

F13 - Lebensdauer von Myonen

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	2
2	Versuchsaufbau	12
3	Versuchsdurchführung	15
4	Datennahme	21
5	Datenanalyse	24
6	Datenauswertung	26
7	Fitten statistischer Daten	31
8	Auswertungshinweise	33
A	Anhang	35
	Literaturverzeichnis	46

1 Physikalische Grundlagen

Die Grundlage der Teilchenphysik bildet das so genannte Standardmodell. Es wurde vor ca. 30 Jahren als Zusammenfassung aller bis dahin in der Teilchenphysik gewonnenen Erkenntnisse gebildet und bis heute in keinem wesentlichen Punkt widerlegt, jedoch auch noch nicht in allen Punkten experimentell bestätigt. Aufgebaut ist es auf drei Säulen: den Teilchen, den Wechselwirkungen und dem Higgs-Mechanismus. Teilchen und Wechselwirkungen stehen in einem engen Zusammenhang, da die Wechselwirkungen sich durch und zwischen Teilchen vollziehen. Der Higgs-Mechanismus verleiht den Teilchen ihre Masse, ist jedoch experimentell noch nicht bestätigt und soll im Folgenden auch nicht weiter betrachtet werden.

1.1 Die Teilchen

Im Standardmodell sind alle Elementarteilchen drei Gruppen zugeordnet, den Quarks, den Leptonen und den Austauscheteilchen, die für die Vermittlung der Wechselwirkung zuständig sind.

Tabelle 1: Quarks

Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]	Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]
up	1,5 - 4,5	2/3	down	5 - 8,5	-1/3
charm	1000 - 1400	2/3	strange	80 - 155	-1/3
top	174300 ± 5100	2/3	bottom	4000 - 4500	-1/3

Quarks und Leptonen haben Spin $\frac{1}{2}$, sind also Fermionen. Sie sind die elementaren Bestandteile der Materie. Quarks tragen Farbladung, unterliegen also - im Gegensatz zu Leptonen - der starken Kraft, außerdem tragen sie elektrische Drittelladungen. Zusammensetzungen aus Quarks nennt man Hadronen. Bestehen diese aus einem Quark und einem Antiquark spricht man von Mesonen, bestehen sie hingegen aus drei Quarks, spricht man von Baryonen. Die Masse der Quarks ist sehr unterschiedlich und lässt sich nur sehr schwer bestimmen, sie reicht von ca. 1,5 MeV/c²(up-Quark) bis zu ca. 174 GeV/c²(top-Quark).

Tabelle 2: Leptonen

Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]	Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]
e	0,511	-1	ν_e	$< 3 \cdot 10^{-6}$	0
μ	105,66	-1	μ_ν	$< 0,19$	0
τ	1776,99	-1	τ_ν	$< 18,2$	0

Leptonen kommen in drei Familien vor: Elektron, Myon und Tauon, jeweils mit den dazugehörigen Neutrinos (vgl. Tabelle 2). Das Elektron ist stabil, Myon und Tauon hingegen zerfallen, wobei meist ein energieärmeres Lepton, also ein Elektron oder ein Myon, entsteht. Im Gegensatz zu den Neutrinos sind Elektron, Myon und Tauon einfach negativ elektrisch geladen, die Antiteilchen dementsprechend einfach positiv. Sie unterliegen der Gravitation, der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkungen. Ihre Masse reicht von 511 keV/c² bis 1777 MeV/c². Neutrinos sind nicht nur elektrisch neutral, weshalb sie auch nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen, auch ihre Masse liegt nahezu bei Null.

1.2 Die Wechselwirkungen

Es gibt vier fundamentale Wechselwirkungen: die Gravitation, die elektromagnetische, die starke und die schwache, die jeweils durch Austauschteilchen bzw. Feldquanten vermittelt werden.

Tabelle 3: Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Vermittler	wirkt auf
Gravitation	Graviton	Quarks, Leptonen
elektromagnetische	Photon	Quarks, Leptonen (nicht ν)
starke	8 Gluonen	Quarks
schwache	W^+, W^-, Z^0	Quarks, Leptonen

Die Gravitation ist die schwächste unter den vier Wechselwirkungen. Auch wenn sie wegen ihrer großen Reichweite makroskopisch sehr stark zu sein

scheint, ist sie doch in Bezug auf die kleine Masse der Elementarteilchen 10^{38} -mal schwächer als die starke Wechselwirkung. Daher ist sie für die Teilchenphysik vernachlässigbar.

Als Becquerel 1896 die Radioaktivität und damit auch den β -Zerfall des Neutrons ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) entdeckte, wurde schnell klar, dass sich der zugrunde liegende Prozess aufgrund der langen Zerfallszeit nicht mit der starken Kraft erklären lässt. Auch ein elektromagnetischer Zerfall war äußerst unwahrscheinlich, weshalb alles auf eine weitere Wechselwirkung, nämlich die schwache, hindeutete. Um die Energieerhaltung bei diesem Prozess zu gewährleisten, postuliert Pauli 1930 das Neutrino. Schwache Prozesse finden sowohl mit Quarks (hadronisch) als auch mit Leptonen (leptonisch), aber auch unter Beteiligung von Teilchen aus beider dieser Kategorien (semileptonisch), statt. Außerdem können sie sowohl geladen - dann ist das Austauschteilchen ein W^+ bzw. ein W^- - als auch ungeladen (Austauschteilchen: Z_0) ablaufen. Die Austauschteilchen koppeln an die schwache Ladung g , welche sowohl von Quarks als auch von Leptonen getragen wird. Eine besondere Eigenschaft der schwachen Wechselwirkung ist, dass sie die Parität verletzt, was sich z.B. am Myonenzerfall zeigt.

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist dahingehend besonders, dass sie bereits ein erster Schritt hin zur Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen ist. Durch Maxwells Gleichungen wurde erstmal die bis dahin getrennt betrachtete elektrische Kraft mit der magnetischen vereinigt. In der Teilchenphysik zeigt sie sich in vielerlei Erscheinungsweisen.

Die starke Wechselwirkung ist verantwortlich für den Zusammenhalt zwischen den Quarks. Je weiter diese voneinander entfernt sind, desto stärker wirkt die anziehende Kraft zwischen ihnen. Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind 8 Gluonen, die selbst Farbe, die Ladung der starken Kraft, tragen und somit auch untereinander wechselwirken können. Nötig wurde die Einführung der Farbladung nach Entdeckung des Ω^- . Da seine drei s-Quarks dem Pauli-Verbot unterliegen, musste es noch eine zusätzliche Quantenzahl geben.

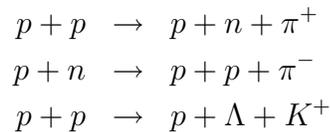
1.3 Das Myon

Dieser Versuch beschäftigt sich mit Myonen, sowohl in ihrer positiven, als auch in ihrer negativen Erscheinungsform. Das Myon ist ein Elementarteilchen. Es gehört zusammen mit dem Myonneutrino zur zweiten Generation der Leptonen. In seiner positiven Form (μ^+) ist es zusammen mit dem Neutri-

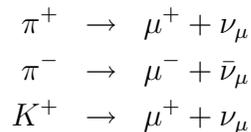
no (ν_μ) ein Teilchen, in seiner negativen Erscheinungsform (μ^+) ein Antiteilchen, ebenso wie das dazugehörige Antineutrino ($\bar{\nu}_\mu$). Es ist in etwa 207-mal schwerer als das Elektron ($m_{e^-} = 511 \text{ keV}$) und nicht stabil. Nach heutigem Kenntnisstand ist das Myon ein punktförmiges Teilchen ($r_\mu < 10^{-18} \text{ m}$ [8]) ohne innere Struktur.

1.4 Myonen aus kosmischer Höhenstrahlung

Das Experiment wird mit kosmischen Myonen durchgeführt, deren Rate auf Meereshöhe ca. $100 \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad}}$ beträgt. Die kosmische Primärstrahlung besteht im Wesentlichen aus energiereichen Protonen. In den oberen Atmosphärenschichten stoßen diese mit Molekülen zusammen, wobei u.a. geladene Pionen und Kaonen entstehen. Dies erfolgt zumeist gemäß der folgenden Reaktionen:



Die dabei entstandenen Pionen und Kaonen sind nicht stabil, sondern zerfallen weiter, unter anderem in Myonen.



Beispielhaft ist das Feynmandiagramm des Pionzerfalls in Abbildung 1 dargestellt.

Aufgrund der positiven Primärstrahlung gilt auch für die auf der Erdoberfläche ankommenden Myonen ein Überschuss an positiven Teilchen, der durch das Verhältnis

$$\frac{\#\mu^+}{\#\mu^-} \approx 1,25$$

ausgedrückt werden kann.

Die in ca. 10 km Höhe erzeugten Myonen sind wegen ihrer hohen Energie relativistisch und können aufgrund der Zeitdilatation die Erde erreichen bevor sie zerfallen. Das Maximum der Energieverteilung der am Erdboden

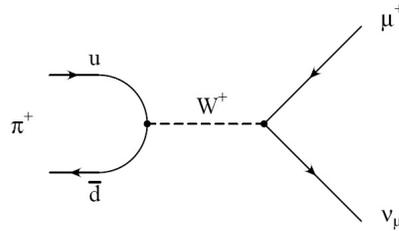


Abbildung 1: Feynmandiagramm des Pionzerfalls als Beispiel für die Entstehung von Myonen

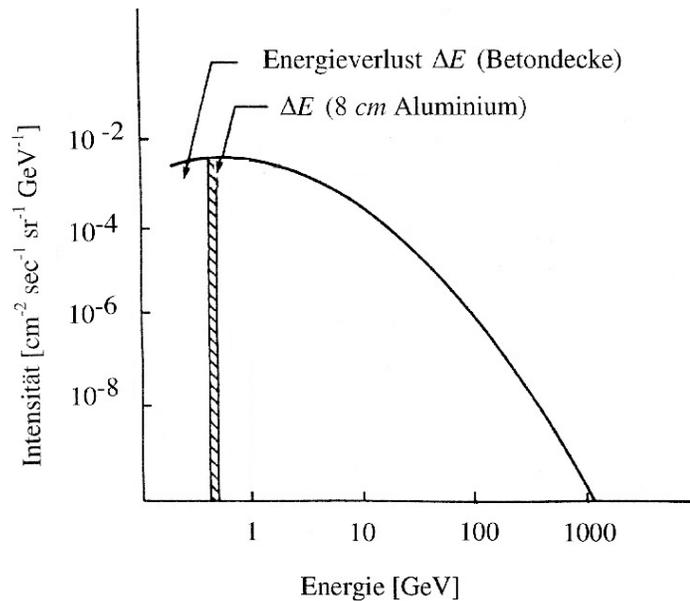


Abbildung 2: Energiespektrum der Myonen aus der Höhenstrahlung, gemessen an der Erdoberfläche.

ankommenden Myonen liegt bei etwa 1 GeV (vgl. Abbildung 2). Ihre mittlere kinetische Energie liegt bei etwa 2 GeV [7].

