



# Analyse von NC- und CC-Ereignissen in OPERA

## Analysis of NC- and CC-Events in OPERA

von

Volker Braunert

geboren am

04.07.1984

Bachelor-Arbeit im Studiengang Physik

Universität Hamburg

2010

1. Gutachter: Prof. Dr. Caren Hagner
2. Gutachter: Dr. Björn Sönke Wonsak

**Kurzfassung** Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird das Verhältnis aus NC<sup>1</sup>- und CC<sup>2</sup>-Ereignissen, sowohl bei Monte-Carlo- als auch bei realen Daten betrachtet. Zunächst werden mittels Monte-Carlo-Daten Kriterien bestimmt, die eine visuelle Analyse erst ermöglichen. Im Anschluss werden diese Kriterien auf einen Datensatz von etwa 2300 Monte-Carlo-Ereignissen angewendet und die eigene Effizienz bestimmt. Nun werden 2000 reale Ereignisse charakterisiert und die erhaltenen Ereigniszahlen, um die eigene Effizienz, korrigiert. Dieses Vorgehen führt auf eine wahre Anzahl von CC- bzw. NC-Ereignissen. Für diese wahren Ereigniszahlen wird das Verhältnis  $R = \frac{\text{Anzahl NC}}{\text{Anzahl CC}}$  bestimmt und die Verhältnisse der beiden Datensätze verglichen. Im Vergleich lassen sich zufriedenstellende Ergebnisse erzielen, da die Werte in etwa im gegenseitigen Fehlerbereich liegen.

**Abstract** In this bachelor thesis the ratio between the counts of NC- and CC-events is contemplated for Monte-Carlo- and real data. At first criteria for characterizing the event types will be determined via Monte-Carlo-Data, so that a visual analysis will be enabled. These criteria are applied to about 2300 Monte-Carlo-Events to define the efficiency of the analyzer. Subsequently 2000 real events are characterized and on this efficiency basis the counts of NC- and CC-events will be corrected, so that we get a true count of events of the respective event. Afterwards we specify the ratio  $R = \frac{\text{count NC}}{\text{count CC}}$  and the ratios of Monte-Carlo- and real data will be compared. Comparing these ratios yields satisfactory results, due to the fact that they are included in each others error ranges.

---

<sup>1</sup> *engl.* neutraler Strom; Beschreibung in Kapitel 2.4

<sup>2</sup> *engl.* geladener Strom; Beschreibung in Kapitel 2.4

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Standardmodell/Neutrinos . . . . .	7
2.2	Schwache Wechselwirkung . . . . .	9
2.3	Neutrino-Nukleon-Wechselwirkung . . . . .	9
2.4	NC-/CC-Ereignisse . . . . .	10
2.5	Bethe-Bloch-Formel . . . . .	10
2.6	Wirkungsquerschnitt . . . . .	11
<b>3</b>	<b>OPERA-Experiment</b>	<b>12</b>
3.1	CERN-Neutrino-to-Gran-Sasso-Strahl . . . . .	13
3.2	OPERA-Detektor . . . . .	16
3.2.1	Target-Bereich . . . . .	17
3.2.2	Myon-Spektrometer . . . . .	18
3.3	OpCarac . . . . .	22
3.3.1	Fiducial Volume . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Ereignischarakterisierung „nach Auge“</b>	<b>24</b>
4.1	NC-/CC-Ereignisse: Kriterien mittels Monte-Carlo-Daten . . . . .	24
4.1.1	Definition von Effizienz . . . . .	27
4.1.2	Fiducial Volume Selection Efficiency <sup>3</sup> . . . . .	27
4.2	Effizienzbestimmung mittels Monte-Carlo-Daten . . . . .	28

---

<sup>3</sup>fiducial volume selection efficiency - *engl.* Effizienz des gewählten Referenzvolumens

---

<b>5</b>	<b>Auswertung realer Daten</b>	<b>30</b>
5.1	Typfilter . . . . .	30
5.2	Berechnung der wahren NC- bzw. CC-Ereigniszahlen nach Effizienzkorrekturen .	31
5.3	Vergleich (Monte-Carlo/ Real) . . . . .	32
5.4	Ergebnisverfälschende Faktoren . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>35</b>

# 1 Einleitung

Seit inzwischen mehr als 40 Jahren ist das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik gültig und beschreibt sehr präzise Wechselwirkungen zwischen Quarks und Leptonen. In Experimenten zum  $\beta$ -Zerfall bei Tritium wurde festgestellt, dass das entstehende Elektron ein Energiespektrum besitzt, es hat also keine feste Energie. Da beim Zerfall aber immer die gleiche Energie frei wird, muss etwas die Energiedifferenz abtragen, da Energieerhaltung gelten muss. Dieser Träger der Restenergie ist das Neutrino. Bei einer genauen Betrachtung der maximalen Energie des Elektrons in diesem Spektrum lässt sich auf die Energie des Neutrinos schließen. Es entsteht durch das Abtragen der Energie durch das Neutrino eine Modifikation im Spektrum. Durch die Untersuchung der Elektronen lässt sich nun nachweisen bis zu welcher Energie das Spektrum verläuft und, im Vergleich mit der eigentlichen maximalen Energie, eine Obergrenze für die Neutrinomasse bestimmen. Diese liegt für das  $\nu_e$  bei  $m < 2$  eV. Da der Nachweis durch Neutrinooszillationen erbracht wurde, dass diese Obergrenze existiert, ist die Masse eine notwendige Eigenschaft der Neutrinos. Dies bedeutet dass eine Verletzung der Leptonenfamilienzahlerhaltung (s. Kapitel 2.1) vorliegt, da die Neutrinos eine Wahrscheinlichkeit besitzen in ihrem Flavour<sup>1</sup> zu oszillieren. Diese Oszillationen wurden bis dahin primär über Disappearance<sup>2</sup>-Ereignisse nachgewiesen, d.h. dass die Anzahl an Neutrinos, die ein Detektor misst, unterhalb derer liegt, die erwartet ist, wenn die Möglichkeit von Oszillationen nicht vorhanden wäre. Demgegenüber steht das OPERA<sup>3</sup>-Experiment, bei dem mittels Appearance<sup>4</sup>-Ereignissen gearbeitet wird. Hierbei soll ein Überschuss an  $\nu_\tau$  nachgewiesen werden, die beispielsweise nicht einer Strahlverunreinigung zuzusprechen sind. Am CERN in Genf wird ein nahezu reiner  $\nu_\mu$ -Strahl erzeugt, auf das Laboratori Nazionale del Gran Sasso in Italien gerichtet und der, dort befindliche, OPERA-Detektor identi-

---

<sup>1</sup>flavour - *engl.* Geschmack; beschreibt im Zusammenhang mit der schwachen Wechselwirkung eine Quantenzahl von Elementarteilchen

<sup>2</sup>disappearance - *engl.* Verschwinden

<sup>3</sup>Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus

<sup>4</sup>appearance - *engl.* Erscheinen

fiziert CC-Ereignisse der  $\nu_\tau$  im Blei-Target.

In dieser Bachelorarbeit geht es um eine optische Analyse von rekonstruierten Teilchenbahnen, sowohl von CC- als auch von NC-Ereignissen, im OPERA-Detektor, und deren Verhältnis zueinander. Vorab werden Kriterien der visuellen Charakterisierung dieser beiden Ereignistypen und die eigene Effizienz des Auges an Monte-Carlo-Daten bestimmt. Im Anschluss erfolgt auf Basis dessen eine Analyse realer Daten und ein Abgleich der Monte-Carlo- mit den realen Daten bzw. deren Verhältnis aus NC- und CC-Ereignissen.

Das zweite Kapitel ist zunächst ein Überblick über Grundlagen der Teilchenphysik. Behandelt werden zunächst das Standardmodell und das Neutrino allgemein und in Folge die schwache Wechselwirkung, die Bethe-Bloch-Formel und der Wirkungsquerschnitt, welche alle drei wichtige Komponenten sind um eine Wechselwirkung der Neutrinos mit dem Target zu erklären.

Im dritten Kapitel geht es um das OPERA-Experiment an sich. Zunächst um die Erzeugung des Neutrinostrahls am CERN und den Aufbau des Detektors im Gran Sasso und im Anschluss um eine detailliertere Betrachtung der beiden Ereignistypen.

Das vierte Kapitel beschreibt die Ermittlung der Kriterien zur Klassifikation der Ereignistypen, darüber hinaus ebenso die eigentliche Definition von Effizienz und der Komponente der Effizienz des Fiducial Volume<sup>5</sup>. Im Weiteren wird die eigene Effizienz ermittelt und das Verhältnis von NC- zu CC-Ereignissen auf Basis dieser Effizienz bestimmt.

Das fünfte Kapitel stellt die Auswertung der realen Daten dar. Auf Basis der Ereignisklassifikation dieser Daten und der eigenen Effizienz aus den Monte-Carlo-Daten wird auch hier das Verhältnis von NC- zu CC-Ereignissen bestimmt und die beiden ermittelten Verhältnisse werden verglichen. Im Anschluss folgt die Präsentation von Fehlerquellen, die im Rahmen dieser Arbeit geschehen sind und deren Auswirkungen.

Zum Ende fasst das sechste Kapitel alle wichtigen Punkte dieser Arbeit zusammen.

---

<sup>5</sup>fiducial volume - *engl.* Referenzvolumen

## 2 Grundlagen

Zunächst sollen die Grundlagen der Teilchenphysik näher gebracht werden, die für die weitere Bestimmung der Kriterien zur Ereignischarakterisierung in Kapitel 4 notwendig sind. Hierzu werden zunächst das Standardmodell und Neutrinos in groben Zügen präsentiert genauso wie die schwache Wechselwirkung, die Bethe-Bloch-Formel und der Wirkungsquerschnitt, die ausschlaggebend für eine erfolgreiche Charakterisierung sind.

### 2.1 Standardmodell/Neutrinos

Die Vorhersage des Neutrinos stammt von Wolfgang Pauli im Jahre 1930, um sowohl die Drehimpulserhaltung und das kontinuierliche Spektrum der emittierten Elektronen beim  $\beta$ -Zerfall zu verstehen. Der Nachweis hingegen fand erst im Jahre 1956 durch F. Reines und C. L. Cowan statt. Im Jahre 1962 untersuchten L. M. Ledermann, M. Schwartz und J. Steinberger Neutrino-Nukleon-Reaktionen in einem Neutrinostrahl. In diesem Versuch wurde der Zerfall von Pionen und Kaonen untersucht. Protonen werden auf Beryllium geschossen, so dass Pionen und Kaonen erzeugt werden. Eine Eisenabschirmung sollte Mesonen und einen Großteil der Myonen stoppen. Die theoretische Erwartung war der Fund von  $e^-$  hinter dieser Abschirmung, da nur das  $\nu_e$  bekannt war, allerdings wurden im Detektor nur Myonen, aber keine  $e^-$  detektiert, obwohl nach Lee und Yang jedes übliche Experiment mit Pion-Zerfällen zu Zerfällen in  $e^-$  führen sollte, da ein Zerfall von Myonen in  $e^-$  und die zugehörigen Neutrinos nicht bekannt war. Eine zweite Art Neutrinos musste also existieren, das  $\nu_\mu$ . Im Jahre 1975 wurde das Tau-Lepton am SLAC<sup>1</sup> gefunden und das zugehörige Tau-Neutrino im DONuT<sup>2</sup>-Experiment im Jahre 2000.

