

Protokoll Myonenlebensdauerbestimmung

Werner Daxböck, Natascha Hörmann, Paul Posch,
Herbert Valerio Riedel, Dominik Steineder,
Iris Vonderhaid

Version 37

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
1.1	Szintillatoren	4
1.2	Photomultiplier	5
1.3	NIM Logic	5
1.3.1	NIM Module	6
1.4	Myonen	7
2	Vorbereitende Messungen	9
2.1	Messanordnung	9
2.2	Justierung/Tuning	10
2.2.1	Diskriminatoren	10
2.2.2	Hochspannungsversorgung	10
2.2.3	Delay-Kurven	13
2.2.4	Frequenzgenerator und Stoptimer	14
3	Versuchsaufbau	16
3.1	Detektoren	16
3.2	Abschätzung der Myonenrate	18
3.3	Signalverarbeitung	21
3.4	Datenerfassung	24
4	Messungsdurchführung	27
4.1	Anfangsbedingungen	27
4.2	Lebensdauer messungsablauf	28
4.3	Untergrundmessungsablauf	32
5	Auswertung	37
5.1	Statistische Methoden	37
5.1.1	Exponentialverteilung und Lebensdauerbestimmung	37
5.1.2	Lebensdauerbestimmung durch gebinnte Least-Square-Method	37
5.1.3	Erwartungswert, Varianz und Binomialverteilung	39
5.1.4	Virtuelle Messung	39
5.1.5	Methode der kleinsten Fehlerquadrate – χ^2 Test	39
5.1.6	χ^2 Verteilung	40
5.2	Untergrund Cuts	40
5.2.1	Linker Cut	40
5.2.2	Rechter Cut	41

5.3	Auswertungsprogramme	42
5.4	Resultate	44
6	Diskussion & Zusammenfassung	46
A	Tabellen	47
A.1	Justierung/Tuning	47
A.2	Lebensdauerermessung	51
B	Programme	52
B.1	Auswertungsprogramm	52
C	Versionsgeschichte	58
	Literaturverzeichnis	61

1 Einführung

Ziel dieser Projektarbeit aus dem Gebiet der „Experimentelle Teilchenphysik“ war die Registrierung einfallender Myonen und die Bestimmung deren mittlerer Lebensdauer. Dazu mussten die Teilchendetektoren angeschlossen und mit einer entsprechenden Hochspannung versorgt werden. Die dazugehörige Messelektronik wurde aufgebaut und entsprechend eingestellt. Ein Datenerfassungsprogramm und ein Auswertungsprogramm für die statistische Analyse und Interpretation der gewonnenen Daten wurde geschrieben. Mit diesem Versuchsaufbau konnten dann verschiedene Lebensdauer- und Untergrundmessungen durchgeführt werden, wobei die Messelektronik je nach Messung entsprechend umgesteckt wurde. Mit den Daten dieser Messungen konnte dann die Cuts festgelegt werden, um die Bereiche, wo der Untergrund gegenüber dem Signal dominiert, herauszuschneiden. Das ergab eine Verbesserung der Ergebnisse der Lebensdauermessung.

Zum Verständnis folgt eine kurze Zusammenfassung der Grundlagen der Detektoren (Szintillatoren und Photomultiplier), der Messelektronik mit der signalverarbeitende Logik (NIM-Logik) als auch eine Einführung in die zu messenden Teilchen aus der Höhenstrahlung, den Myonen.

1.1 Szintillatoren

Szintillationsdetektoren nutzen die Eigenschaft bestimmter Materialien kurze Lichtpulse auszusenden, nachdem diese aufgrund von durchgehenden geladenen Teilchen oder hochenergetischer Photonen angeregt wurden. Eine charakterische Größe ist unter anderem die Lichtausbeute (engl. *light yield*). Unter der Lichtausbeute versteht man den Anteil der Energie der von der einfallenden Strahlung an das Medium abgegeben wird, der auch tatsächlich in Photonen im sichtbaren bzw. im UV-Bereich umgewandelt wird. Die Lichtausbeute ist dabei abhängig vom Material und von der Wellenlänge des emittierten Lichtes und beträgt nur wenige Prozent. Angegeben wird sie für verschiedenste Materialien häufig relativ zu Anthracen, das eine Lichtausbeute von ca. 5% für blaues Licht besitzt. Eine weitere wichtige Größe ist die Zerfallskonstante bei der Erzeugung des Signals, die materialabhängig wenige Nanosekunden aber auch eine Mikrosekunde betragen kann.

Ein Szintillationsdetektor besteht neben dem szintillierenden Medium aus einem Wellenleiter und einem Photodetektor. Als Photodetektor kann beispielsweise ein Photomultiplier verwendet werden. Vorteile solcher Szintillationsdetektoren sind ihre schnelle Ansprechzeit und ihre Sensitivität auf die deponierte Energie. Damit haben sie in vielen Bereichen der Kern- und Teilchenphysik ihren Einsatz gefunden, beispielsweise als Kalorimeter oder in Flugzeitspektrometern.

1.2 Photomultiplier

Der Photomultiplier wandelt das vom Szintillationsdetektor kommende Licht in elektrische Ladung um und vervielfacht diese.

Die wesentlichen Bestandteile eines Photomultipliers umfassen eine evakuierte Glasröhre, in welcher sich diverse Elektroden befinden: die Photokathode, die Dynodenkette sowie die Anode. Das Licht fällt am Eingangsfenster auf die Photokathode, dort werden mittels Photoeffekt Elektronen aus der Kathode rausgeschlagen. Diese Elektronen werden durch Fokussierelektroden zur ersten Dynode(=Sekundäremissionselektrode) geführt bzw. durch die Spannungsunterschiede so stark beschleunigt, daß sie an der Dynode durch Sekundärelektronenemission weitere Elektronen herausschlagen. Die Dynoden liegen „stufenförmig“ auf elektrischen Potentialen zwischen der Kathode und der Anode. Über die Dynodenkette werden die Elektronen bis zur Anode gelenkt und dabei bis zu einem Faktor von 10^7 verstärkt.

Die Photokathoden werden zumeist aus Halbleitern (Antimonidverbindungen) welche eine Quantenausbeuten von ca. 25 % haben, gefertigt.

Das Potentialgefälle entlang der Dynodenkette wird üblicherweise über einen Spannungsteiler angelegt. In der Regel liegen zwischen Kathode und Anode Spannungen zwischen 1–2 kV. Ein Photomultiplier hat ca. 10 bis 14 Stufen, sodaß zwischen den einzelnen Dynoden die Potentialdifferenz zwischen 100–200 V beträgt. Bei diesen Potentialdifferenzen liefern die gebräuchlichen Dynoden aus Sb-Cs-Verbindung 3 bis 5 Sekundärelektronen.

Da an den letzten Dynoden sehr große Stromspitzen auftreten, müssen, um große Spannungsabfälle zu vermeiden, die letzten Dynoden durch Kondensatoren auf ihrem Potential gehalten werden.

Der große Vorteil eines Photomultipliers liegt in seiner hohen Empfindlichkeit. Schon ein einzelnes Photon kann die „Elektronenlawine“ lostreten.

1.3 NIM Logic

Der Nuclear Instrumentation Module (NIM) Standard[4] definiert die mechanische und elektrische Ausführung von elektronischen Modulen (*NIM modules*¹), welche in der nuklearen und experimentellen Teilchenphysik verwendet werden. Die Module sind in ein Chassis (*NIM crate* oder *NIM bin*) eingesteckt.

Der NIM Standard beschreibt außerdem Levels von logischen Signalen, Verkabelung und Impedanzen. Eine standardisierte Stromversorgung wird über das NIM crate durch eine gemeinsame Backplane sichergestellt. Die Stromversorgung ist somit auf verschiedenen Spannungslevels möglich. Bei der Backplane handelt es sich um Stromschienen mit ± 12 V und ± 24 V Gleichspannung [3]. Der Standard schlägt außerdem ± 6 V DC und 220 V oder 110 V AC vor, aber nicht alle NIM crates bieten diesen Pegel. Im Nachfolgenden der Stromlevel der NIM Logik in Tabelle 1.1 auf der nächsten Seite.

¹Strenggenommen ein „module“ zuviel, da schon im Akronym NIM enthalten – diese Redundanz scheint sich jedoch so eingebürgert zu haben.

	Sender	Receiver
Logic 0	< +1 mA (+50 mV)	< +20 mA (+1.0 V)
	> -1 mA (-50 mV)	> -4 mA (-0.2 V)
Logic 1	< -14 mA (-0.7 V)	< -12 mA (-0.6 V)
	> -18 mA (-0.9 V)	> -36 mA (-1.8 V)

Tabelle 1.1: Stromlevel der NIM Logik

Die Signalpegel der NIM Logik arbeiten mit Konstantstrom statt mit Konstantspannung. Logisch 0 (LO) entspricht 0 mA. Logisch 1 (HI) entspricht -16 mA. Wichtig ist auch noch, offene Anschlüsse an Mehrfachausgängen mittels Terminatoren abzuschließen um so Reflexionen zu vermeiden.

Die Datenübertragung unter den Modulen funktioniert über Verkabelung an den Front Panels. Die NIM Logik basiert auf 2 logischen Signalen.

- (Slow-positive) NIM logic (time scale 100 ns und darüber)
- (fast-negative) NIM logic (time scale 1 ns und darunter)

1.3.1 NIM Module

Typische NIM Komponenten beinhalten Diskriminator, Zähler und Amplifiers. Nun eine Aufstellung der im Experiment verwendeten NIM Module

- Diskriminator: Sobald das Eingangssignal einen gewissen Schwellwert überschreitet, wird vom Diskriminator ein logisches Signal erzeugt. Der Schwellwert kann mittels *Threshold* eingestellt werden. Die Länge des Ausgangssignals wird durch *Width* geregelt. Am Monitor Pin liegt die 10-fache Schwellwert Spannung an [3].
- Koinzidenzen: Das Zusammentreffen verschiedener Signale in einem einzigen Messergebnis oder die zusammenfallende Wahrnehmung dieser Signale durch einen Bobachter wird als Koinzidenz bezeichnet. In der Logik entspricht es einem logischen *UND*. Das zugehörige Modul ist daher in der Lage aus mehreren zuschaltbaren Eingangssignalen ein Ausgangssignal zu bilden, welches dann eine logische Kombination der Eingangssignale ist. Zu erwähnen ist auch, dass das Ausgangssignal nur über die Dauer des kürzesten Eingangssignals (*linear out*) anliegt. Der Ausgang des *logical out* ist hingegen solange logisch 1 (HI), wie durch den Regler *Width* definiert.
- Counter: Der Counter zählt die Anzahl der Impulse am Eingang und stellt diese dann auf einer Anzeige dar. Um den Zählengang aktiv oder inaktiv schalten zu können, gibt es eine *Reset*-Leitung und einen *Gate*-Eingang. Ersteres stellt den Zählwert wieder auf 0 zurück, der Gate-Eingang ist mit dem Zählengang als logisches *UND* verknüpft.

- Timing Unit: Sie erzeugt, hervorgerufen durch einen Startpuls, einen Ausgangsimpuls einstellbarer Länge. Ist der Ausgangsimpuls zu Ende, wird am Ausgang *end marker* ein kurzer Impuls ausgegeben.
- Fan-In/Fan-Out: Fan-In bezeichnet eine logische *ODER* Verknüpfung der Eingangssignale. Als Fan-Out bezeichnet man das Aufteilen eines Signals in mehrere Einzelsignale. Wie oben bereits geschrieben benutzt die NIM-Logik Konstantstrom, daher darf man einen Ausgang nicht mit mehreren Eingängen verbinden, sondern muss einen Verstärker zwischen schalten. Dieser Verstärker entspricht dem Fan-Out [3].
- Delay: Aufgrund der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit muss die Signallaufzeit in den Kabeln berücksichtigt werden. Um beispielsweise die Koinzidenzen bei unterschiedlichen Kabellängen zu ermitteln, kann man das Signal zusätzlich über Kabel definierter Länge schicken, um so eine definierte Verzögerung zu erhalten. Dies entspricht auch der Arbeitsweise eines Delaymoduls.

1.4 Myonen

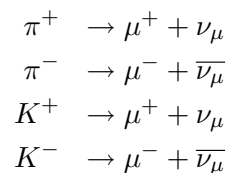
Die kosmische Höhenstrahlung (Primärstrahlung) besteht im wesentlichen bei Energien von 10^{14} eV aus Atomkernen (98 % davon Protonen (87 %), α -Teilchen (12 %), Kerne mit $Z \geq 3$ (1 %)) und Elektronen und Positronen (2 %).

Bei Zusammenstößen der Protonen mit Sauerstoff- und Stickstoff-Molekülen der Atmosphäre (in 15 km Höhe) entstehen bei $\sim 10^{15}$ eV Protonen:

- 80 % Photonen
- 18 % Elektronen/Positronen
- 1,7 % Myonen
- 0,3 % Hadronen (Pionen, Kaonen, ...)

Aus 1 Proton mit 10^{15} eV entstehen $\sim 10^6$ Teilchen, die sekundären Komponenten die in Abbildung 1.1 auf der nächsten Seite dargestellt sind.

Die entstandenen Pionen und Kaonen zerfallen in Myonen plus Myon-Neutrinos:



Die Geschwindigkeit der Myonen beträgt $v = 0,994c$ und die Lebensdauer $\tau = 2,197 \mu\text{s}$. Aufgrund der relativistische Zeitdilatation können die Teilchen sehr weite Entfernungen zurückgelegt werden, ihre mittleren Zerfallslängen betragen 6000 m.

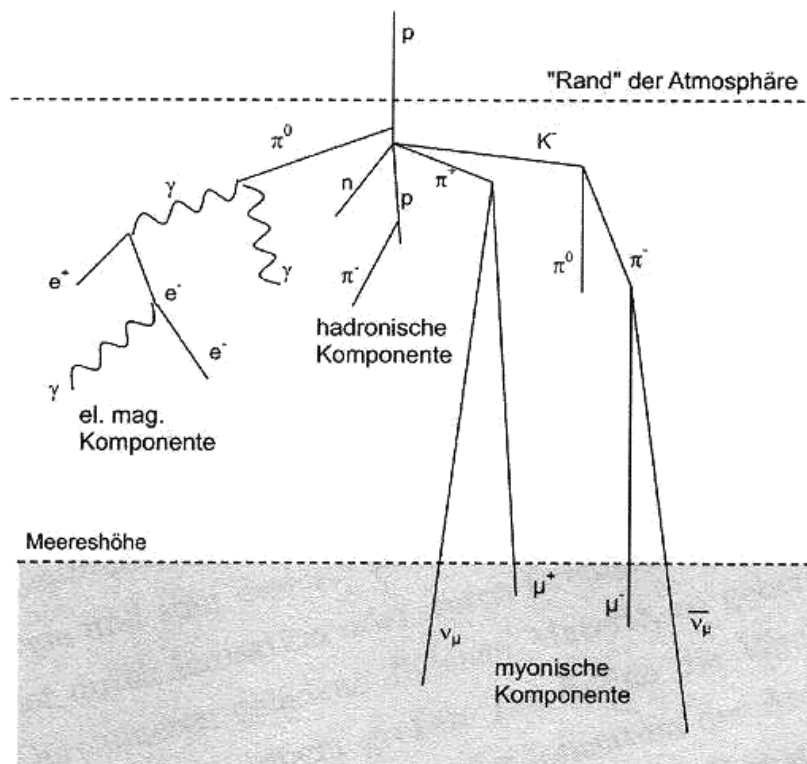
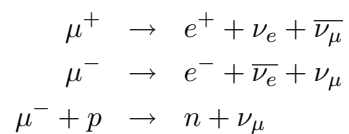


Abbildung 1.1: Die sekundären Komponenten (elektromagnetisch, hadronisch, myonisch) der primären kosmischen Strahlung (Quelle: [5])

Auf Meereshöhe sind 75 % aller Teilchen eines Schauers Myonen, die mittlere Energie ist $\sim 4 \text{ GeV}$. Sie verlieren 2 GeV durch Ionisation bevor sie Meereshöhe erreichen. Die Rate für vertikale Myonen von über $1 \text{ GeV}/c$ ist $I \sim 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$, für horizontale Detektoren wird $I \sim 1 \text{ cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ verwendet.

Myonen zerfallen unter Austausch eines W-Bosons in Elektronen und Neutrinos bzw. inversen Betazerfall:



2 Vorbereitende Messungen

Für die eigentliche Messung mussten vorbereitende Justierungen durchgeführt werden, einerseits war die Einstellung der Pulsweite und die zeitliche Zentrierung der Signale der Diskriminatoren, andererseits die Ermittlung der Werte für die Hochspannung der Szintillatoren, um die maximale Ansprechwahrscheinlichkeit der Szintillatoren einstellen zu können, notwendig.