Da Myonen nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, verlieren sie ihre kinetische Energie nur durch elektromagnetische Wechselwirkungen, d.h. vornehmlich durch Ionisation der von ihnen durchflogenen Materie. Der Energieverlust durch Bremsstrahlung ist wegen der großen Myonmasse im Gegensatz zu dem von Elektronen vergleichbarer Energie sehr klein. Er beträgt bei hohen kinetischen Energien etwa $2 \text{ MeV/g} \cdot \text{cm}^{-2}$. Dies entspricht etwa einem

Energieverlust von 1 MeV in 4 m Luft in der Nähe der Erdoberfläche [7].

1.5 Die schwache Wechselwirkung

Myonen werden bei Wechselwirkung mit Materie abgebremst bis sie zerfallen oder zur Ruhe kommen. Positive Myonen zerfallen entweder als freie Teilchen oder nach Einfang eines Elektrons und damit der Bildung eines Myoniumatoms. Negativen Myonen steht ein weiterer Reaktionskanal offen, sie können von Atomkernen eingefangen werden, mit ihnen myonische Atome bilden und danach durch Kernwechselwirkung zerfallen. Der Myonenzerfall wird von der schwachen Wechselwirkung verursacht, die durch den Austausch von virtuellen Bosonen (W^\pm, Z^0) vermittelt wird.

Myonenzerfall Myonen zerfallen mit einer mittleren Lebensdauer von 2,19 μs zumeist gemäß den folgenden Reaktionen

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

und entsprechend des exponentiellen Zerfallsgesetzes

$$N(t) = N(t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}.$$

Der Zerfall des positiven Myons ist in Abbildung 3 als Feynmandiagramm dargestellt.

Beim Zerfall geht die Ruhemasse des Myons in die Ruhemasse des Elektrons sowie in die kinetische Energie von Elektron und Neutrinos über. Die maximale kinetische Elektronenenergie beträgt $E_{max} = \frac{1}{2}m_\mu c^2$.

Aus der Lebensdauer und der Masse der Myonen kann die Fermi-Kopplungskonstante G_F der schwachen Wechselwirkung bestimmt werden. Sie ist (in natürlichen Einheiten) gegeben als

$$G_F^2 = \frac{192\pi^3}{\tau_0 \cdot m^5} \quad [12].$$

Myoneneinfang Negativen Myonen steht neben dem Zerfall noch ein weiterer Reaktionskanal, der μ^- -Einfang, zu Verfügung. Wenn sie sich in Ruhe befinden und in das elektromagnetische Feld eines Atoms gelangen, werden

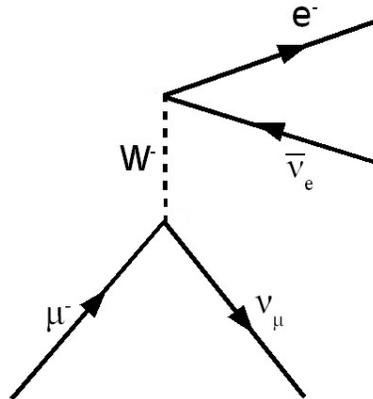
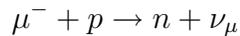


Abbildung 3: Feynmandiagramm des Myonzerfalls

sie von diesem eingefangen und fallen in weniger als 10^{-12} s in die K-Schale dieses Atoms. Somit tritt der Einfang des Myons



mit dem Zerfall in Konkurrenz. Durch den Einfang verkürzt sich die effektive Lebensdauer der negativen Myonen:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_c},$$

wobei τ_c die Lebensdauer bei reinem Myoneneinfang ist. Da die im Versuch untersuchte Höhenstrahlung aus einem Gemisch aus positiven und negativen Myonen besteht, erwartet man folgendes Zeitverhalten für die Anzahl der zerfallenden Myonen:

$$N(t) = N(\mu^-, t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_c}} + N(\mu^+, t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}}$$

1.6 Paritätsverletzung

Eine historisch bedeutsame Erkenntnis im Zusammenhang mit dem Myonenzерfall ist, dass er eine der ersten Reaktionen war, an der klar wurde, dass die schwache Wechselwirkung die Parität verletzt. Konkret zeigt sich dies darin, dass die Zerfallselektronen seltener in Spinrichtung des ursprünglichen

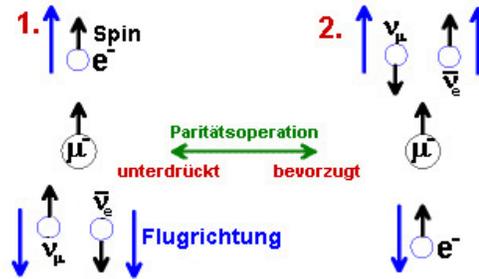


Abbildung 4: Paritätsverletzung beim Myonenzerfall: Das Elektron wird bevorzugt entgegen der Spinrichtung des Myons emittiert [4]

Myons emittiert werden als in die entgegengesetzte Richtung. Abbildung 4 veranschaulicht dies graphisch.

Leptonen besitzen Spin $\frac{1}{2}$. Daher heben sich die entgegengesetzt ausgerichteten Spins der beiden Neutrinos sowohl in Fall 1 als auch in Fall 2 auf. Da der Gesamtspin des Systems erhalten bleiben muss, zeigt der Spin des Elektrons in die selbe Richtung wie der des Myons. Wäre die Parität erhalten, müssten gleich viele Elektronen in und entgegen der Spinrichtung des Myons emittiert werden. In verschiedenen Messungen hat sich jedoch gezeigt, dass die Aussendung eines rechtshändigen Elektrons (in Spinrichtung des Myons, Helizität = +1), seltener stattfindet als die eines linkshändigen (entgegengesetzt der Spinrichtung des Myons, Helizität = -1).

Die räumliche Verteilung der Zerfallselektronen ist $N(\theta) \propto 1 + A \cdot \cos\theta$ um die Spinrichtung des Myons. Hierbei ist A der von der Positronenenergie abhängige Asymmetrieparameter. $A = 1$ entspricht der maximalen Zerfallspositronenenergie, $A = \frac{1}{3}$ ist der Wert, der sich beim Mitteln über alle Positronenenergien ergibt [14]. Die Berücksichtigung von Mehrfachstreuung in Aluminium und von Raumwinkeleffekten ergibt für dieses Experiment eine erwartete Asymmetrie von $A = 0,23$ [14]. Abbildung 5 veranschaulicht die Winkelverteilung graphisch anhand des Zerfalls positiver Myonen.

Ähnliche Überlegungen zur Paritätsverletzung können auch für den Pionen- bzw. Kaonenzerfall angestellt werden. Die auch hier vorhandene Asymmetrie in der Zerfallsrichtung bewirkt, dass die kosmischen Myonen polarisiert sind. Die Polarisation P hängt vom Verlauf des Energiespektrums und der beim Zerfall der Primärteilchen zur Verfügung stehenden Energie ab. Für Pionen als Primärteilchen beträgt die Polarisation $P = 0,33$, für Kaonen

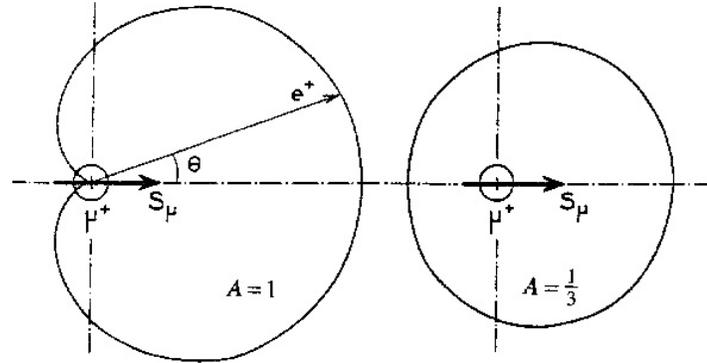


Abbildung 5: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ Winkelverteilung der Positronen nach dem Zerfall

beträgt $P = 0,54$. Der Aufbau dieses Versuchs ist so gewählt, dass lediglich die hochenergetischen Elektronen detektiert werden. Die beiden Zerfallsneutrinos werden in einem Winkel von 180° zu der Flugrichtung des Elektrons ausgesendet (vgl. Abbildung 4).

1.7 Das magnetische Moment des Myons

Die geladenen Leptonen tragen ein magnetisches Moment ($\vec{\mu}$), welches proportional zum Spin (\vec{s}) des Teilchens ist. Der Betrag des magnetischen Momentes ist proportional zum Bohrschen Magneton des Teilchens und dieses ist umgekehrt proportional zur Masse des Teilchens. Für ein Myon ergibt sich das magnetische Moment zu

$$\vec{\mu}_\mu = g_\mu \cdot \mu_\mu^{Bohr} \cdot \vec{s} \quad \text{mit} \quad \mu_\mu^{Bohr} = \frac{e\hbar}{2m_\mu} .$$

Der Proportionalitätsfaktor zwischen magnetischem Moment und Magneton ist der g-Faktor, der nach der Dirac-Theorie für Leptonen genau 2 beträgt [12]. Sein genauer Wert liegt etwas darüber, die Abweichung bezeichnet man als magnetische Anomalie

$$a_\mu = \frac{g_\mu - 2}{2}$$

von der Größenordnung $\frac{\alpha}{\pi}$, wobei $\alpha \approx \frac{1}{137}$ die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante ist.

Befindet sich ein Myon in einem externen Magnetfeld \vec{B} senkrecht zu seinem Spin \vec{s} , so beginnt sein magnetisches Moment eine Larmorpräzession bei der Frequenz

$$\omega_{Larmor} = \frac{g \cdot \mu_{\mu}^{Bohr} \cdot B}{2 \cdot \hbar}$$

durchzuführen. Da beim Zerfall des positiven Myons das Zerfallspositron im Mittel vornehmlich in Richtung des Myonspins und damit auch in Richtung des magnetischen Momentes erfolgt, kann durch Beobachten des zeitlichen Verlaufs der Zerfallsasymmetrie in einem Ensemble von Myonen die Spinpräzession verfolgt werden.

1.8 Aktuelle Myonenforschung

Für moderne Präzisionsexperimente reichen die Flüsse kosmischer Myonen nicht in allen Fällen aus. Daher gibt es weltweit mehrere Beschleunigeranlagen, an denen intensive Strahlen von Myonen erzeugt werden. Die Eigenschaften dieser Strahlen sind im allgemeinen verschieden, sodass die Experimentatoren weltweit den jeweils für die untersuchte Fragestellung geeignetsten aus einer breiten Palette auswählen können [15]. In diesen sogenannten Mesonenfabriken werden Myonen dadurch erzeugt, dass Protonen mit typischen Energien zwischen 600 MeV und 1000 MeV auf ein Beryllium- oder Kohlenstofftarget geschossen werden, in dem nach Kernanregungen Pionen erzeugt werden, die ihrerseits in Myonen zerfallen. Diese Myonen werden in elektromagnetischen Strahlführungssystemen, bestehend aus geschickt hintereinander angeordneten magnetischen Dipol-, Quadrupol- und z.T. Solenoidfeldern gesammelt und in Experimentierareale geleitet. Dort stehen Myonenflüsse von typisch einigen 10^6 pro Sekunde auf Flächen von der Größenordnung einiger cm^2 zur Verfügung.