---

<sup>1</sup>Stanford Linear Accelerator Center; Kalifornien, USA

<sup>2</sup>Direct Observation of the NuTau, ehemaliges Experiment am Fermilab, Illinois, USA

Es gibt also drei Familien für die sechs Leptonen:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Jeder einzelnen Familie ist eine Leptonenfamilienzahl  $L_e, L_\mu, L_\tau$  zugeordnet und diese stellen eine Erhaltungsgröße dar. Die Leptonen gehören zu den Fermionen, das bedeutet dass ihr Spin halbzahlig ist. Im Gegensatz zu den Neutrinos nehmen die anderen Leptonen aufgrund ihrer Ladung sowohl an elektromagnetischen, als auch an der schwachen Wechselwirkung teil. Die Neutrinos hingegen sind ungeladen und beteiligen sich somit nur an der schwachen Wechselwirkung. Keines der Leptonen unterliegt der starken Wechselwirkung und aufgrund der geringen Massen der Teilchen kann auch die Gravitation vernachlässigt werden. Da die Neutrinos im Standardmodell als masselos angenommen werden, folgt für sie eine Helizität von  $H = -1$ . Demgegenüber gibt es die jeweiligen Anti-Teilchen der obigen Teilchen, also beispielsweise  $e^+, \mu^+, \tau^+$  und deren zugehörigen Antineutrinos. Diese haben analog eine Helizität von  $H = +1$ . Ebenso existieren, neben den Leptonen, noch Quarks, die wiederum in 3 Familien kategorisiert sind:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Zugehörig sind auch hier die jeweiligen Antiteilchen. Bei den Zerfallsprozessen, die in Kapitel 3.1 beschrieben werden, tauchen Austauscheteilchen  $W_\pm$ - und  $Z_0$ -Bosonen, die die jeweiligen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen übertragen, auf. Auf eine genauere Spezifikation der Ereignistypen auf Basis dieser Austauscheteilchen wird in den Kapiteln 3.3 eingegangen.

## 2.2 Schwache Wechselwirkung

Die, für den Versuch ausschlaggebende, Kraft ist die schwache Wechselwirkung, die zu den fundamentalen Kräften zählt. Hierbei handelt es sich um eine Wechselwirkung, die mittels  $W_{\pm}$ - und  $Z_0$ -Bosonen stattfindet. Am CERN wurden alle drei Bosonen gefunden und nach der Bestimmung ihrer Massen von  $m_{W_{\pm}} = (80,398 \pm 0,025)\text{MeV}$  und  $m_{Z_0} = (91,1876 \pm 0,0021)\text{MeV}$ , was eine sehr große Masse darstellt, ist ebenso erklärt warum die Reichweite der schwachen Wechselwirkung sehr kurz ist. Sie lässt sich mit der Masse des jeweiligen Bosons über die Yukawa-Kopplung abschätzen:

$$R = \frac{h}{M_{W,Z} \cdot 2\pi \cdot c} \quad (2.3)$$

## 2.3 Neutrino-Nukleon-Wechselwirkung

Die Streuung von Neutrinos an Nukleonen lässt sich in drei unterschiedliche Bereiche unterteilen, auch wenn ihr Übergang fließend ist:

**Bereich 1: Resonante Streuung** Energie wird für Anregung oder Erzeugung von sehr kurzlebigen Teilchen umgewandelt

**Bereich 2: (quasi)elastische Streuung** Kinetische Energie der reagierenden Teilchen wird fast rein durch Stoß-Wechselwirkungen übertragen

**Bereich 3: Tiefinelastische Streuung** Streuung an Quarks, die erst bei höheren Energien stattfinden

Mittels der tiefinelastischen Streuung lassen sich Informationen über die Struktur von Nukleonen finden. Ebenso lassen sich die Verteilungen über Quarks und Anti-Quarks, mittels der unterschiedlichen Kopplungen der Vektorbosonen, bestimmen, da beispielsweise das  $W_+$  nur mit linkshändigen Quarks und rechtshändigen Antiquarks und analog das  $W_-$  für die Anti-Teilchen wechselwirkt.

## 2.4 NC-/CC-Ereignisse

NC- bzw. CC-Ereignisse unterscheiden sich primär in ihrem Zerfall mittels  $W_{\pm}$  bzw.  $Z_0$ . CC-Ereignisse finden über den Austausch eines  $W_{\pm}$  statt, da dies eine Wechselwirkung mit geladenen Strömen darstellt (s. Abb. 2.1 links). Dieser Ereignistyp erklärt auch die Entstehung geladener Leptonen. Bei der Wechselwirkung von  $\nu_{\mu}$  und den  $e^{-}$  der Atome entsteht über den Austausch des  $W^{-}$  ein Myon, da Ladungserhaltung an den Vertizes gelten muss. NC-Ereignisse finden, durch die Wechselwirkung mit ungeladenen schwachen Strömen, über den Austausch eines  $Z_0$  statt und zeichnen sich durch die Erhaltung der Leptonart aus (s. Abb. 2.1 rechts).

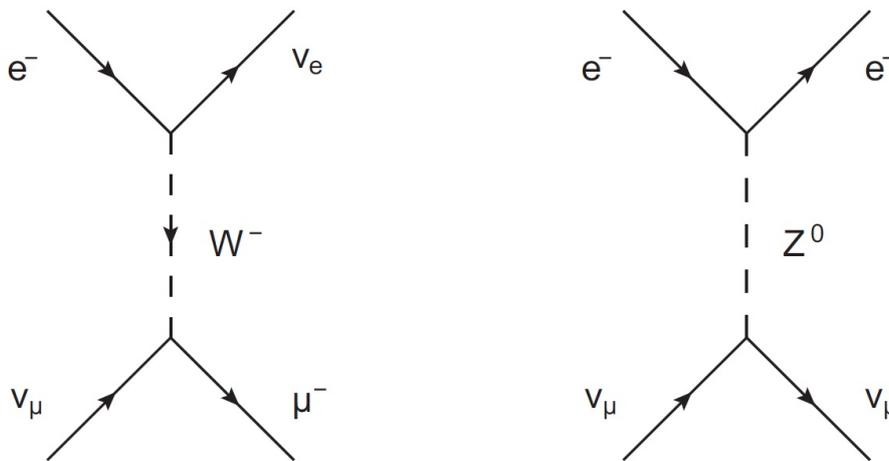


Abbildung 2.1: links: CC-Ereignis, rechts: NC-Ereignis [Cor10]

## 2.5 Bethe-Bloch-Formel

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Kriterienbestimmung ist die Bethe-Bloch-Formel. Geladene Teilchen ionisieren, beim Durchtritt durch beispielsweise Gas, über die Coulombwechselwirkung die Gasatome. Bei diesem Prozess wird Energie vom geladenen Teilchen auf das Elektron des Atoms übertragen, wodurch das geladene Teilchen dementsprechend Energieverluste erleidet.

Die Energieverluste durch Stöße mit Elektronen pro Strecke im durchdrungenen Material wurde klassisch von Bohr und quantenmechanisch von Bethe und Bloch berechnet:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi\alpha^2 \frac{(\hbar c)^2}{m_e c^2} n_0 \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{(1-\beta^2)I} \right) - \beta^2 \right] \quad (2.4)$$

$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$  Feinstrukturkonstante

$z \cdot e$  Ladung des Teilchens

$m_e c^2$  Ruheenergie des Elektrons

$\beta = \frac{v}{c}$  normierte Geschwindigkeit

$I \approx 16 \cdot Z^{0.9} eV$  Ionisationspotential mit  $Z$ =Kernladungszahl der Materie

$n_0 = N_A Z \frac{\rho}{A}$  Elektronendichte in der Materie mit  $\rho$  =Massendichte und  $N_A$  Avogadrozahl

## 2.6 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt ist ebenso ein wichtiger Punkt für die Bestimmung der Kriterien zur Klassifikation, allerdings ist eine Berechnung für eine optische Datenanalyse der Teilchenbahn nicht sinnvoll, so dass er hier nur oberflächlich behandelt werden soll, da er dennoch beachtet werden muss. Geometrisch betrachtet beschreibt er eine Reaktionswahrscheinlichkeit bzw. genauer gesagt eine effektive Querschnittsfläche auf der Teilchenwechselwirkungen stattfinden können. Er hat die Dimension einer Fläche die in Barn [b] angegeben wird:  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$ . Der Wirkungsquerschnitt ist materialabhängig. Da der Detektor aus einem Blei- und einem Eisenbereich besteht, ist es wichtig diesen Querschnitt bei den späteren Betrachtungen nicht außer Acht zu lassen, da die Klassifikationskriterien in diesen Bereichen nicht vereinheitlicht werden können.

### 3 OPERA-Experiment

Ziel des OPERA-Experiments ist der direkte Nachweis der Neutrinooszillation  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ . In Kapitel 3.1 wird zunächst die Erzeugung eines möglichst reinen  $\nu_\mu$ -Strahls beschrieben, dessen  $\nu_\mu$  eine ausreichend hohe Energie besitzen müssen um Tauonen erzeugen zu können. Die Erwartung ist, dass sich, durch eine solche Oszillation, ein geringer Anteil<sup>1</sup> der  $\nu_\mu$  in  $\nu_\tau$  umwandelt und im Detektor, über ein CC-Ereignis des  $\nu_\tau$  mit dem Blei, ein Tauon entsteht, dessen mittlere Lebensdauer mit etwa  $(290,6 \pm 1,1) \cdot 10^{-15}$  s sehr kurz ist. Dieses Tauon zerfällt, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, über ein CC-Ereignis, dementsprechend schnell nach einer mittleren Zerfallslänge von etwa  $600 \mu\text{m}$ . Beim Zerfall entstehen wiederum ein Lepton und ein zugehöriges Neutrino. Wegen Impulserhaltung beschreiben diese, zwei voneinander fortlaufende, Bahnen. Da nur das Lepton detektiert wird, entsteht in der Bahn ein Knick (s. Abb. 3.1).

