alpha \cdot L_1, \quad (4.2)$$

wobei α der Wärmeausdehnungskoeffizient des Materials ist, ergibt sich die Durchbiegung der Module zu:

$$d = \frac{b}{\alpha \cdot \Delta T} \left(1 - \cos \left(\frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot L_1}{2b} \right) \right). \quad (4.3)$$

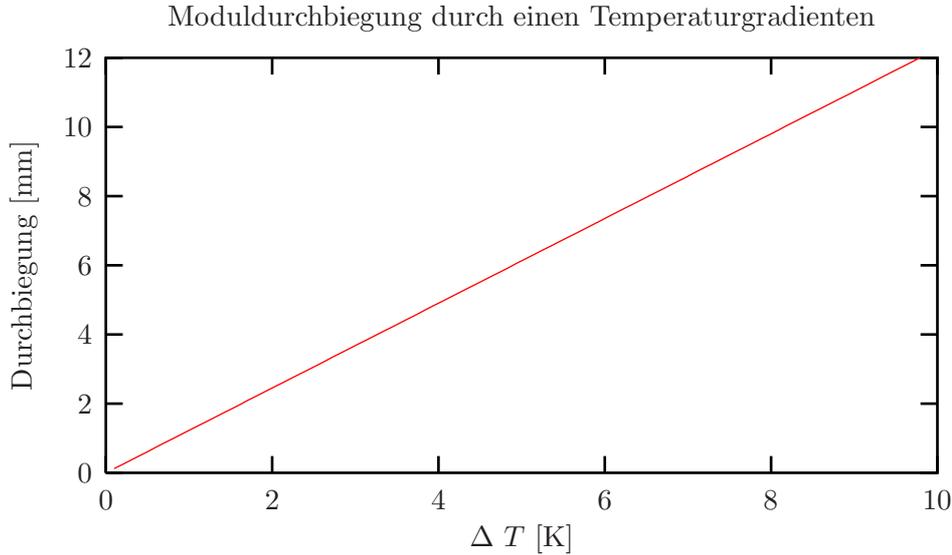


Abbildung 4.1: Durch einen Temperaturgradienten innerhalb der Module (Tiefe in Strahlrichtung gesehen) verbiegen sich die Module.

Bei einem Wärmeausdehnungskoeffizienten¹ von AlMgSi² von $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ergibt sich der Verlauf in Abbildung 4.1.

Schon bei einer Temperaturdifferenz von 2,5 K verbiegen sich die Module um etwa 3 mm. Eventuelle Temperaturgradienten innerhalb des Detektors spielen also eine große Rolle, wie in Kapitel 5 durch Messungen gezeigt wird.

4.2 Elektronische Temperaturmessung

Die Temperatur ist eine wichtige physikalische Zustandsgröße. Die Messung der Temperatur kann durch verschiedene Methoden erfolgen. Meistens wird die Ausdehnung von Stoffen bei höheren Temperaturen ausgenutzt. Bei Widerstandsthermometern misst man über einen temperaturabhängigen elektrischen Widerstand. Große Widerstandsänderungen hat man bei reinen Metallen. Man unterscheidet Heiß- und Kaltleiter. Bei Heißleitern nimmt der Widerstand mit zunehmender Temperatur ab. Sie werden auch NTC-Widerstände³ genannt. Kaltleiter sind PTC-Widerstände⁴. Bei ihnen steigt der elektrische Widerstand mit zunehmender Temperatur. Zu den Kaltleitern gehört beispielsweise das Metall Platin.

Aus dem Widerstandswert wird die Temperatur ermittelt. Betreibt man die Sensoren mit zwei Leitungen, spielen auch die Widerstände der Zuleitungsdrähte und Kontaktstellen eine Rolle (2-Leitermessungen). Um diesen Einfluss zu minimieren, werden

¹bei 20°C

²AlMgSi: typische Aluminium-Legierung, aus der die Driftröhren bestehen.

³Negative Temperature Coefficient

⁴Positive Temperature Coefficient

zusätzliche Leitungen zum Messen der Spannung auf der Messleitung verwendet. Bei diesen 3-Leitermessungen wird angenommen, dass die Widerstände der Zuleitungen gleich groß sind. Für genaue Temperaturmessungen wird 3-Leitertechnik verwendet. 2-Leitertechnik ist eine einfachere, aber entsprechend ungenauere Methode.

Messungen mit Platinsensoren Pt100-Sensoren haben einen positiven Temperaturkoeffizienten und einen charakteristischen Widerstand⁵ von $R_0 = 100 \Omega$ bei $T_0 = 0^\circ\text{C}$. Sie bestehen aus Platin (Pt) und folgen der Norm DIN EN 60751 [DIN96]. Danach gibt es verschiedene Güteklassen, die in Tabelle 4.1 aufgezeigt sind. Für Sensoren werden oft Bruchteile der Norm angegeben. 1/10 Klasse B bedeutet entsprechend 1/10 der genannten Fehlerwerte.

Klasse	Temperaturbereich	ΔT [K]
A	-200°C bis +600°C	$\pm 0,15 \pm 0,002 \cdot T [^\circ\text{C}]$
B	-100°C bis +200°C	$\pm 0,3 \pm 0,005 \cdot T [^\circ\text{C}]$
1/10 B	-100°C bis +200°C	$\pm 0,03 \pm 0,0005 \cdot T [^\circ\text{C}]$

Tabelle 4.1: Maximale Temperaturfehler von Pt100-Sensoren nach DIN 60751.

Platinsensoren werden in verschiedenen Bauformen hergestellt. Dazu zählen unter anderem die Foliensensoren. Der Platinwiderstand befindet sich dabei als massiver Draht zwischen zwei Polyimidfolien. Er ist so gewickelt, dass er die Fläche des biegsamen Sensors gut bedeckt. Sie eignen sich besonders zur Messung an Oberflächen. Da die Temperatur unter anderem direkt an den Driftröhren gemessen werden soll, werden solche Foliensensoren genutzt [Jum05]. Diese werden direkt auf die Röhren geklebt und passen sich dabei der Form der Röhren an. Schaumstoff verhindert den Einfluss von Luftströmungen bei der Messung. Es handelt sich um Platinsensoren, die zur Klasse 1/10 B gehören. Sie sind zwischen -80°C und $+180^\circ\text{C}$ einsetzbar.

4.3 Messungen per OSUB

Die Möglichkeit der elektronischen Temperaturmessung ist in das OSUB integriert. Hierdurch kann die Temperatur der Elektronik und beliebiger anderer Punkte im Detektor überwacht werden. Siliziumsensoren vom Typ KTY81-110 können direkt an die Preamplifierboards angeschlossen werden. Dadurch ergibt sich eine einfache Möglichkeit der Temperaturmessung, da eine komplizierte Verkabelung entfällt. Die Sensoren können beliebig in Modulnähe verteilt werden. Sie decken einen Bereich von 0°C bis 100°C ab und haben einen positiven Temperaturkoeffizienten. Es wird in 2-Leitertechnik gearbeitet.

Die Abhängigkeit der Temperatur vom Widerstand wird in der Kennlinie aufgetragen. Die Kennlinie ist allerdings nicht linear, sondern leicht S-förmig. Der Widerstandswert bei $T_0 = 25^\circ\text{C}$ beträgt $R_0 = 1000 \Omega$. Dabei ist der Fehler $\Delta T = \pm 1,27 \text{ K}$ [Phi98]. Für den Widerstand des Temperatursensors gilt:

$$R_T = R_0 \cdot \left(1 + \alpha (T - T_0) + \beta (T - T_0)^2 \right). \quad (4.4)$$

Hierbei ist $\alpha \approx 7,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ und $\beta \approx 1,7 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-2}$. Der Schaltkreis aus Abbildung 4.2 ist auf den Preamplifierboards integriert und linearisiert die Abhängigkeit der

⁵Pt1000-Sensoren haben analog dazu einen charakteristischen Widerstand von $R_0 = 1000 \Omega$ bei $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

Ausgangsspannung U_A von der Temperatur nahezu.

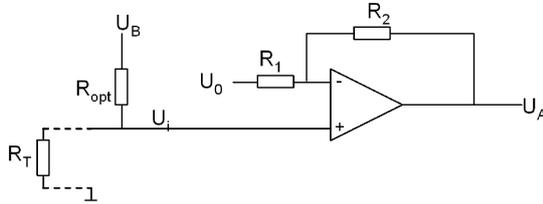


Abbildung 4.2: Schaltbild für die Temperaturmessung am OSUB. R_T ist der Widerstand der Sensoren, der sich mit der Temperatur ändert. Diese kann dann durch die Ausgangsspannung U_A ermittelt werden.

Für die Ausgangsspannung gilt:

$$U_A = U_i \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_0 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right), \quad (4.5)$$

wobei die Innenspannung

$$U_i = \frac{R_T}{R_T + R_{opt}} \cdot U_B. \quad (4.6)$$

Die Kombination von Gleichung 4.5 und 4.6 ergibt mit $v = R_2/R_1$:

$$U_A = (1 + v) \cdot U_B \cdot \frac{R_0 (1 + \alpha x + \beta x^2)}{R_0 (1 + \alpha x + \beta x^2) + R_{opt}} - v \cdot U_0 \quad (4.7)$$

Die Schaltung wird mit folgenden Werten realisiert:

$$R_{opt} = 3,17 \text{ k}\Omega, U_0 = 1,055 \text{ V}, R_1 = 10,1 \text{ k}\Omega, R_2 = 68 \text{ k}\Omega, v = 6,733, U_B = 4,5 \text{ V}$$

In Tabelle 4.2 sind die Ausgangsspannungen U_A für verschiedene Temperaturen T aufgezeigt. Die Temperatur wird von ADCs⁶ mit 5 V Eingangsspannung gemessen. Diese haben eine Auflösung von 10 Bit ($2^{10} = 1024$). Es ergibt sich die Kalibrierungsfunktion

$$T_m [^\circ\text{C}] = \frac{U_A [\text{mV}]}{50 \text{ mV}} [^\circ\text{C}], \quad (4.8)$$

mit der man die gemessenen Temperaturwerte T_m berechnen kann.

$T [^\circ\text{C}]$	$R_T [\text{k}\Omega]$	$U_A [\text{V}]$	$T_m [^\circ\text{C}]$	$\Delta T [^\circ\text{C}]$
0	0,815	0,014	0,27	0,27
10	0,886	0,498	9,96	-0,04
20	0,961	0,992	19,84	-0,16
25	1,000	1,242	24,83	-0,17
30	1,040	1,493	29,86	-0,14
40	1,122	1,994	39,87	-0,13
50	1,209	2,504	50,08	0,08

Tabelle 4.2: Temperaturabhängigkeit der Ausgangsspannung U_A .

⁶Analog Digital Converter

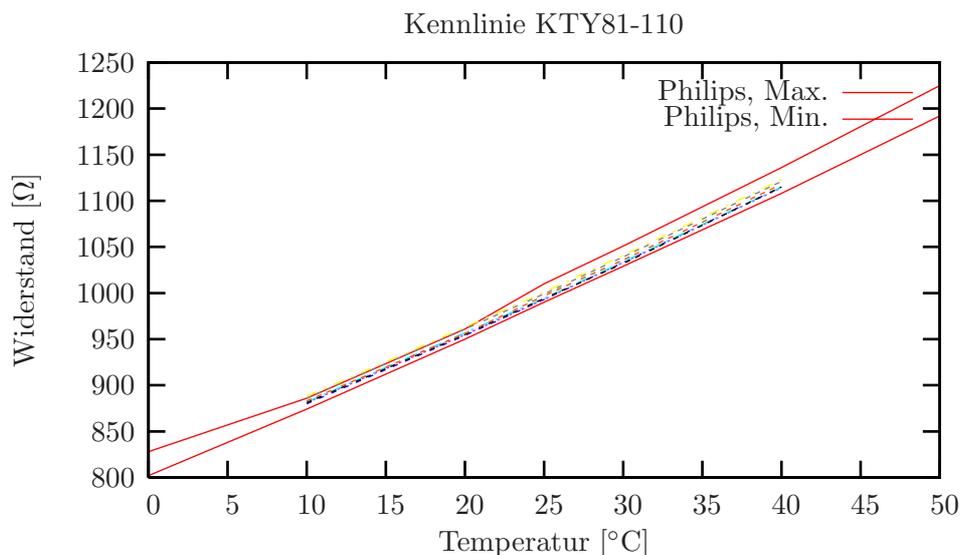


Abbildung 4.3: Kennlinie von Siliziumsensoren KTY81-110. Eingezeichnet sind gemessene Werte für vier Sensoren sowie die Minimal- und Maximalwerte nach [Phi98].

Die KTY81-110-Sensoren haben eine Toleranz von 1% bei 1000 Ω , also bei 25°C. Das entspricht einem Fehler der Temperatur von $\Delta T = 1,27^\circ\text{C}$.

Zur Kalibrierung wird ein Wasserbad der Firma Haake verwendet. Dabei kann die Temperatur geregelt werden. Eine Umwälzpumpe sorgt für eine gute Durchmischung und verhindert so Temperaturgradienten innerhalb des Wasserbades. Die Widerstandswerte werden für einzelne Sensoren bei festen Temperaturen gemessen und die Werte in der Kennlinie in Abbildung 4.3 aufgetragen. Sie liegen alle in den Bereichen der nach [Phi98] angegebenen Maximal- und Minimalwerte.

Die OSUB-Temperaturmessung wird per CAN ausgelesen wie in Kapitel 3 beschrieben. Am Detektor im Gran Sasso gibt es drei PT-Wände mit 15 und neun Wände mit 17 Modulen (vergleiche Abschnitt 2.4.2). Jedes Modul hat vier Preamplifierboards. Da pro Preamplifierboard ein Temperaturanschluss mit 2-Leitertechnik vorliegt, können am Gran Sasso bis zu 792 KTY81-Sensoren angeschlossen werden. Geplant ist vorerst, 100 Sensoren zu installieren. Diese können beliebig im Detektor verteilt werden und die Temperatur beispielsweise an den Driftröhren oder der Elektronik aufzeichnen. Sollten später zur Überwachung weitere Sensoren benötigt werden, können diese einfach ergänzt werden, da entsprechend freie Anschlüsse an den Preamplifierboards am PT vorliegen. Da diese in zwölf Wänden über den gesamten Detektor verteilt sind, kann die nachträgliche Installation ohne komplizierte Verkabelung erfolgen.

Erste Messungen mit KTY81-Sensoren über das OSUB laufen am Gran Sasso. Abbildung 4.4 zeigt exemplarisch den Verlauf der Temperatur am OPERA-Detektor. Dabei ist zu erkennen, dass die Temperatur in der Halle sehr konstant ist. Ein Sensor zeigt einen höheren Wert, da er direkt auf der Elektronik liegt.