Aktuell ist die Myonenlebensdauer auf $2 \cdot 10^{-5}$ genau bestimmt. Zur Zeit gibt es jedoch zwei Experimente am PSI in Villingen / Schweiz, die sich zum Ziel gesetzt haben, diese auf 1 ppm (bzw. 2 ps) genau zu bestimmen. Bei FAST (Fiber Active Scintillator Target) soll dies mit Hilfe von 1536 Szintillatoren mit einem Querschnitt von $(4 \times 4) \text{ mm}^2$ bei μLAN (detector for Muon Lifetime ANalysis) mit einem fußballartigen Detektor, der durch seine Form die Polarisierungseffekte minimieren soll und zwei Lagen Szintillatoren enthält.



Abbildung 6: Zwei Detektoren zur Präzessionsmessung der Myonenlebensdauer: FAST (links) und μ LAN (rechts) am Paul Scherrer Institut in Villingen / Schweiz

2 Versuchsaufbau

Das Experiment wird mit kosmischen Myonen durchgeführt, die mit einer Rate von ca. $100 \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad}}$ auf Meereshöhe ankommen.

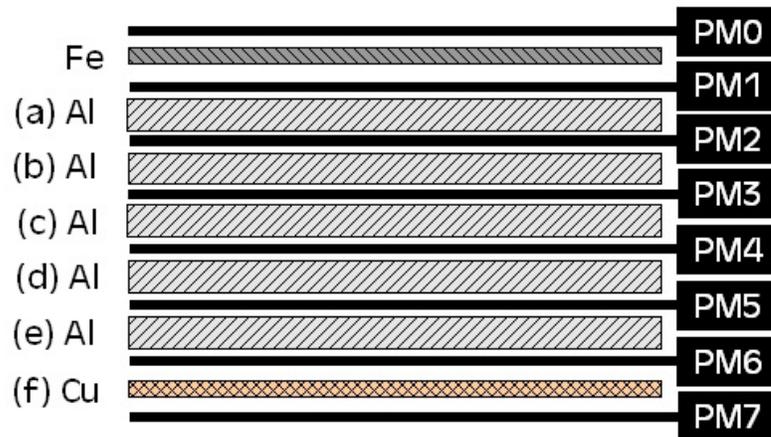


Abbildung 7: Skizze vom Detektor

Der Detektor ist aus einem abwechselnd aus Szintillatoren und Metallplatten zusammengesetzten Stapel aufgebaut. Die obere Platte besteht aus 2,5 cm Blei, darunter folgen fünf 8 cm dicke Aluminiumplatten. Ganz unten befindet sich eine 4 cm dicke Kupferplatte. Die Szintillatoren sind jeweils 1 cm dick.



Abbildung 8: Verschiedene Ansichten des Detektors

Um die Möglichkeit zu haben, die Larmorpräzession der Myonen zu beobachten, ist der Metallplattenstapel und sind die meisten der Szintillatoren im Inneren eines Magneten aufgestellt. Bei angelegtem Magnetfeld wird die Spinpräzession dadurch festgestellt, daß sich die Zählrate der Zerfallspositronen in den Szintillatoren ober- und unterhalb der Metallplatte, in der das Myon zur Ruhe kommt, periodisch ändert. Dies resultiert aus der sich mit der Larmorfrequenz drehenden räumlichen Zerfallsasymmetrie.

Für einen feststehenden Szintillator ergibt sich bei Myonen mit einer Lebensdauer τ , einer Larmorfrequenz ω_{Larmor} , einer Polarisation P und einer Asymmetrie A (vgl. Abbildung 5) eine zeitabhängige Zählrate von

$$Z(t) = Z_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (1 + P \cdot A \cdot \cos(\omega_{\text{Larmor}} \cdot t + \varphi)),$$

wobei φ vom Winkel zwischen Detektionsrichtung und ursprünglicher Myonspinrichtung abhängt.

Ersichtlich ist nun auch, dass sich durch Anlegen eines Magnetfeldes die Polarisation der Myonen messen lässt. Der Magnet besteht aus zwei rechteckigen Spulen mit je 41 Windungen entlang der Längsseite des Detektors (vgl. Abbildung 9). Für dieses Experiment wird ein Feld von $4 \cdot 10^{-3}$ T verwendet.

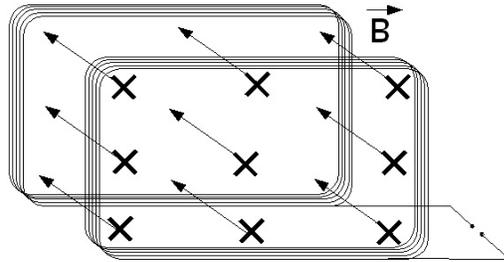


Abbildung 9: Anordnung der beiden Spulen um den Detektor zur Erzeugung eines homogenen Magnetfelds

An die acht Szintillatoren angeschlossen sind Photomultiplier, die ihrerseits mit den Eingängen von acht Diskriminatoren verbunden sind. Diese geben, sobald die Eingangsspannung einen eingestellten Wert überschreitet, Rechteckpulse einstellbarer Länge aus. Die Rechteckpulse werden an einen TDC (time to digital converter) weitergeleitet, der die Zeitinformation digitalisiert und zur weiteren Verarbeitung an den Computer übergibt (vgl. Abbildung 10).

Die kosmischen Myonen passieren den Detektor mit großer Geschwindigkeit. Daher erscheint ein durchgehendes Myon in nur einem Zeitfenster. Wenn das Myon in einer der Metallplatten gestoppt wird, zerfällt es in zwei Neutrinos und ein Elektron bzw. Positron, das auch durch Szintillatoren detektiert werden kann (vgl. Abbildung 11). Die Dicke der Metallplatten ist so gewählt, dass sie für die hochenergetischen Zerfallselektronen bzw. -positronen in etwa der Reichweite in diesem Material entspricht. Zwischen der Detektionszeit der durchgehenden Myonen und der des Elektrons / Positrons besteht eine Differenz, die gemessen wird. Aus vielen Messungen lässt sich über das Zerfallsgesetz die mittlere Lebensdauer der Myonen bestimmen.

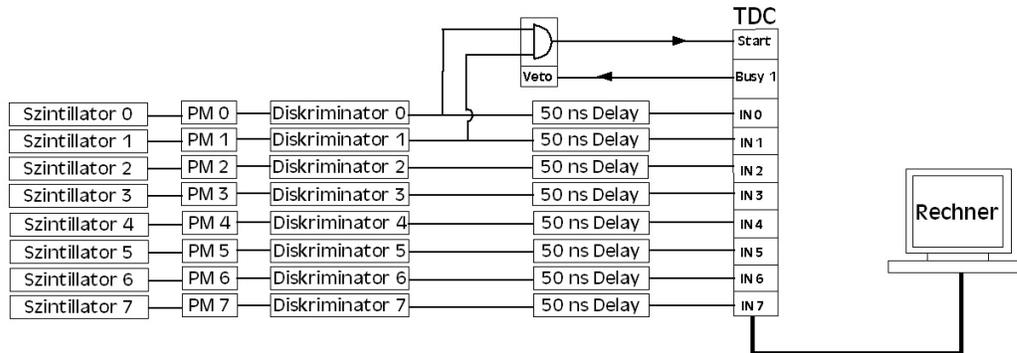


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Hardware

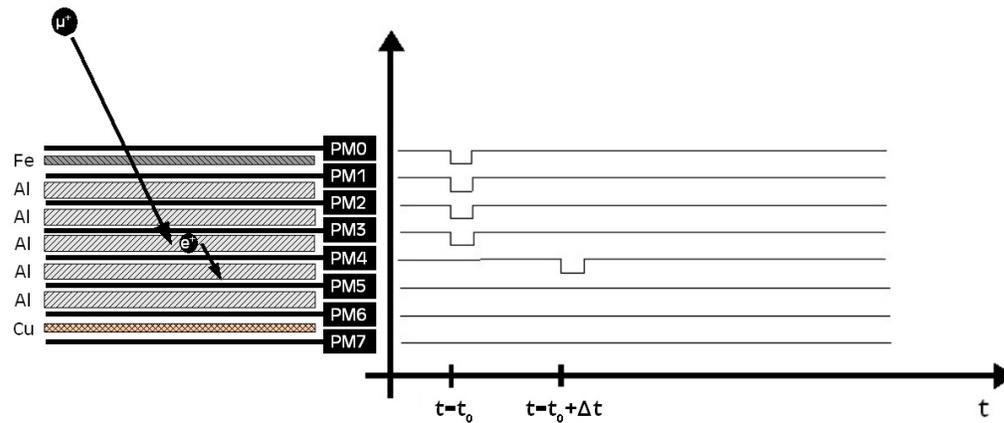


Abbildung 11: Zerfall nach unten im Detektor skizziert (links) und das zugehörige Signalmuster der Diskriminatoren (rechts)

3 Versuchsdurchführung

Im ersten Teil des Versuchs sollen Sie mit typischen Geräten der Hochenergiephysik wie Szintillatoren, Photomultipliern, Diskriminatoren, Delays oder logischen Elementen vertraut gemacht werden. Hierzu werden Schaltungen verkabelt, Pulse auf dem Oszilloskop angeschaut und Zählraten gemessen.

In Abbildung 12 sehen Sie die NIM-Elektronik (NIM: nuclear instruments modules). Die einzelnen Module sind in einem speziellen Einschubrahmen untergebracht, über den die Stromversorgung gewährt wird. Von links nach recht sind zu sehen: Diskriminatoren, Delays, logische Verknüpfungen, der

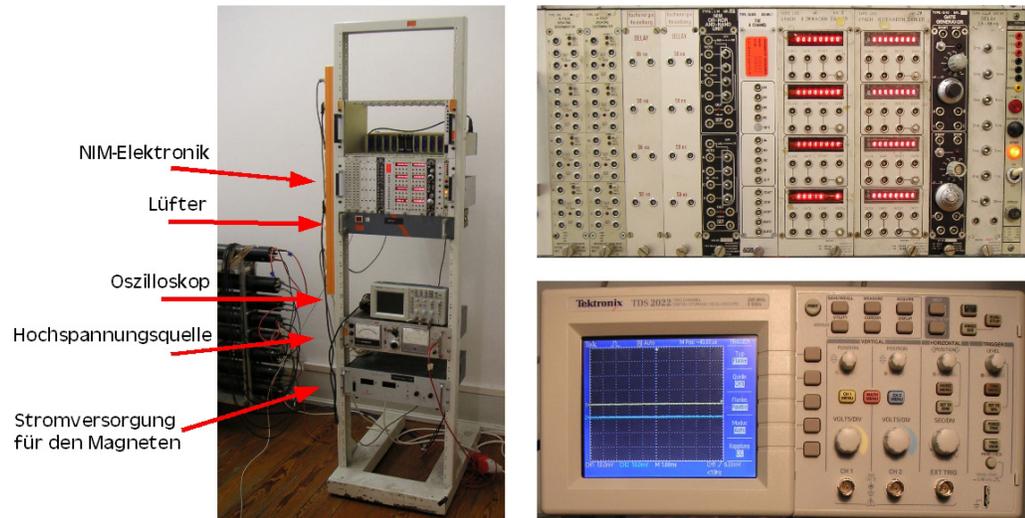


Abbildung 12: NIM-Elektronik und Oszilloskop

TDC, Zähler, Gate-Generatoren und ein weiteres Delay.