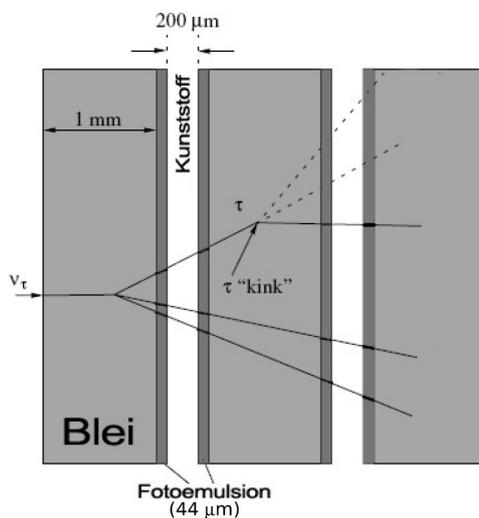


Abbildung 3.1: Teilchenspurschicht mit Knick am Entstehungsort des  $\nu_\tau$  [Won07]

<sup>1</sup>Berechenbar mittels  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau} = (\sin(2 \cdot \Theta))^2 \cdot (\sin(\frac{1,27 \cdot \Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]})^2$  mit  $E_\nu$  - Strahlenergie, L - Abstand Quelle - Detektor,  $\Theta$  - Mischungswinkel,  $\Delta m$  - Massendifferenz

### 3.1 CERN-Neutrino-to-Gran-Sasso-Strahl

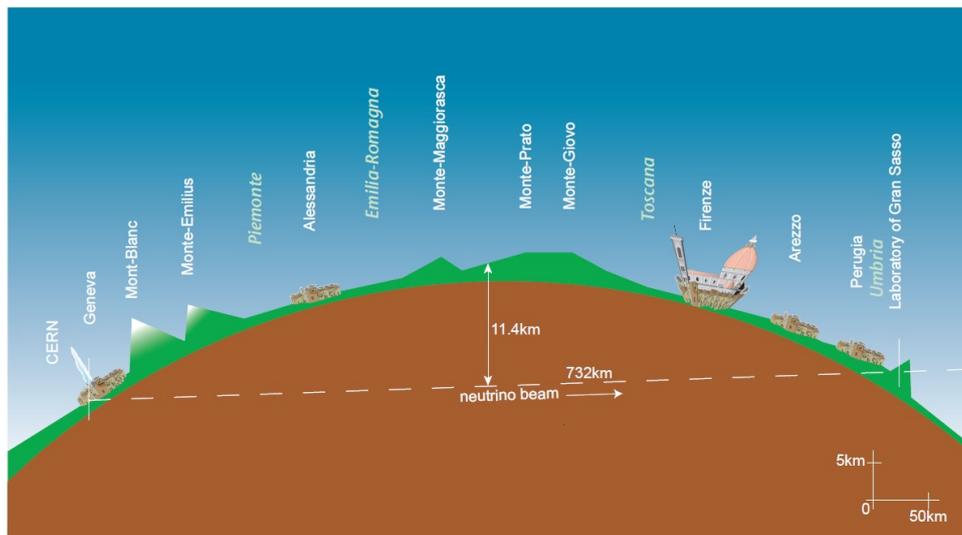


Abbildung 3.2: CNGS-Strahl vom CERN, Genf ins, 732 km entfernte, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien [Cern]

Um, wie in der Einleitung erwähnt, mittels  $\nu_\tau$ -Appearance arbeiten zu können wird ein möglichst reiner  $\nu_\mu$ -Strahl benötigt. Dieser wird am CERN<sup>2</sup> mithilfe von hochenergetischen Protonen (400 GeV) am SPS<sup>3</sup> Beschleuniger erzeugt. Die Protonen treffen auf ein Graphit-Target, wobei primär Pionen und Kaonen entstehen. Diese Teilchen passieren zwei magnetische Linsen (Horn, Reflektor), wodurch negativ geladene Teilchen aus der Strahlrichtung gelenkt und positiv geladene Teilchen zu einem parallelen Strahl fokussiert werden. Die meisten Pionen und Kaonen zerfallen zu Myonen zwischen Reflektor und Hadron Stop, obwohl ein Zerfall in Elektronen energetisch begünstigt wäre. Die Begründung hierfür liegt dabei darin, dass das Pion einen Spin von 0 besitzt, so dass die Spins der beiden Teilchen entgegengesetzt sein müssen. Aufgrund von Impulserhaltung fliegen die Teilchen in entgegengesetzte Richtungen, so dass ihre Helizität<sup>4</sup> gleich sein muss und somit beide Spins entweder zusammen in Flugrichtung oder zusammen gegen die Flugrichtung stehen müssen. Da das Antineutrino als nahezu masselos angenommen werden kann, besitzen Helizität und Chiralität<sup>5</sup> entgegengesetzte Vorzeichen, so dass der Spin immer

<sup>2</sup>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Genf, Schweiz

<sup>3</sup>Super Proton Synchrotron

<sup>4</sup>Spinkomponente in Impulsrichtung

<sup>5</sup>*griech.* Händigkeit (links/rechts), Gesetzmäßigkeit bei Betrachtung zweier zueinander spiegelbildlicher Systeme

in Flugrichtung zeigt. Das andere Teilchen muss demnach ebenso Helizität und Chiralität mit entgegengesetzten Vorzeichen besitzen. Um so schneller allerdings das Teilchen ist, desto geringer die Wahrscheinlichkeit, dass dieses unterschiedliche Vorzeichen eintritt, so dass hohe Geschwindigkeiten des Teilchens beim Zerfall unterdrückt sind. Die Masse des Myons unterscheidet sich weit weniger von der Masse des Pions, als die des  $e^-$ , wodurch das  $e^-$  eine viel höhere Bewegungsenergie trägt als das Myon. Der Rückschluss ist somit, dass der Zerfall in ein Myon bevorzugt ist, da es langsamer ist und der Zerfall in ein  $e^-$  unterdrückt wird, trotz seiner energetischen Begünstigung. Im Hadron Stop (Eisen-Graphit) werden, aufgrund des Wirkungsquerschnitts, die restlichen Hadronen (Pionen, Kaonen, Protonen,...) absorbiert, so dass ihn nur  $\nu_\mu$  durchdringen und ein nahezu reiner  $\nu_\mu$ -Strahl (s. Abb. 3.3) die Quelle (s. Abb. 3.4) in Richtung des Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) verlässt, welches sich 732 km entfernt im italienischen Gran Sasso befindet (s. Abb. 3.2).

Kontamination	Anteil
$\bar{\nu}_\mu$	2,4%
$\nu_e$	0,89%
$\bar{\nu}_e$	0,06%
$\nu_\tau$	vernachlässigbar

Abbildung 3.3: CNGS-Strahl: Verunreinigungen durch andere (Anti-)Neutrinos [Gia]

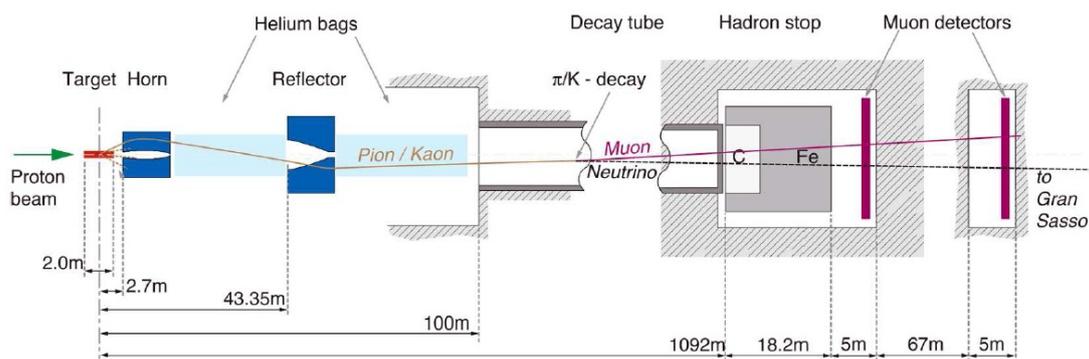


Abbildung 3.4: Neutrinoquelle, Protonen zerfallen über das Target zu Pionen und Kaonen, Fokussierung über Horn und Reflektor, Filterung über Hadron-Stop [Cern]



Abbildung 3.5: Unterirdische Anlage am Cern; Gelb: Neutrinoquelle; Hellblau (oben): SPS-Tunnel; Dunkelblau (unten): LEP/LHC-Tunnel [Cern]

### 3.2 OPERA-Detektor

Bei dem Detektor befinden sich hintereinander in Strahlrichtung zwei Supermodule, die beide aus je zwei Bereichen bestehen und gleich aufgebaut sind. Diese beiden Bereiche sind zum einen das Target<sup>6</sup> bzw. der Target Tracker<sup>7</sup>, bestehend hauptsächlich aus Blei, und die Magnete, bestehend größtenteils aus Eisen. Die erste Komponente dient der Wechselwirkung zwischen den Neutrinos und dem Blei. Die zweite Komponente dient der Bestimmung des Impulses der Teilchen, und insbesondere der Myonen mittels eines Magnetfelds, indem aus der Ablenkung der Teilchen bei bestimmter B-Feldstärke ihr Impuls ermittelt wird (s. Abb. 3.6).

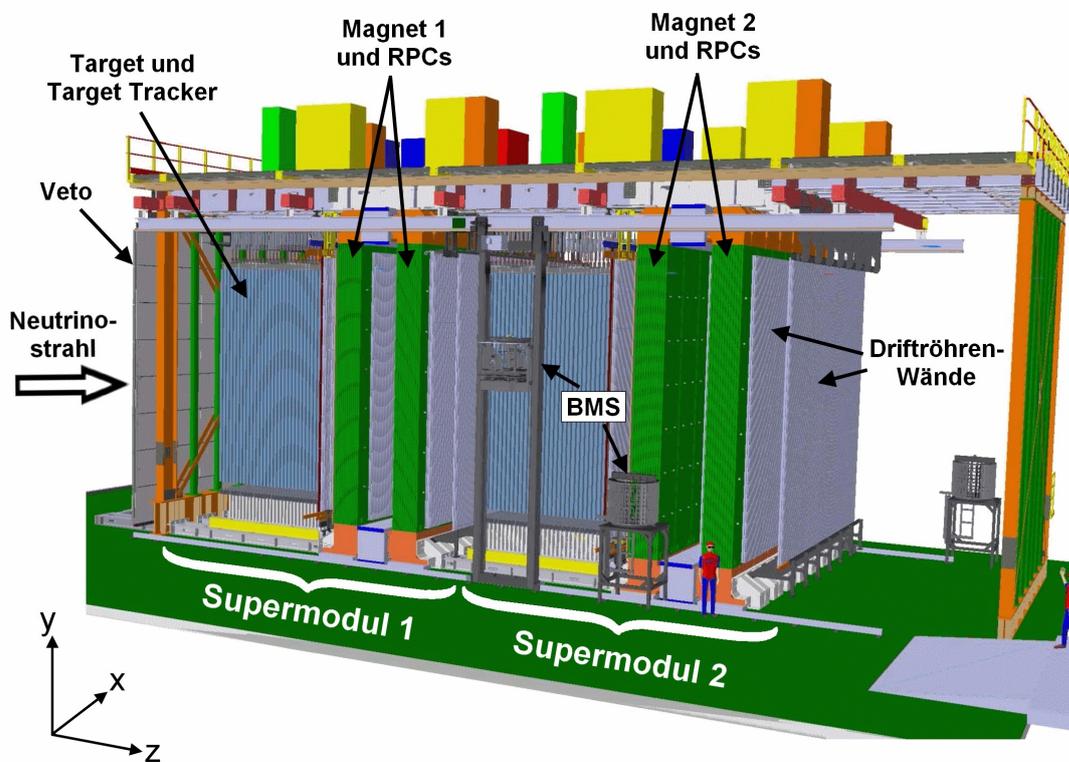


Abbildung 3.6: Detektoraufbau: VETO und 2 Supermodule aus je einem Targetbereich und einem Myonspektrometer; z-Richtung: Strahlrichtung, y-Richtung: vertikal, x-Richtung: horizontal [Cor10]