2.1 Messanordnung

Die Messanordnung für die Myonendetektion besteht aus drei Szintillatoren (1, 2 und 3), die (siehe Abbildung 2.1) übereinander angeordnet sind.

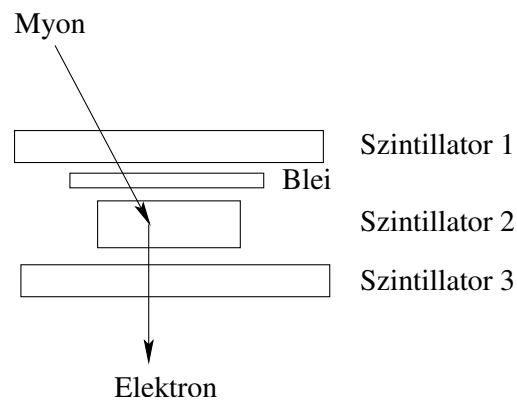


Abbildung 2.1: Messaufbau für die Myonendetektion

Der mittlere Szintillator ist wesentlich dicker bzw. dichter als die Szintillatoren 1 und 3 und dient in diesem Experiment als das Target. Die einzelnen Szintillatoren sind via Lichtleiter mit den Photomultipliern 1, 2 und 3 verbunden. Beim Durchgang eines Teilchens emittiert der Szintillator Photonen. Diese gelangen über den Lichtleiter zum Öffnungsfenster des Photomultipliers, wo das Licht in der Photokathode mittels Photoeffekt Elektronen herausschlägt. Die Elektronen werden über eine Dynodenkette vervielfacht und werden an der Anode als Signal gemessen.

Ein Myoneneinfang wird detektiert, wenn die Szintillatoren 1 und 2 ansprechen, der dritte jedoch nicht. Die logische Startbedingung lautet hiermit wie folgt:

$$\text{Start} = 1 \wedge 2 \wedge \bar{3} \quad (2.1)$$

Mit der Erfüllung der Startbedingung wird der Zähler ausgelöst, bis er durch das Stop-signal angehalten wird.

Myonen, die durch die Szintillatoren 1 und 3 gehen, aber den zweiten Szintillator verfehlen, werden hiermit nicht detektiert. Das vom Szintillator eingefangene Myon zerfällt gemäß dem radioaktiven Zerfallsgesetz nach sehr kurzer Zeit. Bei diesem Zerfall wird wie erwähnt ein Elektron frei, welches wiederum detektiert werden kann. Das Zerfallselektron(oder -positron) regt die Szintillatoren 2 und 3 an, jedoch 1 nicht. Die logische Stop-Bedingung lautet dadurch:

$$\text{Stop} = 2 \wedge 3 \wedge \bar{1} \quad (2.2)$$

Diese Stopbedingung kann realisiert werden, indem zwischen die Szintillatoren 1 und 2 eine dünne Bleischicht eingefügt wird, welche verhindert, daß ein nach oben wegfliegendes Elektron erneut den Szintillator 1 anregt. Da die Zerfallselektronen in alle Raumrichtungen wegfliegen können, wird nicht für jedes Start eine Stopbedingung erfüllt. Deshalb wird ein Timeout implementiert, welches den Zähler nach Ablauf der eingestellten Zeit stoppt und das Setup bereit für das nächste Startsignal wird.

Die Timeoutzeit soll ungefähr das zehnfache der Myonen-Lebensdauer betragen.

2.2 Justierung/Tuning

Im folgenden wird beschrieben, wie wichtige Parameter des Experimentes festgelegt und eingestellt werden können. Es wurden Messungen durchgeführt um zu entscheiden wie die Hochspannungsversorgung der Photomultiplier zu wählen ist. Außerdem wurde das zeitliche Verhalten der NIM-Signale untersucht und entsprechend optimiert. Da der Frequenzgenerator und der Stoptimer wichtige Einheiten in diesem Experiment darstellen, wird deren Realisierung ebenfalls erläutert.

2.2.1 Diskriminatoren

Der Schwellwert für ein Signal kann am Diskriminator mit Hilfe eines Potentiometers eingestellt werden. Dabei wird die Spannung mit einem Voltmeter abgelesen. Für die Diskriminatoren 1, 2 und 3 wurde eine Spannung von 50 mV gewählt. Mit einem zweiten Schrauben kann auch die Weite des NIM-Signals verstellt werden. Dabei betrachtet man das Signal am Oszilloskop und liest die Breite des Pulses ab. Am ersten und dritten Diskriminator wurde eine Weite von 20 ns, am zweiten eine Weite von 6 ns eingestellt.

2.2.2 Hochspannungsversorgung

Um die Hochspannungen festzulegen, die an den Photomultipliern angelegt werden sollen wird für verschiedene Spannungen die Ansprechwahrscheinlichkeit jedes Szintillationsdetektors sowie die Einzelrate der Ereignisse für den jeweiligen Detektor bestimmt. Dabei sollte die Ansprechwahrscheinlichkeit möglichst groß sein, während die Einzelrate nicht zu hoch werden darf. Um die Einstellungen für die ersten drei Diskriminatoren nicht verändern zu müssen, werden für die folgenden Messungen zur Bestimmung der Hochspannungskurven die Diskriminatoren 5, 6 und 7 verwendet, wobei Diskriminator 5 mit

Photomultiplier 1, Diskriminator 6 mit Photomultiplier 2 und Diskriminator 7 mit Photomultiplier 3 verbunden wird. In diesem Abschnitt sind mit den Bezeichnungen 1, 2 und 3 immer die Photomultiplier gemeint und nicht die Diskriminatoren. Zunächst werden die Schwellwerte für die Diskriminatoren 5, 6 und 7 auf 50 mV eingestellt. Die Breite der NIM-Signale dieser Diskriminatoren wird auf jeweils 60 ns festgelegt. Zur Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit des ersten Photomultipliers ϵ_1 wird nun eine Koinzidenz realisiert, bei der alle drei Photomultiplier ein Signal liefern müssen, und eine zweite, wo nur die Photomultiplier 2 und 3 (mittlerer und unterster Szintillator) ansprechen müssen. Das Verhältnis aus den beiden Koinzidenzen liefert den Wert für ϵ_1 .

$$\frac{n(1 \cdot 2 \cdot 3)}{n(2 \cdot 3)} = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3}{\epsilon_2 \cdot \epsilon_3} = \epsilon_1 \quad (2.3)$$

Gemessen wird die Anzahl der Ereignisse in Koinzidenz 1 während die zweite Koinzidenz 100 mal ein Signal liefert. Gleichzeitig wird die Einzelrate gemessen, mit der der Photomultiplier 1 anspricht.

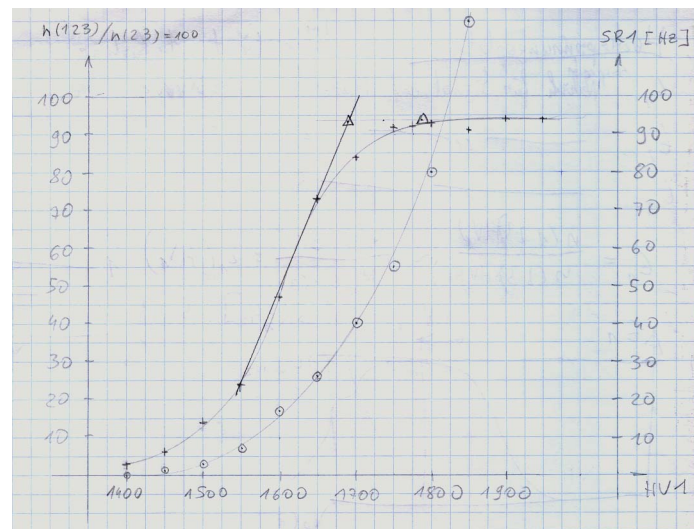


Abbildung 2.2: Hochspannungskurve HV1

Das Ergebnis ist in Abbildung 2.2 abgebildet. Die Hochspannung wird im folgenden so festgelegt, dass sie 100V über dem Schnittpunkt von zwei Tangenten (eine Tangente an die Kurve beim Anstieg und die zweite Tangente an das Plateau) liegt. Für den ersten Photomultiplier beträgt die gewählte Hochspannung 1775 V.

Analog wird nun auch die Hochspannung für den Photomultiplier 3 festgelegt. Man bildet wieder eine Koinzidenz, dass 1, 2 und 3 ein Signal liefern und eine zweite, bei der nur 1 und 2 ein Signal liefern müssen und bestimmt das Verhältnis und damit ϵ_3 sowie die Einzelrate für den dritten Photomultiplier für verschiedene Spannungen.

Die gewählte Hochspannung für den dritten Photomultiplier beträgt 2025 V.

Während die Hochspannungen für die Photomultiplier 1 und 3 nicht kritisch sind ist die Bestimmung der Hochspannung für den zweiten Photomultiplier etwas heikler.

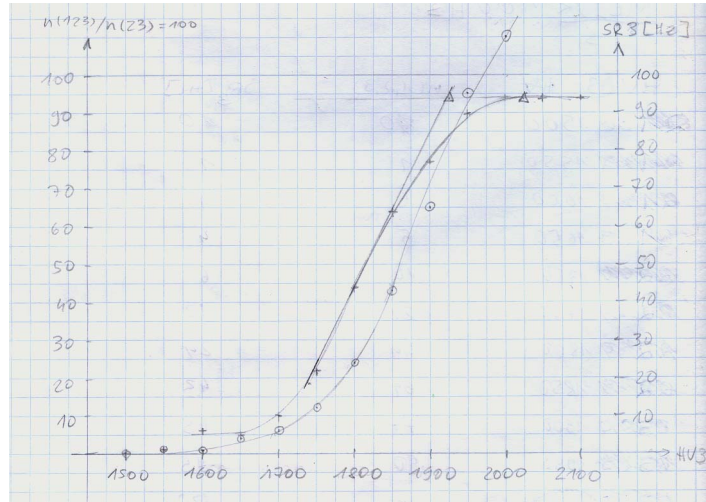


Abbildung 2.3: Hochspannungskurve HV3

So wird die Ansprechwahrscheinlichkeit geringer sein, da der Szintillator, der mit dem zweiten Photomultiplier verbunden ist eine wesentlich kleinere Fläche hat, während die Szintillatoren 1 und 3 in etwa die gleiche Fläche abdecken. Aus diesem Grund wird nun $n(1 \cdot 2 \cdot 3)$ nicht nur für $n(1 \cdot 3) = 100$ bestimmt, sondern in einem interessanten Bereich wird die Messung auch für $n(1 \cdot 3) = 1000$ durchgeführt.

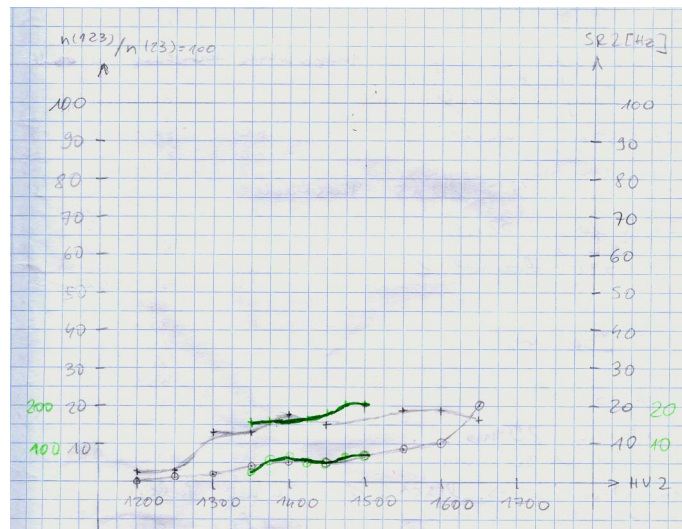


Abbildung 2.4: Hochspannungskurve HV2

Das Ergebnis ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Hochspannung für den zweiten Photomultiplier wurde auf 1550 V festgelegt.

2.2.3 Delay-Kurven

Nach der Messung der Hochspannungskurven werden nun wieder die entsprechenden Photomultiplier mit den Diskriminatoren 1, 2 und 3 verbunden. Die NIM-Signale dieser Diskriminatoren sollen zeitlich zentriert werden. Als Vorübung können diese Signale zunächst auf einem Oszilloskop dargestellt werden. Vor jedem Diskriminator wird dabei noch eine Delay-Unit geschaltet, mittels derer ein Signal verzögert werden kann, indem es zuerst Kabeln entsprechender Länge durchlaufen muss.

Für die exakte Messung werden wieder 2 Koinzidenzen betrachtet. Um die Delay-Kurve für den 1. Diskriminator zu bestimmen wird eine Koinzident realisiert bei der die Diskriminatoren 1, 2 und 3 ($n(1 \cdot 2 \cdot 3)$) anprechen müssen und eine zweite bei der nur 2 und 3 ($n(2 \cdot 3)$) ein Signal geben müssen. Nun wird wieder gemessen wie oft die Koinzidenz $n(1 \cdot 2 \cdot 3)$ ein Signal gibt wenn $n(2 \cdot 3)=100$ beträgt. In den Delay-Units wird das Signal des zweiten Diskriminatoren um 40 ns und das des dritten um 28 ns verzögert. Die Verzögerung des dritten Diskriminatoren ist dabei so zu wählen, dass sich das 6 ns lange Signal von Diskriminator 2 und das 20 ns lange Signal von Diskriminator 3 möglichst vollständig überlappen. Variiert man nun die zeitliche Verzögerung des ersten Diskriminatoren erhält man die entsprechende Delay-Kurve, siehe Abbildung 2.5. Dabei wurde zuerst die Verzögerung um 8 ns verändert und an dem Anstieg bzw. dem Abfall der Kurve wurden weitere Messpunkte hinzugefügt. Die Messwerte sind in Tabelle A.4 angeführt.

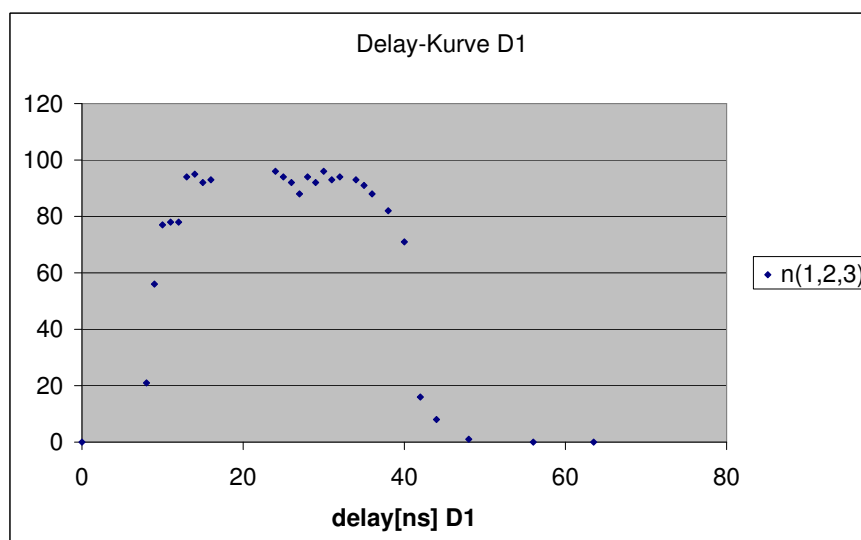


Abbildung 2.5: Delay-Kurve für den 1. Diskriminator

Als beste Verzögerung wird nun jener Wert ermittelt, der in der Mitte der beiden Wendepunkte der Kurve liegt. Dies entspricht im Fall von Diskriminator 1 25 ns. Das bedeutet, dass das Signal von Diskriminator 1 gegenüber dem Signal von Diskriminator 2 (mit einer Verzögerung von 40 ns) um 15 ns vorgezogen werden muss.