- Schauen Sie sich als Einstieg in den Versuch und zur ersten Übung im Umgang mit dem Oszilloskop die Ausgangspulse der Photomultiplier an. Die Hochspannung für die Photomultiplier sollte hierzu auf 2125V bei negativer Polarität eingestellt werden. (Sollten Sie einen höheren Wert für erforderlich halten, so besprechen Sie dies bitte vorher mit Ihrem Assistenten. Auch dieser sollte ihnen keinen Wert über 2500V empfehlen.) Führen Sie dies für alle acht Photomultiplier durch.

Beachten Sie dabei zunächst den Effekt, den ein Abschlusswiderstand von 50Ω im Vergleich zum oszilloskopinternen Abschlusswiderstand von $1M\Omega$ hat.

Skizzieren Sie die beobachteten Photomultiplierpulsformen. Notieren Sie die Pulshöhen.

Fragen dazu:

- Wie werden in einem Photomultiplier Photonen nachgewiesen?
- Wie werden die Photonen in dem Szintillator erzeugt?
- Welche Energie deponieren relativistische Teilchen wie Myonen aus der kosmischen Strahlung in einem Szintillator?

- Welchen Einfluss hat der Abschlusswiderstand auf die Signalform?
- Wie sehen Pulse von Photomultipliern aus?
- Was bestimmt die Höhe dieser Pulse?
- Schauen Sie sich nun die Signale nach Durchgang durch den Diskriminator an. Verändern Sie Schwellen und Pulsbreiten und beobachten Sie den Effekt. Skizzieren Sie sich auch hier die beobachteten Pulsformen und notieren Sie sich die Pulshöhen.

Fragen dazu:

- Was ist die Funktionsweise der Diskriminatoren?
- Welche Auswirkungen hat das Verändern der Schwellen?
- Schauen Sie sich nun für einen Photomultiplier sein Signal vor und nach dem Diskriminator gleichzeitig auf dem Oszilloskop an. Skizzieren Sie sich das Bild.

Fragen dazu:

- Was ist zu beobachten?
- Wie lässt es sich erklären?
- Stellen Sie die Pulsbreiten aller Diskriminatoren auf einen konstanten Wert ein und notieren Sie sich diesen.
- Um näheres über die Rate einzelner Zähler als auch über die der Koinzidenzen mehrerer Zähler zu erfahren, werden im Anschluss einige Zählraten gemessen. Vergleichen Sie hierzu für ein beliebiges Paar die Zählrate eines einzelnen Zählers mit der einer Koinzidenz aus diesem und einem benachbarten. Die Rate R_{12} an zufälligen Koinzidenzen bei gegebenen Einzelraten R_1 und R_2 und mit einer Koinzidenzzeit von Δt (Pulsbreite aus vorherigem Aufgabenteil) ergibt sich zu

$$R_{12} = R_1 \cdot R_2 \cdot \Delta t.$$

Berechnen Sie die Rate der zufälligen Koinzidenzen anhand dieser Formel.

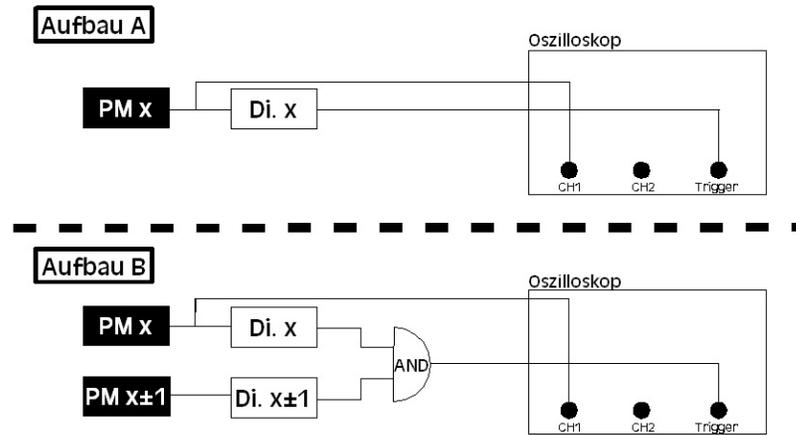


Abbildung 13: Schaltpläne zur Einstellung der Schwellen

- Als nächstes sollen nun die Schwellen der Diskriminatoren eingestellt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Mittelwernerfassung des Oszilloskops. Gemittelt wird über 128 Pulse direkt aus dem Photomultiplier.

In Aufbau A triggern Sie diese Messung mit dem durch den Diskriminator gegangenen Signal des selben Photomultipliers. In Aufbau B legen Sie am Trigger die Koinzidenz aus den Diskriminatoren dieses und des nächsten Photomultipliers an (vgl. Abbildung 13). In Aufbau A wird über alle Pulse aus dem Photomultiplier, auch über die zufälligen gemittelt. Bei zufälligen Pulsen spricht man auch von Rauschen, wobei die Pulshöhe hier wesentlich geringer ist als bei Pulsen von echten Hits im Szintillator. In Aufbau B kann davon ausgegangen werden, dass nur echte Pulse zur Bildung des Mittelwerts beitragen, da eine Koinzidenz mit einer der Nachbarlagen gefordert wurde. Die mittlere Pulshöhe ist in diesem Fall größer, da kein niederenergetisches Rauschen in die Messung mit eingegangen ist. Um Rauschen zu unterdrücken, sollten die mittleren Pulshöhen der Messungen mit Aufbau A und Aufbau B also nahezu gleich sein. Testen Sie beide Aufbauten aus Abbildung 13 für mehrere Schwelleneinstellungen je Detektor und entscheiden Sie sich dann für jeweils eine.

- Durch diese Vorgehensweise haben Sie nun das Rauschen so gut wie

möglich unterdrückt. Dies führt jedoch auch dazu, dass einige echte Signale nicht gesehen werden und die Messrate sinkt. Unter Umständen kann es daher sinnvoll sein, einen gewissen Anteil an Rauschen in Kauf zu nehmen, um eine bessere Statistik, d.h. mehr Ereignisse, zu bekommen.

- Die Nachweiseffizienz der einzelnen Szintillatoren soll nach dem Einstellen der Diskriminatorschwellen bestimmt werden. Nutzen Sie dabei die Tatsache, dass eine Koinzidenz zwischen zwei Szintillatoren eindeutig ein durchlaufendes Teilchen signalisiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein zwischen zwei Szintillatoren gelegener Zähler von dem gleichen Teilchen getroffen wurde. Überlegen Sie sich darauf basierend eine Schaltung zur Bestimmung der Effizienz jedes einzelnen Szintillators.
- Liegt die Effizienz eines Szintillators unter 90% sollten Sie die Schwellen wieder etwas herunter drehen, um nicht zu viele echte Pulse zu unterdrücken.
- Zum Abschluss des Aufgabenteils mit der Hardware sollen Sie diese so schalten, dass die Datennahme zur Lebensdauerermessung gestartet werden kann. Verwenden Sie dazu den in Abbildung 14 dargestellten Versuchsaufbau. Dieser prüft durch eine UND-Verknüpfung, ob die beiden oberen Szintillatoren koinzident angesprochen haben. Ist dies der Fall, wird die TDC-interne Uhr gestartet. Die eigentlichen Signale werden um 50 ns zeitverzögert, damit der Start des TDC vor der Ankunft der Daten erfolgt ist. An *BUSY1* liegt ein Signal an, wenn der TDC gerade aktiv ist. Dieser Ausgang wird mit dem Veto der logischen Verknüpfung verbunden, um zu verhindern, dass eine weitere Messung gestartet wird, wenn bereits eine läuft.

Prüfen Sie für jeden Detektor auf dem Oszilloskop nach, wie lange der Puls nach den Delay im Vergleich zum Startsignal für den TDC zeitverzögert ist und stellen sie diese Differenz für alle Detektoren auf die gleiche Zeit ein.

- Der TDC enthält eine interne Uhr, die bei einem Signal am Startkanal die Zeitmessung beginnt und nach $65 \mu\text{s}$ stoppt. Liegt an einen der INs ein Signal an, wird die Zeit und das Muster aller INs in den Speicher

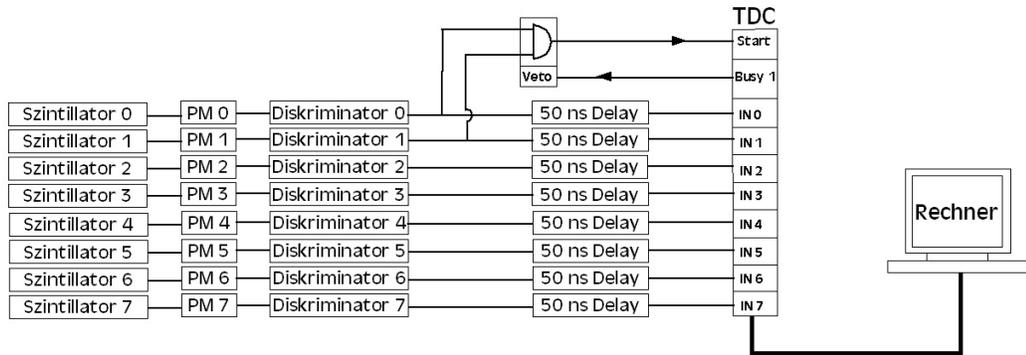


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Hardware

des TDC geschrieben. Bitmuster benötigen 1 Byte Speicherplatz, Zeiten 2 Byte (vgl. Abbildung 15).

Zeit - 2Byte	Detektormuster - 1Byte
40	00001111
2250	00010000

↑

Abbildung 15: Schema des internen Speichers des TDC

4 Datennahme

Die Auslese der Daten aus dem TDC und das anschließende Speichern erfolgt mittels eines in LabVIEW geschriebenen Programms. Die Daten werden sowohl in der digitalen Form, in der sie aus dem Diskriminator kommen angezeigt als auch mittels eines Online-Eventdisplays zeitlich aufgelöst visualisiert. Zum besseren Verständnis werden daneben noch zwei Histogramme zur Anzeige aller Hits pro Detektor und zur Anzeige der auftretenden Slices gefüllt. Slices sind dabei die Anzahl der auftretenden Zeiten, die pro Ereignis in den TDC geschrieben werden.