<sup>6</sup>target - engl. Ziel

<sup>7</sup>von track - engl. Spur

### 3.2.1 Target-Bereich

Im Target-Bereich befinden sich Bricks<sup>8</sup> zum Einen um eine Wechselwirkung mit dem Blei zu bewirken und zum Anderen um genau diese Wechselwirkungen nachzuweisen. Ein Brick ist aufgebaut aus 56 Schichten Blei zwischen denen sich ein Kunststoffträger mit beidseitig aufgebrachtener Fotoemulsion<sup>9</sup> befindet (s. Abb. 3.7). Ebenso zugehörig ist eine Aluminiumummantelung um diesen Block und ein einseitig aufgebracht changeable sheet<sup>10</sup>. Dieses stellt zwei weitere Fotoemulsionsschichten dar, um festzustellen, ob in diesem Brick ein Ereignis stattgefunden hat oder ob ein anderes Brick entwickelt werden muss. Der Targetbereich eines Supermoduls ist aufgebaut aus 31 Targetwänden zu je 64 übereinanderliegenden Reihen zu je 52 Bricks und nimmt so eine Länge von etwa 4 m in Strahlrichtung an. Zwischen diesen Wänden befinden sich Target Tracker, Plastikszintillatoren, die in einer Schicht horizontal und einer Schicht vertikal angeordnet sind. Diese dienen als Trigger<sup>11</sup>, um zu entscheiden, an welchen Stellen es sinnvoll ist einen Brick zu entnehmen. Zur Extraktion der Bricks dient das BMS<sup>12</sup>, ein Robotersystem. Leerstellen werden durch Nachschieben von Außen wieder nachgefüllt. Da etwa 150.000 Bricks hergestellt wurden ergibt sich das Gesamtgewicht des Detektor-Targets zu etwa 1,3 kt.

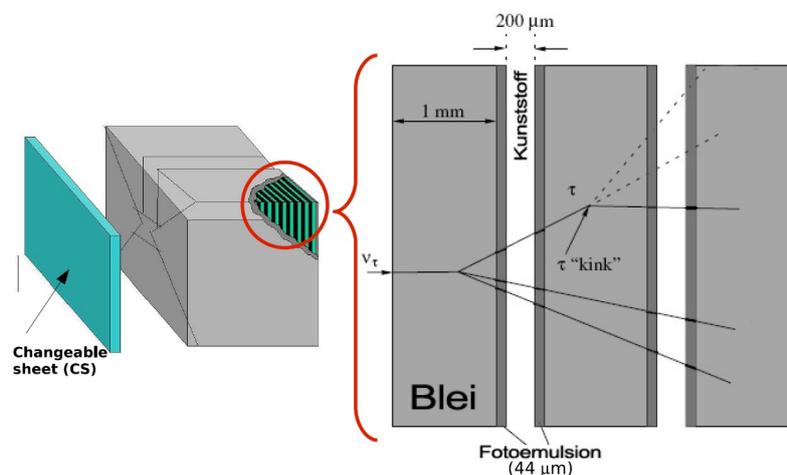


Abbildung 3.7: Brickaufbau [Won07]

<sup>8</sup>brick - *engl.* Ziegel

<sup>9</sup>Elektronische Analysen bzw. Auswertungen der Bricks spielen sich vollständig mittels der Fotoemulsionen ab

<sup>10</sup>changeable sheet - *engl.* austauschbares Blatt

<sup>11</sup>trigger - *engl.* Auslöseimpuls

<sup>12</sup>BMS - **B**rick **M**anipulation **S**ystem

### 3.2.2 Myon-Spektrometer

An den Target-Bereich anschließend befindet sich das Myon-Spektrometer. Dieses ist aufgebaut aus zwei Dipolmagneten, RPCs<sup>13</sup>, XPCs<sup>14</sup> und dem Precision Tracker.

**Dipolmagneten** Er besteht zum Einen aus zwei Armen zu je 12 Eisenplatten, die senkrecht zur Strahlrichtung positioniert sind. Oben und unten daran befindet sich je eine Kupferspule, so dass die Magnetfelder der beiden Arme antiparallel zueinander stehen. Das B-Feld hat eine Stärke von etwa 1,55 T. In diesem Bereich werden geladene Teilchen abgelenkt. Unter der idealen Annahme, dass das Teilchen keinen Energieverlust erleidet, wird es, durch die verschiedenen B-Feld-Richtungen, zwar abgelenkt aber verlässt, durch gleiche Feldstärke der beiden Magnetarme, den Dipolmagneten im gleichen Winkel mit nur horizontalem Versatz, wie beim Auftreffen auf den Magneten (s. Abb. 3.11). Aus dem Ablenkwinkel nach dem ersten Magnetarm kann auf Ladung und Impuls des Teilchens geschlossen werden.

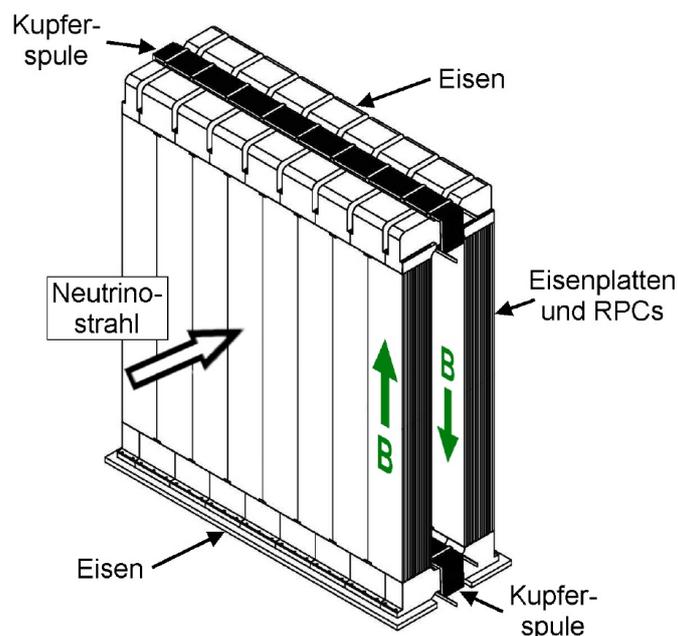


Abbildung 3.8: Dipolmagnete bestehend aus 2 Armen zu je 12 Eisenplatten [Col00]

<sup>13</sup>RPC - **R**esistive **P**late **C**hamber, *engl.* Widerstandsplattenkammer

<sup>14</sup>XPC - **C**rossed **R**PC, *engl.* gekreuzte RPC

**RPCs/XPCs** Zwischen den Eisenplatten des Dipolmagneten finden sich die RPCs, welche aus zwei parallel angeordneten, unter Hochspannung ( $5,8 \text{ kV}$ ) stehenden, Bakelit-Elektrodenplatten bestehen. Zwischen diesen Platten befindet sich ein Gasgemisch. Durchtretende Teilchen können das Gas ionisieren, so dass die Ionen von den Platten angezogen werden und bei hoher Gasverstärkung eine kurze Dauerentladung zwischen den Platten stattfinden kann. Dieses Signal wird im Anschluss über Kupfer-Elektroden ausgelesen, die in horizontaler bzw. vertikaler Ebene zur Strahlrichtung befestigt sind (s. Abb. 3.9).

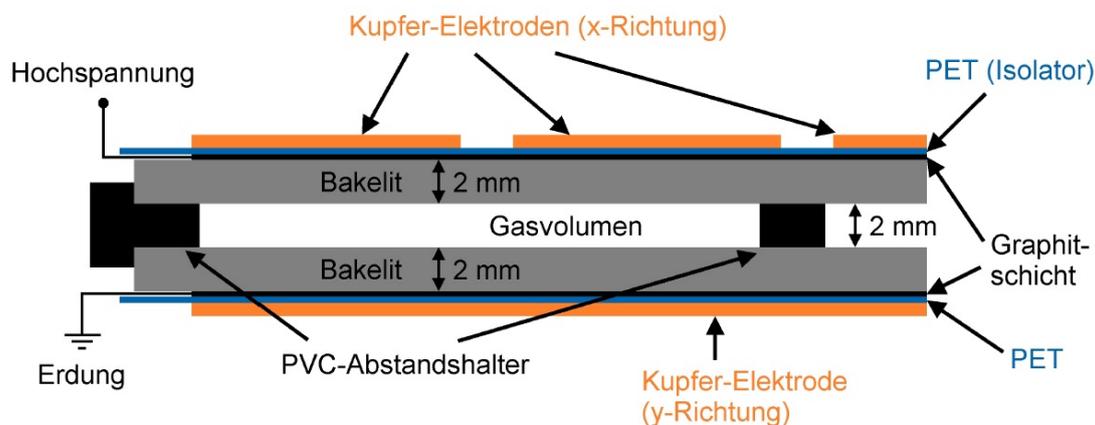


Abbildung 3.9: RPC-Aufbau, obere Elektrode horizontal, untere Elektrode vertikal ausgerichtet [Len07]

Die XPCs befinden sich direkt vor dem Magneten. Ihre Widerstandsplatten bestehen aus Glas und die Kupferelektroden sind um  $42,61^\circ$  in der Horizontalen geneigt. So sollen mögliche Zweideutigkeiten bei der Rekonstruktion gelöst werden, die bei der Zusammenführung aus  $xy$ - und  $xz$ -Ebene auftreten können. Weiterhin fungieren diese XPCs, zusammen mit einigen der RPCs, als Trigger für den Precision Tracker und geben ihm ein präzises zeitliches Signal zur Messung.