4.4 Dreileitermessungen

Feldbuskomponenten der Firma Beckhoff können verschiedene digitale und analoge Signale senden beziehungsweise empfangen und bieten ein umfangreiches Potenti-

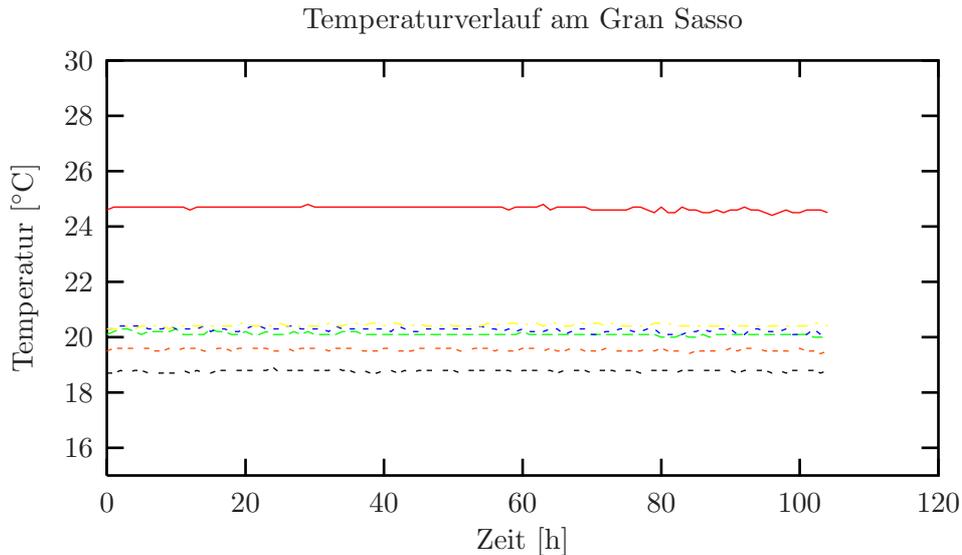


Abbildung 4.4: Temperaturverlauf am Gran Sasso mit KTY-81-Sensoren per OSUB gemessen. Ein Sensor liegt auf der Elektronik und hat entsprechend einen höheren Wert. Insgesamt ist die Temperatur nahezu konstant in der Halle.

al, automatisierte Steuerungstechnik zu realisieren. Mit den Busklemmen KL3202 [Bec05] werden die analogen Signale von Pt100-Sensoren direkt ausgelesen. Ein Mikroprozessor in der Klemme linearisiert über den gesamten Temperaturbereich. Es kann in 2- oder 3-Leitertechnik gearbeitet werden (siehe Abschnitt 4.2). Eventueller Drahtbruch wird durch rote Leuchtdioden (LEDs) angezeigt. Pro Klemme können zwei Sensoren ausgelesen werden. Sensoren der Klasse 1/10 B werden verwendet. Temperaturkontrollsysteme mit 3-Leitermessungen sind für den PT im Gran Sasso und für die Massenproduktion in Hamburg realisiert. Eine genaue Auflistung der zur Temperaturkontrolle verwendeten Geräte und Sensoren befindet sich im Anhang B.

4.4.1 Temperaturmessungen bei der Massenproduktion

Neben der Temperaturmessung am OPERA-Detektor wird auch die Temperatur bei der Massenproduktion der PT-Module in Hamburg überwacht. Dabei sind fünf Platinsensoren installiert. Temperaturschwankungen und resultierende Biegungen sollen so schon bei der Produktion der Driftröhren-Module erkannt beziehungsweise vermieden werden. Außerdem ist die Temperaturüberwachung bei Dichtigkeitstests der neu gefertigten Module notwendig.

Es wird ein Beckhoff-Buscontroller BC9000 [Bec06] zusammen mit drei Temperaturklemmen KL3202 verwendet. Die Sensoren sind an langen Kabeln angebracht und können so beliebig positioniert werden. Sie werden in 3-Leitertechnik betrieben. Der Buscontroller ist per Ethernet an das lokale Netzwerk angeschlossen. Das Auslesen der Daten von den Sensoren kann also von verschiedenen Standorten erfolgen. Abbildung 4.5 zeigt exemplarisch einen Verlauf der Temperatur bei den Sensoren der Massenproduktion über ein Wochenende. Um Fehler zu minimieren, sind auch diese Sensoren mit Hilfe eines Wasserbades kalibriert worden.

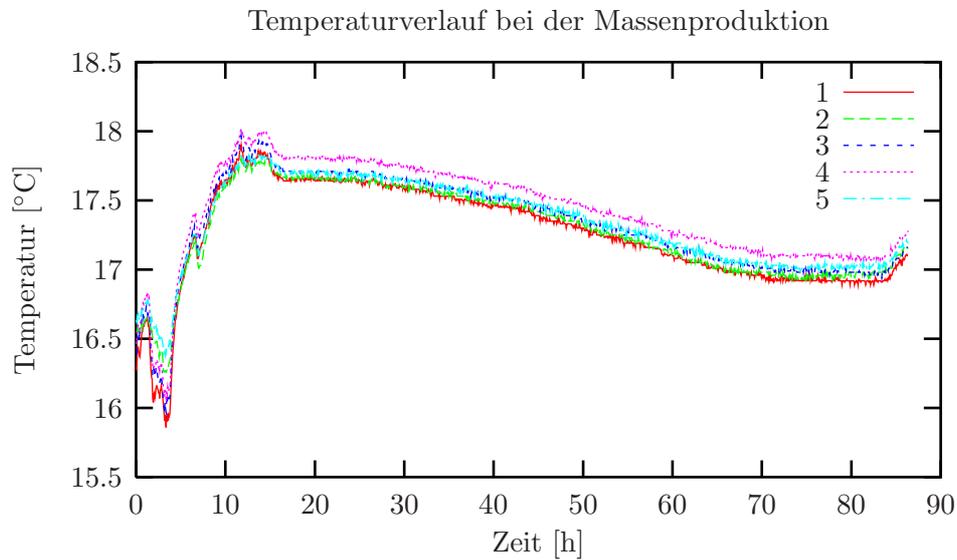


Abbildung 4.5: Temperaturverlauf bei der Massenproduktion. Hier aufgezeichnet ist die Temperatur der fünf Sensoren beim Montagetisch über ein Wochenende.

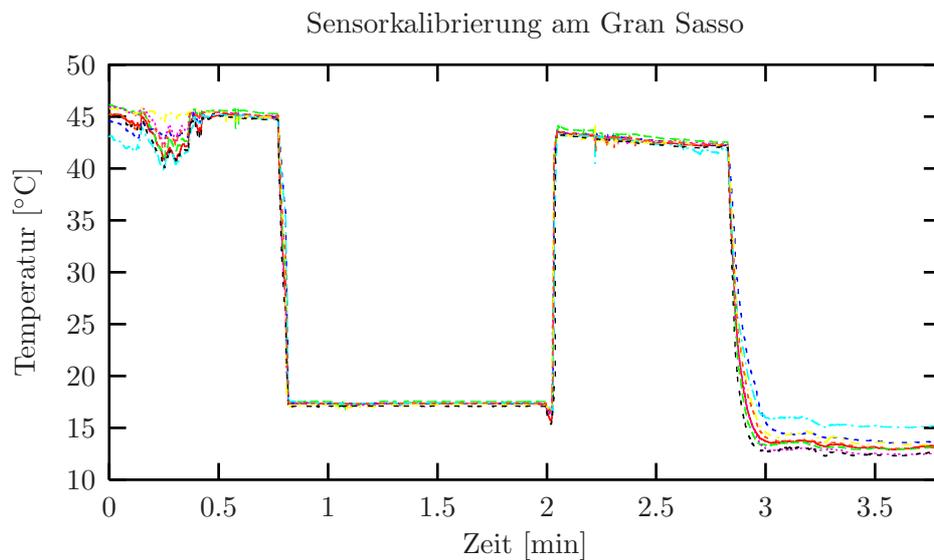


Abbildung 4.6: Kalibrierung am Gran Sasso. Verwendet werden ein kaltes und ein warmes Wasserbad. Ein kleiner Temperaturabfall beim Zeitpunkt 2 Minuten zeigt die Verdunstungskälte beim Herausnehmen der Sensoren aus dem Wasserbad.

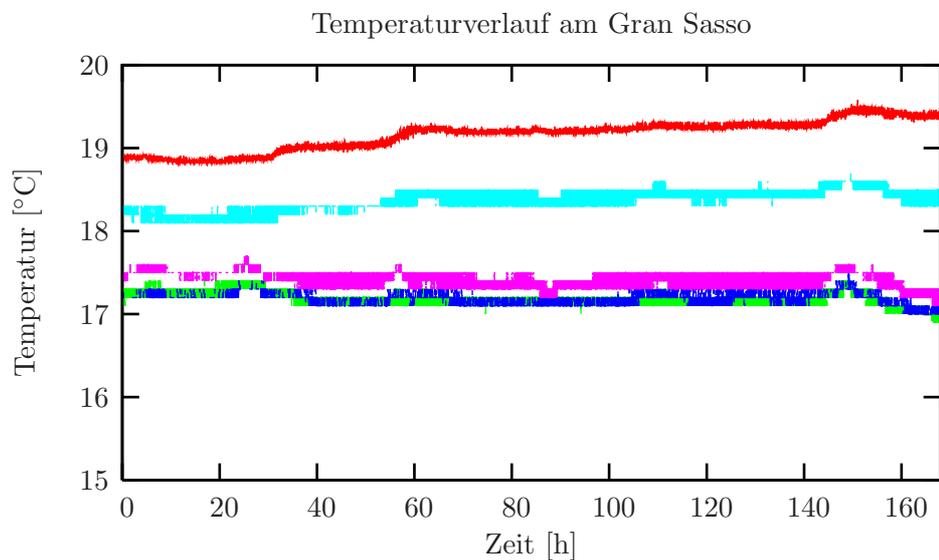


Abbildung 4.7: Temperaturverlauf am Gran Sasso mit Pt100-Sensoren. Die Datennahme erfolgt hier über ein Beckhoff-System.

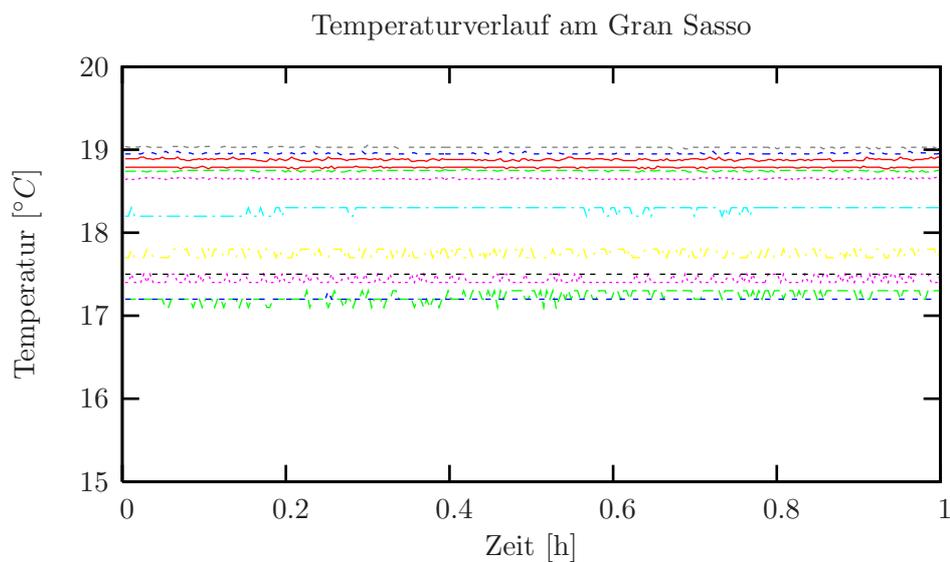


Abbildung 4.8: Temperaturverlauf am Gran Sasso mit Pt100-Sensoren. Der Ausschnitt zeigt nur eine Stunde, so dass kleine Schwankungen sichtbar werden.

4.4.2 Temperaturmessungen am Gran Sasso

Die Temperaturklemmen für das Überwachungssystem am Gran Sasso werden in das Gassystem integriert, also über den Buscontroller des Gassystems ausgelesen. Insgesamt werden 16 Foliensensoren und entsprechend acht Klemmen verwendet. Die Sensoren werden an jeweils gleichlange Kabel gekrimpt und nicht gelötet, um zusätzliche Kontaktspannungen gering zu halten. Dennoch sind Fehler durch unterschiedliche Widerstände in den Kabeln und durch Kontaktstellen unvermeidbar. Zur Kalibrierung werden zwei Wasserbäder verwendet, wie in Abbildung 4.6 zu sehen ist. Ein Wasserbad ist mit wärmerem Wasser gefüllt, eines mit kälterem. Die ermittelten Abweichungswerte dieser sogenannten Vergleichskalibrierung werden gemittelt und in die Temperaturaufzeichnung eingerechnet.

Abbildung 4.7 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf am OPERA-Detektor. Aufgezeichnet sind hier 16 installierte Sensoren an PT 1 und PT 2. Die Grafik zeigt den Verlauf über eine Woche (Start 23. November 2005, 15:30 Uhr). Dabei ist zu erkennen, dass die Temperatur in der Halle C, in der der OPERA-Detektor im Aufbau ist, einen annähernd konstanten Verlauf zeigt.

Einen Ausschnitt aus Abbildung 4.7 von nur einer Stunde zeigt Abbildung 4.8. Hier sind minimale Temperaturschwankungen erkennbar.

Interessant wird die Temperaturaufzeichnung, wenn weitere elektronische Geräte eingeschaltet werden. Insbesondere die Temperaturentwicklung an den Driftröhren innerhalb des Magneten ist relevant, da hier die größte Wärmeentwicklung erwartet wird. Falls dabei Temperaturgradienten innerhalb der Module entstehen, kommt es zu Durchbiegungen der Röhren. Im Falle eines Gradienten von Magnetseite zur Innenseite der beiden Driftrohren Ebenen erwartet man eine Durchbiegung der Module in Strahlrichtung. Messungen mit solchen Durchbiegungen, die am Teststand eingestellt werden können, beinhaltet das folgende Kapitel.

Kapitel 5

Messungen am Teststand

In diesem Kapitel werden Messungen an Modulen des OPERA Precision Tracker vorgestellt. Die OPERA-Arbeitsgruppe betreibt zwei Teststände mit 1 m (*kleiner Teststand*) beziehungsweise 8 m langen Modulen (*großer Teststand*). Die langen Module wurden ursprünglich wie im Experiment in Italien hängend verwendet. Im neuen Aufbau sind sie waagrecht gelagert. Zunächst wird der komplette Teststand beschrieben und die Funktionsweise von Elektronik und Software erklärt. Erste Messungen mit unterschiedlichen Hoch- und Betriebsspannungen sowie Diskriminatorschwellen ermitteln einen optimalen Arbeitspunkt.

Abschnitt 5.2 zeigt dann Messungen mit Driftröhren unterschiedlicher Durchbiegung. Die ersten am Gran Sasso installierten Röhren zeigen eine Durchbiegung, die stärker ist, als man zunächst erwartet hatte¹. Weitere Durchbiegungen, etwa durch Temperaturgradienten innerhalb der Module wie in Abschnitt 4 beschrieben, können nicht ausgeschlossen werden. Bei Durchbiegung der Röhren liegt der Signaldraht nicht mehr mittig im Rohr, da er an den Endplatten fest eingespannt ist. Das elektrische Feld ist also nicht mehr exakt radialsymmetrisch. Mit dieser Arbeit wird der Einfluss der Durchbiegung auf Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung der Driftröhren untersucht.

5.1 Der große Teststand

Der große Teststand besteht aus zwei übereinanderliegenden Modulen aus der PT-Massenproduktion. Entsprechend stehen 96 Röhren zur Auswertung von Teilchenspuren zur Verfügung (vergleiche Abschnitt 2.4.2).

Als Trigger (Signalgeber) dienen zwei Szintillatoren oberhalb und unterhalb der Module, die in Koinzidenz betrieben werden. Wenn Teilchen durch das Szintillatormaterial fliegen, werden im Szintillator Photonen emittiert [All71]. Photomultiplier wandeln die Photonen in ein elektrisches Signal um und vervielfachen dieses. Eine 10 cm dicke Schicht aus Bleiziegeln verhindert die Signalgebung bei niederenergetischer Strahlung. Das Blei befindet sich dafür zwischen den Szintillatoren direkt unterhalb der Module. Teilchen, die nicht ausreichend ionisieren, um Signale von den Driftröhren zu erzeugen, werden im Blei absorbiert und können so keinen Trigger auslösen. Als Quelle dienen bei den Testständen kosmische Myonen.