Als zweites wird nun mit der gleichen Vorgangsweise die Delay-Kurve für das Signal

von Diskriminator 3 gemessen. Es wird wieder gezählt wie oft die Koinzidenz $n(1 \cdot 2 \cdot 3)$ ein Signal liefert wenn die Koinzidenz $n(1 \cdot 2)$ 100 mal anspricht. Die Verzögerung für den Diskriminator 1 beträgt nun 25 ns, für den Diskriminator 2 wieder 40 ns und bei Diskriminator 3 wird die Verzögerung nun variiert, wobei wieder beim Anstieg und Abfall der Kurve mehr Messpunkte liegen sollen. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

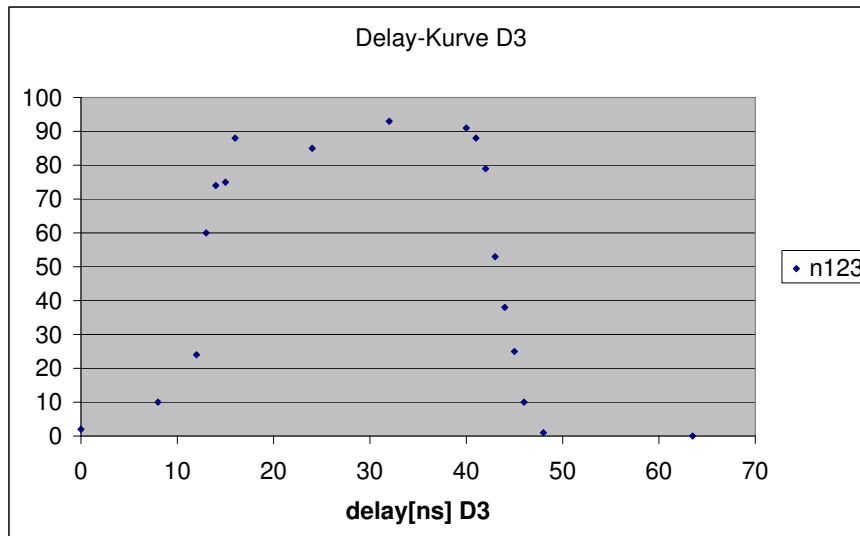


Abbildung 2.6: Delay-Kurve für den 3. Diskriminator

Für den dritten Diskriminator erhält man in analoger Weise wie für den Diskriminator 1, dass die beste Verzögerung bei 28 ns liegt. Das bedeutet wiederum, dass das Signal von Diskriminator 3 um 12 ns gegenüber dem Signal von Diskriminator 2 vorgezogen werden muss.

Um die Delay Boxen vor den Diskriminatoren wieder entfernen zu können, werden Kabeln mit den entsprechen Längen eingefügt. Aus praktischen Gründen wird vor dem Diskriminator 1 ein Kabel mit einer Laufzeit von 1 ns eingefügt, vor dem Diskriminator 2 eines mit 16 ns und vor dem Diskriminator 3 eines mit 4 ns.

2.2.4 Frequenzgenerator und Stoptimer

Frequenzgenerator

Um die Lebensdauer der Müonen messen zu können benötigt man einen Frequenzgenerator, der in kurzen regelmäßigen Abständen ein Signal liefert. Später werden dann diese Impulse abgezählt und mit dem Zeitabstand zwischen zwei Signalen multipliziert um die Zeit zwischen Start und Stop zu bestimmen. Hierfür ist es günstig einen Frequenzgenerator mit möglichst hoher Frequenz zu bauen, da dann die Zeitmessung genauer wird. Realisiert wird dies einfach, indem der Out-Ausgang der Timing Unit über eine Delay Unit direkt wieder mit dem Start der Timing Unit verbunden wird. Zu Beginn wird mit

Hilfe der Drehregler der kürzest mögliche Ausgangsimpuls eingestellt. Mithilfe der Delay Unit kann nun das Signal soweit verzögert werden, das die Zeit die der Impuls benötigt um vom Out wieder zum Start zu gelangen ausreicht um einen neuen Ausgangsimpuls zu erzeugen. Durch Verwendung von 4 ns Kabeln zu der Delay Unit hin und von dieser weg und einer weiteren Verzögerung von 24,5 ns in der Delay-Unit kann eine Frequenz von knapp über 20 MHz erreicht werden. Durch drehen am oberen Drehregler (Feineinstellung) kann nun versucht werden die Frequenz möglichst exakt auf 20 MHz einzustellen. Der von uns verwendete Frequenzgenerator lieferte zu Beginn Impulse mit einer Frequenz von 20,131 MHz.

Stoptimer

Der Stoptimer besteht ebenfalls aus einer Timing Unit, die einen Ausgangsimpuls erzeugen soll, dessen Länge der Zeit zwischen dem Start Signal und dem Stop Signal entspricht. Das bedeutet, das exakt für diesen Zeitraum die Impulse des Frequenzgenerators gezählt werden. Dafür verbindet man die Start Koinzidenz mit dem Start der Timing Unit und die Stop Koinzidenz mit dem Reset der Timing Unit. Mit Hilfe der Drehregler wird nun ein Time out eingestellt, das ca. 8 mal der erwarteten Lebensdauer von Müonen entsprechen sollte. Ist nach dieser Zeit kein Stop Signal gekommen, läuft die Stoppuhr ins Time out, bricht damit die Messung der Zeitspanne ab und ein neues Start kann die Stoppuhr wieder anwerfen. Aufgrund von Problemen mit dem Potentiometer an der verwendeten Timing Unit konnte das Time out nicht so genau wie gewünscht eingestellt werden. Schließlich wurde das Time out auf 261 Impulse und damit auf eine Zeitspanne von ca. 13 μ s festgelegt.

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau des Myonen-Experiments ist in Abbildung 3.1 dargestellt und besteht aus den Szintillatoren mit den Photomultiplier, welche die Myonen detektieren und in Elektronen umwandeln. Diese Signale werden dann zur signalverarbeitenden Elektronik (NIM-Logik) weitergeleitet. Die Elektronik ist über eine Schnittstelle zur Datenspeicherung und Verarbeitung mit einem Computer verbunden.

Überblick Messaufbau Myonen-Experiment

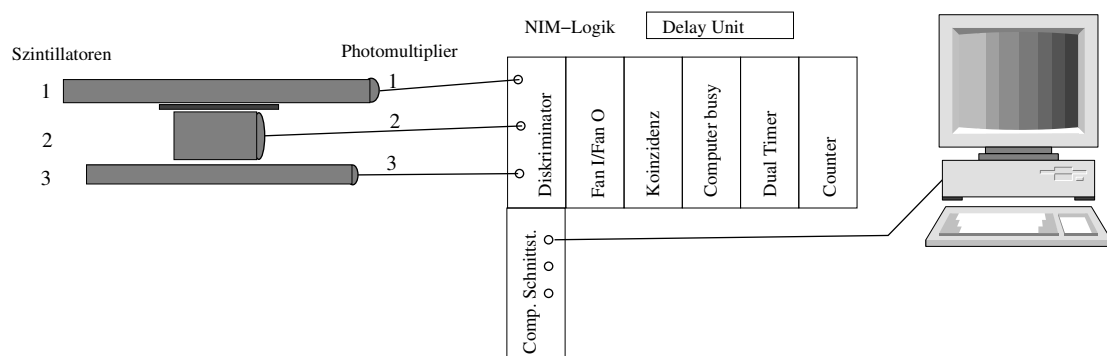


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau des Myonen-Experiment: Szintillatoren mit Photomultiplier, NIM-Logik und Speicherung und Auswertung der Daten am Computer

3.1 Detektoren

Der Szintillationsdetektor besteht aus dem szintillierenden Medium, einen Lichtleiter (optional) und einem Photodetektor. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.2 [7] dargestellt.

Die Szintillatoren sind mit einem lichtundurchlässigen Klebeband umwickelt. Im szintillierenden Medium werden durch die auftreffenden Myonen Photonen erzeugt, welche

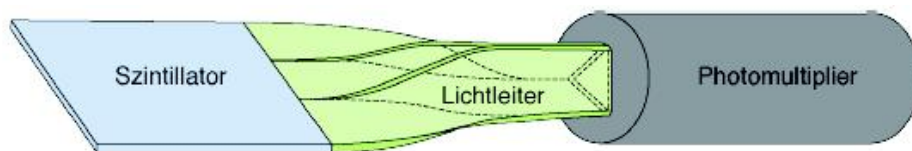


Abbildung 3.2: Der Szintillator ist über Lichtleiter mit dem Photodetektor verbunden

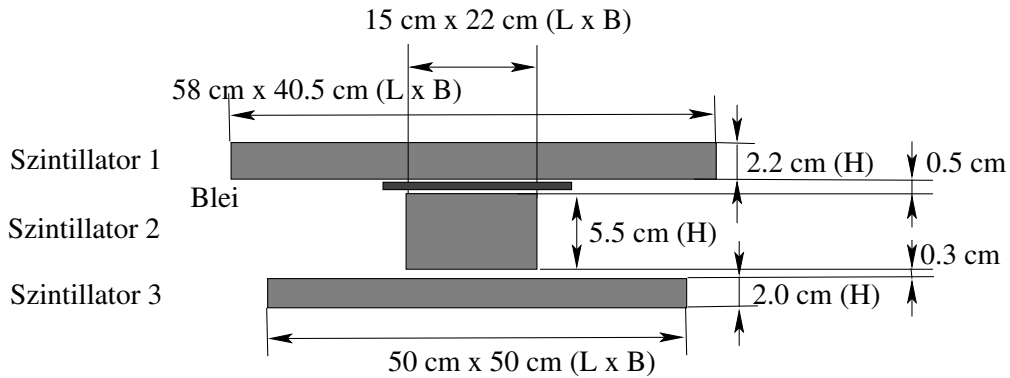


Abbildung 3.3: Maße der Szintillatoren und deren Anordnung im Detail

über den Lichtleiter zum Photomultiplier gelangen. Dort werden Elektronen herausgelöst und in den Dynoden des Photomultipliers verstärkt, um ein messbares Signal für die Elektronik zu erzeugen.

Die Maße der verwendeten drei Szintillatoren sind in der Tabelle 3.1 und graphisch in Abbildung 3.3 mit der Anordnung im Detail dargestellt.

	L	B	H
Szintillator 1	58.0	40.5	2.2
Szintillator 2	15.0	22.0	5.5
Szintillator 3	50.0	50.0	2.0

Tabelle 3.1: Maße der Szintillatoren in cm

Die Abstände zwischen den Szintillatoren sind:

- zwischen Szintillator 1 und 2: 0.5 cm
- zwischen Szintillator 2 und 3: 0.3 cm

Zwischen Szintillator 1 und 2 ist eine Bleischicht angebracht um zu verhindern, dass die Elektronen wieder von unten in den Szintillator 1 eindringen.

Die Öffnungswinkel, in welchen die Myonen eintreten können, sind bedingt durch die Geometrie (Abbildung 3.4 auf der nächsten Seite):

- bei der Ansicht von vorne (Längseite L): $w1 \sim 144$
- bei der Ansicht von der Seite (Breitseite B): $w2 \sim 124$

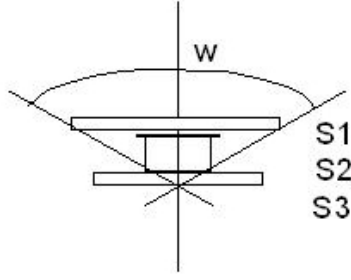


Abbildung 3.4: Möglicher Eintritts-Öffnungswinkel der Myonen geometrisch bedingt durch die Szintillator-Plattenanordnung

3.2 Abschätzung der Myonenrate

In dieser Abschätzung der Myonenrate sollen nur jene Myonen berücksichtigt werden, die im Szintillator 2 abgestoppt werden.

In der Darstellung ist das Myonen-Energiespektrum mit dem Myonen-Fluss auf Meeres-Niveau für die Zenit-Winkeln $\theta = 0$ und $\theta = 75$ dargestellt (Abbildung 3.5 auf der nächsten Seite). Die grünen Linien markieren einerseits den geschätzten Energieverlust durch das Dach bei $\sim 200 \text{ MeV}$ (vertikale Linie), andererseits das Resultat des Energieverlustes über die Winkelverteilung $\int f(\omega)d\omega = 8,487 \times 10^{-4} \times 2\pi$.

Die Ordinate dF_μ/dE wird in Einheiten von $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$ dargestellt.

Die Myonenrate ergibt sich dann aus

$$F_\mu = \int f(t, \omega, F, E) d\omega dF dE \quad (3.1)$$

Die Winkelverteilung in ϑ und φ ist gegeben durch

$$d\omega = d\cos\vartheta d\varphi$$

Der Öffnungswinkel mit $\vartheta \sim 60$ entspricht einen Raumwinkel von π . Damit ergibt das Integral über alle Winkeln (Abbildung 3.6 auf Seite 20):

$$\int f(\omega)d\omega = 8,487 \times 10^{-4} \times 2\pi$$

Die Fläche im Integral der Myonenrate (3.1) ist konstant und ergibt sich aus der Fläche des Szintillators 2:

$$\Delta F = (15 \times 22) \text{ cm}^2$$

Der Energieverlust im Szintillator 2 wurde mit 20 MeV angenommen:

$$\Delta E = 20 \text{ MeV} = 0.02 \text{ GeV}$$

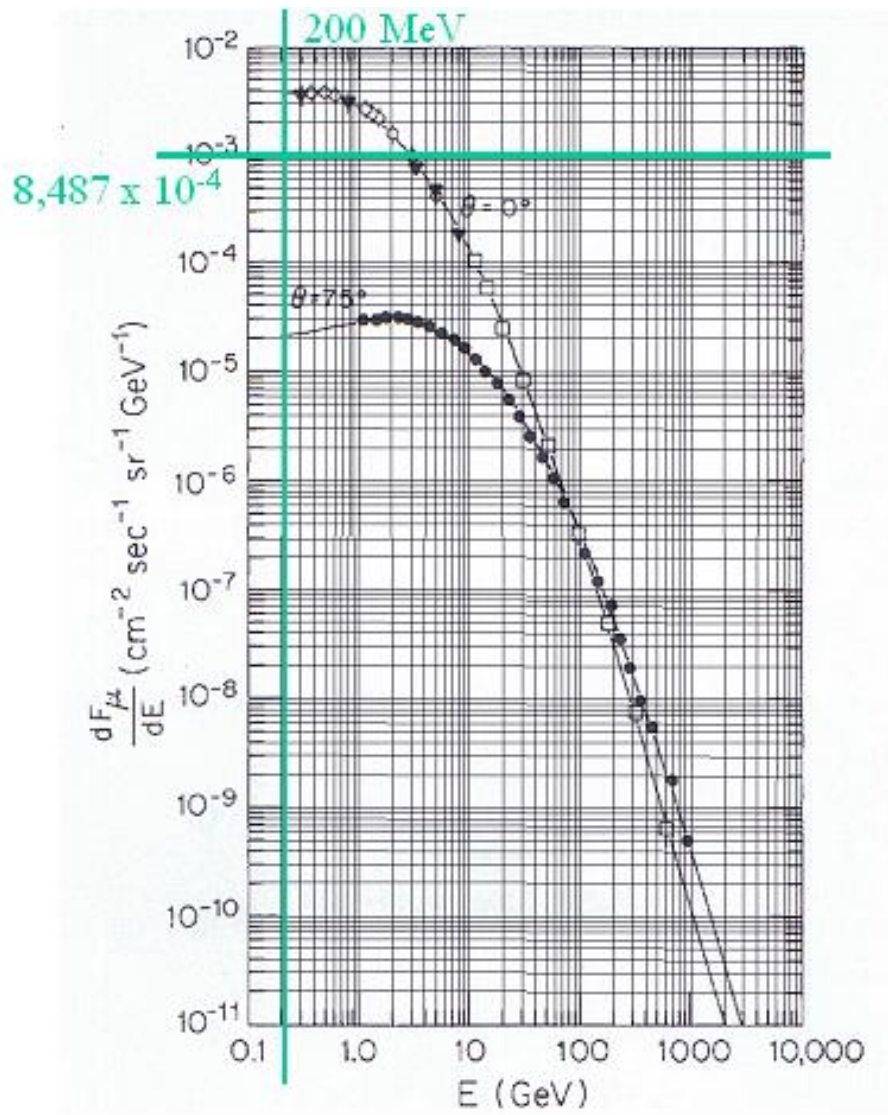


Abbildung 3.5: Myonen-Energiespektrum für die Zenit-Winkeln $\theta = 0$ und $\theta = 75$

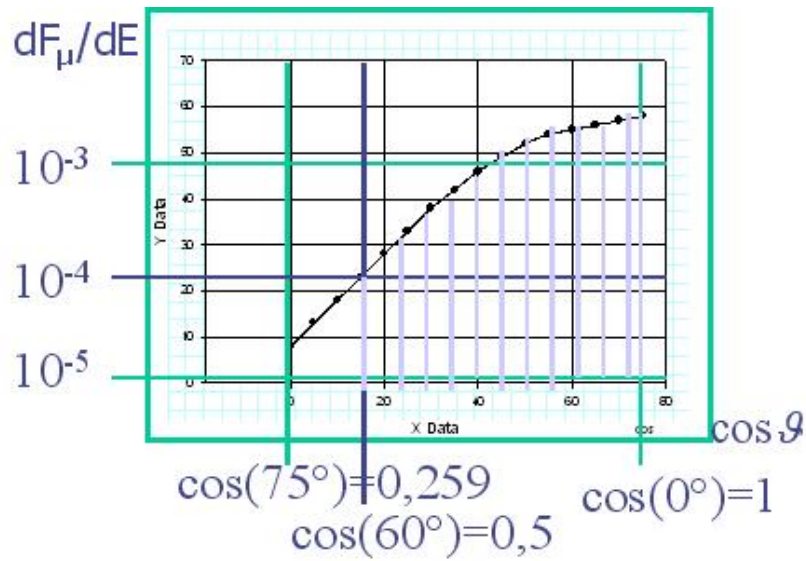


Abbildung 3.6: Der Energieverlust dF_μ/dE über die Winkelverteilung $\cos\vartheta$ aufgetragen.