**Precision Tracker** Der Precision Tracker (PT) besteht aus 9504 Aluminium-Driftröhren. Die Driftröhren sind in Modulen zu vier Lagen á zwölf Röhren angeordnet, so dass bei einem Teilchendurchgang immer, unabhängig vom Einfallswinkel, mindestens drei Röhren durchflogen werden. Diese Module befinden sich immer zu einem Paar vor, hinter und zwischen den Armen des Dipolmagneten und dienen der Bestimmung des genauen Durchgangsweges durch den Dipolmagneten.

Aufgebaut ist jede einzelne dieser Driftröhren aus einem Aluminiumrohr in dessen Mitte ein goldbeschichteter Wolframdraht positioniert ist. Durch eine Hochspannung zwischen Draht und Rohr von 2,45 kV fungiert die Röhre als Kathode und der Draht als Anode. In ihrem Inneren befindet sich ein Gasgemisch, dass von durchdringenden Teilchen ionisiert werden kann, d.h. dass sie Elektronen der Gasatome ausgeschlagen werden. Die Atomrümpfe werden durch ihre positive Ladung zur Kathode und die Elektronen zur Anode bewegt. Durch die Anziehung zur Anode werden die Elektronen beschleunigt. Sie tragen schnell genug Energie um Sekundärionisationen auszulösen. Das Resultat ist eine Ladungsverstärkung in Richtung Anode, da sich die Zahl der freigesetzten Elektronen erhöht, so dass messbare Spannungspulse entstehen (s. Abb. 3.10). Mit Hilfe des zeitlichen Triggersignals der XPCs/RPCs, als Startsignal, und einem Stoppsignal bei Signalerhalt an der Anode kann der minimale Abstand zwischen Teilchen und Anode bestimmt werden. Hierdurch ergeben sich Abstandskreise zur Anode. Bei der Rekonstruktion mit mehreren Driftröhren kann so der Durchgangsweg durch die Magnetarme präzise bestimmt werden.

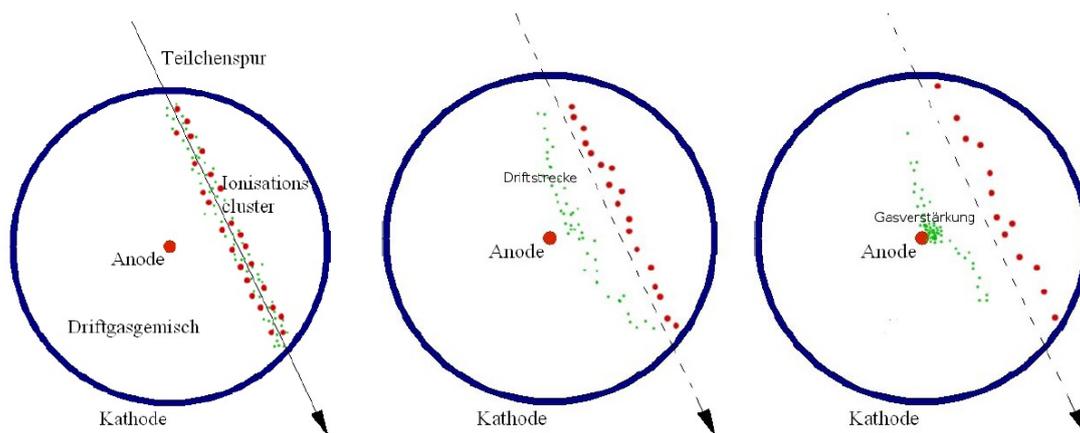


Abbildung 3.10: Driftröhrenschnitt [Roß06]

**Veto** Das Veto befindet sich vor den Supermodulen in Strahlrichtung und besteht aus zwei Lagen Glas-RPCs. Seine Aufgabe besteht darin zu entscheiden, ob geladene Teilchen vor oder im Detektor entstanden sind. Wird schon hier ein geladenes Teilchen gefunden, ist dieses vor dem Detektor entstanden und somit für eine Messung nicht relevant, so dass diese Spur direkt aussortiert wird.

**Hauptkomponenten des Myon-Spektrometers** Ein Zusammenspiel aus den 3 Hauptkomponenten (Dipolmagnet, RPC/XPC, Precision Tracker) gibt Auskunft über die gesamte Bahn, die ein Teilchen im Myon-Spektrometer eingeschlagen hat:

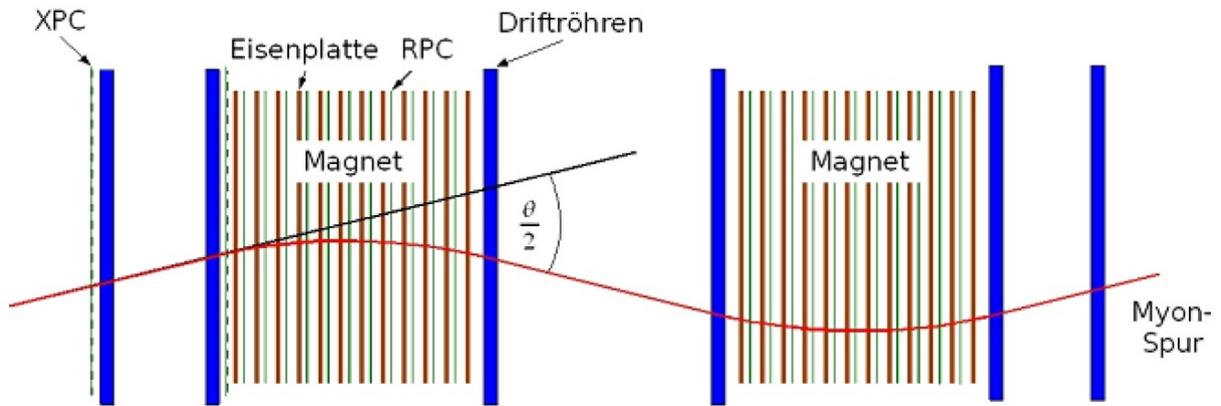


Abbildung 3.11: PT-Module blau, Teilchenbahnkrümmung übertrieben dargestellt. Der Eintrittswinkel kann bestimmt werden über das erste Paar PT. Das zweite Paar liefert den Winkel der Ablenkung durch das Magnetfeld; unter Annahme, dass die Teilchen keinen Energieverlust erleiden, ist der Austrittswinkel aus dem 2. Magneten gleich dem Eintrittswinkel in den 1. Magneten [Cor10]

### 3.3 OpCarac

Die Opera-Software besteht aus einer ganzen Kette von Programmen. Hier soll uns nur die Komponente OpCarac interessieren, da sie für die Berechnungen in Kapitel 5 von Bedeutung ist. Diese Software kategorisiert unter gewissen Kriterien, wie unter Anderem mittels Spurlänge der rekonstruierten Spuren und Spurdichte, die Ereignisse in verschiedene Klassen:

**CONTAINED**<sup>15</sup> Primärer Wechselwirkungsbereich: Target

**SPECTRO** Primärer Wechselwirkungsbereich: Myon-Spektrometer

**FRONT-/SIDEMUON**<sup>16</sup> Wechselwirkungsbereich: Außerhalb des Detektors

Diese Art von detektierten Myonen entsteht durch Wechselwirkung beispielsweise mit der Hallendecke, in der der Detektor steht. Die Myonen entstehen nicht im Detektor und treffen den Detektor meist in einem anderen Winkel als die normalen Strahlmyonen.

**UNKNOWNTYPE**<sup>17</sup> Bei diesem Typ ist keine Klassifikation möglich

#### 3.3.1 Fiducial Volume

Bei realen Daten ist es notwendig ein sogenanntes Fiducial Volume einzuführen. Ereignisse wie SIDEMUON produzieren Entscheidungsfehler von OpCarac in der Klassifikation der zuvor genannten Klassen. Da die Teilchenspür am Rand des Detektors verläuft werden CC-Ereignisse aufgrund ihrer dort zu kurzen Spurlänge fälschlicherweise als NC-Ereignis kategorisiert. In Abb. 3.12 ist der gesamte Detektorbereich gezeigt. Grau der Target-Bereich, grün die Precision Tracker und rot die Dipolmagneten. Dunkel unterlegt ist das Fiducial Volume der jeweiligen Detektor-komponenten. Hell ist somit der Bereich der Vertizes von beispielsweise SIDEMUON-Ereignissen, die uns, für die Analyse, nicht interessieren sollen (s. Abb. 3.12). Auch wenn im Fall von Monte-Carlo-Daten nur CONTAINED-Ereignisse simuliert werden, kann OpCarac auch hier Fehler in der Klassifikation machen. Man muss sich also ebenfalls auf CONTAINED-Ereignisse beschränken und das Fiducial Volume einführen.