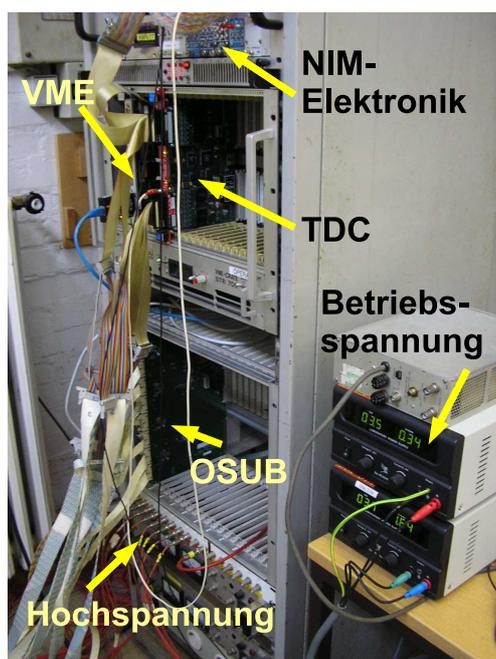


Abbildung 5.1: Die Elektronik am großen Teststand. Die Konizidenzschaltung mit NIM-Elektronik befindet sich am oberen Bildrand. Darunter ist der TDC und der VME-Controller, der über ein Netzkabel bootet und die Datenauslese ermöglicht. Die Signale von den Modulen kommen über ein Breitbandkabel direkt an den TDC. Darunter befindet sich ein OSUB, mit dem die Diskriminatorschwellen eingestellt werden. Unten im Bild sieht man einen Hochspannungsverteiler, über den die Module mit Hochspannung versorgt werden. Rechts sind die Betriebsspannungsgeräte.

5.1.1 Aufbau

Die Signale der Szintillatoren gehen zunächst über einen Diskriminator auf eine UND-Schaltung (Koinzidenz).

Es werden also nur Signale weitergegeben, wenn durch beide Szintillatoren ein Teilchen fliegt, dieses also auch die Module durchquert. Die Szintillatoren haben eine Fläche von etwa $50 \text{ cm} * 50 \text{ cm}$. Damit decken sie die Module gut ab. Allerdings muss in der Auswertung beachtet werden, dass sie so nur Teilchen in einem bestimmten Winkelbereich detektieren können. Bei dem Abstand der Szintillatoren von ungefähr 60 cm ergibt sich ein maximaler Winkel von etwa 40° für Teilchen, die diagonal durch die Module fliegen und die Szintillatoren noch an den Ecken durchqueren. Außerdem ist es entsprechend unwahrscheinlicher, dass Röhren am Rand getroffen werden. Durch diesen Aufbau, Fläche und Szintillatorabstand bedingt, ergibt sich eine Triggerrate von etwa 6 Hz .

Den Aufbau der Elektronik verdeutlicht Abbildung 5.2. Das Signal aus der UND-Schaltung wird weiter in einen Gate Generator geleitet. Mit dem Gate Generator ist es möglich, von NIM²-Signalen sowohl die Signalzeit als auch die Pulspausenzeit zu verändern. Hier wird eine Verzögerungszeit (Delay) so eingestellt, dass der Trigger in den Zeitbereich des TDC³ fällt, der die Zeitsignale ausliest und digitalisiert. Ein NIMtoLVDS-Converter wandelt die NIM-Signale in LVDS⁴-Signale um, die zum TDC gehen und Kanal 96 darstellen. Diese dient als Zeitreferenz, ist also der Zeitpunkt des Teilchendurchgangs. In die Kanäle 0 bis 95 vom TDC kommen die Signale von den beiden Modulen, also den 96 vorhandenen Driftröhren. Auf einem VME⁵-Controller, der im gleichen Crate ist, läuft das entsprechende Messprogramm.

¹Am Gran Sasso werden die Positionsmessungen mit Hilfe von Theodoliten durchgeführt.

²Nuclear Instrumentation Modules

³Time-to-Digital Converter

⁴Low Voltage Differential Signaling

⁵VME: VERSAcArD Modified for Eurocard, ein BUS-Standard der die Kommunikation verschiedener Computer und Elektronikkomponenten regelt.

Der VME–Controller ist ein PC, der über ein Netzwerk von einem entsprechend eingerichteten Server bootet, da er keine eigene Festplatte besitzt. Auf dem Server ist ein Unterverzeichnis als virtuelle Festplatte eingerichtet. Die Meßdaten werden auf diesem PC gespeichert.

Als TDC dient am Teststand ein kommerzieller TDC der Firma CAEN. Für den PT am Gran Sasso werden mehrere TDCs benötigt und speziell für OPERA entwickelt. Dies ist kostengünstiger und die OPERA TDCs können den speziellen Erfordernissen angepasst werden. Sie befinden sich am PT in den Crates zusammen mit den OSUBs. In jedem Crate befindet sich zusätzlich ein OPERA Trigger Board (OTB) [SvS06], das die TDCs in dem Crate mit dem Trigger, generiert aus Signalen von den RPCs versorgt. Das Triggerkonzept des PT beschreibt [Fel05]. Der PT besteht aus 198 Modulen (vergleiche Abschnitt 2.4.2). Da jedes Modul durch vier Preamplifierboards ausgelesen wird und ein OSUB bis zu acht Preamplifierboards ansprechen kann, gibt es am PT insgesamt 99 OSUBs verteilt auf zwölf Crates. Das Steuern der Diskrimina-

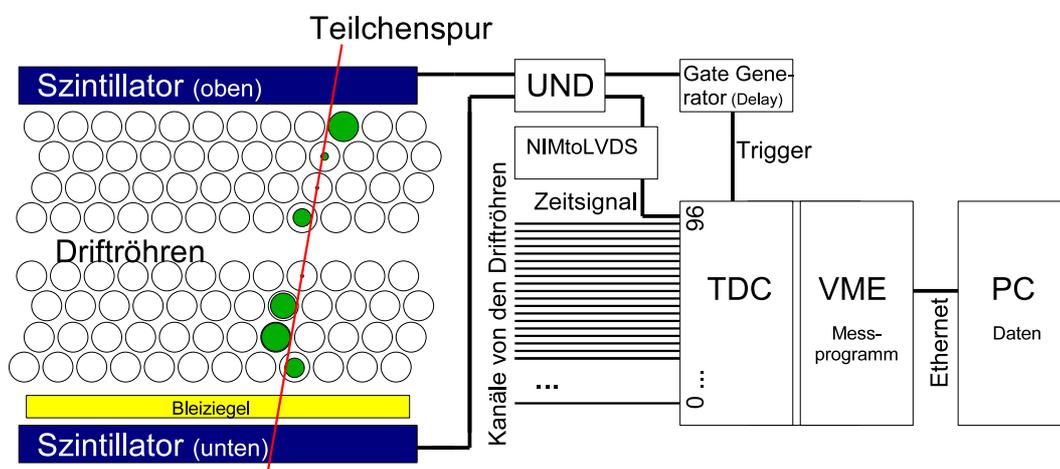


Abbildung 5.2: Skizze des Teststandes. Trifft durch beide Szintillatoren ein Teilchen (UND), wird über den Gate Generator der Trigger ausgelöst. Die Zeitsignale aus den Röhren und das zeitliche Referenzsignal von den Szintillatoren wird im TDC eingelesen. Mit einem Messprogramm auf dem VME–Controller werden die Daten auf einen PC gespeichert.

torschwellen am Teststand erfolgt, unabhängig von der Elektronik zur Datennahme, wie in Kapitel 3 beschrieben über das OSUB. Die Boards werden mit einstellbarer Betriebsspannung versorgt. Eine genaue Auflistung der am Teststand verwendeten Geräte befindet sich im Anhang B.

5.1.2 Parameter des Teststands

Aus den Rohdaten der Messungen, in denen Kanalnummer und Driftzeiten kodiert sind, kann man das Driftzeitspektrum bestimmen. Trifft ein Teilchen durch eine Röhre, bilden sich mehrere Cluster und es werden entsprechend mehrere Zeitsignale pro Kanal gespeichert. Abbildung 5.3 zeigt ein typisches Driftzeitspektrum für die OPERA–Driftröhren. Hierbei sind 500.000 Events aufgezeichnet. Die Anstiegsflanke beim Zeitpunkt Null stellt die Drahtposition dar. Die maximale Driftzeit in den Röhren mit einem Durchmesser von 38 mm beträgt hier etwa 1500 ns. Zwischen 500 und 1500 ns verläuft das Spektrum annähernd konstant. Zum Draht nimmt das

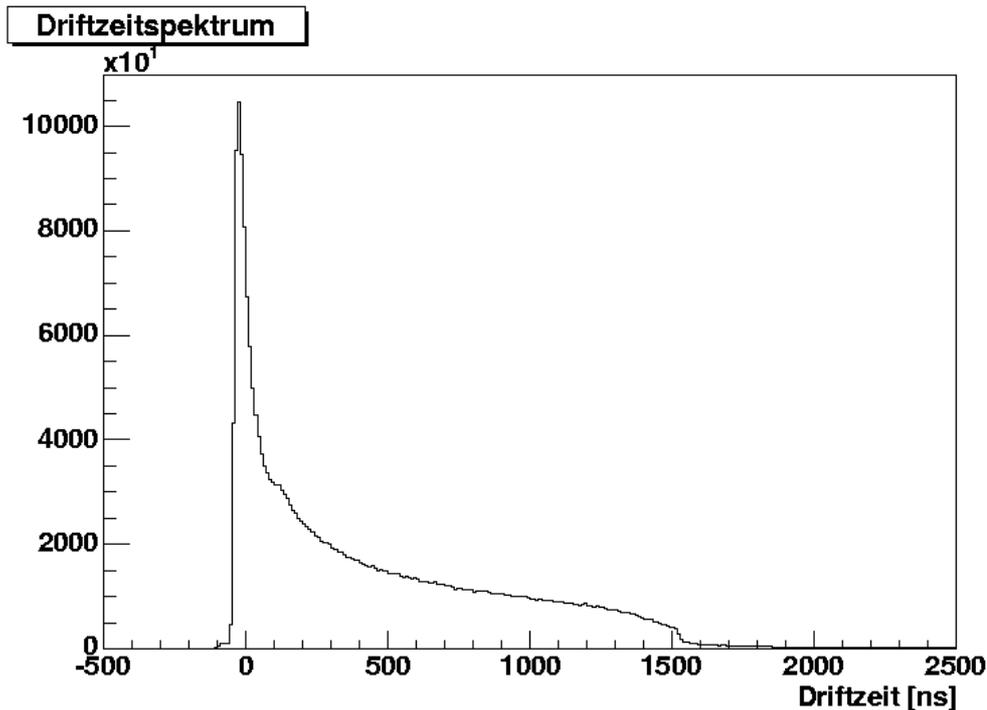


Abbildung 5.3: Driftzeitspektrum einer Messung mit 500.000 Events. Die maximale Driftzeit in den Röhren beträgt etwa 1500 ns.

elektrische Feld zu und die Zahl der Einträge steigt entsprechend stark an. Einträge oberhalb von 1500 ns können als Rauschen interpretiert werden. Wie oft die einzelnen Kanäle bei der Messung insgesamt getroffen werden, zeigt Abbildung 5.4. Deutlich zu erkennen sind die acht Ebenen von Driftröhren. Die Kanäle von Röhren in der Mitte der Module werden häufiger getroffen. Das ist durch die Geometrie des Aufbaus begründet. Die Szintillatoren bedecken die Module nur annähernd. Die kosmischen Teilchen kommen in einer bestimmten Winkelverteilung ($\cos^2\alpha$) durch die Module. Die Röhren an den Seiten können aber nur Teilchen detektieren, die entlang der Röhren gesehen senkrecht durch die Module fliegen, da nur dann beide Szintillatoren getroffen werden und der Trigger ausgelöst wird. Abbildung 5.5 verdeutlicht diese Einschränkung. Die Kanäle 0 bis 95 sind die Signale aus den beiden Modulen. Kanal 96 zeigt den Trigger, der bei jedem Ereignis ein Signal abgibt. Auffällig häufig spricht Kanal 12 an. Ein Rauschen in diesem Kanal ist die wahrscheinlichste Ursache. Kanal 49 hingegen hat ein relativ schlechtes Ansprechverhalten. Aus den Daten kann die Driftzeit–Ort–Beziehung ermittelt werden [Zim99]. Der Ort gibt hierbei den Radius um den Draht an, den das Teilchen tangential berührt hat. Für jedes Ereignis kann also Kanalnummer und Radius für alle getroffenen Kanäle bestimmt werden. Durch die bekannten Positionen der Driftröhren, zumindest relativ zueinander, kann man die Ereignisse im Eventdisplay darstellen. Ein exemplarisches Event zeigt Abbildung 5.6. In diesem Fall wird leicht eine Teilchenspur rekonstruiert. Die Multiplizität gibt an, wie viele Röhren bei einem Ereignis ein Signal abgegeben haben (vergleiche Abschnitt 3.3). Abbildung 5.7 zeigt die Multiplizität für eine Messung mit 500.000 Events. Im Idealfall erwartet man, dass ein Teilchen, das von oben durch die acht Modulebenen fliegt, auch acht Röhren trifft. Im Mittel zeigt sich hier auch etwa diese Erwartung.

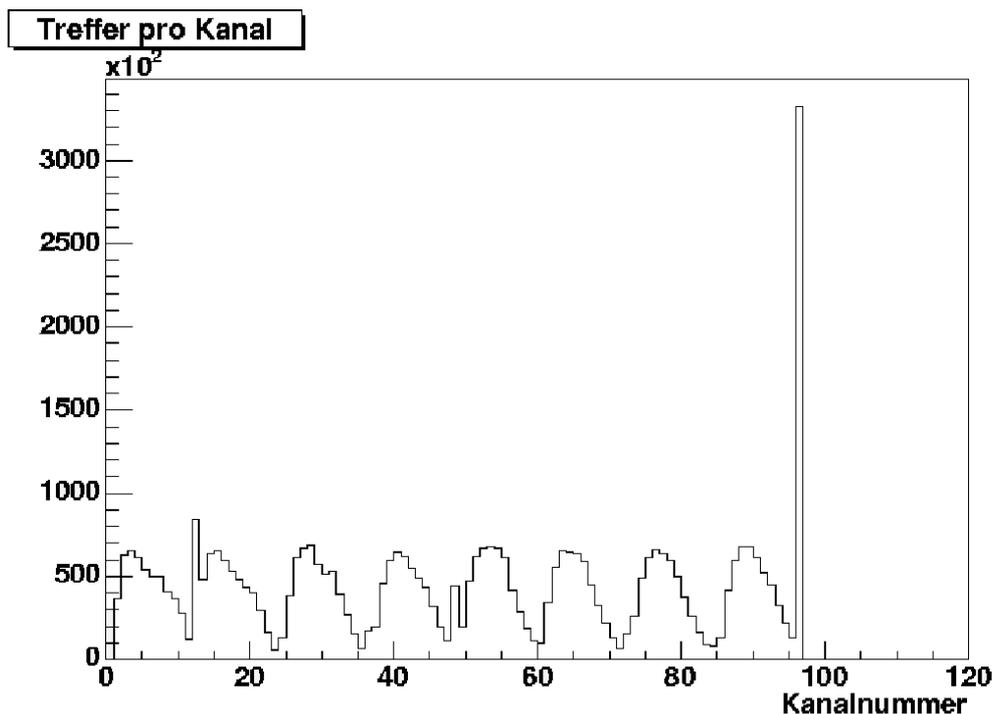


Abbildung 5.4: Treffer pro Kanal. An den Kanälen 0 bis 95 kommen die Signale der Driftröhren an. Kanal 96 ist der Triggerkanal.