Damit ergibt sich die Teilchenrate der im Szintillator 2 gestoppten Myonen aus dem Integral (3.1 auf Seite 18):

$$\begin{aligned}
 F_\mu &\sim 8.487 \times 10^{-4} \times 2\pi \times (15 \times 22) \times 0.02 /s \\
 &= 3.519 \times 10^{-2} /s = 2.11 /min = 126.6 /h
 \end{aligned}$$

Aufgrund der Verluste die auftreten können, da nicht der gesamte Winkelbereich abgedeckt ist bzw. wegen Elektronen, die im Szintillator 2 stecken bleiben, wird von der Myonenrate nur ca. 10 % detektiert

⇒ die Myonen-Teilchenrate ergibt dann 12.66 /h.

3.3 Signalverarbeitung

Die Photomultiplier werden mit den Diskriminatoren 1, 2 und 3 verbunden, wobei als Schwellwert für alle drei Diskriminatoren 50 mV gewählt wurden. Die Breite des Signals von Diskriminator 1 und 3 beträgt 20 ns und für den 2. Diskriminator 6 ns. Die Ausgänge der Diskriminatoren werden jeweils mit einer Fan-In/Fan-Out Einheit verbunden. Diese dient dazu das Signal jedes einzelnen Diskriminators aufzuteilen und es kann auch das verneinte Signal \overline{OUT} ausgegeben werden.

Als nächstes werden die Start- und Stopbedingung mit Hilfe von Koinzidenzen realisiert. Für die Startbedingung werden die Signale 1, 2 und $\bar{3}$ ¹ mit den Eingängen A, B und C der Koinzidenz verbunden. Eingang D wird deaktiviert. In gleicher Weise wird die Stopbedingung realisiert, indem die Signale $\bar{1}$, 2 und 3 mit den Eingängen einer weiteren Koinzidenz verbunden werden.

Von den Ausgängen der Startbedingungen werden nun Verbindungen mit dem Counter 1, dem Start des Stoptimers und dem sogenannten "Computer busy" hergestellt (hierauf wird später genauer eingegangen). Wenn ein Signal von der Start Koinzidenz kommt, wird der Wert im Counter 1 um 1 erhöht und der Stoptimer angeworfen. Das **OUT** der Stop-Koinzidenz wird nun mit dem Counter 2, dem **Reset** des Stoptimers und dem **IN2** der Computerschnittstelle verbunden. Liegt ein Signal am Ausgang der Stop-Koinzidenz an, wird der Wert im Counter 2 um 1 erhöht und das Signal, das der Stoptimer liefert beendet. Darüber hinaus wird dem Labview-Programm über die Computerschnittstelle mitgeteilt, wann ein Stop-Signal stattgefunden hat.

Der Endmarker des Stoptimers wird ebenfalls über **IN1** mit der Computerschnittstelle verbunden und liefert immer dann einen Impuls wenn der Stoptimer beendet wird, wobei nicht unterschieden wird ob es sich um ein Stop von der Stop-Koinzidenz handelt, oder ob der Timer wegen einer Zeitüberschreitung beendet wurde. Das \overline{OUT} des Frequenzgenerators wird nun mit dem Eingang einer 3. Koinzidenz verbunden. Liegt am Ausgang dieser Koinzidenz ein Signal an, wird dieses an **CNT-IN** der Computerschnittstelle übertragen. Damit zählt der Counter dieser Schnittstelle die Impulse des Schwingkreises. Allerdings sollen nur dann Impulse gezählt werden, wenn der Stoptimer ein Signal liefert. Entsprechend wird das \overline{OUT} des Stoptimers, das immer ein Signal liefert, wenn der Stoptimer nicht läuft über eine Fan-In/Fan-Out Einheit mit dem **VETO** der Koinzidenz 3 verbunden. Um die Zahl der Schwingkreis-Impulse während der Stoptimer läuft auch direkt ablesen zu können, wird der Ausgang des Frequenzgenerators mit dem Eingang eines dritten Counters und der Ausgang des Stoptimers mit dem Gate dieses Counters verbunden. Somit werden auch hier nur dann die Impulse gezählt wenn der Stoptimer ein Signal liefert.

Mit dem bis jetzt beschriebenen Aufbau wird bei jedem Start der Stoptimer angeworfen und entweder über ein tatsächliches Stop oder mittels Timeout beendet. Die Zahl der Schwingkreisimpulse wird während dieser Zeit von einem Counter der Computerschnittstelle (**CNT-IN**) mitgezählt. Das reicht allerdings noch nicht aus, denn es muss

¹im weiteren ist mit Signal 1 immer das Signal, das ursprünglich vom Diskriminator 1 kam gemeint. Analoges gilt für Signal 2 und 3. Mit gequerten Ziffern wie zum Beispiel $\bar{1}$ sind die verneinten Signale gemeint.

MESSAUFBAU – MYONEN-EXPERIMENT

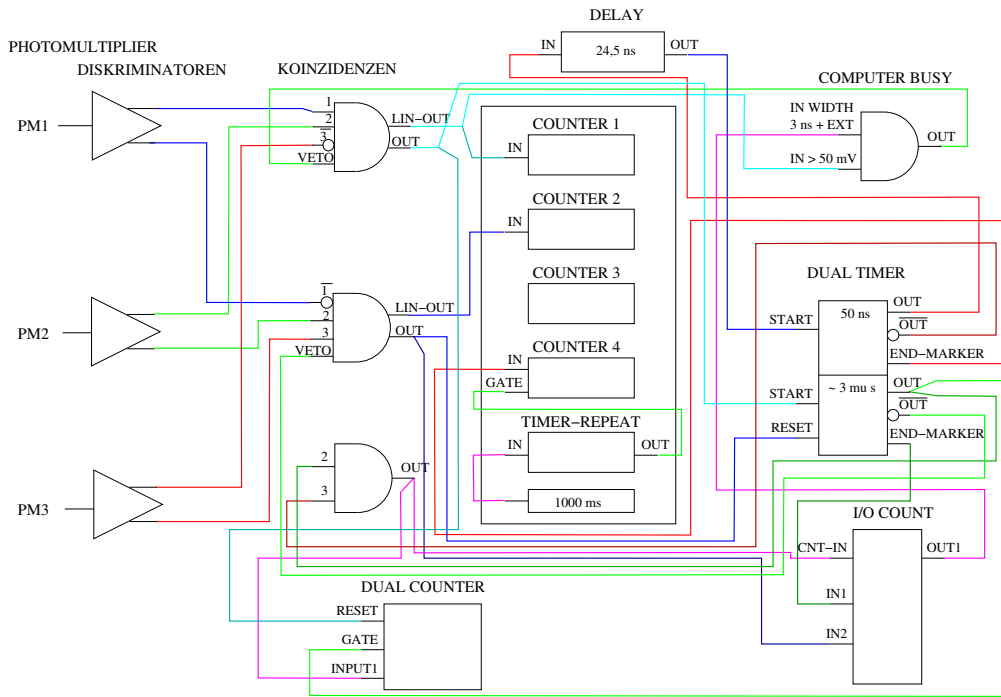


Abbildung 3.7: NIM Logik Verschaltung Blockdiagramm

verhindert werden, dass ein weiteres Start ein Signal liefert, bevor nicht der Inhalt des Counters vom Computer ausgelesen wurde. Dazu dient die Einheit “Computer busy”. Deren Ausgang ist mit dem **VETO** der Startkoinzidenz verbunden. Über den Ausgang der Computerschnittstelle kann nun dieses **VETO** aufgehoben werden, wodurch ein neues Startsignal möglich wird.

Außerdem soll ein Stop nur dann eintreten können, wenn es vorher ein Start gegeben hat und der Stoptimer läuft. Das \overline{OUT} des Stoptimers wurde ja, wie oben beschrieben, mit einer Fan-In/Fan-Out Einheit verbunden. Daher kann ein Ausgang dieser Einheit mit dem **VETO** der Stopkoinzidenz verbunden werden um das gewünschte Verhalten zu gewährleisten.

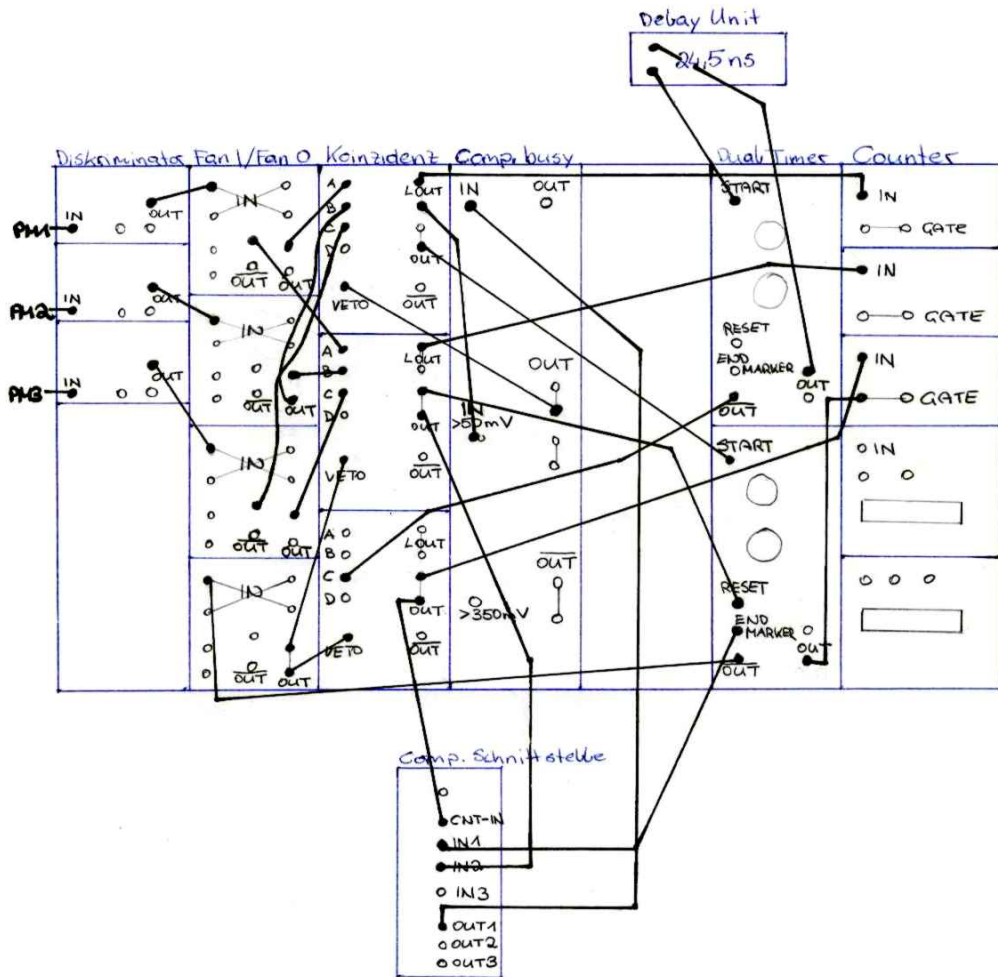


Abbildung 3.8: NIM Logik Verschaltung Steckbild

3.4 Datenerfassung

Um die in der NIM-Logik verarbeiteten Signale für eine spätere Datenauswertung verwenden zu können, ist es notwendig diese auf einem Datenträger zu speichern; zu diesem Zweck werden die Schwingkreis-Impulse (die zwischen Start- und Stoppbedingung anfallen) in einem Zähler erfasst, der vom Datenerfassungscomputer ausgelesen werden kann.

Dieser Zähler befindet sich auf einer VMEbus-Einschubkarte, die darüberhinaus noch Logikein- und -ausgänge besitzt und über eine IEEE-488 Schnittstelle mit dem Datenerfassungscomputer verbunden ist.

Die NIM-Logik-kompatiblen Anschlüsse dieser Einschubkarte wurden wie folgt verwendet:

CNT-IN Dieser Zählereingang wird im Zeitfenster zwischen Start- und Stopp-Bedingung (bzw. Zeitüberschreitung) von der NIM-Verschaltung mit Impulsen des Zeitgebers (ca. 20 MHz) versorgt.

IN1 Erhält einen Impuls wenn Stopp- (innerhalb Zeitlimit) nach Start-Koinzidenz oder Zeitüberschreitung stattfand.

IN2 Erhält einen Impuls wenn eine Stopp-Koinzidenz innerhalb des Zeitlimits eintrat – dient zur Unterscheidung ob **IN1** durch Zeitüberschreitung oder „echtem“ Stopp ausgelöst wurde.²

OUT1 Setzt die NIM-Schaltung zurück, um eine neue Messung zu ermöglichen.

Die Aufgabe des Datenerfassungsprogramms besteht im wesentlichen darin, in einer Schleife (siehe auch Flußdiagramm in Abbildung 3.9 auf der nächsten Seite)

- auf den Erhalt eines Impulses auf **IN1** zu warten³,
- zu überprüfen ob auch auf **IN2** ein Impuls registriert wurde,
- gegebenenfalls den Zählerinhalt auf dem Datenträger zu speichern,
- jedenfalls den Zähler zurückzusetzen,
- einen Impuls auf **OUT1** zu generieren und schliesslich den nächsten Schleifendurchgang zu begehen.

Die konkrete Implementation (siehe LabView Blockdiagramm in Abbildung 3.11 auf Seite 26) wurde mittels LabView realisiert, und darüberhinaus mit einer laufenden Mittelwert- und einer „echtzeit“ Histogramm-Anzeige versehen (siehe Abbildung 3.10 auf der nächsten Seite). Die gezählten Zeitgeber Impulse werden zusammen mit einem numerischen Zeitstempel (vergangene Sekunden seit 1.1.1904) in einer Textdatei abgelegt.

²Ob eine Zeitüberschreitung stattfand hätte man im Prinzip auch anhand des ausgelesenen Zählerwerts erkennen können.

³Um sicherzugehen, daß die Schaltung sich nicht „aufgehängt“ hat, wird nach Ablauf einer Sekunde das Warten abgebrochen und ein Impuls auf **OUT1** verursacht.