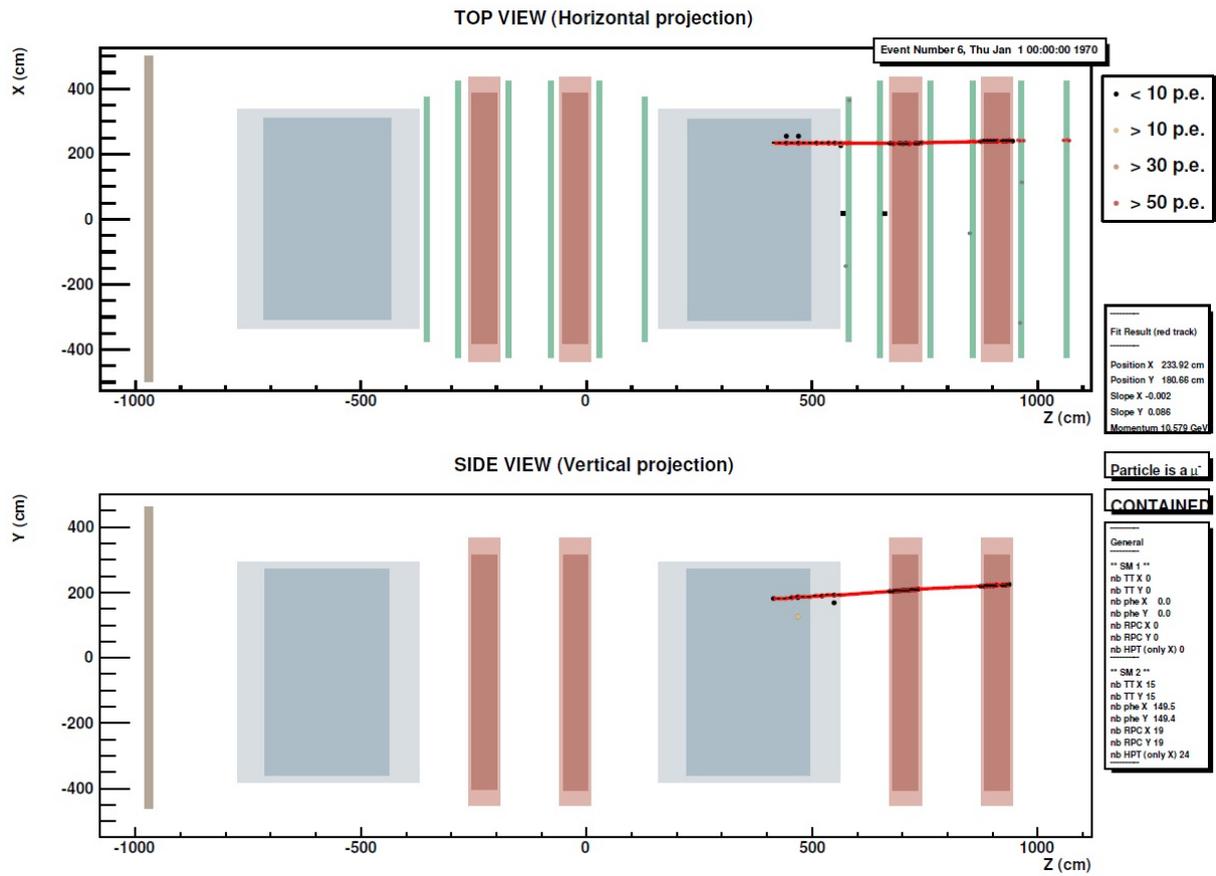


Abbildung 3.12: Gesamter farbiger Bereich: Detektorbereich, Tiefe Farben: Fiducial Volume, Begrenzung auf kleineren Messbereich; Braun: Veto, Blau/grau: Target, Rot: Magnetarme, Grün: Precision Tracker [Cor10]

## 4 Ereignischarakterisierung „nach Auge“

Für Kapitel 5 (Auswertung) ist es nötig Kriterien zu finden, um eine Klassifikation per Auge überhaupt zu ermöglichen. Diese Kriterien basieren zum Großteil auf Spurlänge und der Spurdichte bei einem einzelnen Ereignis. Weitere Kriterien werden im Folgenden ebenso mitbetrachtet, um eine feinere Charakterisierung vorzunehmen.

### 4.1 NC-/CC-Ereignisse: Kriterien mittels Monte-Carlo-Daten

Auf Basis von Ereignissen aus Monte-Carlo-Daten deren Klassifikation (NC, CC), wie zuvor beschrieben, sicher ist, werden zunächst Kriterien gefunden. Es werden etwa 200 Ereignisse pro Typ betrachtet und auf ihre Besonderheiten hin analysiert.

**NC-Ereignis** Dieser Typ weist primär kurze Teilchenspuren auf und die Dichte ist überschaubar. Seine Bahnlänge beschreibt im Target-Bereich (circa 4 m Länge in Strahlrichtung) etwa  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  Länge des Bereichs und kann in seltenen Fällen bis zu  $\frac{3}{4}$  der Bereichslänge erreichen. Da meist mehrere Spuren auftreten ist ebenso zu erwähnen, dass in diesem Fall alle Spuren in etwa gleiche Länge aufweisen. Bei Austritt aus dem Blei, kann diese Bahnlängenorientierung, aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsquerschnitte, nicht mehr angenommen werden. Im Spektrometer-Bereich können nun durchaus größere Längen erreicht werden. Die Punkte im Ereignis-Fenster (s. Abb. 4.1) stellen Energieverluste der Teilchen dar. Diese verlorene Energie entspricht Ionisationen der Target Tracker, visualisiert durch Punkte, mittels welcher auch die Spurrekonstruktion stattfindet. Im Falle eines NC-Ereignisses verteilen sich diese Punkte relativ nah um die Spur selbst. Die Bahnen sind im Target-Bereich meist recht parallel angeordnet und können beim Übergang zum Spektrometer wirre Bahnen annehmen.

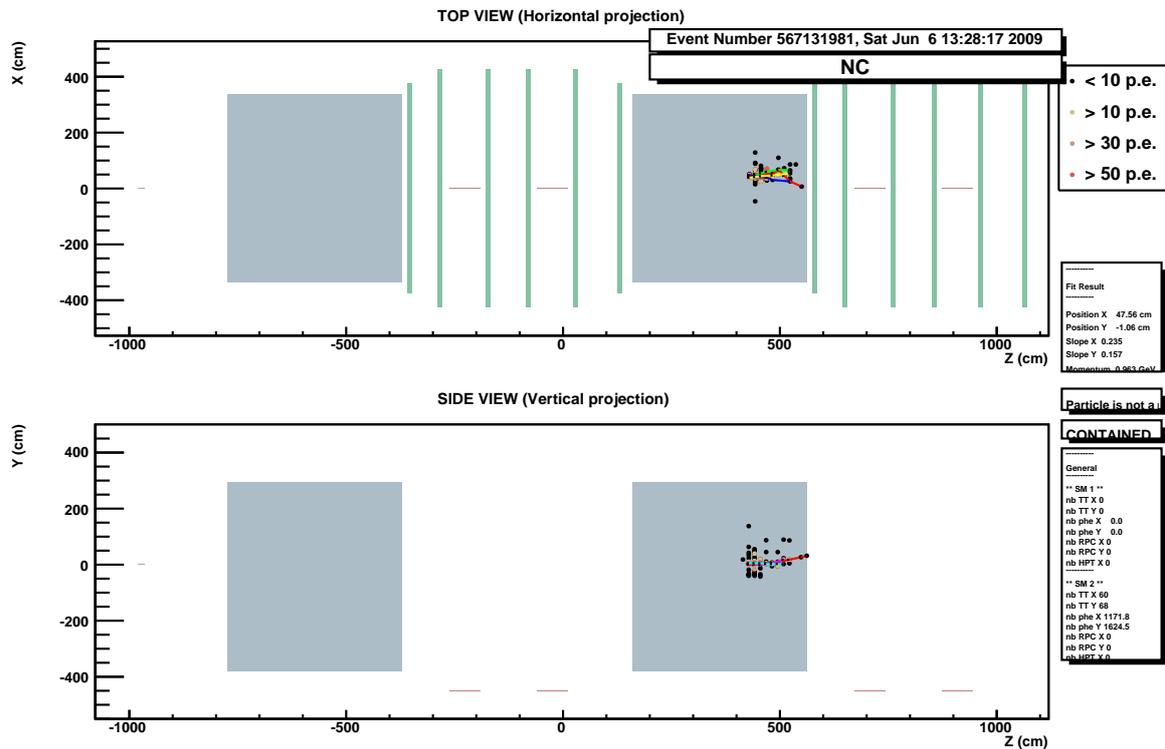


Abbildung 4.1: Typisches NC-Ereignis; rechts angezeigt, dass das Teilchen kein Myon und das Ereignis CONTAINED ist, Rest rechts hierbei nicht von Interesse

**CC-Ereignis** Ein ausschlaggebender Punkt für ein CC-Ereignis ist eine Primärspur eines geladenen Teilchens, das im Fall von Myonen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit den Detektor komplett durchdringt. Dennoch weisen die sekundären Spuren eine größere Länge auf als im Fall der NC-Ereignisse. Diese liegen bei mindestens einer halben Target-Länge und erstrecken sich bis auf  $\frac{3}{4}$  des Bereichs. Da das Durchdringen der Primärspur kein notwendiges Muss für eine CC-Klassifikation ist, ist diese Länge dennoch ein ausschlaggebender Punkt. Eine Ablenkung im Spektrometer erfolgt hier weit weicher. Die Stetigkeit der Teilchenbahn bleibt erhalten. In diesem Fall befinden sich viele der Punkte (Energieverluste) verstreut um die Spuren und nicht spurnah. Ebenso haben sie eine weit höhere Anzahl als im NC-Fall und können manchmal per Auge einer Spur zugeordnet werden, die allerdings nicht rekonstruiert ist.

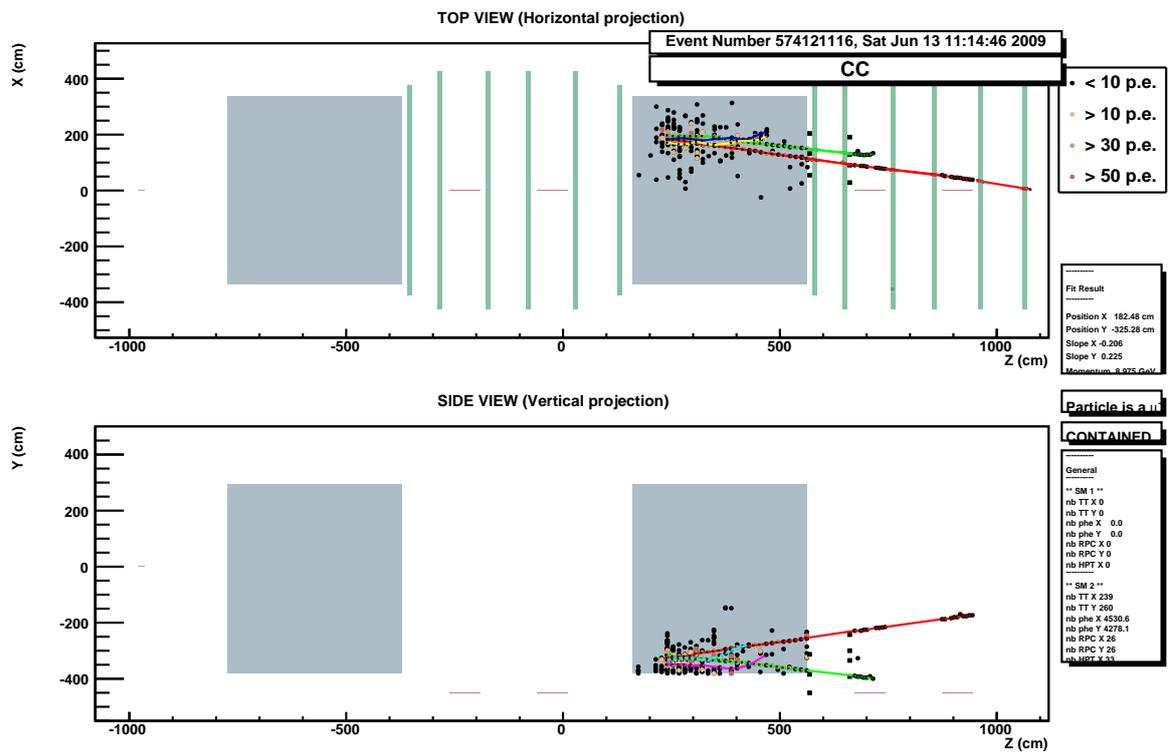


Abbildung 4.2: Typisches CC-Ereignis; rechts angezeigt, dass das Teilchen ein Myon und das Ereignis CONTAINED ist, Rest rechts hierbei nicht von Interesse

Auf Basis dieser Kriterien kann nun eine visuelle Klassifikation der Events in NC- bzw. CC-Ereignisse erfolgen. Hierzu muss die eigene Effizienz bestimmt werden, um bei realen Daten zu wissen mit welcher Güte die visuelle Klassifikation stattgefunden hat.