Zwei wichtige Größen zur Beurteilung der Detektorqualität sind die Nachweiswahrscheinlichkeit und die Auflösung:

Nachweiswahrscheinlichkeit Eine wichtige Größe für die Beurteilung der Detektorqualität ist die Nachweiswahrscheinlichkeit. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für einzelne Röhren gibt an, wie oft die Röhre prozentual anspricht, wenn eine Spur durch diese Röhre rekonstruiert werden kann. Zur Nachweiswahrscheinlichkeitsbestimmung werden eine oder mehrere Röhren, die mittig im Modul sind, gewählt, da diese aufgrund der Szintillatorposition häufiger getroffen werden und homogen ausgeleuchtet sind. In der Auswertung wird hierfür Röhre Nummer 68 herangezogen, die sich mittig im oberen Modul befindet.

Auflösung Da die Ortsauflösung beim Teilchendurchgang direkte Auswirkung auf die Impulsbestimmung hat (vergleiche Gleichung 2.23 in Abschnitt 2.5), spielt die Ortsauflösung eine wesentliche Rolle. Sie wird durch die Genauigkeit der Mechanik und der Zeitmessung sowie durch Primärionisation beeinflusst. Für den PT wird eine durch die Zeitmessung bedingte maximale Ortsauflösung von $300 \mu\text{m}$ gefordert [Zim05].

5.1.3 Variation der Diskriminatorschwellen

Abbildung 5.8 zeigt Messungen der Multiplizität in Abhängigkeit von der Diskriminatorschwelle mit unterschiedlichen Hochspannungen. Unterhalb einer Schwelle von 50 mV nimmt das Rauschen stark zu. Oberhalb pendelt sich die Anzahl bei 0 Kanälen ein, wenn nur eine niedrigere Hochspannung (Messungen mit 500 V beziehungsweise

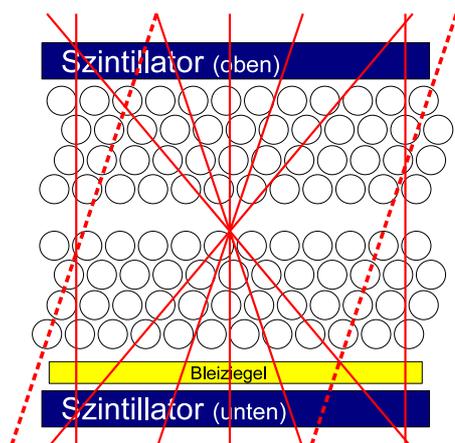


Abbildung 5.5: Nur wenn durch die Szintillatoren der Trigger ausgelöst wird, findet die Aufzeichnung des Events statt (durchgezogene Linien). Die Spur wird entsprechend nicht detektiert, wenn nur ein Szintillator getroffen wird (gestrichelte Linien). Die Röhren an den Seiten werden so seltener aufgezeichnet (vergleiche Abbildung 5.4).

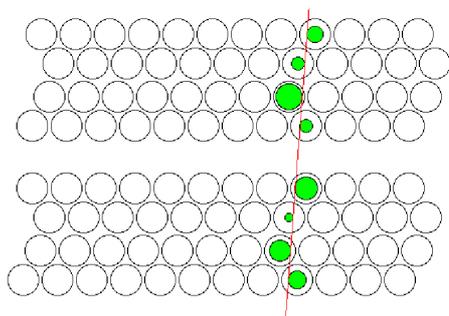


Abbildung 5.6: Ein Event am großen Teststand. Aus den Zeitsignalen, die der TDC ausgibt wird die Entfernung vom Draht bestimmt, also der Radius ermittelt, den die Teilchenbahn berührt. In diesem *Eventdisplay* wird der Teilchendurchgang graphisch dargestellt.

1000 V) an den Modulen anliegt. Bei einer Arbeitsspannung von 2350 V erwartet man, dass im Idealfall acht Röhren von einem Teilchen getroffen werden. Entsprechend sind die Werte für diese Messung.

Unterhalb von 15 mV bleibt die Multiplizität etwa konstant. Dabei liegt deren Wert bei einer kleineren Zahl von Ereignissen (Messung mit 100 statt 1000 Ereignissen) deutlich höher. Dieser Verlauf hat keine physikalische Ursache, sondern resultiert aus der Bandbreite des Netzes bei der Dateneinlese. Unterhalb von 15 mV rauschen nahezu alle Röhren so stark, dass nicht alle Signale mehr aufgezeichnet werden können.

5.1.4 Variation der Hochspannung am Draht

Um einen guten Arbeitspunkt zu finden, werden verschiedene Parameter variiert. Schon in Kapitel 3 ist zu sehen, dass die Schwellenspannung optimal bei etwa 50 mV liegt. Die ausführlichen Messungen aus Abschnitt 5.1.3 bestätigen diesen Wert. Eine weitere wichtige Größe ist die Hochspannung an den Moduldrähten. Die Abbildungen 5.9 bis 5.11 zeigen Messungen mit unterschiedlichen Hochspannungen. Abbildung 5.9 zeigt den Verlauf von Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit steigt bis 2300 V an und bleibt dann etwa konstant. Die Auflösung hat einen optimalen Wert bei 2350 V. Zu höheren Hochspannungen steigt der Wert der Auflösungen allerdings schnell wieder. Hier erwartet man eigentlich einen exponentiellen Abfall, da bei höheren Hochspannungen kleine Elektronencluster eine Rolle spielen und entsprechend kleinere Bereiche aufgelöst werden können.

Für einen Erklärungsversuch des vorliegenden Verlaufs zeigen Abbildung 5.10 und 5.11 Nachweiswahrscheinlichkeit beziehungsweise die Auflösung und gleichzeitig die Multiplizität. Man kann vermuten, dass es bei höheren Hochspannungen zu einem starken Rauschen kommt, das die Auflösung beeinflusst. Es zeigt sich aber, dass auch

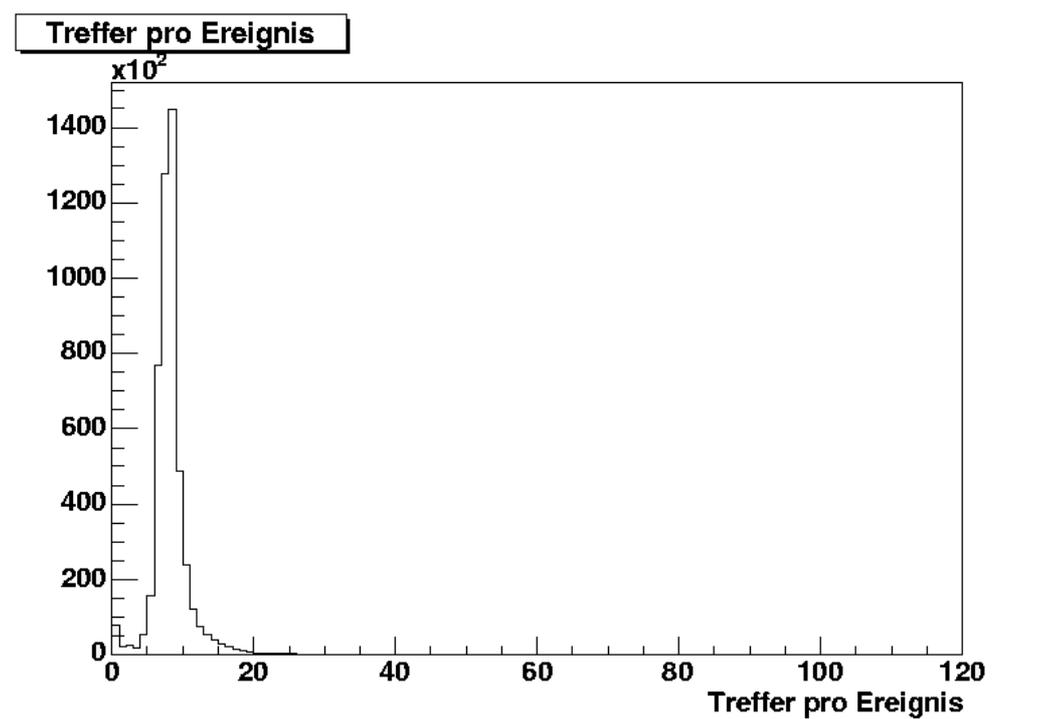


Abbildung 5.7: Die Multiplizität gibt an, wie viele Röhren bei einem Ereignis ein Signal liefern.

bei etwa 2600 V die Anzahl der getroffenen Röhren in einem Ereignis im Durchschnitt nur auf elf ansteigt. Als Erklärung reicht das Rauschverhalten also nicht aus. Der folgende Abschnitt untersucht daher zusätzlich das Crosstalkverhalten bei zwei verschiedenen Betriebsspannungen. Mit Crosstalk bezeichnet man Übersprechen von einem auf einen oder mehrere andere Kanäle. Crosstalk in der Elektronik erkennt man leicht daran, dass Röhren, die vom gleichen Verstärker bedient werden, in einem Event das gleiche Zeitsignal liefern. Die relativ niedrigen Auflösungswerte im niedrigen Spannungsbereich lassen sich durch eine nur kleine Zahl von rekonstruierbaren Spuren unterhalb von 2300 V erklären.

5.1.5 Variation der Betriebsspannung

Da man im Verlauf der Auflösung bei höheren Hochspannung (≥ 2350 V) eine unerwartete Verschlechterung der Auflösung feststellen kann, werden die Messungen wiederholt, wobei die Verstärker mit einer geringeren Betriebsspannung versorgt werden. Bei größeren Hochspannungen gibt es größere Signale und es findet häufiger Crosstalk statt. Bei einer geringeren Betriebsspannung ist die Möglichkeit von Crosstalk eingeschränkt, da hier die Analogsignale kleiner sind. Abbildung 5.12 zeigt den Auflösungsverlauf in Abhängigkeit der Hochspannung in der ursprünglichen Messung mit 3,5 V und in der Wiederholung mit 3,0 V. Man erkennt, dass bei der niedrigeren Betriebsspannung die beste Auflösung erst bei 2400 V erreicht ist. Das Auftreten von Crosstalk nimmt bei höherer Spannungsversorgung zu. Es liegt also nahe, dass Crosstalk in der Elektronik bei höheren Hochspannungen eine starke Rolle spielt und zu schlechteren Ergebnissen in der Auflösung führt.

Die Abbildungen 5.13 und 5.14 zeigen den Auflösungsverlauf und gleichzeitig den

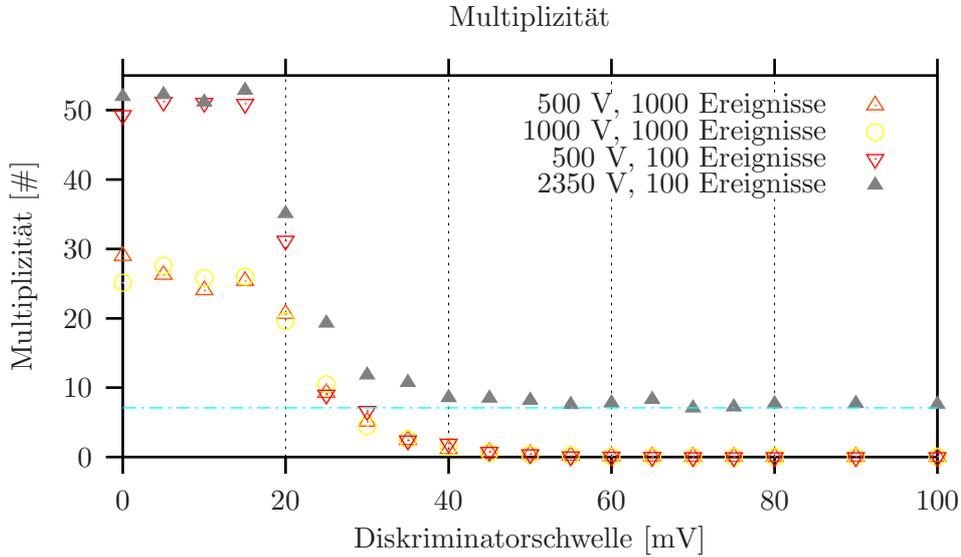


Abbildung 5.8: Multiplizität in Abhängigkeit von der Schwellenspannung bei verschiedenen Hochspannungen (500, 1000 beziehungsweise 2350 V).

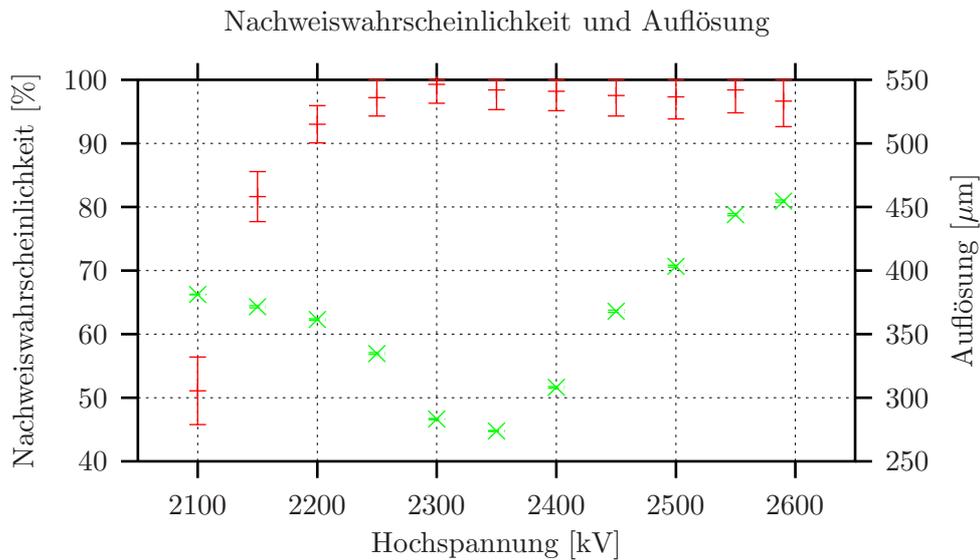


Abbildung 5.9: Auflösung und Nachweiswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Hochspannungen am Draht. Die Auflösung liegt hier nur bei 2300 und 2350 V unterhalb von $300 \mu\text{m}$. Die Nachweiswahrscheinlichkeit steigt bis 2300 V an und bleibt dann etwa konstant.

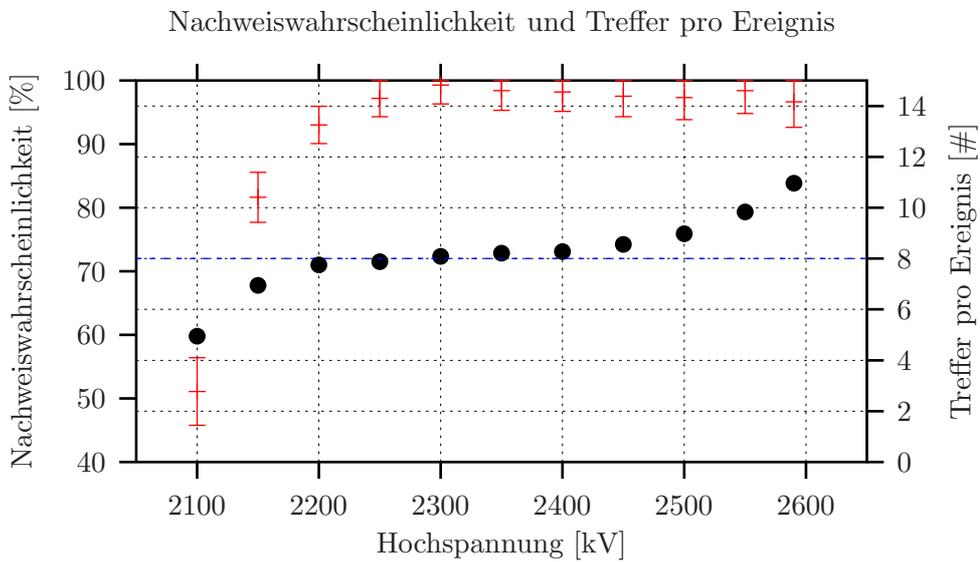


Abbildung 5.10: Nachweiswahrscheinlichkeit und Multiplizität bei verschiedenen Hochspannungen am Draht. Im Bereich zwischen 2200 und 2400 V liegt die Multiplizität (durch Punkte dargestellt) etwa konstant beim Wert 8.