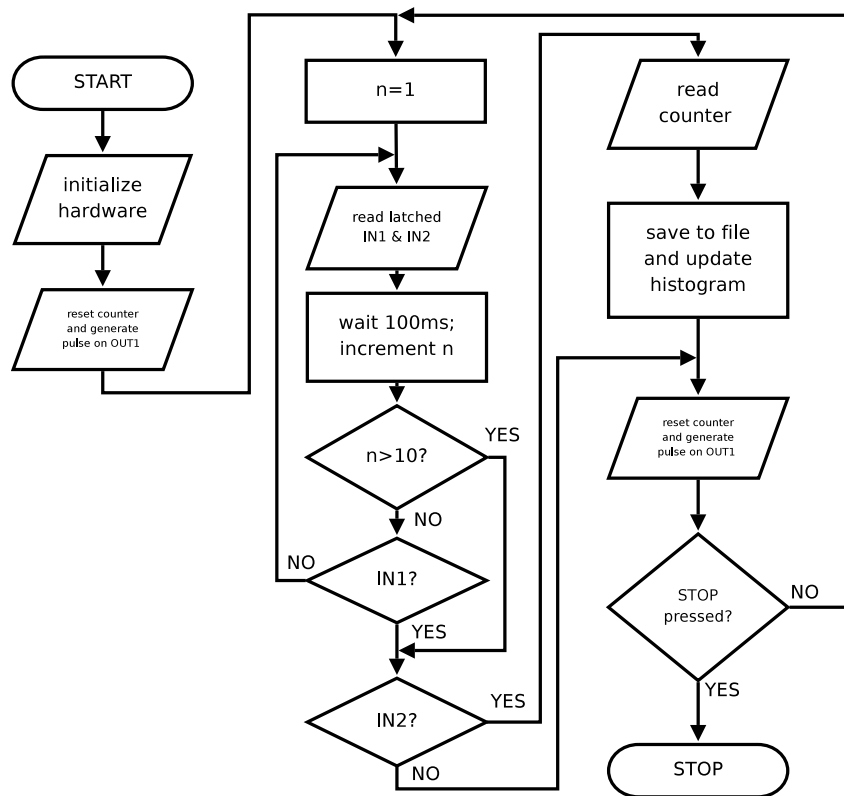


Abbildung 3.9: Vereinfachtes Flußdiagramm des Datenerfassungsprogramms

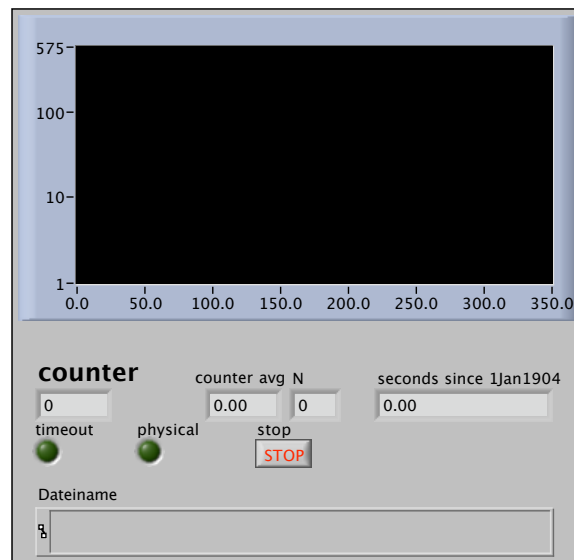


Abbildung 3.10: LabView *Front Panel* Ansicht des Datenerfassungsprogramms

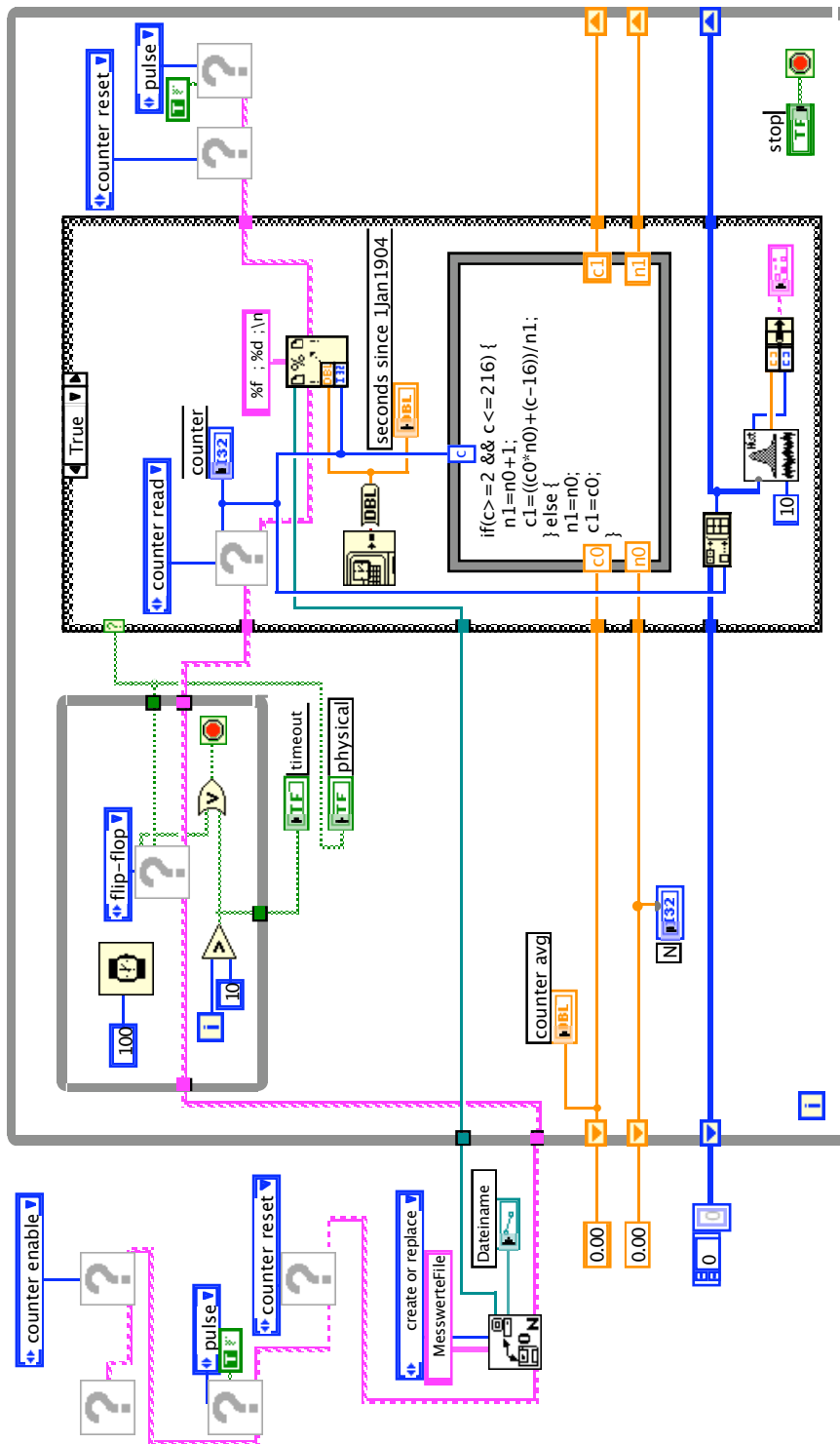


Abbildung 3.11: LabView *Block Diagram* Ansicht des Datenerfassungsprogramms

4 Messungsdurchführung

4.1 Anfangsbedingungen

Bevor die eigentliche Messung beginnen kann, sind als Vorarbeit Messungen zur Ermittlung der geeigneten Einstellungen für Hochspannung, Delay am Diskriminator sowie Pulsbreiten (width) und Koinzidenzraten zu ermitteln.

Hochspannung

Die Einstellung der Hochspannung erfolgt auf Basis der Messdaten für die Hochspannungsplateaukurven. Die Bezeichnung mit HV1, HV2 und HV3 steht für High Voltage. Die Nummerierung 1-3 entspricht der Nummer der zugeordneten Szintillatoren (siehe auch Tabelle 4.1).

scintillator	HV name	value	channel
1	HV1	1775 V	0
2	HV2	1550 V	1
3	HV3	2025 V	2

Tabelle 4.1: Highvoltage Einstellungen

Delay und Width

Nach Messung der Delaykurven wurden folgende Werte für die Einstellung am Diskriminator verwendet:

Diskriminator	Delay	Width
1	1 ns	20 ns
2	16 ns	6 ns
3	4 ns	20 ns

Tabelle 4.2: Delay- und Widthwerte

Koinzidenzraten

Die Koinzidenzraten wurden pro 100s gemessen:

Koinzidenz	Sekunden
123	444
$1\bar{2}3$	51
$\bar{1}23$	46

Tabelle 4.3: Koinzidenzraten

4.2 Lebensdauerermessungsablauf

Um genügend Daten für die statistische Auswertung zu erhalten, wurden über mehrere Wochen hinweg Lebensdauerermessungen durchgeführt.

Eine tabellarische Auflistung der Rohdaten siehe Anhang A.2 auf Seite 51.

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Messungen aufgelistet. Die Werte, welche im Abschnitt 4.1 auf der vorherigen Seite aufgelistet sind bleiben erhalten (sofern keine explizite Änderung erwähnt wird). Ebenso verhält es sich mit Einstellungen die bei einer erneuten Messung *nicht* erneut explizit angeschrieben werden.

Bei der Lebensdauerermessung erhält man den Langzeituntergrund, das ist das Verhältnis der falschen Starts (=alle Starts) zu den richtigen Starts (innerhalb τ_μ). Die Relation der daraus erhaltenen Faktoren gibt an, wie weit der Untergrund verschoben ist.

1. Messung, 11.12.07 - 18.12.07

- Beginn der Messung
Start: 11.12.07, 17:16
File: `muonen_counter_11dez2007.txt`
Frequenz: 20.12 MHz
Timeout: 261
Auswertung von 0.8-12.8 μ s
- Steckbild: Siehe Abbildung 3.8 auf Seite 23
- Einschub Prof.Regler am 12.12.07, 12:00
Starts: 27824
Stops: 245 (in guter Übereinstimmung mit Vortrag, wenn man Untergrund abzieht)
Uhr stabil: 261 counts
Achtung: rechter Schnitt der Untergrundmessung darf nicht höher als timeout sein.
Derzeit 261 counts bei 13 μ s. Ein zuerst vermuteter Fehler der Mittelwertrechnung hat sich nicht bestätigt.
- Ende der Messung
Am 18.12.07 abgebrochene Messung vorgefunden. Als Ursache wird ein Stromausfall am 13.12.07 vermutet.

2. Messung 18.12.07-20.12.07

- Beginn der Messung
Start: 18.12.07, keine Zeit dokumentiert
File: `muonen_counter_18dez2007.txt`
Frequenz: 20.075 MHz
Timeout: nicht dokumentiert
- Ende der Messung
Ende: 20.12.07, 15:18
Stops: 603
Hinweis: Die 2.Messung wurde zwecks Optimierung der Untergrundmessung abgebrochen. Diese Untergrundmessung wurde jedoch nicht durchgeführt und zugunsten der 3. Messung über die Weihnachtsferien auf Jänner verschoben.
- Optimierungsversuch Untergrundmessung, 20.12.07
 $\overline{OUT} \rightarrow$ VETO des Uhr-Gate
freies OUT \rightarrow direkt STOP-Koinzidenz;
 \Rightarrow Optimierung needs further work
Hinweis: Fehler bezüglich Auswertung gefunden \rightarrow N wurde mit cut nicht reduziert!
 $t_{min} = 0.8\mu s$
 $t_{max} = 10.8\mu s$
bin-Rundung $0.05\mu s$
 $\Rightarrow \chi^2 \approx 8$

3. Messung 20.12.07-08.01.08

- Beginn der Messung
Start: 20.12.07, 19:00
File: `muonen_counter_20dez2007.txt`
Frequenz: 20.074 MHz
Timeout: nicht dokumentiert
- Ende der Messung
Ende: 08.01.08, 10:13
Starts: 638 938
Stops: 5 322
Frequenz: 20.067 MHz
Timeout: 250

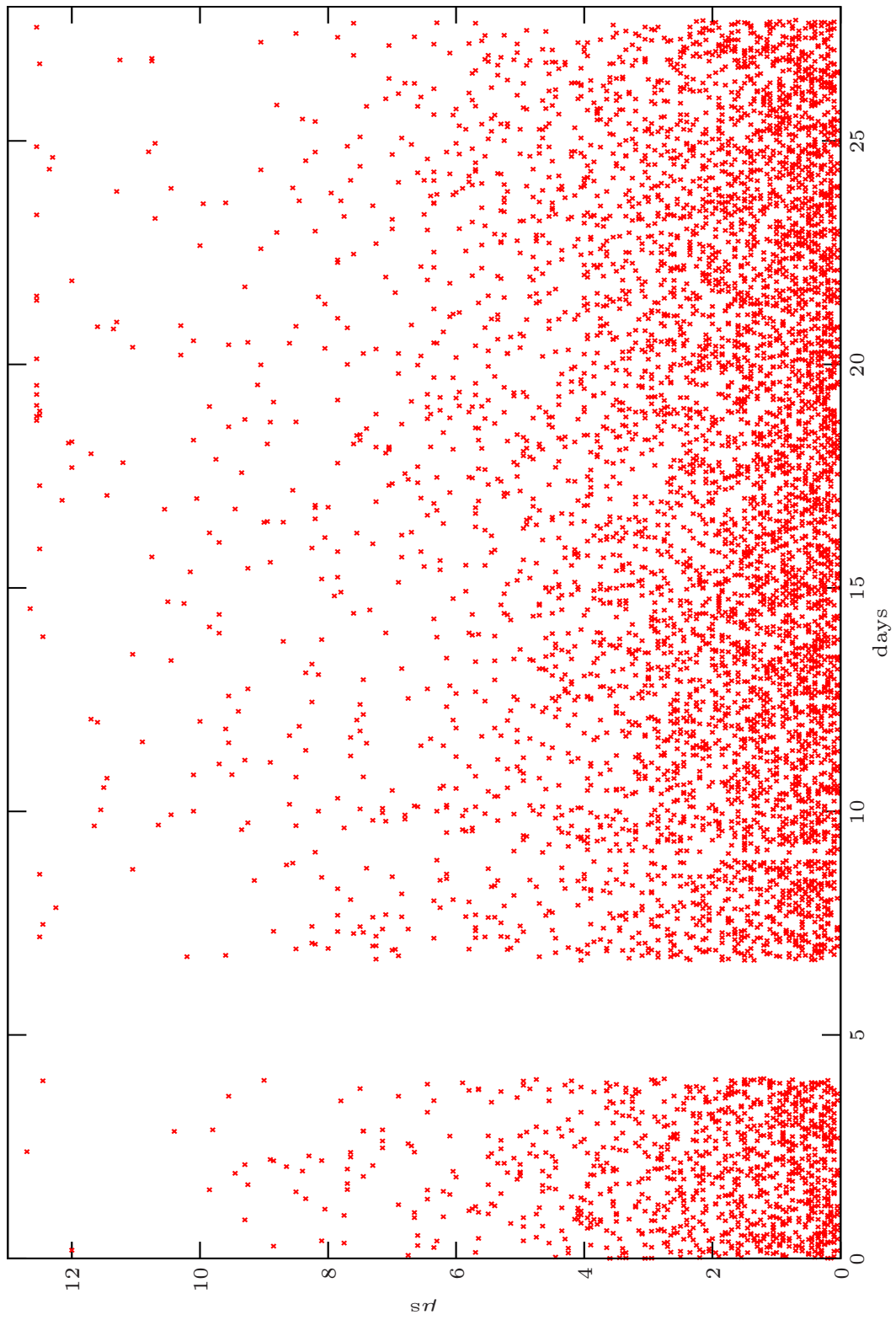


Abbildung 4.1: Zeitverlauf Lebensdauermessungen

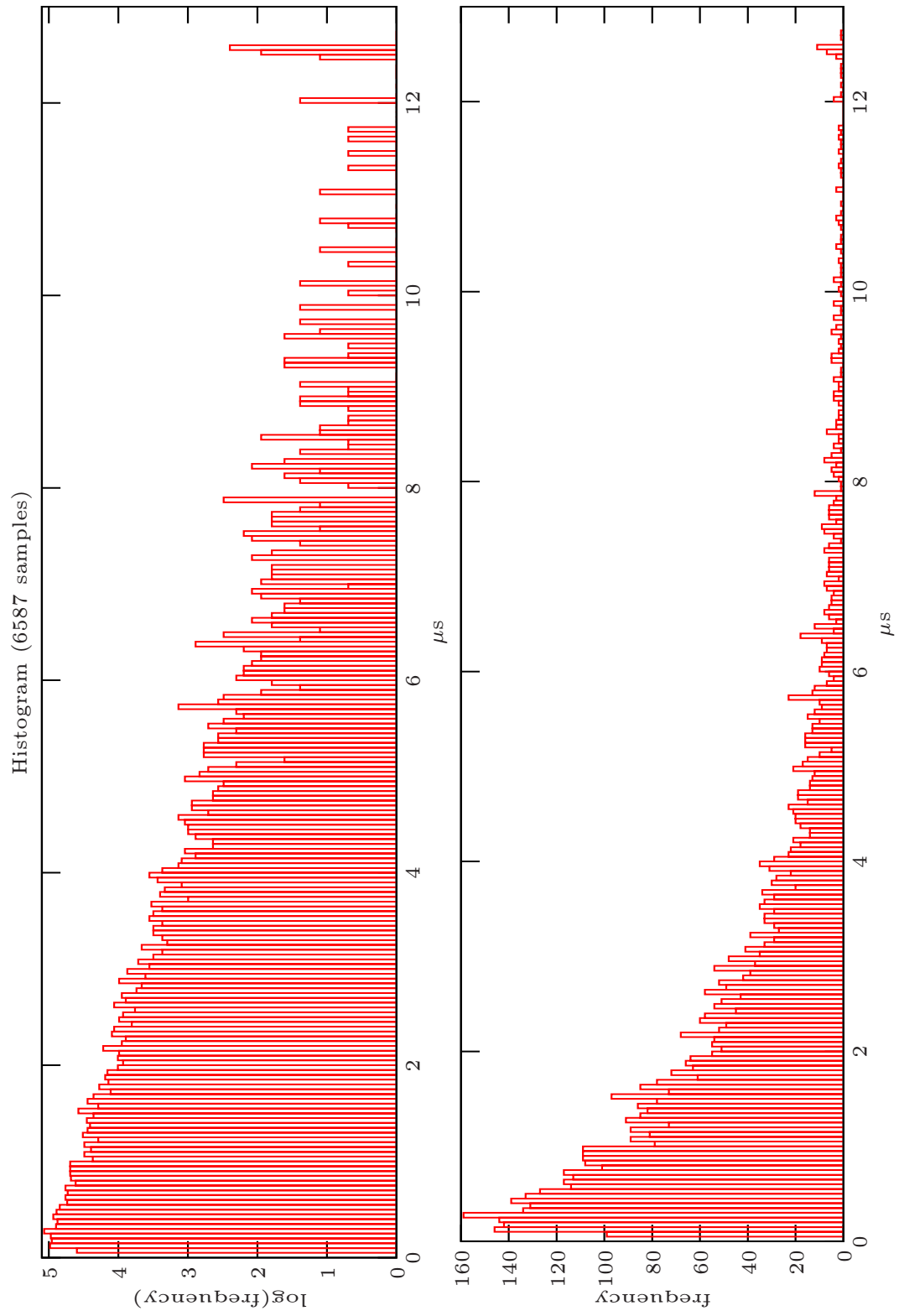


Abbildung 4.2: Histogramm Lebensdauermessungen

4.3 Untergrundmessungsablauf

Die folgenden Messungen dienten zum Erfassen des Untergrundanteils am Signal, woraus die Cuts bestimmt wurden zwecks Abtrennung des Untergrunds vom Signal.