### 4.1.1 Definition von Effizienz

Die Effizienz gibt an mit welcher prozentualen Güte nach Auge eine Klassifikation korrekt getroffen wird. Hierzu teilt man die gemessene Anzahl der Ereignisse durch die korrekt Identifizierten. Die Zahl der korrekt identifizierten Ereignisse ergibt sich nach Abgleich mit der ursprünglichen Identität des Ereignisses. Dementsprechend ergibt sich die Ineffizienz aus gemessener Anzahl und den falschen Entscheidungen.

Für CC-Ereignisse:

$$\epsilon_{CC} = \frac{CC_{mess}}{\text{Richtige Entscheidungen (CC)}} \quad (4.1)$$

$$(1 - \epsilon)_{CC} = \frac{CC_{mess}}{\text{Falsche Entscheidungen (CC)}} \quad (4.2)$$

Analog für NC-Ereignisse:

$$\epsilon_{NC} = \frac{NC_{mess}}{\text{Richtige Entscheidungen (NC)}} \quad (4.3)$$

$$(1 - \epsilon)_{NC} = \frac{NC_{mess}}{\text{Falsche Entscheidungen (NC)}} \quad (4.4)$$

### 4.1.2 Fiducial Volume Selection Efficiency<sup>1</sup>

Bei dem Fiducial Volume handelt es sich, wie zuvor erklärt, um einen Bereich im Detektor bei dem beispielsweise SIDEMUON ausgeschlossen werden kann. Dieser Bereich besitzt eine gewisse Effizienz, die Fiducial Volume Selection Efficiency. Im Falle von Monte-Carlo-Daten werden nur CONTAINED-Ereignisse erzeugt und es ist vorab festgelegt welcher Ereignistyp (NC, CC) simuliert wird, auch wenn OpCarac bei der Klassifikation Fehler macht. Deshalb wird das Fiducial Volume für beide Analysen eingeführt und besitzt eine Effizienz, die im Folgenden für NC-Ereignisse als 88,2% und für CC-Ereignisse als 96,9% angenommen wird. Diese Prozentsätze sind nach Alessandro Bertolin berechnet [AB10].

---

<sup>1</sup>fiducial volume selection efficiency - *engl.* Effizienz des gewählten Referenzvolumens

## 4.2 Effizienzbestimmung mittels Monte-Carlo-Daten

Zur Bestimmung der Effizienz wurden 2291 Monte-Carlo-simulierte CONTAINED-Ereignisse analysiert. Hierzu wurde der Satz zuerst mit ausgeblendetem wahren Typ-Ergebnis<sup>2</sup> klassifiziert. Ein anschließender Vergleich mit dem, nach Simulation, festgelegten Ereignistyp ergab die folgenden Effizienzen  $\epsilon$  und Ineffizienzen  $(1 - \epsilon)$  für CC und NC:

$$\epsilon_{CC} = (94,6 \pm 3,1)\% \quad (4.5)$$

$$(1 - \epsilon)_{CC} = (5,4 \pm 0,5)\% \quad (4.6)$$

$$\epsilon_{NC} = (78,5 \pm 6,1)\% \quad (4.7)$$

$$(1 - \epsilon)_{NC} = (21,5 \pm 2,7)\% \quad (4.8)$$

Auf Basis dessen können nun mittels der folgenden Formeln die wahren Ereigniszahlen bestimmt werden:

$$CC_{mess} = \epsilon_{OpCar,CC} \cdot \epsilon_{CC} \cdot n_{CC} + \epsilon_{OpCar,NC} \cdot (1 - \epsilon)_{NC} \cdot n_{NC} \quad (4.9)$$

$$NC_{mess} = \epsilon_{OpCar,CC} \cdot (1 - \epsilon)_{CC} \cdot n_{CC} + \epsilon_{OpCar,NC} \cdot \epsilon_{NC} \cdot n_{NC} \quad (4.10)$$

Hier entspricht  $CC_{mess}$  der Anzahl von CC-Ereignissen nach Simulation (analog  $NC_{mess}$ ).  $n_{NC}$  bzw.  $n_{CC}$  sind die wahren Ereigniszahlen, die es zu bestimmen gilt.

**Erklärung des Formelwerks:** Die gemessene Anzahl an CC-Ereignissen ergibt sich aus dem wahren  $n_{CC}$  multipliziert mit der eigenen Effizienz der Klassifikation für CC-Ereignisse ( $\epsilon_{CC}$ ), addiert mit der wahren  $n_{NC}$  multipliziert mit der eigenen Ineffizienz für die NC-Ereignis-Klassifikation ( $(1 - \epsilon)_{CC}$ ). Die beiden Komponenten werden multipliziert mit der jeweiligen Effizienz des OpCarac für CC ( $\epsilon_{OpCar,CC}$ ) bzw. NC ( $\epsilon_{OpCar,NC}$ ). Die erste Komponente entspricht dem wahren Wert der CC-Ereignisse „reduziert“ auf die wirklich korrekten Entscheidungen und die zweite Komponente der wahren Anzahl der NC-Ereignisse „reduziert“ auf die falschen Entscheidungen dessen. Für  $NC_{mess}$  ergibt sich die Berechnung analog.

<sup>2</sup>s. z.B. Abb. 4.2, oben Ereignisdisplay mit beispielsweise der Ereignisnummer und darunter Klassifikation

Nach geeigneten Umformungen der Formeln ((4.9),(4.10)) lassen sich diese realen Ereigniszahlen bestimmen:

$$n_{CC} = \frac{CC_{mess} \cdot \epsilon_{NC} - NC_{mess} \cdot (1 - \epsilon)_{NC}}{\epsilon_{OpCar,CC} \cdot (\epsilon_{NC} \cdot \epsilon_{CC} - (1 - \epsilon)_{NC} \cdot (1 - \epsilon)_{CC})} \quad (4.11)$$

$$n_{NC} = \frac{NC_{mess} \cdot \epsilon_{CC} - CC_{mess} \cdot (1 - \epsilon)_{CC}}{\epsilon_{OpCar,NC} \cdot (\epsilon_{NC} \cdot \epsilon_{CC} - (1 - \epsilon)_{NC} \cdot (1 - \epsilon)_{CC})} \quad (4.12)$$

Mit den aus der optischen Analyse erhaltenen Ereigniszahlen von:

$$CC_{mess} = 1919 \pm 44 \quad (4.13)$$

$$NC_{mess} = 372 \pm 19 \quad (4.14)$$

ergeben sich die wahren Werte zu:

$$n_{CC} = 2012,9 \pm 35,0 \quad (4.15)$$

$$n_{NC} = 386,1 \pm 116,2 \quad (4.16)$$

und es folgt ein Verhältnis von:

$$R^{MC} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (19,2 \pm 5,8)\% \quad (4.17)$$

Alle Fehler sind statistischer Natur und wurden mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechnet.

## 5 Auswertung realer Daten

### 5.1 Typfilter

Auch bei der Auswertung realer Daten werden nur CONTAINED-Ereignisse betrachtet und das Fiducial Volume genutzt. Nach Alessandro Bertolin angenommen, liegen auch hier dessen Effizienzen bei  $\epsilon_{OpCarac,NC} = 88,2\%$  und  $\epsilon_{OpCarac,CC} = 96,9\%$ . Ebenso werden bei den betrachteten Ereignissen alle Ereignisse ausgeblendet, die nicht als CONTAINED klassifiziert werden. Andere Reaktionen sind für einen effektiven Vergleich nicht erwünscht, da beispielsweise FRONT- und SIDEMUON das Ergebnis dahingehend verfälschen, als dass zu viele CC- als NC-Ereignisse klassifiziert werden [AB10].

## 5.2 Berechnung der wahren NC- bzw. CC-Ereigniszahlen nach Effizienzkorrekturen

In diesem Schritt werden 2000 Ereignisse aus realen Daten analysiert und die wahren Werte, mit den, in Kapitel 4.2 erhaltenen, Effizienzen, berechnet:

$$\epsilon_{CC} = (94,6 \pm 3,1)\% \quad (5.1)$$

$$(1 - \epsilon)_{CC} = (5,4 \pm 0,5)\% \quad (5.2)$$

$$\epsilon_{NC} = (78,5 \pm 6,1)\% \quad (5.3)$$

$$(1 - \epsilon)_{NC} = (21,5 \pm 2,7)\% \quad (5.4)$$

Ereigniszahlen aus Analyse:

$$CC_{mess} = 1596 \pm 40 \quad (5.5)$$

$$NC_{mess} = 404 \pm 20 \quad (5.6)$$

Wahre Ereigniszahlen:

$$n_{CC} = 1645,3 \pm 49,6 \quad (5.7)$$

$$n_{NC} = 459,9 \pm 72,1 \quad (5.8)$$

Diese führen nun auf ein Verhältnis von:

$$R^{Real} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (28,0 \pm 4,5)\% \quad (5.9)$$

### 5.3 Vergleich (Monte-Carlo/ Real)

Die Verhältnisse aus den Kapiteln 4.2 und 5.2 wurden ermittelt zu:

$$R^{MC} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (19,2 \pm 5,8)\% \quad (5.10)$$

$$R^{Real} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (28,0 \pm 4,5)\% \quad (5.11)$$

Leicht ersichtlich ist der Unterschied zwischen der Theorie (Monte-Carlo-Daten) und der Praxis (reale Daten), wobei beide Werte im gegenseitigen Fehlerbereich liegen.

Solche Abweichungen können verschiedene Gründe besitzen. Ein großer Faktor sind Fehler in der Analyse, die im nächsten Kapitel besprochen werden sollen. Auf Basis des Weinbergwinkels, worauf hier nicht eingegangen werden soll, sollte das Verhältnis bei 30% liegen. Vergleichswerte werden aus [AB10] herangezogen:

$$R^{MC} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (22,8 \pm 0,8)\% \quad (5.12)$$

$$R^{Real} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (23,4 \pm 0,8)\% \quad (5.13)$$

Beide Vergleichswerte liegen im Fehlerbereich der, hier berechneten, Verhältnisse. Eine Deckung der Verhältnisse (Monte-Carlo/ Real) lässt sich auch bei Bertolins Berechnungen feststellen und spiegelt sich in den, hier berechneten, Verhältnissen wieder. Um das Verhältnis von 30% zu erhalten müsste jeder Ereignistyp gesehen und infolge korrekt identifiziert werden. Die Ereignisse werden allerdings nicht alle vom Detektor gefunden und weitergehend gibt es eine Effizienz für die Klassifikation die weder im NC- noch im CC-Fall bei 100% liegt. So ist die Erwartung, ganz ab von den Ungewissheiten des Neutrinoflusses, nicht gegeben ein Verhältnis von 30% aus den Berechnungen zu bekommen.