Anhand des Histogramms zur Anzeige aller Hits pro Detektor, können Sie sich noch einmal über die Qualität Ihrer Einstellung der Schwellen am Diskriminator vergewissern. In den ersten beiden Detektoren sollten in etwa gleich viele Hits zu sehen sein, da ihre Koinzidenz überhaupt erst den Start des TDC bewirkt. Sie müssen jedoch nicht genau gleich sein, da die Hits eines einzelnen Myons in zwei Zeitfenster des TDC fallen und somit mehrfach im Histogramm auftauchen können. Für alle anderen Detektoren ist ein kontinuierlicher Abfall der Anzahl der Hits zu erwarten, da auf dem Weg nach unten immer mehr Myonen zerfallen.

- Das Programm lässt sich in den *singelrun* Modus schalten, um einzelne Ereignisse anzuschauen und sich über die Funktionsweise klar zu werden. Bei ausgeschaltetem *singlerun* wird die Messung gestartet, und Sie werden gefragt, wo und unter welchem Namen Sie die Daten speichern möchten.
- Machen Sie sich zu Beginn mit dem Programm vertraut.

Fragen dazu:

- Welche Werte zeigen die einzelnen Elemente auf der Benutzeroberfläche an?
- Wie stellt sich ein Myonzerfall auf dem Eventdisplay und der digitalen Anzeige dar?
- Schauen Sie sich einige Ereignisse im *singlerun* Modus an und versuchen Sie, diese zu interpretieren.
- Die Lebensdauer der Myonen soll mit 5% Genauigkeit gemessen werden. Hierzu sollte die Messung mindestens eine Nacht lang laufen. Starten Sie die Messung und beobachten Sie das Füllen der Histogramme.

- Neben der Lebensdauer der Myonen kann mit den selben Daten auch die wesentlich kürzere Zeit gemessen werden, in der die negativen Myonen von den Kernen des Aluminiums bzw. Kupfers eingefangen werden, die sogenannte Einfangzeit.
- Durch Anlegen eines Magnetfeldes lässt sich die Polarisation der Myonen messen. Der Magnet besteht aus zwei rechteckigen Spulen mit je 41 Windungen entlang der Längsseite des Detektors (vgl. Abbildung 16). Er kann über ein Netzgerät mit Strömen von bis zu 25 A betrieben werden. Dabei gilt für das magnetische Feld

$$B = I \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \frac{T}{A}.$$

Stellen Sie die Stromstärke auf 20 A. Wie groß ist dann die Feldstärke? Führen Sie diese Messung mit möglichst guter Statistik durch (bis Montag der darauffolgenden Woche).

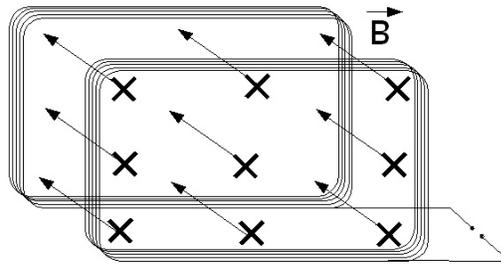


Abbildung 16: Anordnung der beiden Spulen um den Detektor zur Erzeugung eines homogenen Magnetfelds in diesem

Fragen dazu:

- Warum sind die Myonen polarisiert?
- Wie lässt sich die Polarisation nachweisen?
- Für diese statistische Messung müssen Nachpulse berücksichtigt werden. Von Nachpulsen spricht man, wenn ein Detektor eigentlich nur einen Hit hatte, der Photomultiplier allerdings zwei Signale weiterleitet. Dies geschieht, wenn das Primärsignal im Photomultiplier in dessen Restgas Ionen erzeugt, die zurück zur Kathode laufen und dort einen

zweiten Puls auslösen. Da solche Ereignisse mit in die Messung eingehen, ist es wichtig, sie später wieder zu entfernen, um die eigentlichen Messgrößen nicht zu verfälschen.

5 Datenanalyse

Zur Analyse der Daten wird ein in C++ geschriebenes Programm verwendet. Dieses sortiert die gespeicherten Daten aus den Nachtmessungen in vier verschiedene Kategorien: Zerfälle nach oben, Zerfälle nach unten, Nachpulse und alle übrigen. Des Weiteren werden verschiedene Histogramme gefüllt, deren Inhalt in einer Root- und einer Textdatei zur weiteren Verarbeitung gespeichert wird.

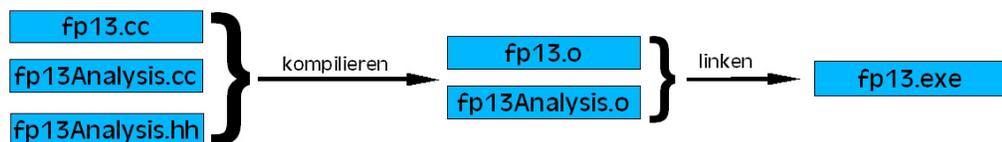


Abbildung 17: Vorgang beim Kompilieren zum Analyseprogramms

Das C++ Programm setzt sich aus vier Dateien zusammen, drei davon sind in Abbildung 17 zu sehen, eine weitere ist das `Makefile`, das den Vorgang beim Kompilieren vorgibt. `fp13Analysis.hh` ist die Datei, in der die in den anderen Dateien benötigten Funktionen und Variablen deklariert sind. In der Datei `fp13.cc` ist die Funktion `int main()` definiert, mit der das Programm beginnt. Hier wird die Analyse mit Hilfe der Klasse `fp13Analysis` aufgerufen und gesteuert. In `fp13Analysis.cc` sind verschiedene Funktionen zur Analyse definiert, die aufgerufen werden und die Daten selektieren. Lediglich diese Datei (`fp13Analysis.cc`) wird von Ihnen editiert und sollte daher grob verstanden werden. Sie finden sie am Ende dieser Anleitung.

- Welche Bitmuster müssen für die oben genannten vier Kategorien (Zerfälle nach oben, Zerfälle nach unten, Nachpulse und alle übrigen) vorliegen?
- Machen Sie sich mit dem Aufbau des `fp13Analysis.cc` vertraut!
- Funktionen zur Einordnung der Ereignisse in die Kategorien Zerfall nach oben und Nachpulse sind schon vorhanden. Schreiben Sie selbst eine Funktion für Zerfall nach unten und eine allgemeinere Funktion für die Nachpulse.

- Nach Ausführen der Funktionen werden einige der Rückgabewerte und globalen Variablen in Histogramme gefüllt. Machen Sie sich mit dieser Methode vertraut und erstellen und speichern Sie selbst Histogramme für die Zerfälle nach unten und die Nachpulse unter den dafür vorgesehenen Namen.
- Nun müssen Sie die verschiedenen Dateien mit dem Befehl `make` kompilieren und das dabei entstandene Programm über Ihre Messdaten laufen lassen. Dies machen Sie mit `fp13.exe -f fp13.txt`, bzw. zuletzt dem Namen Ihrer Textdatei.

Die Daten der Histogramme werden nun in die Datei `fp13.root` gespeichert, die im Anschluss zur weiteren Analyse verwendet wird. Falls Sie nicht mit dem Programm ROOT arbeiten möchten, stehen Ihnen die Daten der Histogramme auch als Textdatei zu Verfügung. Diese können Sie in einem Programm Ihrer Wahl weiter verwenden.

6 Datenauswertung

Die weitere Auswertung der Daten erfolgt im Normalfall mit dem Programm ROOT. Mit diesem lassen sich die gespeicherten Histogramme graphisch darstellen und fitten, was zur Ausgabe der Parameter der Fitfunktion führt. Die Schritte können zum einen direkt in einer Kommandozeile hintereinander ausgeführt werden, lassen sich aber auch in Makros schreiben, die dann komplett ausgeführt werden können.

- Machen Sie sich zunächst mit dem Programm vertraut, indem Sie sich einige Histogramme von einer Kommandozeile aus ansehen. `h1` und `h2` sollten Ihnen bereits aus der Benutzeroberfläche des Ausleseprogramms bekannt vorkommen.
 - Laden Sie die Datei mit den gespeicherten Histogrammen:
`TFile f("fp13.root")`
 - Zeichnen Sie eines der zu Verfügung stehenden Histogramme, z.B. `h1`:
`h1->Draw("hist")`
 - Füllen Sie dieses mit einer Farbe:
`h1->SetFillColor(kBlue)`
 - Danach müssen Sie `h7` neu zeichnen:
`h1->Draw("hist")`
 - Wiederholen Sie den Vorgang für `h7` und zeichnen sie dann `h8` mit Fehlerbalken darüber:
`h8->Draw("samee")`
- Schauen Sie sich nun das Makro `Weiteres.C` an und machen sich mit dem Aufbau vertraut. Führen Sie `Weiteres.C` folgendermaßen aus:
 - Laden des Makros:
`.L Weiteres.C`
 - Ausführen einer im Makro definierten Funktion wobei die Daten aus `fp13.root` verwendet werden:
`canvas3("fp13.root")`
 - Auch hier finden Sie die Ihnen schon bekannten Histogramme `h1` und `h2` wieder.

- Am Ende dieser Anleitung finden Sie einen Überblick über alle vorhandenen Histogramme und deren Verteilung auf die verschiedenen Makros. Schauen Sie sich diesen genau an und führen Sie Funktionen von ihnen aus.
- Verschaffen Sie sich nun in einem Texteditor einen Überblick über das Makro `Lebensdauer.C`.
 - Wo finden sich die schon bekannten Befehle wieder?
 - Was geschieht in den anderen Abschnitten?

Ein Histogramm könnte z.B. wie in Abbildung 18 aussehen. Bei beiden Abbildungen handelt es sich um das gleiche Histogramm, wobei das rechte mit logarithmischer y-Achse um Fehlerbalken dargestellt ist.