0. Untergrundmessung, 08.01.08

Start:	08.01.08, keine Zeit dokumentiert		
Start-Trigger:	1	2	$\bar{3}$
Stop-Trigger:	$\bar{1}$	2	3
Starts ohne VETO:	0.409 Hz		
Stops ohne VETO:	0.373 Hz		

Diese Messung diente zur (groben) Abschätzung des rechten Cuts (siehe Abschnitt 5.2.2 auf Seite 41).

1. Untergrundmessung, 11.01.08 – 15.01.08

Histogramm siehe Abbildung 4.3 auf Seite 34.

Start-Trigger:	1	2	$\bar{3}$	
Stop-Trigger:	$\bar{1}$	2	3	($\bar{1}$ deaktiviert)
Beginn Messung:	2008-01-11 18:19			
Erstes Event:	2008-01-11 18:37:42			
Letztes Event:	2008-01-15 10:38:34			
Ende Messung:	2008-01-15 10:51			
Frequenz:	20.09 MHz (Ende: 20.07 MHz)			
Starts:	130121			
Stops:	1098			
Erfasste Events:	1095			
Timeout:	273			

Bei dieser Untergrundmessung wurde beim Stop Szintillator 1 als ineffizient simuliert d.h. jedes durchgehende Teilchen erzeugte auch ein Stop. Aufgrund des Verlaufs des Untergrunds half diese Untergrundmessung nicht den unteren Cut zu finden.

2. Untergrundmessung, 15.01.08 – 21.01.08

Histogramm siehe Abbildung 4.4 auf Seite 35.

Start-Trigger:	1	2	3
Stop-Trigger:	$\bar{1}$	2	3
Beginn Messung:	2008-01-15 11:46		
Erstes Event:	2008-01-15 13:06:18		
Letztes Event:	2008-01-21 16:19:30		
Ende Messung:	2008-01-21 16:23		
Frequenz:	20.06 MHz (Ende: 20.06 MHz)		
Starts:	1268972		
Stops:	270		
Erfasste Events:	267		
Timeout:	276		

Bei dieser Untergrundmessung wurden alle Myonen, die sicher durchgehen auch gemessen. Die Messung ergab nur selten Stops und eine Anhäufung bei korrelierten Myonen (niedriges $\tau < 1 \mu\text{s}$). Daraus wurde der untere Cut grob bei ca. $0,5 \mu\text{s}$ festgelegt.

3. Untergrundmessung

Histogramm siehe Abbildung 4.5 auf Seite 36.

Start-Trigger:	1	2	$\bar{3}$
Stop-Trigger:	$\bar{1}$	2	β (3 deaktiviert)
Beginn Messung:	2008-01-21 16:33		
Erstes Event:	2008-01-21 16:34:29		
Letztes Event:	2008-01-23 12:19:03		
Ende Messung:	2008-01-23 12:22		
Frequenz:	20.06 MHz (Ende: 20.06 MHz)		
Starts:	65218		
Stops:	1098		
Erfasste Events:	1096		
Timeout:	250		

Bei der letzten Untergrundmessung wurde beim Stop Szintillator 3 als ineffizient simuliert. Bei diese Messung wurden die niederenergetische Signale registriert, die nicht bis Szintillator 2 kamen. Die Messung ergab keine Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses. Somit könnte diese Messung auch als Lebensdauermessung verwendet werden.

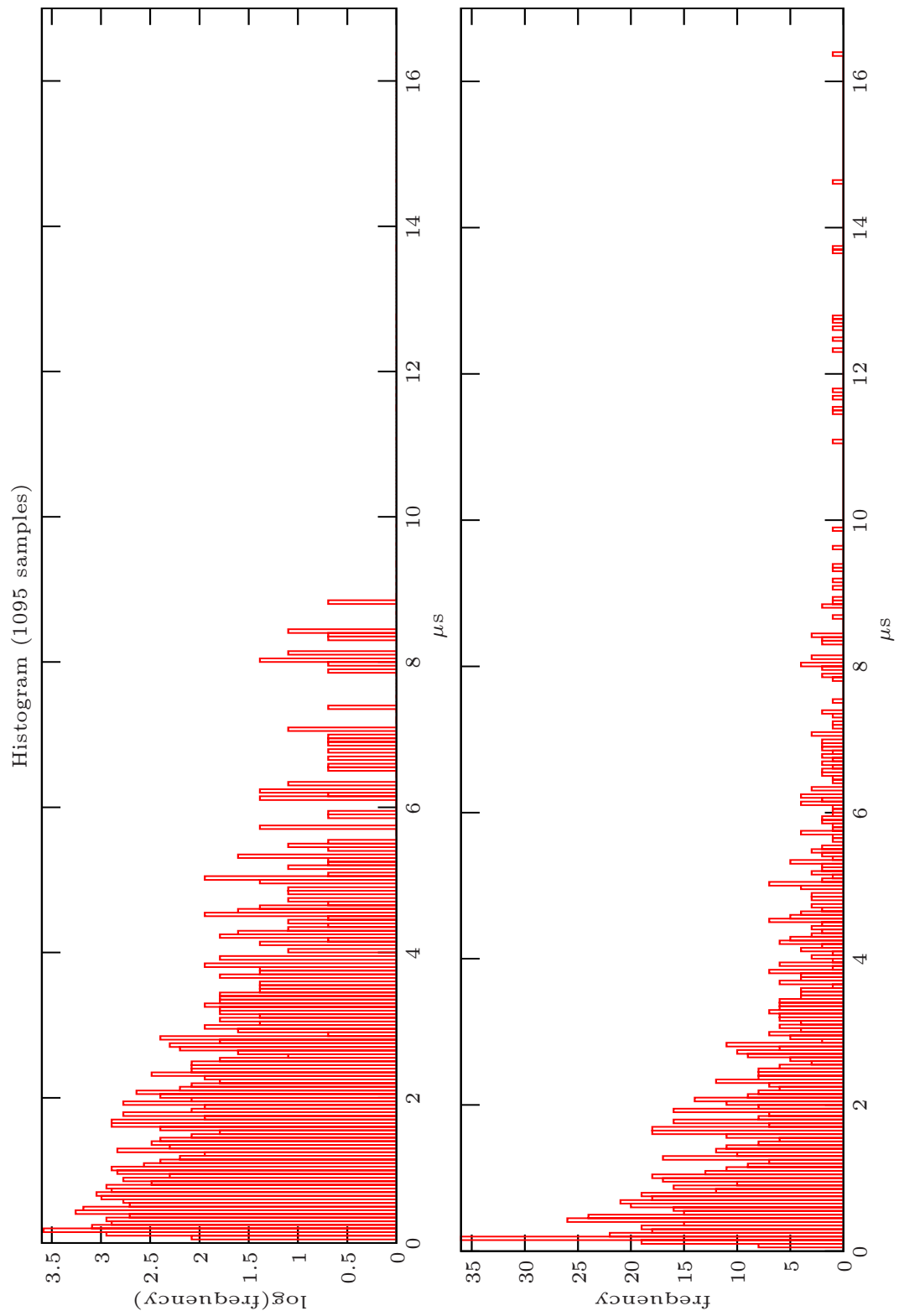


Abbildung 4.3: Untergrundmessung 2008-01-11 18:37:42 bis 2008-01-15 10:38:34 (start=12 $\bar{3}$ stop=23)

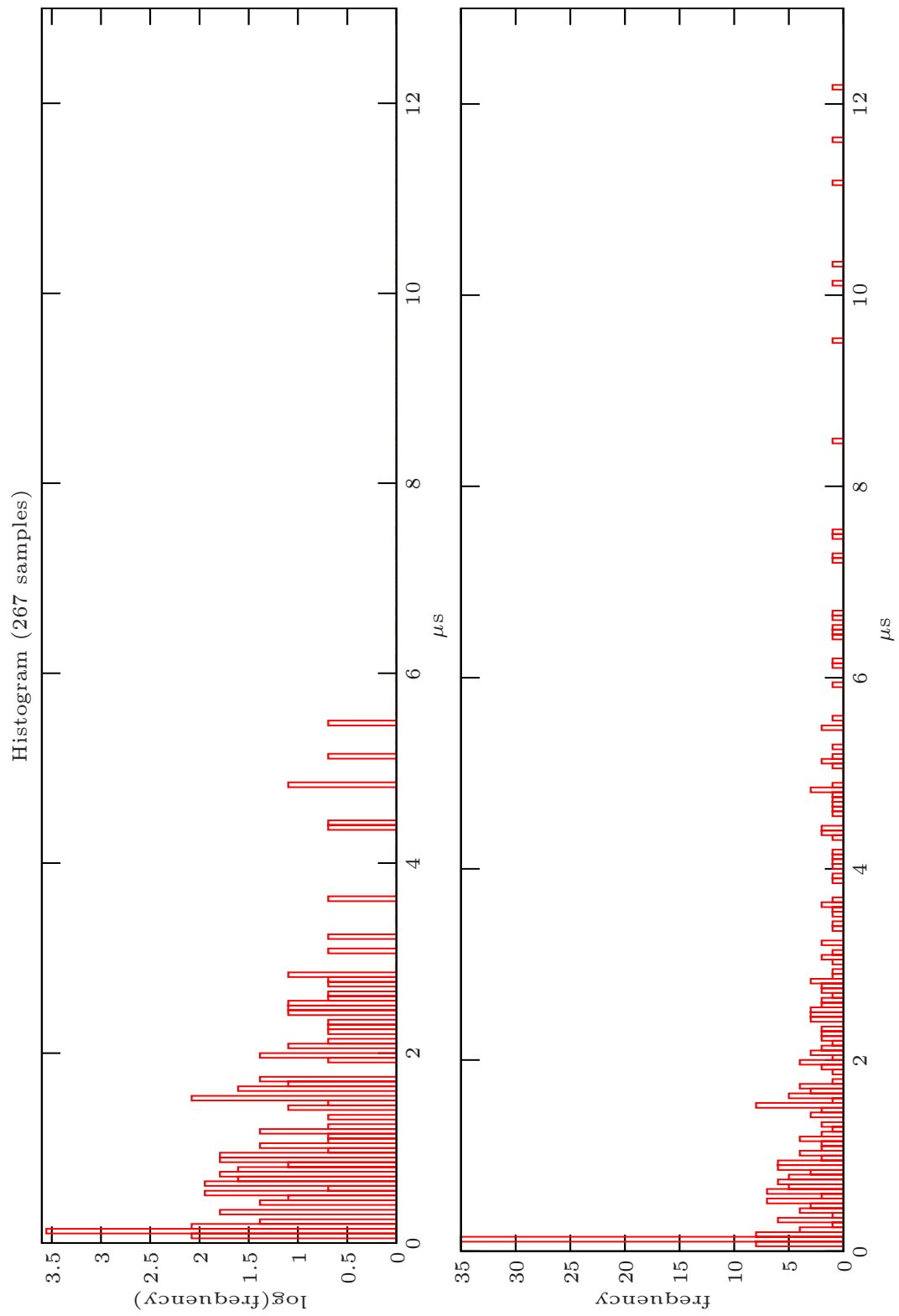


Abbildung 4.4: Untergrundmessung 2008-01-15 13:06:18 bis 2008-01-21 16:19:30 (start=123 stop=123)

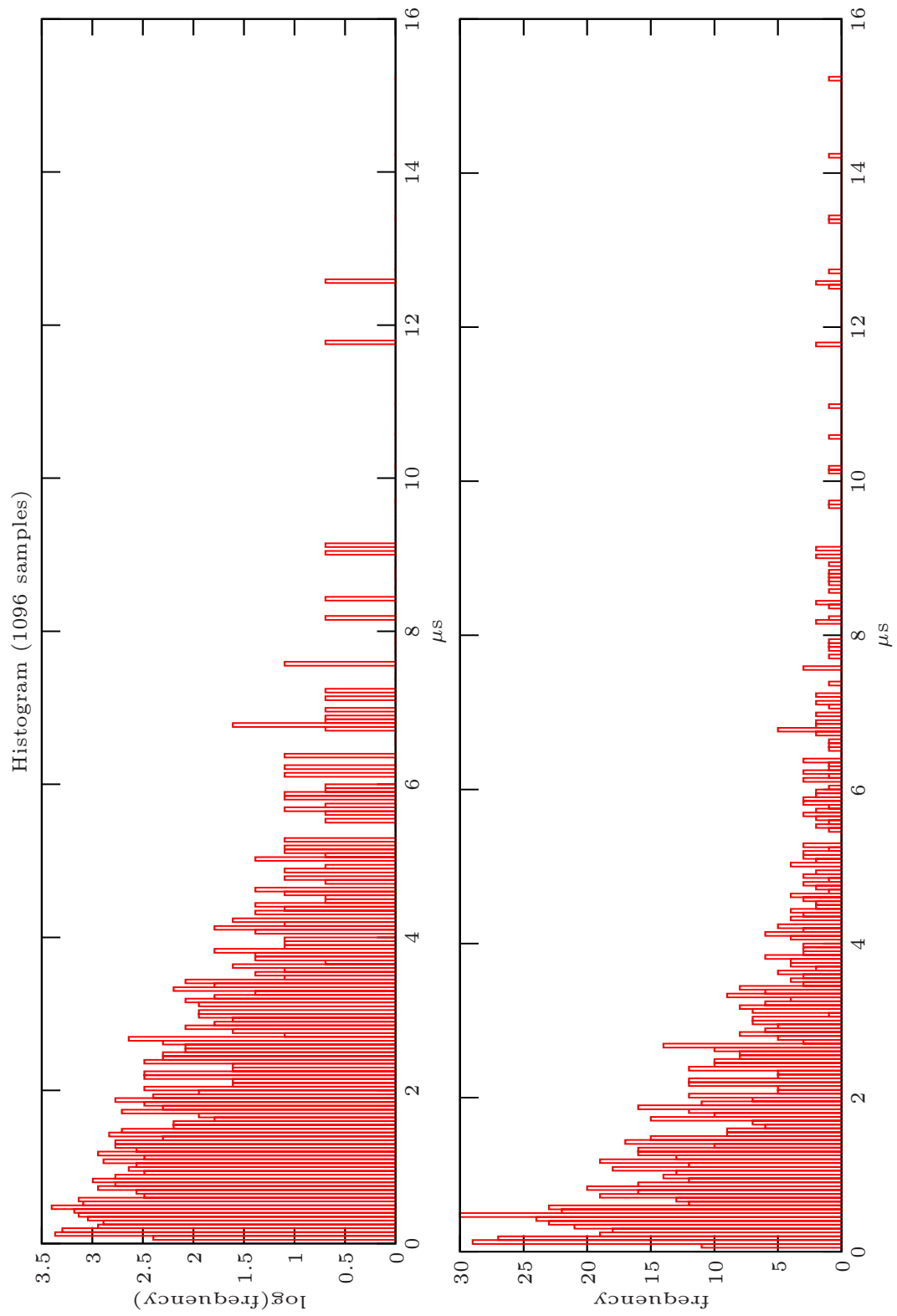


Abbildung 4.5: Untergrundmessung 2008-01-21 16:34:29 bis 2008-01-23 12:19:03 (start=123, stop=12)

5 Auswertung

5.1 Statistische Methoden

Im nachfolgenden soll die Statistik hinter der Lebensdauerbestimmung näher erläutert werden.