## 5.4 Ergebnisverfälschende Faktoren

**CONTAINED-Ereignisse (Reale Daten)** Ein gravierender Fehler, der im Rahmen dieser Arbeit zuerst gemacht wurde, war die Nichtreduktion des realen Datensatzes auf CONTAINED-Ereignisse. Die äußeren Einflüsse, also Myonen, die in den Detektor eintreten, aber nicht hier entstanden sind, ist relativ stark. Das Verhältnis verändert sich um einen großen Teil auf:

$$R^{Real} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (37,1 \pm 3,8)\% \quad (5.14)$$

Es besteht eine Veränderung des Verhältnisses um etwa 9%. Die SIDEMUONEN werden als NC-Ereignis gewertet, obwohl den CC-Ereignissen zugeordnet werden müssten. Durch das Ankratzen des Detektors ist ihre Spurlänge allerdings soweit minimiert, dass sie falschen Kategorisierungen unterliegen. Die Folge ist eine stark erhöhte Zahl an NC-Ereignissen. Dies ist auch der Grund wieso eine Analyse von ausschließlich CONTAINED-Ereignissen als gerechtfertigt angenommen werden kann und muss.

**CONTAINED-Ereignisse (Monte-Carlo-Daten)** Bei den Monte-Carlo-Daten wurden zuerst ausnahmslos alle Ereignistypen betrachtet. Da aber auch OpCarac Fehler in der Klassifikation macht, obwohl nur CONTAINED-Ereignisse simuliert werden, ist diese Betrachtung ein Fehler und wurde als zweite Fehlerquelle gefunden. Dieser Fehler wirkt sich dahingehend aus, dass sich die Verhältnisse zu den folgenden Werten ergeben:

$$R^{MC} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (18,7 \pm 5,7)\% \quad (5.15)$$

$$R^{Real} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (24,4 \pm 4,3)\% \quad (5.16)$$

Die Veränderung des realen Verhältnisses ergibt sich daraus, dass sich ein Fehler in den Monte-Carlo-Daten auf die Effizienzen auswirkt, die infolge für die realen Daten verwendet werden.

**Fiducial Volume Selection Efficiency Wahl** Im Fall der Monte-Carlo-Daten muss das Fiducial Volume, bezüglich des letzten Abschnitts (CONTAINED-Ereignisse (Monte-Carlo-Daten)) als 100% angenommen werden. Eine Einführung des Fiducial Volume ist sinnvoll, da OpCarac Fehler bei der Klassifikation macht. Eine nachträgliche Einführung der Fiducial Volume Selection Efficiency hätte dazu geführt, dass das erhaltene Verhältnis etwas besser die berechneten Werte von Bertolin repräsentiert hätte.

$$R^{MC} = \frac{n_{NC}}{n_{CC}} = (20,5 \pm 5,7)\% \quad (5.17)$$

Allerdings werden dabei Ereignistypen (SIDE-/FRONTMUON) rechnerisch mit einbezogen, die bei der optischen Analyse hätten ausgeschlossen werden müssen und so wird das Ergebnis verfälscht. Um ein aussagekräftigeres Ergebnis zu erhalten musste der Datensatz, unter Berücksichtigung ausschließlich von CONTAINED-Ereignissen, neu ausgewertet werden (s. Kapitel 4.2).

## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Bachelorarbeit war ein Vergleich der Reaktionsraten von NC- und CC-Ereignissen aus Monte-Carlo- und realen Daten. Die Ermittlung der Kriterien zur Kategorisierung erfolgt über die intensive Betrachtung der Ereignistypen. Mittels dieser Kriterien wurden etwa 2300 Monte-Carlo-Ereignissen klassifiziert und, mit nachfolgendem Abgleich der wahren Natur, die eigene Effizienz bestimmt. Auf Basis dieser Effizienz konnte eine Analyse von 2000 Events realer Daten erfolgen. Für die jeweils erhaltenen Reaktionszahlen von NC- bzw. CC-Ereignissen wurden die Verhältnisse  $R = \frac{\text{Anzahl NC}}{\text{Anzahl CC}}$  bestimmt und die beiden erhaltenen Raten verglichen.

Da die Fehlerbereiche jeweils das andere Ergebnis fast mit einschließen, können diese als gute Übereinstimmung gewertet werden und auch ein Vergleich mit den berechneten Werten nach Bertolin ergibt eine sehr gute Übereinstimmung.

Die großen statistischen Fehlerbereiche der Raten liegen bei realen Daten bei 16% und bei Monte-Carlo-Daten sogar bei 30% des Ergebnisses. Diese großen Fehlerbereiche lassen eine definitive Aussage kaum zu. Eine wesentlich größere Zahl an Ereignissen würde die statistischen Fehler wesentlich reduzieren. Ebenso ist eine stärkere Integration der Energieverluste der Teilchen eine Option, die in Betracht gezogen werden sollte, da diese in den Datensätzen in verschiedene Energiehöhen klassifiziert sind, wobei dies schon aus dem Bereich der optischen Analyse herausführen würde.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	links: CC-Ereignis, rechts: NC-Ereignis [Cor10] . . . . .	10
3.1	Teilchenspur mit Knick am Entstehungsort des $\nu_\tau$ [Won07] . . . . .	12
3.2	CNGS-Strahl vom CERN, Genf ins, 732 km entfernte, Laboratori Nationali del Gran Sasso, Italien [Cern] . . . . .	13
3.3	CNGS-Strahl: Verunreinigungen durch andere (Anti-)Neutrinos [Gia] . . . . .	14
3.4	Neutrinoquelle, Protonen zerfallen über das Target zu Pionen und Kaonen, Fokussierung über Horn und Reflektor, Filterung über Hadron-Stop [Cern] . . . . .	14
3.5	Unterirdische Anlage am Cern; Gelb: Neutrinoquelle; Hellblau (oben): SPS-Tunnel; Dunkelblau (unten): LEP/LHC-Tunnel [Cern] . . . . .	15
3.6	Detektoraufbau: VETO und 2 Supermodule aus je einem Targetbereich und einem Myonspektrometer; z-Richtung: Strahlrichtung, y-Richtung: vertikal, x-Richtung: horizontal [Cor10] . . . . .	16
3.7	Brickaufbau [Won07] . . . . .	17
3.8	Dipolmagnete bestehend aus 2 Armen zu je 12 Eisenplatten [Col00] . . . . .	18
3.9	RPC-Aufbau, obere Elektrode horizontal, untere Elektrode vertikal ausgerichtet [Len07] . . . . .	19
3.10	Driftröhrenschnitt [Rof06] . . . . .	20
3.11	PT-Module blau, Teilchenbahnkrümmung übertrieben dargestellt. Der Eintrittswinkel kann bestimmt werden über das erste Paar PT. Das zweite Paar liefert den Winkel der Ablenkung durch das Magnetfeld; unter Annahme, dass die Teilchen keinen Energieverlust erleiden, ist der Austrittswinkel aus dem 2. Magneten gleich dem Eintrittswinkel in den 1. Magneten [Cor10] . . . . .	21

---

3.12	Gesamter farbiger Bereich: Detektorbereich, Tiefe Farben: Fiducial Volume, Begrenzung auf kleineren Messbereich; Braun: Veto, Blau/grau: Target, Rot: Magnetarme, Grün: Precision Tracker [Cor10] . . . . .	23
4.1	Typisches NC-Ereignis; rechts angezeigt, dass das Teilchen kein Myon und das Ereignis CONTAINED ist, Rest rechts hierbei nicht von Interesse . . . . .	25
4.2	Typisches CC-Ereignis; rechts angezeigt, dass das Teilchen ein Myon und das Ereignis CONTAINED ist, Rest rechts hierbei nicht von Interesse . . . . .	26

## Literaturverzeichnis

- [AB10] A. BERTOLIN, C. JOLLET, A. MEREGAGLIA: *Analysis for the ED performance paper*, 2010.
- [Col00] COLLABORATION, OPERA: *An appearance experiment to search for  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  oscillations in the CNGS beam*, 2000.
- [Cor10] CORDS, N.: *Verhältnis der Reaktionszahlen von Neutrinos im Target- und Spektrometerebereich beim OPERA-Experiment*, 2010.
- [Gia] GIACOMELLI, G.: *arXiv:physics/0703247*.
- [Len07] LENKEIT, J.: *Kalibrationsmessungen für das Driftröhren-Myon-Spektrometer des OPERA-Detektors*, 2007.
- [Roß06] ROSS, O.: *Winkelauflösung und Spureffizienz am Teststand sowie Aufbau der Hochspannungsversorgung des Driftröhrenspektrometers für das OPERA-Experiment*, 2006.
- [Won07] WONSAK, B. S.: *Die Spurrekonstruktion für das Driftröhren-Myon-Spektrometer des Neutrinos-Experiments OPERA.* , 2007.

## **Danksagung**

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Prof. Dr. Caren Hagner für die Übertragung der Arbeit und bei Dr. Björn Sönke Wonsak als Zweitgutachter.

Dank gilt besonders der Arbeitsgruppe (Björn Wonsak, Christoph Göllnitz, Stefanie Kietzmann, Jan Lenkeit, Torben Ferber, Martin Hierholzer, Daniel Bick, Annika Hollnagel, Nadine Heidrich, Christian Oldorf, Jan Timm, Hans-Jürgen Ohnmacht, Joachim Ebert, ...) für eine gute Zeit und eine sehr gute Arbeitsatmosphäre.

Arbeitstechnisch hervorgehoben seien Björn Wonsak, Torben Ferber, Martin Hierholzer, Jan Lenkeit und Daniel Bick für die Hilfe bei fachlichen und softwaretechnischen Fragen, und den zuvor genannten, mit zusätzlich Christoph Göllnitz und Stefanie Kietzmann, für sehr viel Spaß in der Gruppe und an den privaten Abenden.

Weiter gilt natürlich mein Dank für die durchgehende Unterstützung in den drei Jahren meinen Freunden und meiner Familie Angelika, Wilfried, Anita, Günter, Gertrud und besonders meiner Schwester Daniela, für die ich, seit ich in Hamburg lebe, leider weniger Zeit hatte, als ich es gern gehabt hätte.

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig verfasst wurde und ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel - insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen - benutzt habe und die Arbeit von mir vorher nicht einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht wurde. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium. Ich bin damit einverstanden, dass die Bachelorarbeit veröffentlicht wird.

Hamburg, 12. Oktober 2010

Volker Braunert