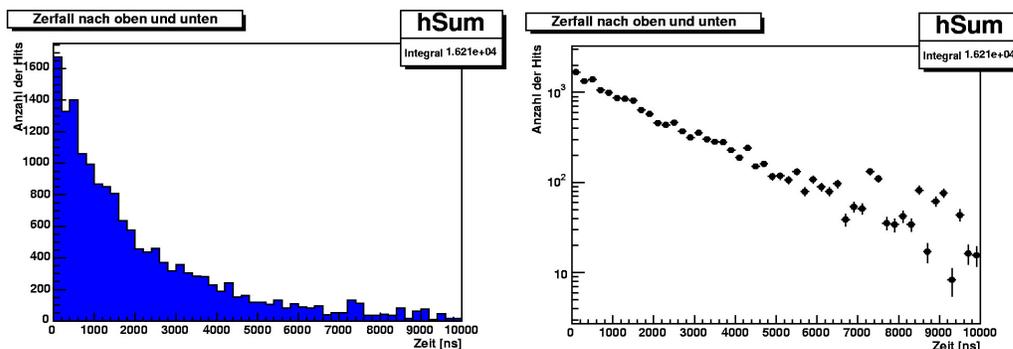


Abbildung 18: Histogramm aller Zerfälle, Anzahl der Ereignisse gegen Lebensdauer aufgetragen

- Laden Sie das Makro `.L Lebensdauer.C` zur Bestimmung der Lebensdauer und führen Sie danach die darin enthaltene Funktion durch `Lebensdauer(1000, “./fp13.root”)` aus. 1000 steht hierbei für 1000 ns und ist die Zeit, zu der die spätere Fitfunktion des Histogramms starten soll. Scauen Sie sich zunächst nur die ersten drei sich öffnenden Fenster an.
- Nehmen Sie sich an dieser Stelle ausreichend Zeit, alle Histogramme zu betrachten. Fragen dazu:

- Wo finden Sie in den Zerfällen in den einzelnen Lagen Ähnlichkeiten?
 - Gbt es charakteristische, besonderes von den anderen abweichende Histogramme?
 - Wie wirkt sich der Einfluss der Nachpulse auf die Spektren aus? Welche Konsequenzen hat das für Ihr weiteres Vorgehen?
 - Welche Muster müssen bei den Zerfällen nach oben bzw. bei den Zerfällen nach unten vorliegen, damit Nachpulse in die Spektren einfließen? Wie wirkt sich die Effizienz der Detektoren darauf aus?
- Unter Umständen kann es sinnvoll oder sogar nötig sein, die Nachpulse aus den Zerfallsspektren zu eliminieren. Um das Nachpulshistogramm jedoch mit richtiger Gewichtung vom Spektrum abzuziehen, müssen Sie den dazu nötigen Faktor bestimmen. Tabelle 4 kann dazu hilfreich sein.

Tabelle 4: Anteile der Nachpulse in den Zerfallshistogrammen, bestimmt durch Verhältnisse guter zu möglicher Ereignisse

Lage (Detektor)	Nachpulse pro Startmuster [%]	Zerfälle nach oben pro Startmuster [%]	Anteil der Nachpulse am Spektrum [%]
a (1)			
b (2)			
c (3)			
d (4)			
e (5)			
f (6)			
Lage (Detektor)	Nachpulse pro Startm. · Ineff. [%]	Zerfälle nach unten pro Startmuster [%]	Anteil der Nachpulse am Spektrum [%]
a (2)			
b (3)			
c (4)			
d (5)			
e (6)			

Achten Sie in beiden der folgenden Fälle darauf, dass Sie sich auf ein sinnvolles Zeitfenster beschränken.

Berechnet werden also für Zerfälle nach oben:

- der Quotient aus der Anzahl der Zerfälle nach oben und der Anzahl der Startmuster, die zu einem Zerfall nach oben hätten führen können
- der Quotient aus der Anzahl der Nachpulse und der Startmuster, die zu einem Nachpuls hätten führen können
- der Quotient aus den beiden erstgenannten Punkten

Für Zerfälle nach unten werden berechnet:

- der Quotient aus der Anzahl der Zerfälle nach unten und der Anzahl der Startmuster, die zu einem Zerfall nach unten hätten führen können multipliziert mit der Ineffizienz des jeweiligen Detektors
 - der Quotient aus der Anzahl der Nachpulse und der Startmuster, die zu einem Nachpuls hätten führen können
 - der Quotient aus den beiden erstgenannten Punkten
- Ziehen Sie nun die Nachpulse mit dem von Ihnen bestimmten Skalierungsfaktor von den Spektren ab und prüfen Sie, wie sich das Erscheinungsbild der Spektren ändert. Entscheiden Sie dadurch, welche Spektren Sie in das später zu fittende Histogramm mit hineinnehmen und variieren das Makro dementsprechend.
 - Betrachten Sie nun auch das vierte Fenster. Es wird im Folgenden mit der Funktion

$$N(t) = N(\mu)e^{-t/\tau_0} + N_{BG}$$

gefittet. Setzen Sie die Startwerte der Parameter auf Ihnen sinnvoll erscheinende Zahlen. Verändern Sie auch den Start- und den Endwert Ihres Fits.

Fragen dazu:

- Was erscheint hier als sinnvoll?

- Ab welcher Zeit trägt der Einfang negativer Myonen nicht mehr signifikant zum Spektrum bei?
- Was sagt ihnen das für Ihren Fit?
- *Fakultativ:* Sie können nun auch versuchen, die Einfangzeiten für negative Myonen in Aluminium und Kupfer zu ermitteln, indem Sie nur die entsprechenden Lagen verwenden. Hierbei müssen Sie die Überlagerung aus zwei Exponentialfunktionen fitten, wobei die eine die Einfangzeit und die andere die Lebensdauer enthält. Benutzen Sie dazu das Makro `Einfangzeiten.C`, welches als Fitfunktion schon die Überlagerung der beiden exponentiellen Abfälle enthält:

$$N(t) = N(\mu^-)e^{-t/\tau_o}e^{-t/\tau_c} + N(\mu^+)e^{-t/\tau_o} + N_{BG}$$

- Sobald Ihre Messung mit eingeschaltetem Magneten abgeschlossen ist sollen Sie selbst ein Makro zur Darstellung und zum Fitten der Asymmetrie schreiben. Dazu müssen die Zerfälle nach unten von denen nach oben abgezogen werden, nachdem beide von Nachpulsen bereinigt wurden. Um den Quotienten zu normieren und das Exponentialverhalten zu eliminieren, wird noch durch die Summe der Zerfälle nach oben und unten dividiert. Zu erstellen sind ein Histogramm und eine Fitfunktion:

$$\frac{Z_{up}^{korr}(t) - Z_{down}^{korr}(t)}{Z_{up}^{korr}(t) + Z_{down}^{korr}(t)} \approx P \cdot A \cdot \cos(\omega_{Larmor}t + \varphi) + c$$

Machen Sie sich klar, dass Sie durch diese Darstellungsweise eine oszillierende Funktion bekommen, bei der der exponentielle Zerfall eliminiert ist.

- Variieren Sie auch hier die Startwerte der Parameter so lange, bis die Funktion gut mit den Daten übereinstimmt.

Fragen dazu:

- Welche Werte erwarten Sie für die Parameter?
- Stimmen die erwarteten Größenordnungen mit den vom Programm errechneten Werten überein? Wenn nicht: Könnte Ihnen die Periodizität des Sinus weiterhelfen?

7 Fitten statistischer Daten

In der Hochenergiephysik, aber auch in dem hier durchzuführenden Experiment, werden physikalische Größen bestimmt, indem sehr viele Daten genommen und diese in Histogramme gefüllt werden. An diese Histogramme werden im Anschluss Funktionen gefittet. Hierzu gibt es im Allgemeinen zwei Möglichkeiten: das Minimum- χ^2 und das Maximum-Likelihood Verfahren.

- *Minimum- χ^2* : Bei dem Minimum- χ^2 Verfahren versucht der Fitalgorithmus die als

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i(mess) - y_i(fit))^2}{(\Delta y_i)^2}$$

definierte Größe zu minimieren. Für jeden einzelnen Eintrag in das Histogramm wird also die quadrierte Abweichung zwischen Eintrag und Wert des Fitparameters gebildet und diese durch das Quadrat des Fehlers auf dem jeweiligen Eintrag dividiert. Dies wird für alle Einträge und für alle Parameter gemacht, danach wird die erhaltene Funktion minimiert. Wenn die Fitfunktion die Daten gut beschreibt, erwartet man, dass bei vielen Kanälen die Abweichung der Daten von der Fitfunktion im Mittel so groß ist wie der Fehler Δy der einzelnen Einträge. Somit wäre jeder Summand im Mittel 1 und $\chi^2 = N$, wobei N die Zahl der zu fittenden Punkte ist. Da Δy als $\sqrt{y_{mess}}$ angenommen wird, dies aber nur für genügend hohe Zählraten der statistisch korrekte Fehler ist, ist das χ^2 -Kriterium bei kleinen Zählraten kein gutes Kriterium mehr. In solchen Fällen ist die Maximum-Likelihood Methode wesentlich sinnvoller.

- *Maximum-Likelihood*: Bei der Bestimmung der Parameter der Fitfunktion mit der Maximum-Likelihood Methode wird der freie Parameter a aus dem Vergleich von N unabhängigen Messwerten x_i mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x_i|a)$ bestimmt. Dies geschieht durch Maximieren des Produkts der Einzelwahrscheinlichkeiten, also der Likelihood-Funktion:

$$L(x_1, \dots, x_N|a) = \prod_N^{i=1} P(x_i|a)$$

Nicht immer konvergiert ein Fit, aber auch wenn er konvergiert, sollten Sie noch einige Kriterien anwenden, um seine Güte abzuschätzen:

1. Beurteilen Sie Ihren Fit mit dem Auge. Sind die Daten gleichmäßig um die angepasste Fitfunktion verteilt oder gibt es systematische Abweichungen?
2. Wenn Sie Startwert, Endwert und Binbreite (um Bins mit keiner oder wenig Statistik zu verhindern) Ihres Fits geeignet gewählt haben, sollte $\chi^2 \approx N$ bzw. $\chi^2/N \approx 1$ sein.
3. Beachten Sie auch die Angaben, die die Fit-Routine Ihnen gibt. Wenn bei einem Parameter der Hinweis ***at limit*** erscheint, bedeutet dies, dass der Parameter an den Rand seines erlaubten Bereichs gelaufen ist.

8 Auswertungshinweise

- Die Effizienz der einzelnen Szintillatoren soll ermittelt werden. Bitte stellen Sie Ihre Werte (eingestellte Schwelle, Zählrate, Effizienz, Signal-Rausch-Verhältnis) für alle Zähler in einer Tabelle zusammen.
- Extrahieren Sie aus Ihren Messungen die absolute Rate an kosmischen Teilchen. Hierbei ist der Raumwinkel des beobachteten Firmaments zu beachten.
- Geben Sie die von den einzelnen Szintillatoren nach Einstellung der Diskriminatoren detektierten Raten an. Hieraus kann die Rate der Zufallskoinzidenzen bei bekannter Länge der Normpulse mit Hilfe der obigen Formel abgeschätzt werden.
- Bestimmen Sie die Lebensdauer der Myonen.
- Berechnen Sie die Anzahl der erwarteten Myonenzerfälle im Zeitbereich $> 10\mu\text{s}$ über der Ausdruck

$$\int_{10\mu\text{s}}^{\text{Ende}} N_{\mu} e^{-t/\tau} dt,$$

wobei Sie Ihre gemessenen Werte einsetzen.