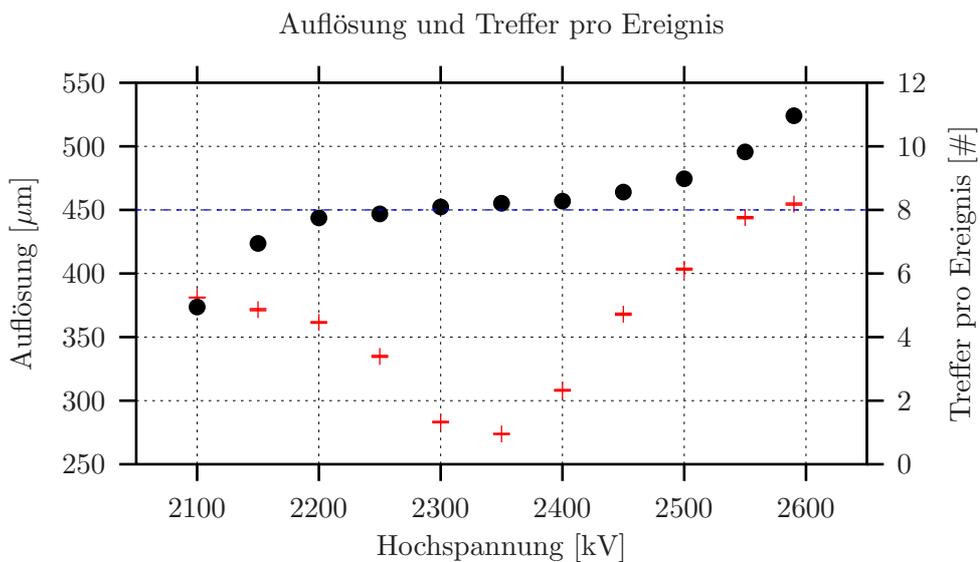


Abbildung 5.11: Auflösung und Multiplizität (durch Punkte dargestellt) bei verschiedenen Hochspannungen am Draht.

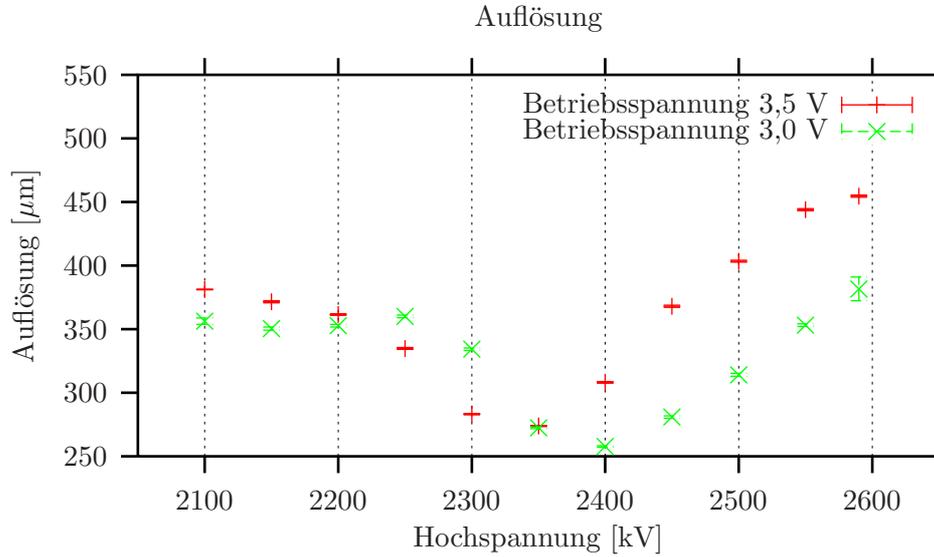


Abbildung 5.12: Auflösung bei verschiedenen Hochspannungen am Draht für Betriebsspannung von 3,0 V und 3,5 V.

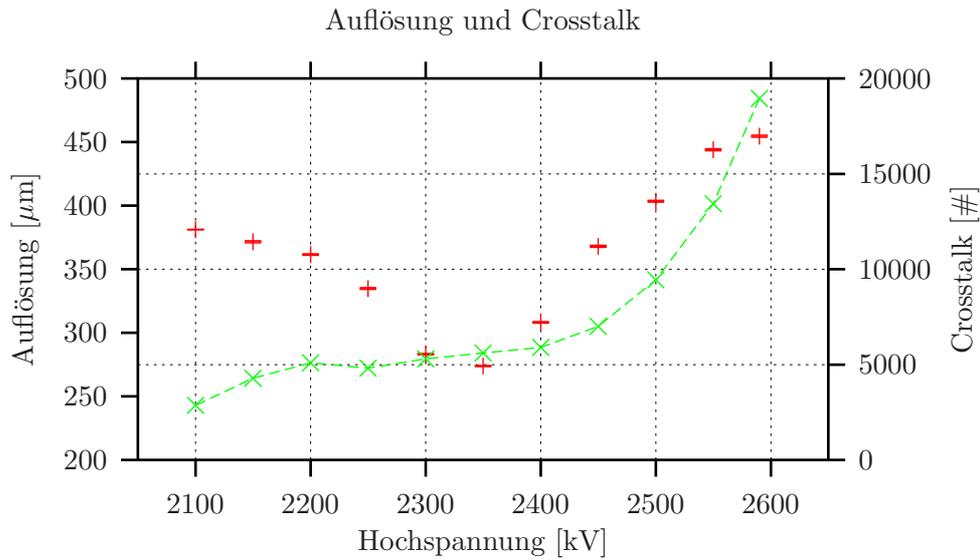


Abbildung 5.13: Auflösung und Crosstalk (durchgezogene Linie) bei verschiedenen Hochspannungen am Draht. Die Betriebsspannung ist auf 3,5 V eingestellt.

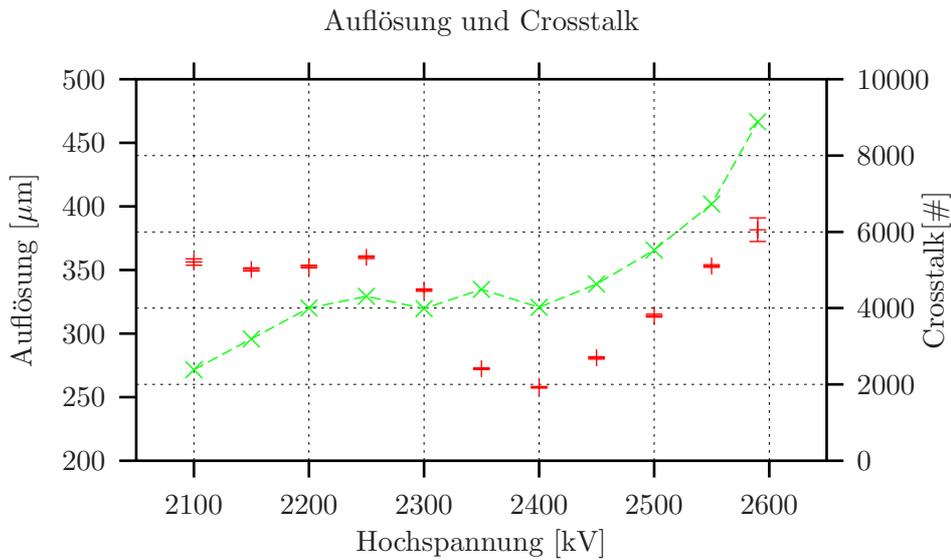


Abbildung 5.14: Auflösung und Crosstalk (durchgezogene Linie) bei verschiedenen Hochspannungen am Draht. Die Betriebsspannung ist auf 3,0 V eingestellt.

Crosstalk. Da immer vier nebeneinanderliegende Röhren von einem Verstärker versorgt werden, kommt es vor allem innerhalb dieser Vierergruppen zu Übersprechen in der Elektronik. Dabei treten nicht nur Vierermuster auf. Oft kommt auch bei zwei nebeneinanderliegenden Röhren das gleiche Zeitsignal an. Auch beliebige Dreiergruppen kommen vor.

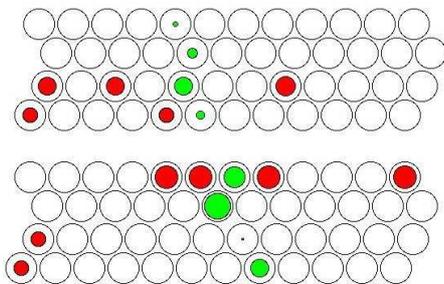


Abbildung 5.15: Durch eine Vierergruppe in einer Lage von getroffenen Röhren, die das gleiche Zeitsignal abgeben, zeigt sich Crosstalk bei dieser Messung.

Abbildung 5.15 zeigt ein typisches Vierermuster in der Mitte. Da genau diese vier Röhren von einem Verstärker bedient werden, ist das Crosstalkverhalten offensichtlich. Crosstalk innerhalb dieses Chips führt dazu, dass für alle vier Röhren das gleiche Zeitsignal ausgelesen wird. Hier ist auch ein zweites Teilchen, das gleichzeitig die Kammer am linken Rand durchstreift, nicht auszuschließen.

Auch in Abbildung 5.16 sind typische Crosstalkmuster zu sehen. In diesem Fall sprechen zwei beziehungsweise drei Röhren gleichzeitig an. Dadurch wird ein Rekonstruieren einer Spur schwierig. Der Crosstalk-Wert aus den Abbildungen 5.13 und 5.14 ist die Summe der gezählten Zweier-, Dreier- und Vierer-Muster für jeweils die gesamte Messung.

Daher kann der mit höheren Hochspannungen an den Drähten zunehmende Crosstalk als Grund für schlechte Auflösung und den unerwarteten Verlauf (Abbildung 5.9) als wahrscheinlich angesehen werden.

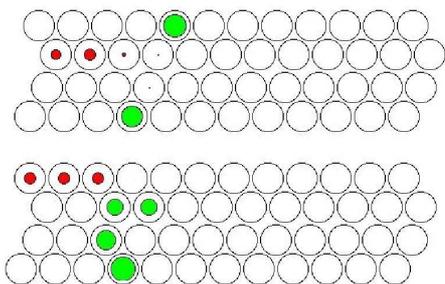


Abbildung 5.16: Ein Dreiermuster von getroffenen Röhren in der ersten Ebene vom unteren Modul eine Zweiergruppe darunter sind typische Crosstalkmuster.

5.2 Durchbiegungsmessungen

Durchbiegungen der Driftröhren im Detektor entstehen im wesentlichen aus zwei Gründen: Temperaturgradienten wie in Kapitel 4.1 beschrieben und Zwangskräften, die durch den Aufbau hervorgerufen werden. Auch Verbiegungen schon bei der Massenproduktion können nicht ausgeschlossen werden. Positionsmessungen am Gran Sasso haben gezeigt, dass die Module stärker als erwartet durchgebogen sind. Bei den Driftkammern kommt es im wesentlichen auf die Drahtposition und nicht auf die Röhrenposition an. Für das Experiment ist es wichtig zu wissen, ab welcher Durchbiegung der Röhren sich die Auflösung und die Nachweiswahrscheinlichkeit verschlechtert. Dafür zeigt dieser Abschnitt Messungen mit einstellbarer Durchbiegung.

5.2.1 Aufbau



Abbildung 5.17: Der große Teststand. Zu sehen ist die Höheneinstellung in der Mitte der Module. Eine Wasserwaage dient zur Kontrolle, dass die Höheneinstellung über zwei Gewinde (unten) gleichmäßig erfolgt. Abgelesen wird die Höhe über einen Höhenanreißer (hinten). Links sieht man die beiden Szintillatoren, die den Trigger geben.

Zum bereits beschriebenen Aufbau (Abschnitt 5.1.1) kommt die Möglichkeit hinzu, die Durchbiegung der Driftröhren einzustellen.

Die Module liegen an den Enden fest. In der Mitte ist die Höhe über zwei Gewinde einstellbar und an einem Höhenmesser ablesbar. Mit einer digitalen Wasserwaage wird sichergestellt, dass sich die Module nicht bei der Höhenverstellung in sich verdrehen, die Höheneinstellung über zwei Gewinde also gleichmäßig erfolgt. Ein Nivelliergerät⁶ dient zur Messung weiterer Höhenpositionen des Moduls (siehe Abbildung 5.18). Dabei wird die mittlere Position (4) durch Ablesen am Höhenanreißer millimeterweise eingestellt.

Abbildung 5.19 zeigt die Position der Module, wobei beide Modulenden auf Null normiert sind. Man erkennt, dass die Module in der Mitte maximal 11 mm durchhängen. Die Signaldrähte in den Driftröhren hängen durch ihr Eigengewicht jeweils

⁶Ein Nivellier ist ein Messgerät, mit dem Höhenunterschiede gemessen werden können. Dazu hat es ein Zielfernrohr, das durch drei Fußschrauben und eine Libelle waagrecht ausgerichtet wird. Mit diesem drehbaren Zielrohr werden Punkte in einer waagerechten Ebene angepeilt.

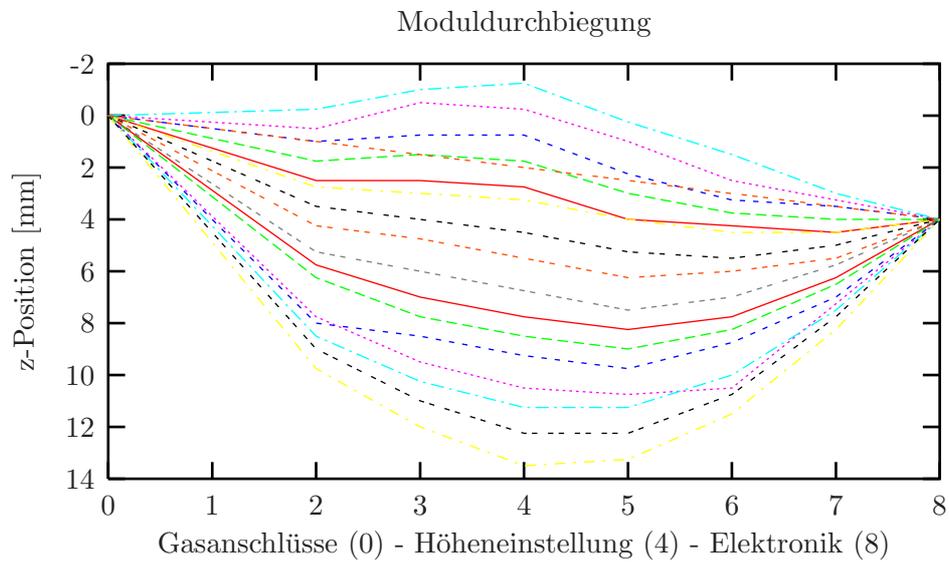


Abbildung 5.18: Durchbiegung der Module, dargestellt aus den absoluten Messwerten des Nivelliergerätes.