5.1.1 Exponentialverteilung und Lebensdauerbestimmung

Die Exponentialverteilung ist u.a für Prozesse geeignet, welche auf die Vorgeschichte keinen Einfluss haben. Es handelt sich um eine kontinuierliche Verteilung mit der Wahrscheinlichkeitsdichte

$$f(t) = \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \Theta(t)$$

und der Verteilungsfunktion

$$u = F(t) \equiv \int_0^t f(t') dt' = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

deren inverse Funktion durch

$$t = F^{-1}(u) = -\tau \cdot \ln(1 - \mu)$$

beschrieben wird.

Die Zeichnung 5.1 auf der nächsten Seite stellt eine Transformation dar. Transformationen werden bei Computersimulationen verwendet und zwar dann, wenn die gegebene Verteilung des Zufallszahlengenerators in eine andere Verteilung umgerechnet werden soll. In der Zeichnung ist die gegebene Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$, die über die Transformation $u = F(t)$ in eine Gleichverteilung $f(u)$ transformiert werden soll, dargestellt.

Es gilt, wenn u gleichverteilt ist im Intervall $[0, 1)$, dann ist t exponentialverteilt im Intervall $[0, \infty)$ und umgekehrt folgt aus einem exponentialverteiltem t gleichverteiltes u . Für das Intervall $[u_0, u_k]$ wiederum gilt, ist u in diesem Intervall gleichverteilt, so ist t im Intervall $[t_0, t_k]$ exponentialverteilt. Umgekehrt gilt auch, ist t exponentialverteilt in $[t_0, t_k]$, so ist u gleichverteilt im Intervall $[u_0, u_k]$.

5.1.2 Lebensdauerbestimmung durch gebinnte Least-Square-Method

Wir wissen, dass der Zerfall von Myonen, und damit die Lebensdauer, durch eine Exponentialverteilung beschrieben werden kann:

$$f_E(t, \tau) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \Theta(t)$$

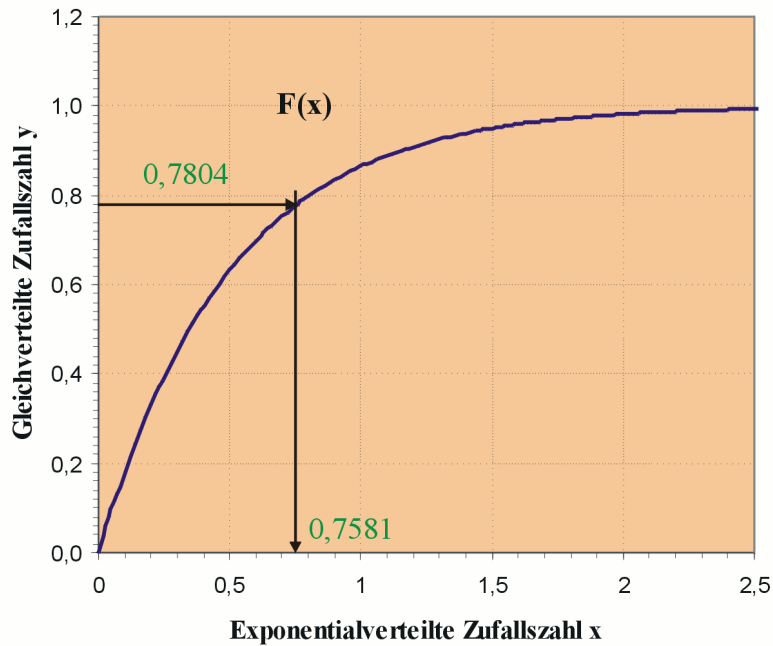


Abbildung 5.1: Inversionsmethode: Transformation der Wahrscheinlichkeitsdichte zu einer gleichverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte mittels Inversion der Verteilungsfunktion $F(t)$ (Bildquelle: Inversionsmethoden/Wikipedia)

Wobei t eine Zufallsvariable und τ den gesuchten Parameter, die mittlere Lebensdauer eines Myons, bezeichnet. Die Exponentialfunktion gibt die Intervalllänge zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen an. Mit Hilfe dieser Verteilungsfunktion kann im Mittel eine Voraussage über die Zerfallswahrscheinlichkeit eines Myons getroffen werden. Das Zeitintervall für das wir Zerfälle und damit die Verteilungsfunktion zulassen, beschränken wir auf ein Intervall $t \in [t_0, t_k]$ mit $t_0 > 0$. Der Grund dafür ist, dass es sich bei der Lebensdauer um eine kontinuierliche Zufallszahl handelt. Kontinuierliche Zufallszahlen sind u.a auch dadurch gekennzeichnet, dass sie beliebige Werte in einem kontinuierlichen Intervall annehmen können. Das Intervall wird weiter in k Unterintervalle, sogenannte Bins $t \in [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, \dots, k$ unterteilt. Für die stückweise kontinuierliche, auf das Intervall normierte und positiv definite Verteilungsfunktion $f_E(t, \tau)$ gilt die nachfolgende Wahrscheinlichkeit p_i , dass ein Myon in einem der Bins zerfällt.

$$p_i(\tau) = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} f_E(t, \tau) dt}{\int_{t_0}^{t_k} f_E(t, \tau) dt} = \frac{e^{-\frac{t_{i-1}}{\tau}} - e^{-\frac{t_i}{\tau}}}{e^{-\frac{t_0}{\tau}} - e^{-\frac{t_k}{\tau}}} < 1$$

Aus dem Umstand, dass es sich hierbei um eine Wahrscheinlichkeit handelt, erklärt sich auch das Integral im Nenner – es stellt eine Normierung dar. Es gilt auch $\sum_{i=1}^k p_i(\tau) = 1$. In der Praxis wird die Anzahl der Bins so gewählt, dass die statistischen Schwankungen in den Bins nicht die systematischen überdecken[8].

5.1.3 Erwartungswert, Varianz und Binomialverteilung

Sofern die Zahl der Teilchen groß ist und die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines einzelnen Teilchens klein ist, folgt die Lebensdauer von Teilchen in einem vorgegebenem Intervall einer Poissonverteilung. Der Grund dafür ist, dass die Poissonverteilung für $N \rightarrow \infty$ einen Grenzfall der Binomialverteilung darstellt.

In unserem Fall ergibt sich daraus die Frage nach der Größe der Wahrscheinlichkeit $f_B(x_i)$, dass sich nach N Messungen genau x_i davon im i -ten Bin (B) befinden[1]. Da es nur die 2 möglichen Ergebnisse „im Intervall“ und „nicht im Intervall“ gibt, folgt daraus die Binomialverteilung

$$f_B(x_i) = \binom{N}{x_i} \cdot p_i^{x_i} \cdot (1 - p_i)^{N-x_i}$$

mit dem zugehörigen Erwartungswert

$$\bar{x}_i = N \cdot p_i,$$

der Varianz

$$\sigma_{x_i}^2 = N \cdot p_i \cdot (1 - p_i)$$

und der Kovarianz

$$\text{cov}\{x_i, x_j\} = -N \cdot p_i \cdot p_j \quad \text{für } i \neq j.$$

5.1.4 Virtuelle Messung

Die gemessenen Zeiten werden Bins zugeordnet, und somit ein Histogramm erstellt, wobei die Bin-Inhalte n_i jetzt die Meßwerte darstellen (von daher *Virtuelle Messung*). Die Summe der Bin-Inhalte $\sum_{i=1}^k n_i = N$ entspricht somit der Gesamtzahl N an Einzelmessungen.

Die Kovarianz- (bzw. „Fehler“-)Matrix der Virtuellen Messungen

$$\text{cov}\{n_i, n_j\} \equiv V = \begin{pmatrix} \sigma^2(x_1) & \cdots & \text{cov}\{n_i, n_j\} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}\{n_i, n_j\} & \cdots & \sigma^2(x_k) \end{pmatrix}$$

ist singular und daher ist V nicht invertierbar bzw. die *Gewichtsmatrix* $G = V^{-1}$ nicht berechenbar. Die im folgenden Abschnitt beschriebene LS-Methode umgeht dieses Hindernis.

5.1.5 Methode der kleinsten Fehlerquadrate – χ^2 Test

Um eine Anpassung von Funktionen an Messwerte zu erreichen wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Method, LS-Methode) verwendet, dabei handelt es sich um die Minimierung der χ^2 -Funktion. Anders ausgedrückt erfolgt die Bestimmung des Parameters τ durch Minimierung der Summe χ^2 der normierten quadratischen Abweichungen der Messwerte n_i von der Vorhersage. Sprich die Zahl der Bin-Inhalte n_i

sind als Messwert zu interpretieren, die wir mit der Vorhersage vergleichen, indem die Summe der quadratischen Abweichungen bestimmt wird.

In unserem Fall suchen wir durch Anpassung (Fitting) also die beste Schätzung der Lebensdauer τ eines Myons. Hierzu ist zunächst folgender Ansatz notwendig:

$$M(\tau) \hat{=} (r_1, \dots, r_k) \cdot V^{-1} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_k \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - N \cdot p_i(\tau))^2}{N \cdot p_i(\tau)} \Rightarrow \min.$$

Im Nenner steht die Abweichung, wobei n_i die Bin-Inhalte und $N \cdot p_i(\tau)$ den Erwartungswert bezeichnet. Im Zähler findet sich die mittlere quadratische Abweichung $\sigma_{x_i}^2$. Da die Wahrscheinlichkeiten $p_i < 1$ ist, wird jedoch die Klammer weggelassen. Dies entspricht einer Poissonnäherung der Binomialverteilung (siehe [8]) und die mittlere quadratische Abweichung wird gleich der Wahrscheinlichkeit, x_i Messungen im i -ten Bin zu finden. Somit stellt der Zähler die Normierung dar, um die erwartete mittlere quadratische Abweichung χ^2 zu erhalten. Die Summierung über alle k Unterintervalle wird durch $\sum_{i=1}^k$ angezeigt.

Die Minimierung des obigen Problems führt zur Lösung $\tilde{\tau}$ und es gilt $M(\tilde{\tau}) \equiv \chi^2$. Mittels der Gleichung $M(\tilde{\tau} \pm \sigma_{\tilde{\tau}}) = \chi^2 + 1$ lässt sich dann auf $\sigma_{\tilde{\tau}}$ schließen. Beweis siehe [1].

5.1.6 χ^2 Verteilung

Die χ^2 Verteilung wird durch die Anzahl von Freiheitsgrade (Number of Degrees of Freedom bzw. ndf) festgelegt:

$$ndf = (k - 1) - 1$$

Der Ausdruck $(k - 1)$ beschreibt die Zahl der unabhängigen Messungen, die Subtraktion von 1 entspricht der Anzahl der gefitteten Parameter. Die Zahl der Freiheitsgrade richtet sich nach der um 2 reduzierten Anzahl von Bins.

Wenn die vorgegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung gültig ist, folgt die Verteilung von χ^2 in guter Näherung der, der Hypothese zugrundeliegenden χ^2 -Verteilung, welche in [8] näher beschrieben ist.

5.2 Untergrund Cuts

Um die Verfälschung durch den Untergrund möglichst gering zu halten, werden bei der Auswertung Daten ausserhalb der Cuts verworfen.

5.2.1 Linker Cut

Der linke Cut wurde aufgrund des Ergebnis der 2. Untergrundmessung (siehe Abschnitt 4.3 auf Seite 33) grob bei $0,5 \mu\text{s}$ angesetzt, bei der Auswertung jedoch auf $0,8 \mu\text{s}$ angehoben.

5.2.2 Rechter Cut

Die Zerfallszeiten der Myonen sind wartezeitverteilt, dh. es gilt folgende Wahrscheinlichkeitsdichte:

$$f(t|\tau) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.1)$$

Ebenso ist allerdings der Langzeituntergrund wartezeitverteilt. Da die Lebensdauer τ_B für diesen Untergrund wesentlich größer ist als die mittlere Lebensdauer der Myonen wird dieser dominant für große Zeiten, weshalb ein rechter Cut eingeführt werden muss. Um abzuschätzen wo dieser Cut liegen soll, muss zunächst τ_B bestimmt werden, indem für 1000 s die Stops ohne VETO gezählt werden und die Frequenz berechnet wird.

$$\tau_B = \frac{1}{f_B} = \frac{1}{0.373Hz} = 2680965\mu s \quad (5.2)$$

Aufgrund des großen Wertes von τ_B (im Vergleich $\tau_\mu \approx 2\mu s$) kann der Langzeituntergrund im Bereich einiger Mikrosekunden als konstant angenommen werden. Dieser Untergrund wird nun allerdings um das Verhältnis von “falschen” Starts zu “richtigen” Start erhöht. Zur Berechnung dieses Faktors S_f wurde die Zahl aller Starts (entspricht in etwa der Zahl der falschen Starts, da nur ein geringer Anteil ein physikalisches Stop liefert und der Großteil ins Timeout läuft) und die Zahl der Stops (entspricht der Zahl der richtigen Starts) aus der 3. Messung vom 20.12.2007 bis zum 8.1.2008 verwendet.

$$S_f = \frac{\text{falsche Starts}}{\text{richtige Starts}} \approx \frac{\text{Starts}}{\text{Stops}} = \frac{638938}{5322} = 120.05 \quad (5.3)$$

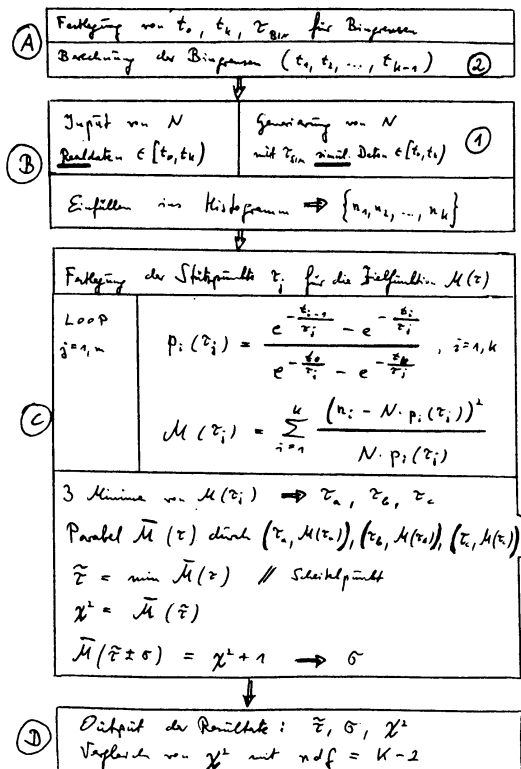
Nun kann der Schnittpunkt zwischen der Wartezeitverteilung der Myonen und dem als konstant angenommenen Untergrund berechnet werden.

$$\frac{1}{\tau_\mu} e^{-\frac{t_s}{\tau_\mu}} = \frac{S_f}{\tau_B} \quad \rightarrow \quad t_s = -\tau_\mu \ln\left(\frac{\tau_\mu S_f}{\tau_B}\right) = 18.64\mu s \quad (5.4)$$

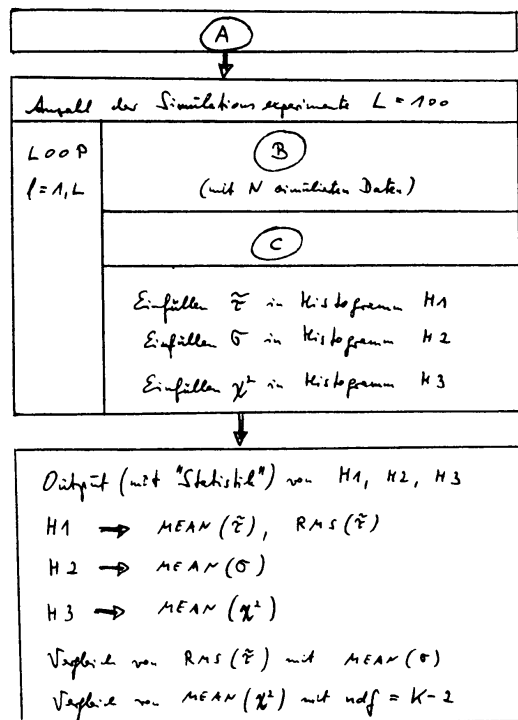
Soll der Langzeituntergrund beim rechten Cut nur ein Prozent betragen so muss der Cut um Δt von t_s nach links verschoben werden. Δt kann wie folgt berechnet werden:

$$\Delta t = -\tau_\mu \ln(0.01) = 9.21\mu s \quad (5.5)$$

Der rechte Cut liegt daher bei $9.43\mu s$.



(a) Auswertung real/einfache „Simulation“



(b) Auswertung „doppelte“ Simulation

Abbildung 5.2: Auswertungsprogramm: Flußdiagramme für Auswertung realer Daten und simulierter Daten (Quelle: [1])

5.3 Auswertungsprogramme

Die bei der Datenerfassung gesammelten Daten wurden mit Hilfe eines GNU Octave Programms (kommentiertes Programmlisting siehe Anhang B.1 auf Seite 52) ausgewertet.