Fragen dazu:

- Können Sie erklären, warum für Zeiten über $10\mu\text{s}$ im wesentlichen Untergrund beobachtet wird?
- Sind diese $10\mu\text{s}$ ein besonders ausgezeichneter Zeitpunkt?
- Vergleichen Sie die Abhängigkeit der von Ihnen bestimmten Kern-Einfangrate der negativen Myonen von der Kernladungszahl Z mit den Erwartungen.
- Das magnetische Moment des Myons soll aus seiner Spinpräzession ermittelt werden. Geben Sie die ursprüngliche Spin-Richtung im Bezug auf die Bewegungsrichtung der Myonen an.
- Ermitteln Sie die Polarisation kosmischer Myonen. Welche Schlüsse über den Entstehungsprozess kosmischer Myonen lassen sich daraus ableiten?

- Bestimmen Sie aus Ihren Messwerten die Fermi-Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung G_F . Verwenden Sie dabei, dass das Myon ein Lepton ist, was u.a. bedeutet, dass der magnetische g-Faktor bis auf die in diesem Experiment vernachlässigbaren quantenelektrodynamischen (QED) Korrekturen mit dem des Elektrons identisch ist. Denken Sie dabei an den fundamentalen Zusammenhang zwischen dem magnetischen Moment und der Masse eines punktförmigen Teilchens.
- Das beim Myonenzerfall entstehende Elektron hat maximale Energie, wenn die Neutrinos entgegengesetzt zum Elektronimpuls wegfliegen (maximaler Rückstoß). Berechnen Sie mit Hilfe von Energie- und Impulssatz unter Vernachlässigung der Ruhemasse des Elektrons diese maximale Energie. Beachten Sie dabei relativistische Effekte. Was passiert, wenn sie die Ruhemasse mit einbeziehen?

A Anhang

A.1 Histogrammüberblick

Tabelle 5: Histogramme, die in `fp13Analysis.cc` gefüllt werden

h1:	Hits in den Lagen insgesamt
h2:	Anzahl der auftretenden Zeiten
h3:	Zerfall nach oben
h3l:	Zerfall nach oben
h4:	Zerfall nach unten
h5:	Nachpulsspektrum (allgemein)
h5l:	Nachpulsspektrum (lang)
h6:	Detektor der Nachpulse
h7:	Lage der Zerfälle nach oben
h8:	Lage der Zerfälle nach unten
h9:	Nachpulsspektrum (speziell)
h10:	Detektor der Nachpulse
h11:	Anzahl aller Slices
h12:	Anzahl der genommenen Slices
h13:	Anzahl der Durchgänge bis zu genau diesem Detektor
h14:	Anzahl der komplett durchgegangenen
h15:	Startmuster pro Detektor
h21:	Zeit des ersten Hits für Lage %i (z%i)
h22:	Nachpulse für Detektor %i (x%i) (allgemein)
h23:	Nachpulse (lang) für Detektor %i (lx%i) (allgemein)
h24:	Zerfall nach oben in Lage %i (a%i)
h25:	Zerfall nach oben (lang) in Lage %i (la%i)
h26:	Zerfall nach unten in Lage %i (b%i)
h27:	Nachpulse2 für Detektor %i (w%i) (speziell)
h28:	Zeit des zweiten Hits für Lage %i (o%i)
h29:	Nachpulse (kurz) für Detektor %i (kx%i)

Tabelle 6: Makros zur Auswertung

Lebensdauer.C mit Lebensdauer()
⇒ Spektren aller Lagen Zerfälle nach oben und unten skaliert
⇒ Nachpulsspektren aller Lagen
⇒ alle Zerfälle nach oben und alle Zerfälle nach unten
⇒ Lebensdauerfit
Einfangzeiten.C mit Einfangzeiten()
⇒ Spektren aller Lagen Zerfälle nach oben und unten skaliert
⇒ Nachpulsspektren aller Lagen
⇒ alle Zerfälle nach oben und alle Zerfälle nach unten
⇒ Einfangzeitenfit
Asymmetrie.C
⇒ Spektren aller Lagen Zerfälle nach oben und unten skaliert
⇒ Nachpulsspektren aller Lagen
⇒ alle Zerfälle nach oben und alle Zerfälle nach unten
⇒ Asymmetriefit
Weitere.C
⇒ Canvas1() Zeit des ersten Hits für alle Lagen (z0-z7)
⇒ Canvas2() Nachpulse pro Detektor (x0-x7)
⇒ Canvas3() Hits pro gesamt, alle auftretenden Zeiten, Nachpulse pro Detektor, alle Slices, genommene Slices, Startmuster (h1, h2, h6, h11, h12, h15)
⇒ Canvas4() Zerfall nach oben pro Lage (a1-a6)
⇒ Canvas5() Zerfall nach unten pro Lage (b1-b6)
⇒ Canvas6() Lage der Zerfälle nach oben und Lage der Zerfälle nach unten (h7, h8)
⇒ Canvas7() Nachpulse2 pro Detektor (w0-w7)
⇒ Canvas8() Zeit des zweiten Hits für alle Lagen (o0-o7)

A.2 Filterprogramm

```

//-----//
//      Mode:  c++  --//
//-----//

#include "fp13Analysis.hh"
#include <TH1.h>

//-----//
// Offnen des Files in das die Histogramme geschrieben werden //
//-----//

void fp13Analysis::openDataFile(const char *fileName) {
    #HistFile = new TFile("fp13.root", "RECREATE"); // erstellt bzw. ueberschreibt das fp13.root
    #DataFile = new ifstream(fileName);
    char buff[200];
    #DataFile->getline(buff, 200, '\n');

    if (!(*DataFile)) { // prueft, ob das File wirklich geoeffnet wurde
        cout
        << "Error: Datafile "
        << fileName
        << " nicht gefunden!"
        << endl;
        abort();
    }
}

//-----//
// Erstellen der benoetigten Histogramme //
//-----//

void fp13Analysis::bookHistograms() {
    #HistFile->cd();
    TH1D h = new TH1D("h1", "Hits in den Lagen insgesamt; Lage; Anzahl der Hits", 16, 0., 8.); h->Sumw2();
    h = new TH1D("h2", "Anzahl der auftretenden Zeiten; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", 100, 0., 10000);
    h = new TH1D("h3", "Zerfall nach oben; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", 100, 0., 10000.);
    h = new TH1D("h4", "Zerfall nach unten; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", 100, 0., 10000.);
    h = new TH1D("h5", "Nachpulsspektrum; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", 100, 0., 10000.);
    h = new TH1D("h5", "Nachpulsspektrum (lang); Zeit [ns]; Anzahl der Hits", 100, 0., 100000);
    h = new TH1D("h6", "Detektor der Nachpulse; Detektor; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);
    h = new TH1D("h7", "Lage der Zerfaelle nach oben; Lage; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);
    h = new TH1D("h8", "Lage der Zerfaelle nach unten; Lage; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);
    h = new TH1D("h9", "Nachpulsspektrum; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", 100, 0., 10000.);
    h = new TH1D("h10", "Detektor der Nachpulse; Detektor; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);
    h = new TH1D("h11", "Anzahl aller Slices; Slices; Anzahl der Hits", 40, 0., 20.);
    h = new TH1D("h12", "Anzahl der genommenen Slices; Slices; Anzahl der Hits", 40, 0., 20.);
    h = new TH1D("h13", "Durchgang bis zu Detektor; Detektor; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);
    h = new TH1D("h14", "Komplettdurchgang; Detektor; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);
}

```

```

h = new TH1D("h15", "Startpattern; Detektor; Anzahl der Hits", 16, 0., 8);

for (int i = 0; i < 8; ++i){
    // Form schreibt einen Array aus hier 8 Histogrammen
    h = new TH1D(Form("%i", i), Form("Zeit des ersten Hits fuer Lage %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 40, 0., 200.); //h21
    h = new TH1D(Form("%i", i), Form("Wachpulsse fuer Detektor %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 100, 0., 10000.); //h22
    h = new TH1D(Form("1x%i", i), Form("Wachpulsse fuer Detektor %i (lang); Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 100, 0., 100000.); //h23
    h = new TH1D(Form("%i", i), Form("Zerfall nach oben in Lage %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 40, 0., 10000.); //h24
    h = new TH1D(Form("1ax%i", i), Form("Zerfall nach oben in Lage %i (lang); Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 100, 0., 100000.); //h25
    h = new TH1D(Form("b%i", i), Form("Zerfall nach unten in Lage %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 40, 0., 10000.); //h26
    h = new TH1D(Form("%i", i), Form("Wachpulsse2 fuer Detektor %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 100, 0., 10000.); //h27
    h = new TH1D(Form("%i", i), Form("Zeit des zweiten Hits fuer Lage %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 100, 0., 200.); //h28
    h = new TH1D(Form("kx%i", i), Form("Wachpulsse fuer Detektor %i; Zeit [ns]; Anzahl der Hits", i), 40, 0., 10000.); //h29
}

// -----//
// Einlesen und Formatieren der Daten
// -----//

int fpi3Analysis::readEvent() {
    static char buffer[200];
    ++fEvent;
    if ((fEvent % 10000) == 0){
        cout << "Event " << fEvent << endl;
    }

    fBits.clear();
    fBits.resize(0);
    fTimes.clear();
    fTimes.resize(0);fHistFile->cd();

    while (fDataFile->getline(buffer, 200, '\n')) {
        int Slices, bitPattern, timeStamp; // bitPattern = Hits
        for (int i = 0; i < 200; ++i) {
            if (buffer[i] == '\r') {
                buffer[i] = '\0';
                break;
            }
        }
        if (!strcmp(buffer, "###")) {
            break;
        }
        sscanf(buffer, "%d %d %d",
               &Slices, &bitPattern, &timeStamp);
        fBits.push_back(bitPattern);
        fTimes.push_back(timeStamp);
        fSlices = Slices;
    }
}

```

```

}
// -----//
// Fuellen fuer alle Slices
// -----//
// Anzahl der Slices
fHstFile->cd();
TH1D *h1 = (TH1D*)gDirectory->Get("h1");
h1->Fill(fSlices);
// -----//
// Ende Fuellen fuer alle Slices
// -----//
// Zusammenschieben "verwackelter" Events
schieben();
if (fDataFile->eof()) {
return i;
} else {
return 0;
}
}
// -----//
// Fuellen der Histogramme
// -----//
void fpf3Analysis::analyze() {
// -----//
// allgemeine Histogramme
// -----//
for (int il = 0; il < 8; ++il) { // Loop ueber alle 8 Lagen
for (int is = 0; is < (fSlices); ++is) { // Loop ueber die Slices
if (fBts[is] & (1 << il)) { // Prueft, ob die jeweilige Lage zur gerade untersuchten Zeit getroffen war.
// Spektren pro Lage
fHstFile->cd();
TH1D *h = (TH1D*)gDirectory->Get("h1");
h->Fill(i1); // Spektren aller eingelesenen Ereignisse
fHstFile->cd();
TH1D *h2 = (TH1D*)gDirectory->Get("h2");
h2->Fill(fTimes[is]);
}
}
for (int is = 0; is < (fSlices); ++is) {
for (int il = 0; il < 8; ++il) {
if (fBts[is] & (1 << il)){