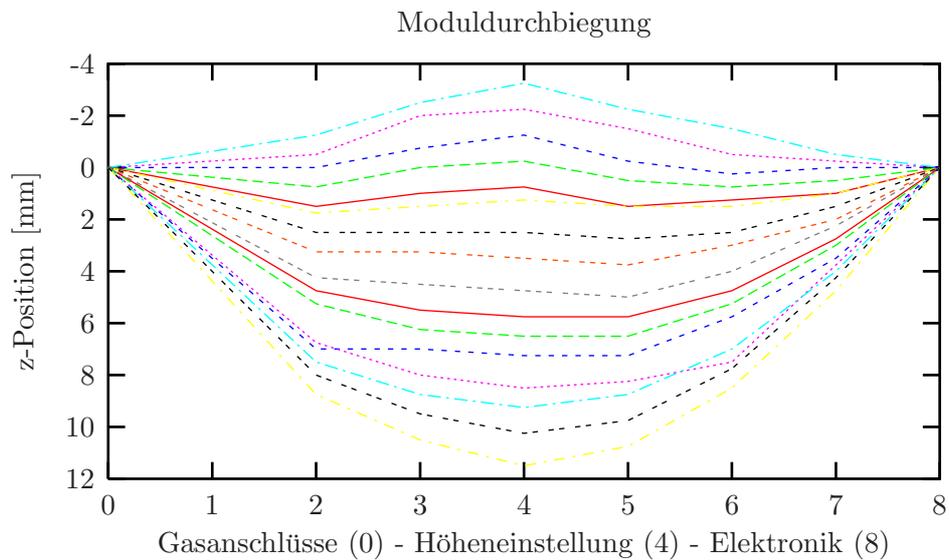


Abbildung 5.19: Durchbiegung der Module, wobei die Enden auf Null normiert sind. Ohne Unterstützung in der Mitte (Position 4) hängen die Module etwa 11 mm durch. Der Signaldraht hängt durch sein Eigengewicht etwa 1 mm durch (siehe Anhang D).

etwa 1 mm durch (Berechnung siehe Anhang D). Ideale Höheneinstellung, also dort, wo der Draht in Modulmitte genau mittig im Rohr positioniert ist, liegt entsprechend bei einem Durchhang der Module von ebenfalls 1 mm vor. Bei allen Messungen aus Abschnitt 5.1 wird diese Idealposition verwendet. Die folgenden Messungen werden nun in Abhängigkeit der Durchbiegung durchgeführt.

5.2.2 Messungen mit Driftröhren unterschiedlicher Durchbiegung.

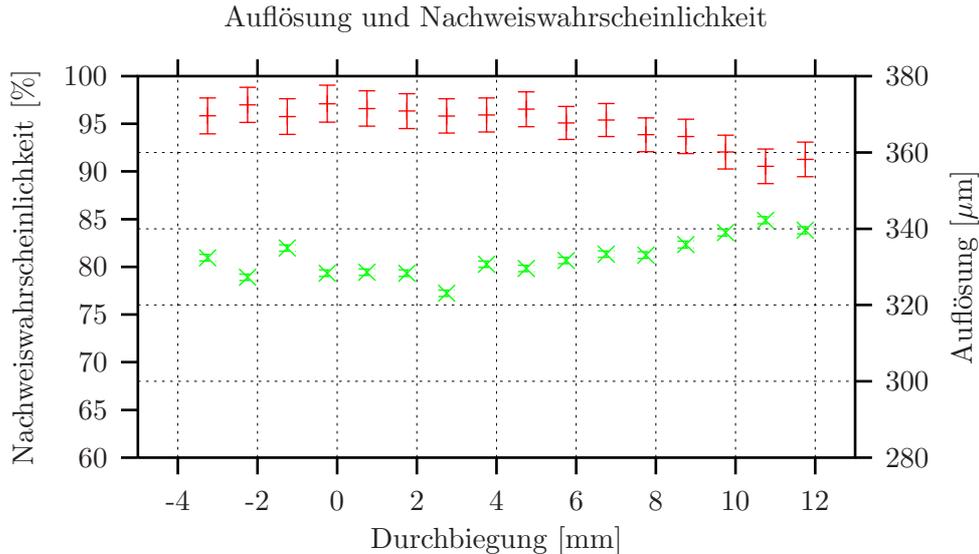


Abbildung 5.20: Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung bei verschiedenen Durchbiegungen gemessen. Die Nachweiswahrscheinlichkeit liegt bis zu einer Durchbiegung von 6 mm bei etwa 96%. Die Auflösung liegt zwischen 320 und 340 μm . Schwellenspannung ist auf 100 mV, die Drahtspannung auf 2300 V eingestellt. Der Szintillator steht bei 1,2 m, nahe den Gasanschlüssen. Wie in Abbildung 5.19 zu sehen, ist die Durchbiegung bei dieser Szintillatorposition entsprechend gering.

Der folgende Abschnitt zeigt Messungen mit Driftröhren unterschiedlicher Durchbiegung. Aufgetragen sind jeweils Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung gegen Durchbiegung. Die Richtung der Durchbiegung der Module entspricht der z-Komponente am OPERA-Experiment, also entlang der Strahlrichtung. Negative Werte der z-Position sind Durchbiegungen der Module nach oben. Die Nullposition bei den Ergebnissen bedeutet, dass die Modulenden und die mittlere Position genau auf einer Geraden liegen. Bei $x = 1$ mm verläuft der Draht mittig im Rohr (vergleiche Abschnitt 5.2.1).

In Abbildung 5.20 sind die ersten Messungen bei verschiedenen Durchbiegungen aufgezeigt. Die Messungen werden bei einer Szintillatorspannung von -1,650 kV durchgeführt. Die Schwellenspannung beträgt 100 mV, die Modulspannung 2300 V. Hier werden jeweils 10.000 Ereignisse aufgezeichnet. Dadurch ist noch ein großer Fehler vorhanden. Da Schwellenspannung und Modulspannung nicht am idealen Arbeitspunkt eingestellt sind, werden hier auch keine optimalen Ortsauflösungen erreicht. Zu Erkennen ist jedoch, dass in diesem Aufbau die Nachweiswahrscheinlichkeit bis etwa 4 mm Durchbiegung keine nennenswerte Änderung erfährt. Dies bestätigen auch die folgenden Messungen.

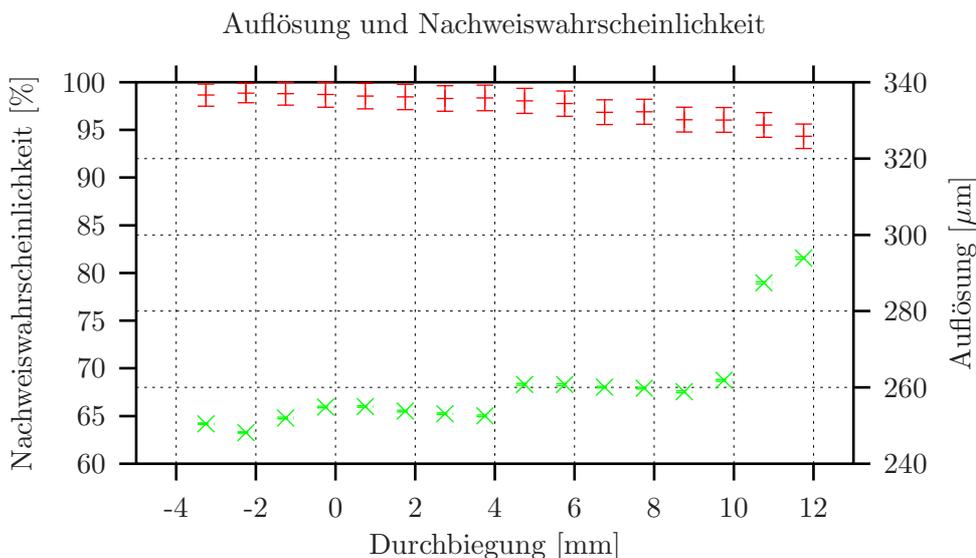


Abbildung 5.21: Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung bei verschiedenen Durchbiegungen. Die Nachweiswahrscheinlichkeit liegt bei geringer Durchbiegung gut über 95%. Die Auflösung bleibt unter 300 μm . Die Diskriminatorschwelle ist auf 50 mV, die Drahtspannung auf 2350 V eingestellt. Der Szintillator steht bei 1,2 m.

Eine Wiederholung dieser Messung mit höherer Statistik (100.000 events), einer Schwellenspannung von 50 mV und einer Spannung auf den Drähten von 2350 V zeigt Abbildung 5.21. Die Szintillatoren bleiben am Ende der Module (1,2 m). Hier befinden sich die Gasanschlüsse. Die Elektronik ist am anderen Ende der Module. Das bedeutet, dass die Signale fast die gesamte Drahtlänge überwinden müssen. Fehler durch Durchgangsdämpfung der Signale können nicht ausgeschlossen werden. Die Durchbiegung der Röhren ist an dieser Szintillatorposition gering. Wie Abbildung 5.19 zu entnehmen, ist hier die Abweichung des Drahtes aus der Mittelposition maximal 4 mm. Entsprechend hoch ist die Nachweiswahrscheinlichkeit auch bei maximaler Durchbiegung in der Mitte der Module. Die Auflösung verschlechtert sich zwar bei großer Durchbiegung, bleibt aber unterhalb der geforderten 300 μm .

Stellt man die Szintillatoren in die Mitte der Module (3,2 m), ergibt sich der Verlauf aus Abbildung 5.22. Hier sind 100.000 Events bei einer Schwellenspannung von 50 mV und einer Spannung auf den Drähten von 2350 V aufgezeichnet. Bei dieser Szintillatorposition ist die maximale Abweichung des Drahtes aus der Mitte einstellbar (Abbildung 5.19). Der Verlauf von Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung ist etwa symmetrisch um den Punkt, bei dem der Draht genau in der Mitte positioniert ist (Durchbiegung 1 mm). Erwartungsgemäß ergeben sich also ähnliche Werte für gleiche Drahtabweichungen nach oben oder nach unten. Bis zu einer Durchbiegung von etwa 4 mm ändert sich die Nachweiswahrscheinlichkeit kaum. Erst bei etwa 9 mm Durchbiegung ist eine Nachweiswahrscheinlichkeit von nur 90% erreicht. Die Auflösung bleibt bis 6 mm Durchbiegung unterhalb von 300 μm .

Bei allen Messungen kommt es nicht auf die Absolutwerte der Durchbiegungen, sondern auf die Abweichungen der Drahtpositionen von der Mitte im mittleren Bereich der Module an. Beim Teststand ist dieser Wert aus der Darstellung von Abbildung 5.19 zu entnehmen. Am PT muss entsprechend die Abweichung der Driftröhren in

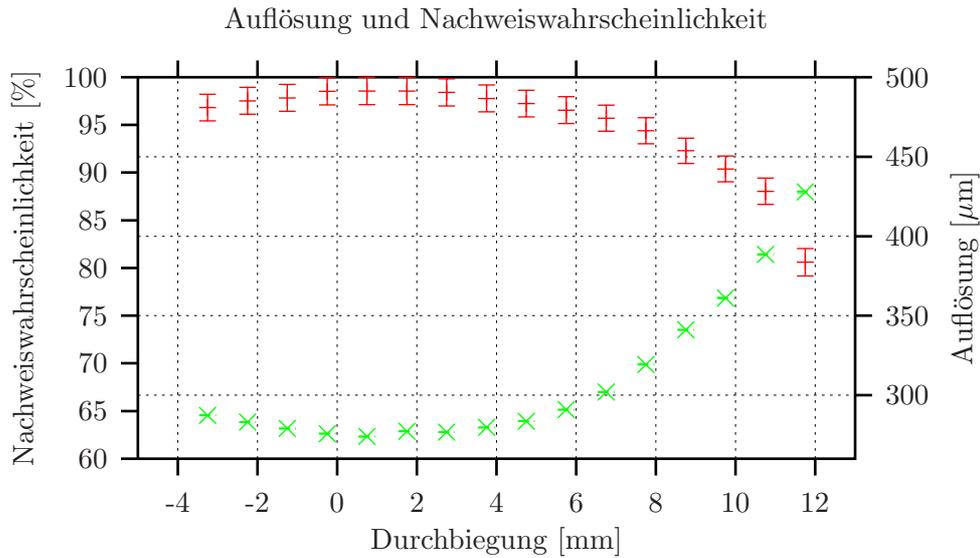


Abbildung 5.22: Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung bei verschiedenen Durchbiegungen. Die Nachweiswahrscheinlichkeit ist bei Idealposition (Durchbiegung 1 mm) bei knapp 99%. Die Auflösung bleibt bis etwa 7 mm Durchbiegung unter $300 \mu\text{m}$. Die Diskriminator-schwelle ist auf 50 mV, die Drahtspannung auf 2350 V eingestellt. Der Szintillator steht nahezu mittig bei 3,1 m.

Modulmitte von der Geraden, die die Modulenden verbindet, beachtet werden. Diese Abweichung liegt innerhalb des Bereiches, in dem Auflösung und Nachweiswahrscheinlichkeit in dem Bereich bleiben, der für die Funktionalität der Detektorelemente keine Beeinträchtigung bedeutet.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des OPERA-Experimentes durchgeführt. Mit OPERA sollen $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen nachgewiesen werden. Dazu wird in einem reinen Myonneutrinostrahl in einer Entfernung von 732 km nach Tauneutrinos gesucht. Tauneutrinos können im Bleitarget des Detektors wechselwirken. Entstehende Tauonen zerfallen zu Elektronen, Myonen oder Hadronen. Diese Reaktionen werden in Emulsionsschichten innerhalb des Targets festgehalten. Der Nachweis der Tauneutrinos erfolgt durch die direkte Detektion der Tauonen. Mit OPERA werden zum ersten Mal Neutrinooszillationen in einem *Appearance*-Experiment gezeigt.

Die Arbeitsgruppe in Hamburg entwickelt für den OPERA-Detektor den Precision Tracker, einen wesentlichen Teil des Myonspektrometers. Dieser ist aus Driftröhren aufgebaut, die eine Spurrekonstruktion und damit die Impulsbestimmung der Myonen ermöglichen. Zur Beurteilung der Güte der Driftröhren sind die Nachweiswahrscheinlichkeit und die Auflösung zwei wesentliche Größen.

Die vorliegende Arbeit behandelt Parameter, die zum Betrieb und zur Optimierung der Driftröhren erforderlich sind, beschreibt einen Teil der sogenannten *Slow Control*, insbesondere die Steuerung der Diskriminatorschwellen sowie den Aufbau eines Systems zur Temperaturüberwachung, und zeigt abschließend den Einfluss der Abweichung der Signaldrähte aus der Mittelposition innerhalb der Driftröhren auf die Nachweiswahrscheinlichkeit und die Auflösung.

Mit der *Slow Control* werden die vier Bereiche Gassystem, Hochspannung, Betriebsspannung und OPERA Support Board geregelt beziehungsweise gesteuert und überwacht. Die wichtigste Funktion des Support Boards ist das Steuern von Diskriminatorschwellen. Mit Hilfe dieser Schwellen werden nur relevante Signale zur Spurrekonstruktion herangezogen. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird so optimiert. Messungen zeigen, dass in dieser Konstruktion ab einer Diskriminatorschwelle von 50 mV Spurrekonstruktionen mit hoher Auflösung und großer Nachweiswahrscheinlichkeit möglich sind.

In dieser Arbeit wird ein System zur elektronischen Temperaturüberwachung vorgestellt. Temperaturgradienten innerhalb der Driftröhrenanordnung können zu Verbiegungen führen. Auch konstruktionsbedingt kann es passieren, dass der Signaldraht nicht mehr mittig in den Driftröhren verläuft. Durch erste Positionsmessungen am OPERA-Detektor wurden Durchbiegungen festgestellt.

Mit den Durchbiegungsmessungen an Driftröhren wird der Einfluss auf Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung untersucht. Die vorliegenden Messungen zeigen, dass Durchbiegungen von bis zu 4 mm auf 7900 mm lange Röhren mit einem Durchmesser von 38 mm keine Beeinträchtigung der Detektorfunktionalität bezüglich Nachweiswahrscheinlichkeit und Auflösung haben. Erst ab Durchbiegungen von etwa 7 mm verschlechtern sich diese beiden Größen nennenswert.

Anhang A

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog Digital Converter
AdsOCX	Automation Device Specification OLE Control eXtension
BAM	Brick Assembly Machine
BKGD	Background, Untergrund
BMS	Brick Manipulation System
BUS	Binary Utility System
BR	Branching Ratio, Verzweigungsverhältnis
CAN	Controller Area Network
CC	Charged Current
CERN	Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire
CKM	Cabbibo–Kobayashi–Maskawa–Matrix
CNGS	CERN Neutrinos to Gran Sasso
DAQ	Data Acquisition, Datenakquisition
DONUT	Direct Observation of the NU Tau (Experiment)
DIS	Deep Inelastic Scattering, tiefinelastische Steuerung
ECC	Emulsion Cloud Chamber, Emulsions–Nebelkammer
ES	Elastic Scattering
HV	High Voltage, Hochspannung

IBF	Improved Brick Finding, Verbessertes Auffinden der Bricks
INFN	Instituto Nazionale di Fisica Nucleare
LNGS	Laboratori Nazionali del Gran Sasso
LV	Low Voltage, Niederspannung
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
NC	Neutral Current
NIM	Nuclear Instrumentation Modules
NTC	Negative Temperature Coefficient
OLE	Object Linking and Embedding
OPERA	Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus
OSUB	OPERA Support Board
OTB	OPERA Trigger Board
PMNS	Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata–Matrix
PT	Presicion Tracker
PTC	Positive Temperature Coefficient
QE	Quasi Elastic Scattering, quasielastische Steuerung
RPC	Resistive Plate Chambers
SNO	Sudbury Neutrino Observatory
SPS	Super Proton Synchrotron
TDC	Time-to-Digital Converter
TEB	Technische Entwicklung und Betrieb, Arbeitsgruppe der Universität Hamburg
TTL	Transistor-Transistor Logic, Schaltkreisbauart mit Rechtecksignalen
VME	VERSAcard Modified for Eurocard - ein BUS-Standard, der die Kommunikation verschiedener Computer und Elektronikkomponenten regelt.
3–PD	3–Prong Decay, Zerfall des τ^- in drei geladene Zerfallsprodukte

Anhang B

Liste der verwendeten Geräte

B.1 Großer Teststand

Die am großen Teststand verwendete Elektronik
(eingeschlossen das System zum Setzen von Schwellenspannungen):

- *Oltronix* HIGHPAC A2K5-20HR Power Supply zur Spannungsversorgung der Szintillatoren
- *Wenzel* H.V. Power Supply N1130-4 zur Spannungsversorgung der HV-Drähte
- *LeCroy Research System* Octal Discriminator Model 623B
- *LeCroy Research System* Quad Coincidence Model 622
- *LeCroy Research System* Dual Gate Generator Model 222
- *TEB*¹ *Uni Hamburg* NIMtoLVDS Converter (2005)
- *CAEN* Time to Digital Converter (TDC) Mod. V1190A
- *Cetia* VME VMTR2a
- *TEB Uni Hamburg* OPERA Support Board OSUB
- *Peak Systems* USBtoCAN-Adapter PEAK-USB IPEH-002021
- *Laboratory Power Supply* EA-PS2016-050
- *TEB Uni Hamburg* OPERA Support Board (2005)
- *TEB Uni Hamburg* 8 Preamplifier Boards (2005)
- *TEB Uni Hamburg* Breitbandkabel (TDC)
- *Uni Hamburg* OPERA PT Module (Driftröhren)
- *Uni Hamburg* OPERA PT Gassystem

¹Arbeitsgruppe *Technische Entwicklung und Betrieb* der Universität Hamburg

B.2 Temperaturkontrollsystem

Die für das Temperaturkontrollsystem verwendeten Geräte (Beckhoffsystem und OSUB-System):

- *Beckhoff* analoge Inputklemmen KL3202-0028
- *Beckhoff* Buscontroller BC9000
- *Beckhoff* TwinCAT Software
- *Jumo* Platin-Folien-Temperatursensoren
- *TEB Uni Hamburg* OPERA Support Board (2005)
- *TEB Uni Hamburg* 8 Preamplifier Boards (2005)
- *Philips* Silikonsensoren Typ KTY81-110

Anhang C

Programmquelltexte

Es folgen Beispielquelltexte (Visual Basic) aus der OSUB- und OTB-Programmierung. Es handelt sich um einzelne Programmblöcke und nicht um vollständige Programme. Es soll lediglich die Programmierung der einzelnen Funktionen verdeutlicht werden.

C.1 Programmstart beim OSUB

Definition der Programmvariablen. Der Variablentyp *TPCANMsg* wird durch ein separates Programmmodul definiert. Die Benutzeroberfläche (Formular) wird geladen.

```
Option Explicit
Dim T_Ident As Integer
Dim Msg, Msg1 As String
Dim CAD, BAD As Integer           ' Board Address, Crate Address
Dim MsgNr As Integer
Dim TestPulseOn As Boolean
Dim Ret As Long
Dim TFrame As TPCANMsg
Dim ReadFrame As TPCANMsg
Dim Autputt As Boolean
Dim Schnitttemp, Einzeltemp As Long
Dim Schwellendateiname As String
Dim Schwellenschreiben, Schwellenformload As Boolean
Dim Eichfaktor(7) As Double
Dim Tempdateiname As String
Dim Timerdelay, Tempdelay As Integer
Dim Anzahl As Integer

Private Sub form_load()
Dim I, J, K As Integer
Autputt = False
Schwellenschreiben = False
Schwellendateiname = txtTreshdatei.Text
Timer1.Enabled = False
For K = 0 To 7
    cmbCAD.AddItem K
```

```

Next K
cmbCAD.Refresh
    cmbCAD.ListIndex = 0
For J = 0 To 7
    cmbBAD.AddItem J
Next J
cmbBAD.Refresh
    cmbBAD.ListIndex = 0
'Call Start
End Sub

```

C.2 CAN-Verbindung herstellen

Eine Verbindung zum CAN-Netz wird hergestellt. Firmware Release und CAN-Fehler werden gelesen.

```

Private Sub Start()
Dim DL As Long
Dim VL As Integer
Dim VH As Integer
Dim I, J, K As Integer
BAD = cmbBAD.ListIndex
CAD = cmbCAD.ListIndex
    T_Ident = CAD * &H100 + BAD * &H10
    TFrame.MSGTYPE = 0
    Ret = CAN_Init(CAN_BAUD_125K, CAN_INIT_TYPE_ST)
    If Ret = CAN_ERR_OK Then
        Text1.Text = "Configuration o.k"
    Else
        Text1.Text = "Configuration Error"
    End If
    TFrame.ID = T_Ident + 3
    TFrame.LEN = 1
    TFrame.DATA(0) = &H3 '(firmware)
    Ret = CAN_Write(TFrame)
    Call Delay
    Ret = CAN_Read(ReadFrame)
    If Ret = CAN_ERR_OK Then
        VH = (ReadFrame.DATA(1) And &HF0) / 16
        VL = ReadFrame.DATA(1) - VH * 16
        Msg = Hex(VH) & "." & Hex(VL) & "." & Hex(ReadFrame.DATA(2))
        Version.Text = Msg
    End If
    TFrame.DATA(0) = &H1 '(CAN error)
    Ret = CAN_Write(TFrame)
    Call Delay
    Ret = CAN_Read(ReadFrame)
    If Ret = CAN_ERR_OK Then
        CANSTAT.Text = Hex(ReadFrame.DATA(1)) & " " & Hex(ReadFrame.DATA(2)) & " " _

```

```
                & Hex(ReadFrame.DATA(3))
End If
MsgNr = 20
TestPulseOn = False
SPON.Caption = "On"
Timer1.Enabled = True
Call cmdEicheins_Click
End Sub
```

C.3 CAN-Nachricht senden

Eine CAN-Nachricht wird gesendet. *TFrame.ID* gibt den Identifier, *TFrame.LEN* die Länge der Nachricht und *TFrame.DATA(I)* den Datenblock an (vergleiche Abschnitt 3.2.1).

```
'einzelne schwellen setzen (1 roehre)
Private Sub SETDAC_Click(N As Integer)
Dim DN, DV As Integer
Dim I As Integer
DN = DACNR(N).Text
If DN < 0 Then
    DN = 0
    DACNR(N).Text = DN
End If
If DN > 11 Then
    DN = 11
    DACNR(N).Text = DN
End If
DV = DACVAL(N).Text
If DV < 0 Then
    DV = 0
    DACVAL(N).Text = DV
End If
If DV > 255 Then
    DV = 255
    DACVAL(N).Text = DV
End If
TFrame.ID = T_Ident + 2
TFrame.LEN = 4
TFrame.DATA(0) = &H1
TFrame.DATA(1) = N
TFrame.DATA(2) = DN
TFrame.DATA(3) = DV
Ret = CAN_Write(TFrame)
Call Delay
Ret = CAN_Read(ReadFrame)
End Sub
```

```
'schwollen fuer einen port setzen (12 roehren):
```

```
Private Sub SETALLDAC_Click(N As Integer)
```

```
Dim DV As Integer
```

```
Dim I As Integer
```

```
    DV = DACVAL(N).Text
```

```
    If DV < 0 Then
```

```
        DV = 0
```

```
        DACVAL(N).Text = DV
```

```
    End If
```

```
    If DV > 255 Then
```

```
        DV = 255
```

```
        DACVAL(N).Text = DV
```

```
    End If
```

```
    TFrame.ID = T_Ident + 2
```

```
    TFrame.LEN = 3
```

```
    TFrame.DATA(0) = &H2
```

```
    TFrame.DATA(1) = N
```

```
    TFrame.DATA(2) = DV
```

```
    Ret = CAN_Write(TFrame)
```

```
    Call Delay
```

```
    Ret = CAN_Read(ReadFrame)
```

```
Schwellenschreiben = True
```

```
End Sub
```

```
'schwollen fuer ein support board setzen (96 roehren)
```

```
Private Sub GSETDAC_Click()
```

```
Dim I, J, K As Integer
```

```
Dim N, DN, DV As Integer
```

```
    DV = DACVAL(0).Text
```

```
    If DV < 0 Then
```

```
        DV = 0
```

```
        DACVAL(0).Text = DV
```

```
    End If
```

```
    If DV > 255 Then
```

```
        DV = 255
```

```
        DACVAL(0).Text = DV
```

```
    End If
```

```
    TFrame.ID = T_Ident + 2
```

```
    TFrame.LEN = 2
```

```
    TFrame.DATA(0) = &H3
```

```
    TFrame.DATA(1) = DV
```

```
    Ret = CAN_Write(TFrame)
```

```
    Call Delay
```

```
    Ret = CAN_Read(ReadFrame)
```

```
End Sub
```

C.4 CAN-Nachricht empfangen

Ein CAN-Befehl fragt nach Temperaturwerten von Sensoren. Da dies in einem regelmäßigen Zeitabstand erfolgt wird ein *Timer* verwendet. Der Datenblock *TFrame.DATA* wird durch *ReadFrame.DATA* ausgelesen.

```

Private Sub Timer1_Timer()
Dim I, J, K As Integer
Dim TMP(4) As Integer
Dim VREF, Cal As Double
Dim Mask As Integer
Dim Kontrolltext As String

VREF = 5040
Cal = VREF / 1024 '(Kalibration: 5 V at 10 bit)
MsgNr = MsgNr + 1
If MsgNr > 1 Then MsgNr = 0

TFrame.ID = T_Ident + 1
TFrame.LEN = 1
TFrame.DATA(0) = MsgNr + 1
Ret = CAN_Write(TFrame)
Call Delay
Ret = CAN_Read(ReadFrame)
If Ret = CAN_ERR_OK Then
    TMP(0) = ReadFrame.DATA(5) And &H3
    TMP(1) = (ReadFrame.DATA(5) And &HC) / &H4
    TMP(2) = (ReadFrame.DATA(5) And &H30) / &H10
    TMP(3) = (ReadFrame.DATA(5) And &HC0) / &H40

    For I = 0 To 7
    Eichfaktor(I) = txtEichfaktor(I).Text
    Next I

    If (ReadFrame.DATA(0) = 1) And (MsgNr = 0) Then
        For I = 0 To 3
            temp(I).Text = Round(Eichfaktor(I) *
                (4 * ReadFrame.DATA(I + 1) + TMP(I)) * Cal / 50, 1)
        Next
    End If
    If (ReadFrame.DATA(0) = 2) And (MsgNr = 1) Then
        For I = 0 To 3
            temp(I + 4).Text = Round(Eichfaktor(I + 4) *
                (4 * ReadFrame.DATA(I + 1) + TMP(I)) * Cal / 50, 1)
        Next
    End If

    Mask = 1
    Anzahl = 0
    For I = 0 To 7

```

```

    If (ReadFrame.DATA(6) And Mask) = Mask Then
    Switch(I).Switch_to False
    Else
    Switch(I).Switch_to True
    Anzahl = Anzahl + 1
    End If
    Mask = Mask * 2
Next
SwitchAll.Switch_to False
If Anzahl = 8 Then
SwitchAll.Switch_to True
End If
End If
End Sub

```

C.5 Programmstart vom Trigger Board

Der Programmstart funktioniert analog zum OSUB (vergleiche C.1).

```

Private Sub Start_Click()
Dim VL As Integer
Dim VH As Integer
    TPC(0).Value = True
    TPSEL(0).Value = 1
    CAD = CrateAdr.Text
    Ident = CAD * &H100 + &HF0
'Firmware Release of OPT:
    TFrame.DATA(0) = &H2
    TFrame.ID = Ident + 7
    TFrame.LEN = 1
    Result = CAN_Write(TFrame)
    Call Delay
    Result = CAN_Read(ReadFrame)
    VH = (ReadFrame.DATA(1) And &HF0) / 16
    VL = ReadFrame.DATA(1) - VH * 16
    Msg = Hex(VH) & "." & Hex(VL) & "." & Hex(ReadFrame.DATA(2))
    OPT_Version.Text = Msg
'CAN Error
    TFrame.DATA(0) = &H1
    Result = CAN_Write(TFrame)
    Call Delay
    Result = CAN_Read(ReadFrame)
    Msg = Hex(VH) & "." & Hex(VL) & "." & Hex(ReadFrame.DATA(2))
    OPT_CANSTAT.Text = Hex(ReadFrame.DATA(1)) & " " & Hex(ReadFrame.DATA(2)) & " " &
        & Hex(ReadFrame.DATA(3))
End Sub