```

```

fHistFile->cd();
TH1D *h21 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("%s%i", il));
h21->Fill(fTimes [is]);
}
if (is == 1){
fHistFile->cd();
TH1D *h28 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("%s%i", il));
h28->Fill(fTimes [is]);
}
}
// -----//
// Fuellen fuer Zerfall nach oben
// -----//
int a = -1;
a = zerfallNachOben();
// Funktion gibt die Lebensdauer beim Zerfall nach oben zurueck, hat kein Zerfall stattgefunden -1
if((a > -1) && (dto > 50)){
fHistFile->cd();
TH1D *h3 = (TH1D*)gDirectory->Get("h3");
h3->Fill(dto); // Spektrum des Zerfall nach oben
TH1D *h31 = (TH1D*)gDirectory->Get("h31");
h31->Fill(dto); // Spektrum des Zerfall nach oben (lang)
TH1D *h7 = (TH1D*)gDirectory->Get("h7");
h7->Fill(a);
TH1D *h24 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("a%i", a)); // Zerfall nach oben in allen Lagen
h24->Fill(dto);
TH1D *h25 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("la%i", a)); // Zerfall nach oben in allen Lagen (lang)
h25->Fill(dto);
}
// -----//
// Fuellen fuer Zerfall nach unten
// -----//
int b = -1;
b = zerfallNachUnten();
// Funktion gibt die Lebensdauer beim Zerfall nach oben zurueck, hat kein Zerfall stattgefunden -1
if((b > -1) && (dtu > 50)){
fHistFile->cd();
TH1D *h4 = (TH1D*)gDirectory->Get("h4");
h4->Fill(dtu); // Spektrum des Zerfall nach unten
TH1D *h8 = (TH1D*)gDirectory->Get("h8");
h8->Fill(b); // Spektrum des Zerfall nach unten (lang)
TH1D *h26 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("b%i", b)); // Zerfall nach unten in allen Lagen
h26->Fill(dtu);
TH1D *h30 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("lb%i", b)); // Zerfall nach unten in allen Lagen
h30->Fill(dtu);
}

```

```

TH1D *h41 = (TH1D*)gDirectory->Get("h41");           // Spektrum des Zerfall nach unten
h41->Fill(dt);
}

// Fuellen Sie hier mit den aus der Funktion zerfallNachUnten() erhaltenen Werten
// die oben definierten Histogramme h4, h8 und h26.

// -----//
// Fuellen fuer Nachpulse (allgemein)              //
// -----//

int c = -1;                                       //
c = nachpulse();                                 // allgemeine Version

// Fuellen Sie hier mit den aus der Funktion nachpulse() erhaltenen Werten
// die oben definierten Histogramme h5, h51 und h22.

// -----//
// Fuellen fuer Nachpulse (speziell)              //
// -----//

int d = -1;                                       //
d = nachpulse2();                                // spezielle Version

if (dt2 > 50){
  fHistFile->cd();
  TH1D *h9 = (TH1D*)gDirectory->Get("hg");         // Nachpulsspektrum
  h9->Fill(dt2);
  TH1D *h10 = (TH1D*)gDirectory->Get("h10");      // Nachpulsspektrum (lang)
  h10->Fill(d);
  TH1D *h6 = (TH1D*)gDirectory->Get("hg");
  h6->Fill(c);
  TH1D *h27 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("w%i", d)); // Nachpulse in allen Detektoren
  h27->Fill(dt2);
  TH1D *h23 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("lx%i", c)); // Nachpulse in allen Detektoren (lang)
  TH1D *h29 = (TH1D*)gDirectory->Get(Form("rx%i", c)); // Nachpulse in allen Detektoren (kurz)
  h29->Fill(dt);
}

// -----//
// Fuellen fuer genommene Slices                  //
// -----//

if (((a > -1) && (dto > 50)) || ((b > -1) && (dtu > 50))){
  fHistFile->cd(); // Anzahl der Slices
}

```

```

TH1D *h12 = (TH1D*)gDirectory->Get("h12");
h12->Fill(GSlices + 1);
}

// + 1, da hier Slices [0...n-1], aber in LabVIEW Slices [1...n]

// -----//
// Fuellen fuer Startpattern
// -----//

int tiefste = -1;
tiefste = startpattern();

if (tiefste > -1){

    fhstFile->cd();
    TH1D *h15 = (TH1D*)gDirectory->Get("h15");
    h15->Fill(tiefste);
}

// -----//
// Fuellen fuer Skalierung des Nachpuls-Histogramms
// -----//

if (durchgang > -1){

    fhstFile->cd();
    TH1D *h13 = (TH1D*)gDirectory->Get("h13");
    h13->Fill(durchgang);
}

if (komplett > -1){

    fhstFile->cd();
    TH1D *h14 = (TH1D*)gDirectory->Get("h14");
    h14->Fill(komplett);
}
}

// -----//
// Schreiben des .ROOT Files fuer die Histogramme
// -----//

void fp13Analysis::dumpHistograms() {
    fhstFile->Write();
    fhstFile->Close();
}

// -----//
// Initialisieren einiger Variablen - Konstruktor
// -----//

fp13Analysis::fp13Analysis() {

```

```

#Event = 0;
#Slices = 0;
}

// -----//
// Destruktor
// -----//

fp3Analysis::~fp3Analysis() {
}

// -----//
// Funktion zur Formatierung der eingelesenen Daten
// -----//

void fp3Analysis::schieben() {
    for (int is = 0; is < (fSlices); ++is) {
        // Loop ueber die Slices
        // pruefen, ob Zeiten mit nur einer Einheit Unterschied ( = 10ns) auftreten
        // Zusammenfuegen der beiden Bitmuster (das neue erhaelt somit die Zeit des ersten Slice)
        fTimes[is+1] = fTimes[is] - 10;
        fBits[is+1] = fBits[is] | fBits[is];
        fTimes[is] = fTimes[is+1];
        for (int i = 1; i < (fSlices - is); ++i){
            // schiebt alle fTimes und fBits um jeweils eins nach vorne
            fTimes[is+i] = fTimes[is+i+1];
            fBits[is+i] = fBits[is+i+1];
        }
        fSlices = fSlices - 1;
        is--;
    }
}

// -----//
// Pruefen auf Zerfall nach oben
// -----//

int fp3Analysis::zerfallNachOben(){
    int t1 = -1;
    int t2 = -1;
    int l = -1;
    dco = -1;

    for (int n = 7; n > 1; --n){
        if (fBits[0] == int(pow(2, n))-1){
            t1 = fTimes[0];
            if (fBits[1] == int(pow(2, n-1))){
                t2 = fTimes[1];
                dco = t2 - t1;
                l = n-1;
                goto end;
            }
        }
    }
end:
    return l;
}

```

```

}
// -----//
// Pruefen auf Zerfall nach unten
// -----//

int fp13Analysis::zerfallNachUnten()
// Schreiben Sie diese Funktion fuer den Zerfall nach unten.
// Definieren Sie sich dazu benoetigte Variablen.
// dtu steht als globale Variable zu Verfuegung.
// Wie muss das Detektormuster eines Zerfalls nach unten aussehen?
// Sie benoetigen einen Rueckgabewert.
// Orientierung bietet der Zerfall nach oben.
}

// -----//
// Pruefen auf Nachpulse (allgemein)
// -----//

int fp13Analysis::nachpulse()
// Schreiben Sie hier eine allgemeinere Funktion zum Herausfiltern der Nachpulse.
// Definieren Sie sich dazu benoetigte Variablen.
// dt steht als globale Variable zu Verfuegung.
// Wie koennte ein allgemeineres Detektormusters eines Nachpulses aussehen?
// Sie benoetigen einen Rueckgabewert.
// Orientierung bietet die spezielle Nachpulsfunktion.
}

// -----//
// Pruefen auf Nachpulse (speziell)
// -----//

int fp13Analysis::nachpulse2()
    int t1 = 0;
    int t3 = 0;
    int l = -1;
    dt2 = -1;

    if (fBits[0] == 255){
        for (int n = 0; n > -1; --n){
            t1 = fTimes[0];
            if (fBits[1] == int(pow(2, n))){
                t3 = fTimes[1];
                dt2 = t3 -t1;
                l = n;
                break;
            }
        }
        return l;
    }
    // prueft, ob im ersten Slice alle Detektoren getroffen waren
    // prueft, ob danach noch ein weiterer Detektor (aus 0..7) an gewesen ist
    // prueft, ob eine einzelne Lage einen Nachpuls hatte
    // ausser Lage 7, da hier Nachpuls und echter Hit nicht zu unterscheiden sind

```

```
}
// -----//
// Pruefen auf Startpattern
// -----//
int fpi3Analysis::startpattern(){
    int start = -1;
    // letzter Hit eines kontinuierlichen Durchgangs in Detektor x entspricht
    // Zerfall in Lage x (ueber Richtung noch nichts gesagt)

    for (int n = 8; n > 1; --n){
        if (fHits[0] == int(pow(2, n))-1){
            start = n-1;
        }
    }
    return start;
}
```

Literatur

- [1] Case, T.: Precision Measurement of Muon Capture und Muon Lifetime, Berkeley 2004: <http://www.npl.uiuc.edu/exp/mucapture/Abstract.doc>
- [2] DESYs KworkQuark: <http://kworkquark.net>
- [3] Grehn, J. / Bolz, J.: Metzler Physik, Hannover 1998: Schroedel
- [4] Hacker, G.: Grundlagen der Teilchenphysik, Erlangen 2003: http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/grundl_d_tph/titelseite.html
- [5] Jonker, M. et al.: Measurement of the Polarisation of Positive Muons Produced in High-Energy Antineutrino Interactions, in: Particles and Fields, Springer 1983, 211-217
- [6] Leo, W.R.: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Berlin Heidelberg New York 1994: Springer
- [7] Maier, B.: Versuch im Fortgeschrittenenpraktikum - Polarisierte kosmische Myonen, Staatsexamensarbeit, Heidelberg 1999
- [8] Martyn, H.U.: Test of QED by High Energy Electron-Positron Collision, in: Kinoshita, T.: Quantum Elektrodynamics, Singapore New Jersey London Hong Kong 1990: World Scientific, 92-157
- [9] Particle Data Group: Particle Physics Booklet, July 2002
- [10] Paul-Scherrer Institute: Scientific Report 2003, „Particles and Matter“, Villingen 2003
- [11] Perkins, D.: Hochenergiephysik, Bonn 1991: Addison-Wesley
- [12] Povh, B. / Rith, K. / Scholz, C. / Zetsche, F.: Teilchen und Kerne, Berlin Heidelberg New York 2004: Springer
- [13] Rausch, A.: Benutzerhandbuch DL605 Multihit-TDC, Heidelberg 2004
- [14] Turner, R. / Ankenbrandt, C.M. / Larsen, C.: Physical Review D, Vol. 4, 1971

- [15] Walter, M. / Gerlich, C.: F13 - Lebensdauer von Myonen, Versuchsanleitung, Heidelberg 2002