```

C.6 OTB Testpulse, TDC Status

Durch entsprechende Befehle werden Testpulse generiert, der Status gelesen etc..

```
Private Sub Timer1_Timer()  
Dim I, N, CN As Integer  
Dim DAV As Integer  
Dim D, NK, TDCV As Double  
  
    CN = 0  
    N = 1  
    For I = 0 To 4  
        If TPSEL(I).Value = 1 Then CN = CN Or N  
        N = 2 * N  
    Next  
    TFrame.ID = Ident + 3  
    TFrame.LEN = 2  
    'Test Pulse:  
    TFrame.DATA(0) = &H1  
    TFrame.DATA(1) = CN  
    Result = CAN_Write(TFrame)  
    Call Delay  
    Result = CAN_Read(ReadFrame)  
    TFrame.ID = Ident + 4  
    TFrame.LEN = 1  
    'TDC Status:  
    TFrame.DATA(0) = &H2  
    Result = CAN_Write(TFrame)  
    Call Delay  
    Result = CAN_Read(ReadFrame)  
    TDCStat.Text = Hex(ReadFrame.DATA(1))  
    TFrame.ID = Ident + 4  
    TFrame.LEN = 1  
    'TDC Value:  
    TFrame.DATA(0) = &H1  
    Result = CAN_Write(TFrame)  
    Call Delay  
    Result = CAN_Read(ReadFrame)  
    DAV = ReadFrame.DATA(1)  
  
    NK = ReadFrame.DATA(3)  
    NK = NK * 256 + ReadFrame.DATA(2)  
    NK = NK / 65535  
    NK = Int(2000 * NK + 0.5) / 1000  
    TDCV = ReadFrame.DATA(5)  
    TDCV = 2 * (TDCV * 256 + ReadFrame.DATA(4)) + NK  
    TDCValue.Text = Str(TDCV) + " s"  
End Sub
```

C.7 OTB Reset

Durch Funktion 4 (im Identifier) wird beim Triggerboard der Grundzustand wieder hergestellt.

```
Private Sub TDCReset_Click()  
    TFrame.ID = Ident + 4  
    TFrame.LEN = 1  
    'Reset TDC:  
    TFrame.DATA(0) = &H3  
    Result = CAN_Write(TFrame)  
    Call Delay  
    Result = CAN_Read(ReadFrame)  
  
    TDCStat.Text = Hex(ReadFrame.DATA(1))  
  
End Sub
```

Anhang D

Berechnung Drahtdurchhang

Im Folgenden soll der Durchhang eines Seils (beziehungsweise eines Drahtes) durch sein Eigengewicht berechnet werden. Wir betrachten ein beliebiges Seil mit konstanter Dichte. In Ruhe ist an jedem Punkt des Seils die Summe aller Kräfte Null (siehe Abbildung D.1). \vec{F}_G ist die Gewichtskraft, \vec{F}_S ist die Seilspannung senkrecht zu \vec{F}_G . \vec{F}_T ist die ausgleichende tangentielle Kraft. Die Spannkraft \vec{F}_S ist konstant. Die Gewichtskraft \vec{F}_G ist abhängig von der x-Position, vom Minimum der Funktionskurve aus gesehen proportional zur Seillänge L .

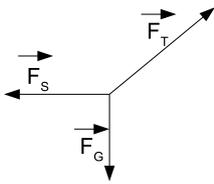


Abbildung D.1: Kräftegleichgewicht für einen beliebigen Punkt am Seil (hier rechts vom Minimum). F_G ist die Gewichtskraft, F_S die Seilspannung.

Die Funktionsgleichung der Kurve des Seils (Abbildung D.2) sei $f(x)$.



Abbildung D.2: Das Seil ist an den Seiten fest, hängt aber durch sein Eigengewicht durch.

Für die Ableitung dieser Funktion erhält man:

$$f'(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{F_G}{F_S}. \quad (\text{D.1})$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{\nu L g}{F_S}, \quad (\text{D.2})$$

mit der Fallbeschleunigung g und der Masse pro Längeneinheit ν .

$$\Rightarrow L = \frac{F_S}{\nu g} \frac{dy}{dx}. \quad (\text{D.3})$$

Die Länge eines Funktionsgraphen berechnet sich außerdem mit:

$$L = \int_0^x \sqrt{1 + (f'(\chi))^2} d\chi. \quad (\text{D.4})$$

Aus den Gleichungen D.3 und D.4 folgt:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\nu g}{F_S} \int_0^x \sqrt{1 + (f'(\chi))^2} d\chi. \quad (\text{D.5})$$

Differenzieren nach x ergibt folgende Differentialgleichung [Kam59]:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\nu g}{F_S} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (\text{D.6})$$

Substitution mit $z = dy/dx$ ergibt:

$$\frac{z'}{\sqrt{z^2 + 1}} = \frac{\nu g}{F_S}. \quad (\text{D.7})$$

Durch Integrieren über x erhält man [Bro96]:

$$\operatorname{arsinh} z = \frac{\nu g}{F_S} x. \quad (\text{D.8})$$

$$\Rightarrow z = \sinh \frac{\nu g}{F_S} x \quad (\text{D.9})$$

Für den Durchhang des Seils y ergibt sich:

$$y = \frac{F_S}{\nu g} \cosh \left(\frac{\nu g}{F_S} x \right) - \frac{F_S}{\nu g}. \quad (\text{D.10})$$

Der Subtrahend $\frac{F_S}{\nu g}$ sorgt dafür, dass $f(0) = 0$.

Für den Draht in den OPERA-Driftröhren ergibt sich danach bei einer Dichte von 19250 kg/m^3 von Wolfram, einer Drahtlänge von 7900 mm , einem Drahtdurchmesser von $45 \text{ }\mu\text{m}$ [Zim05] und einer Drahtspannung von 200 g ein Durchhang in der Mitte der Module von:

$$y = 1,19 \text{ mm.}$$

Literaturverzeichnis

- [All71] O. C. Allkofer.
Teilchen-Detektoren, München (1971).
- [Bec99] M. Beck.
Zeitmeßsystem und Gasgemisch des HERA-B-Driftdetektors, Dissertation, Universität Rostock (1999).
- [Bec05] Beckhoff (Fa.).
<http://www.beckhoff.de/english/busterm/kl3202.htm>, (2005).
- [Bec06] Beckhoff (Fa.).
<http://www.beckhoff.de>, (2006).
- [Bel04] A. Bellerive.
Review of solar neutrino experiments,
International Journal of Modern Physics A, Vol. 19, No. 8 (2004) 1167-1179.
- [Ber92] C. Berger.
Teilchenphysik. Eine Einführung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1992).
- [Bet30] H. Bethe.
Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskelstrahlen durch Materie,
Ann. d. Physik, 5. Folge (1930).
- [Bos91] R. Bosch GmbH.
CAN Specification, Version 2.0, Postfach 300240, D-70442 Stuttgart (1991).
- [Bro96] Zeidler, E. (Herausgeber).
(begründet von Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; weitergeführt von Grosche, G.; Ziegler, V.; Ziegler, D.)
Teubner-Taschenbuch der Mathematik, Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner (1996).
- [Cia06] CAN in Automation
<http://www.can-cia.org>, Erlangen (2006).
- [DIN96] DIN EN 60751.
Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Meßwiderstände,
Ausgabe:1996-07 (IEC 60751:1983 + AMD 1:1986 + AMD 2:1995);
Deutsche Fassung EN 60751:1995 + A2:1995 (1996).
- [Eid04] S. Eidelmann et. al.
Review of Particle Physics, Phys. Lett. B 592, (2004).

- [Ets94] K. Etschberger. (Hrsg.)
CAN -Controller Area Network, Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen, Carl HanserVerlag, München, Wien, (1994).
- [Fer06] T. Ferber.
Messung der Gaseigenschaften unter Einfluss von molekularem Sauerstoff und Aufbau eines Gassystems für das Driftröhren-Myon-Spektrometer des OPERA-Detektors,
Diplomarbeit, Universität Hamburg (2006).
- [Fel05] G. Felici, A. Paoloni, R. van Staa, R. Zimmermann.
Concept of the Trigger System for the Precision Tracker, Internal Note (2005).
- [Gri99] O. Grimm.
Driftgeschwindigkeits- und Signalverstärkungsmessung in Gasen für das äußere Spurkammersystem des HERA-B Detektors,
Diplomarbeit, Universität Hamburg (1999).
- [Gru93] C. Grupen.
Teilchendetektoren, Spektrum Verlag, (1993).
- [Gru00] C. Grupen.
Astroteilchenphysik, Springer-Verlag, Berlin (2000).
- [Jum05] JUMO GmbH & Co KG.
'Platin-Folien-Temperatursensor nach DIN EN 60 751, Bauform PF (90.6023)', (2005).
- [Kam59] E. Kamke.
Differentialgleichungen Lösungsmethoden und Lösungen, Band I, 6. Auflage/Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Seite 556 (1959).
- [Kle92] K. Kleinknecht.
Detektoren für Teilchenstrahlung, BG Teuber, Stuttgart (1992).
- [Kne88] F. K. Kneubühl.
Repititorium der Physik, BG Teuber, Stuttgart (1988).
- [Led62] L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger et al.
Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos, Phys. Rev. Lett. 9: 36-44, (1962).
- [Loh90] E. Lohrmann.
Einführung in die Elementarteilchenphysik, 2. Aufl., B.G. Teuber, Stuttgart, (1990).
- [Loh92] E. Lohrmann.
Einführung in die Hochenergiephysik, 4. Aufl., B.G. Teuber, Stuttgart, (1992).
- [Mon03] Peter Monadjemi.
Visual Basic 6, Kompendium Sonderausgabe, Markt+Technik, (2003).

- [Ope00] OPERA Collaboration.
An appearance experiment to search for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations in the CNGS beam, Experiment Proposal, (2000).
- [Pat01] T. Patzak (DONUT).
First direct observation of the tau-neutrino, Europhys. News 32 (2001) 56-57.
- [Pau61] W. Pauli.
in: *Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie*, p. 156.
Hrsg. W. Westphal, Vieweg & Sohn, Braunschweig (1961).
- [Pea06] Peak Systems.
<http://www.peak-system.com>, (2006).
- [Per98] Robert Pernack.
Untersuchungen von Gasmischungen mit Blick auf die im Spurkammersystem des HERA-B-Detektors erreichbare Effizienz und Auflösung, Diplomarbeit, (1998).
- [Per04] Robert Pernack.
J/ ψ - und ψ' -Produktion bei HERA-B, Dissertation, (2004).
- [Phi98] Philips.
Data Sheet KTY81-1 series silicon sensors, (1998).
- [Rei56] F. Reines, C.L. Cowan.
Nature **178** (1956) 446; 523 (erratum); *C.L. Cowan et al.: Science* **124** (1956) 103.
- [Sau77] F. Sauli.
Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers, Lectures given in the academic training programme of CERN, Geneva (1997).
- [Sch97] N. Schmitz.
Neutrino-physik, Teubner, Stuttgart (1997).
- [Sch97a] N. Schmidt.
Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers, Lectures given in the academic training program of CERN, Geneva (1997).
- [Sew06] J. Sewing.
Entwicklung und Bestimmung der Nachweiseigenschaften des Myon-Detektors für das OPERA-Experiment, Dissertation, Universität Hamburg (2006).
- [SvS05] J. Schütt, R. van Staa.
OSUB OPERA Support Board, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (2005).
- [SvS06] J. Schütt, R. van Staa.
OTB OPERA Trigger Board, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (2006).

- [Zim99] R. Zimmermann.
Zeitmeßelektronik für den HERA-B-Detektor, Dissertation, Universität Rostock (1999).
- [Zim05] R. Zimmermann, J. Ebert, C. Hagner, B. Koppitz, V. Saveliev, W. Schmidt-Parzefall, J. Sewing, Y. Zaitsev.
The precision tracker of the OPERA detector, NIM A555, Pages 435-450. (2005).
- [Zim06] R. Zimmermann.
Status of the OPERA Experiment, arXiv:physics/0604101. (2006).

Danksagung

Vielen, vielen Dank ^{1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13} !

¹Prof. Dr. Caren Hagner für die Übertragung dieser Arbeit.

²Prof. Dr. Walter Schmidt-Parzefall für alle fachlichen und geselligen Beiträge in der Gruppe.

³Dr. Raoul Zimmermann für die Betreuung mit vielen Tipps und Hilfen am Teststand und anderswo.

⁴Dr. Joachim Ebert für die vielen Tipps, den roten Faden in der Arbeit und natürlich den Freitagskaffee!

⁵Natürlich auch der Chaosbande aus Doktoranden und Diplomanden (Sommerstudenten, Praktikanten, eben den sog. Kollegen): A-Jörn (Jörn Boysen, für die gemeinsame Zeit in der Halle), B-Jörn (Björn Sönke Wonsak, unser Arbeitstier [rm -r *]), Torben (Torben Ferber, der Göttliche), Benny (Benjamin Janutta, weil er der Beste ist), Jan (Jan Sewing, weil er ganz lieb ist), Computerwurm (Martin Hierholzer, für seine lustigen Programme), Ole (Ole Ross, für seine soziale und politische Lebensweise), Daniel (Daniel Bick, für die tollen gnuplot-Tipps), Rokko (Benjamin Orth, unser Jogger), Matze (Matthias Röder) und alle, die schonmal da waren oder noch kommen werden.

⁶Allen gruppeninternen und -externen Personen, die eine große Hilfe waren, insbesondere: Herrn van Staa für die Erklärungen zu CAN und weitere Hilfen, Lutz Berger für seine technischen Bausteine am Teststand, Uwe Kühnel für meine Büropflanze und diverse Hilfen, Martin Bräuer für seine Beckhoffhinweise und die Hilfe am Gran Sasso, Lars Gumprecht für Temperatursensoren, die Nutzungsmöglichkeit des Wasserbades und diverse Tipps zur elektronischen Temperaturmessung, Hans-Jürgen Ohmacht (Hajo) für die allseits gute Laune und einen immer kurzen Dienstweg, unseren Sekretärinnen Frau Hack und Frau Biermann sowie dem gesamten technischen Personal.

⁷Allen Korrekturlesern, vor allem Raoul, Jochen, Rokko, Benny, Jörg, Gika, meinen Eltern und Uli für das Korrekturlesen dieser Danksagung.

⁸Allen Freunden aus der Uni, ohne die das Studium nur halb so lustig gewesen wäre, insbesondere Stephan, Anne, Niels, Claudia, Christian, Mahdi, Manuel, Arafat, Ilka, Marc, Nina, Saskia, Nuran.

⁹Allen Freunden, den ich das ein oder andere Bier weggetrunken habe oder die mich immer irgendwie bei Laune gehalten haben (in nahezu willkürlicher Reihenfolge:) Taschi, Haacki, Alex, Hannah, Andrea, Charlotte, Johannes, Verena, Frank, Thomas, Ulrike, Hannes, Clemens, Borge, Florian, Kerstin, Monica, David, Magdalena, Jonathan, Kerstin, Flix, Philipp, Kristin, Helfi, Sonja, Rüdiger, Peter, Lutzi, Resi, Tommy, Judit, Tobi, Janina, Krisztina, Astrid, Frank, Nico, Nik, Martin, Volodia, Toma, Peza, Julia, Barbara, Uli (Herr Petersen), Dominik, Anna, Felix, Vero, Olli, Elmar, Ulli, Sarah, Jessica, Elisabeth, Katrin, Bastian, Jörg, Schumi, Fabian, Peter, Kerstin, Birgit, Jojo, Sandra, Zwelch und Dr. Jefferson.

¹⁰Der DESY PR-Abteilung, insbesondere Veronika und Christian.

¹¹Der gesamten OPERA-Kollaboration.

¹²Meiner ganzen Familie, insbesondere natürlich meinen Eltern für die finanzielle und seelische Unterstützung vor, während und nach der Arbeit.

¹³Allen, die noch meinen, hier stehen zu müssen, aber versehentlich vergessen wurden.

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ausschließlich mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln verfasst zu haben.
Mit der Veröffentlichung und der Auslage in der Bibliothek bin ich einverstanden.

Hamburg, den 6. Juni 2006

Christoph Göllnitz