Der grobe Programmablauf ist im Flußdiagramm in Abbildung 5.2 dargestellt. Zwecks Überprüfung der Plausibilität der Auswertung, ist als alternativer Betriebsmodus eine Simulation der Experimentdaten für ein gegebenes τ vorgesehen, mit anschließender Auswertung. In Abbildung 5.4 auf der nächsten Seite ist das Resultat einer solchen Simulation visualisiert. Abbildung 5.3 auf der nächsten Seite zeigt eine Visualisierung der Minimumbestimmung der Zielfunktion $M(\tau)$ mittels Parabelfit.

Im Programm wird angenommen, dass die erfassten Zählwerte einer exakten 20 MHz Zeitbasis zugrundeliegen, d.h. in Zeiteinheiten von 50 ns.

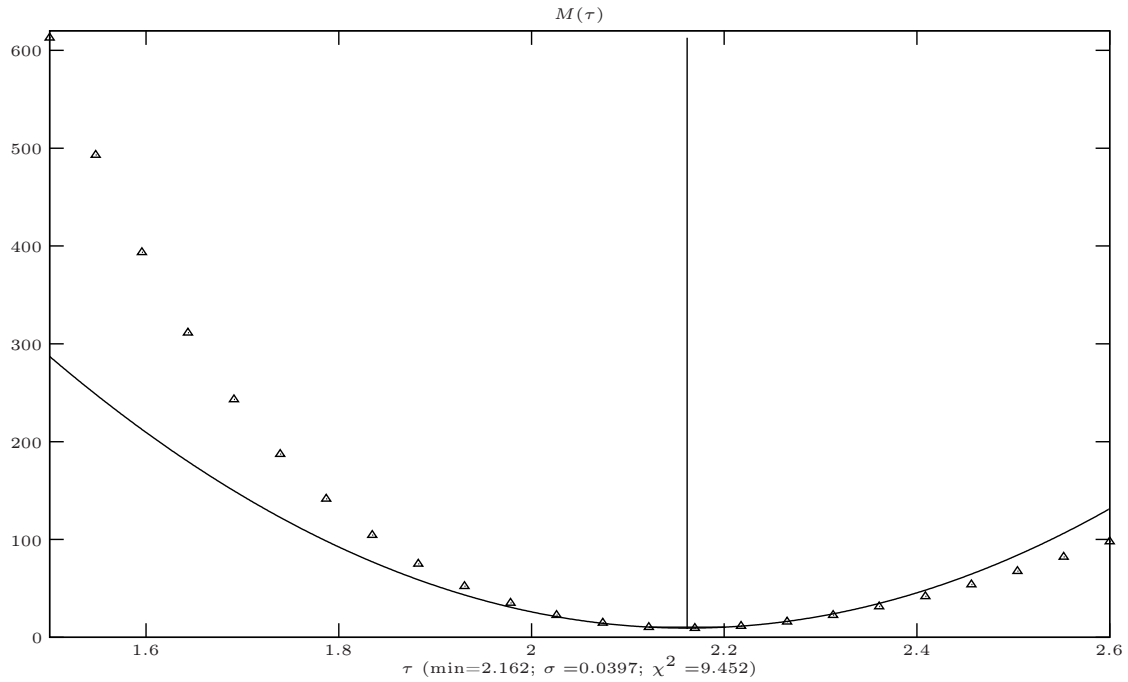


Abbildung 5.3: Auswertungsprogramm: Visualisierung der Zielfunktion $M(\tau)$ und der gefitteten Parabel

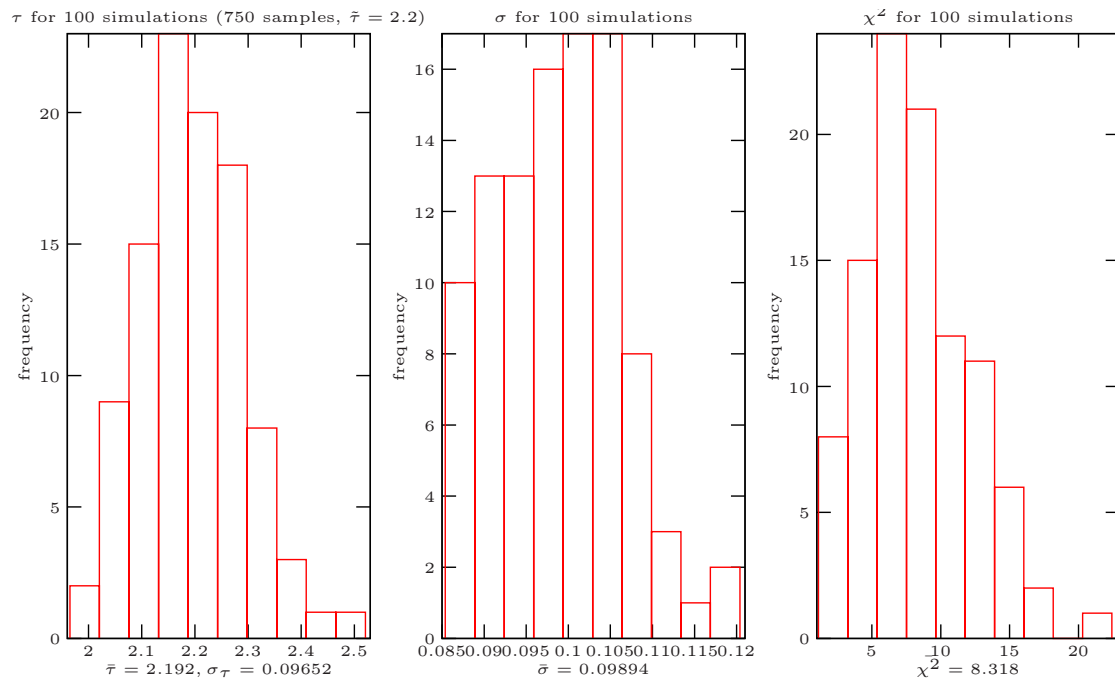


Abbildung 5.4: Auswertungsprogramm: Histogramme der ermittelten Parameter bei doppelter Simulation

Cuts	$[0.8, 9.4] \mu s$
Events	4574 von 7059
$\bar{\tau}$	$2.1616 \mu s$
σ_{τ}	$0.039702 \mu s$
χ^2	9.4517

Tabelle 5.1: Zusammengefasstes Resultat des Experiments zur Bestimmung der Lebensdauer von Myonen

5.4 Resultate

Die Bin-Grenzen ergaben sich bei $0.775 \mu s$, $1.025 \mu s$, $1.225 \mu s$, $1.525 \mu s$, $1.825 \mu s$, $2.175 \mu s$, $2.575 \mu s$, $3.125 \mu s$, $3.925 \mu s$, $5.175 \mu s$ und $9.425 \mu s$.

Das bedeutet, der untere Cut liegt derart, dass $0.8 \mu s$ der kleinste erfasste Wert ist; der obere Cut derart, dass $9.4 \mu s$ der größte nicht-verworfenen Wert ist. Effektiv blieben damit von insgesamt 7059 Events (bzw 6587 Events ohne Nullwerte) 4574 Events übrig (siehe Abbildung 5.5 auf der nächsten Seite).

Als Mittelwert für die Lebensdauer τ ergibt sich $2.1616 \mu s$ mit einer Standardabweichung σ_{τ} von $0.039702 \mu s$ und einem χ^2 von 9.4517 (siehe auch Abbildung 5.3 auf der vorherigen Seite).

In Tabelle 5.1 findet sich das Resultat nochmals tabellarisch zusammengefasst.

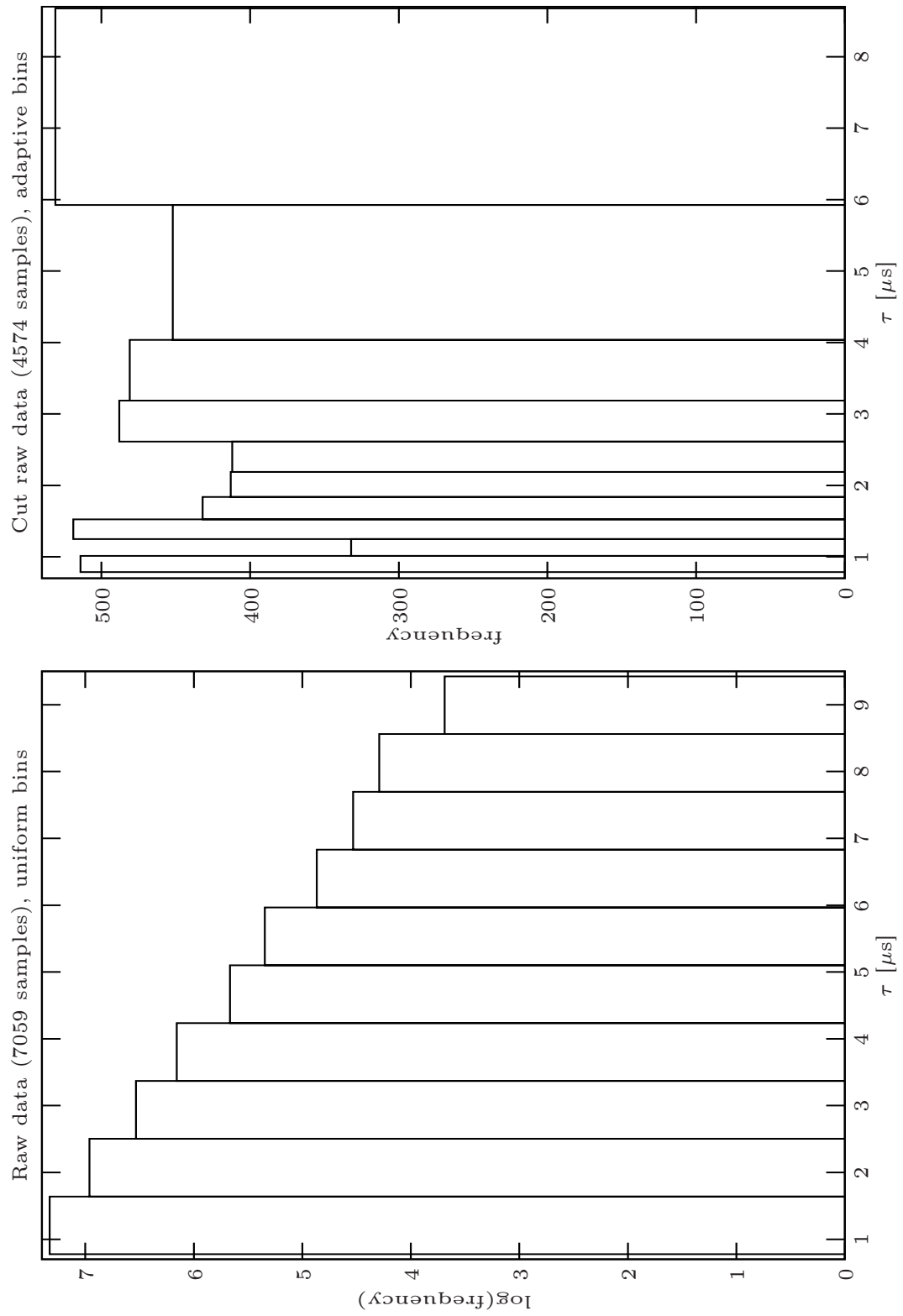


Abbildung 5.5: Auswertung der Daten der Lebensdauerermessung

6 Diskussion & Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde versucht einen Überblick über wichtige Bereiche bei der Durchführung eines Experiments zur Lebensdauerbestimmung von Myonen zu geben. Im folgenden sollen die wichtigsten Schritte noch einmal zusammengefasst werden. In der Einleitung werden einige wichtige Komponenten des Detektors sowie die NIM Logik kurz beschrieben und die Entstehung der Myonen in unserer Atmosphäre erklärt. Der verwendete Detektor besteht aus drei Szintillatoren, wobei der zweite Szintillator als Target dient. Ein Myon (mit passender Energie) kann den ersten Szintillator durchqueren, hat allerdings nicht ausreichend Energie um auch den zweiten zu passieren und bleibt stecken. Nach kurzer Zeit zerfällt das Myon in ein Elektron und zwei Neutrinos, wobei das Elektron im besten Fall in Richtung des dritten Szintillators fliegt und daher im zweiten und dritten Szintillator ein Signal erzeugt. Ziel ist es die Zeit zu messen, die vergeht zwischen dem Einfall des Myons und dem Austritt des Elektrons. Dementsprechend werden die Start- und Stopbedingung wie in Kapitel 2 auf Seite 9 definiert. Ebenfalls in Kapitel 2 werden wichtige Messungen zu Einstellungen des Experiments beschrieben, wie etwa die Hochspannungen an den Photomultipliern oder das zeitliche Verhalten der Signale. Die Signalverarbeitung und die Datenerfassung mit Hilfe eines Labview-Programms sind neben der Beschreibung der Detektoren selbst wichtige Punkte in Kapitel 3 auf Seite 16, welches sich dem Versuchsaufbau widmet.

Nachdem möglichst viele der kurz zuvor skizzierten Ereignisse gemessen wurden, ist es möglich mit Hilfe statistischer Methoden die mittlere Lebensdauer der Myonen zu berechnen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Messergebnisse einen Untergrund haben, der in eigenen Messungen abgeschätzt werden kann. Mit diesen Untergrundmessungen wird das für die Auswertung interessante Zeitintervall festgelegt. Die Auswertung selbst erfolgt mit einem GNU Octave Programm. Die Messung sowie die Auswertung sind in Kapitel 4 auf Seite 27 und 5 auf Seite 37 genauer erklärt.

Zum Schluss ist es von Interesse das erhaltene Ergebnis mit den aktuellen anerkannten Werten für die Myonenlebensdauer zu vergleichen. Die von der Particle Data Group (W.-M. Yao et al.) veröffentlichten Ergebnisse aus 2006 liefern für die mittlere Lebensdauer von Myonen einen Wert von $2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$ [6]. Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem hier erhaltenen Ergebnis von $2.1616 \pm 0.039702 \mu\text{s}$. Der Wert der Particle Data Group liegt innerhalb des Intervalls $\tau \pm \sigma$ der hier beschriebenen Messung.

Anhang A

Tabellen

A.1 Justierung/Tuning

HV1	$n(1 \cdot 2 \cdot 3)$	Einzelrate 1 [Hz]
1400	3	0
1450	6	1
1500	14	3
1550	24	7
1600	47	17
1650	73	26
1700	84	40
1750	92	55
1775	92	65
1800	93	80
1850	91	120
1900	94	200
1950	94	300

Tabelle A.1: Plateaukurve 1 für $n(2 \cdot 3) = 100$

HV3	$n(1 \cdot 2 \cdot 3)$	Einzelrate 3 [Hz]
1500	0	0
1550	1	1
1600	6	1
1650	5	4
1700	10	6
1750	22	12
1800	44	24
1850	64	43
1900	77	65
1950	90	95
2000	94	120
2025	94	165
2050	94	240

Tabelle A.2: Plateaukurve 3 für $n(1 \cdot 2) = 100$

HV2	$n(1 \cdot 2 \cdot 3)$	Einzelrate 2 [Hz]
1200	2	0
1250	3	1
1300	13	2
1350	13(156)	4(3)
1375	-(159)	-(6)
1400	18(159)	5(7)
1425	-(157)	-(5)
1450	15(175)	5(5)
1475	-(205)	-(7)
1500	20(198)	7(7)
1550	19	9
1600	19	10
1650	16	20

Tabelle A.3: Plateaukurve 2 für $n(1 \cdot 3) = 100$ bzw. ($n(1 \cdot 3)=1000$)

Delay 1	Delay 2	Delay 3	$n(1 \cdot 2 \cdot 3)$
0	40	28	0
8	40	28	21
9	40	28	56
10	40	28	77
11	40	28	78
12	40	28	78
13	40	28	94
14	40	28	95
15	40	28	92
16	40	28	93
24	40	28	96
25	40	28	94
26	40	28	92
27	40	28	88
28	40	28	94
29	40	28	92
30	40	28	96
31	40	28	93
32	40	28	94
34	40	28	88
35	40	28	91
36	40	28	88
38	40	28	82
40	40	28	71
42	40	28	16
44	40	28	8
63,5	40	28	0

Tabelle A.4: Delay-Kurve 1 für $n(1 \cdot 3) = 100$

Delay 1	Delay 2	Delay 3	$n(1 \cdot 2 \cdot 3)$
25	40	0	2
25	40	8	10
25	40	12	24
25	40	13	60
25	40	14	74
25	40	15	75
25	40	16	88
25	40	24	85
25	40	32	93
25	40	40	91
25	40	41	88
25	40	42	79
25	40	43	53
25	40	44	38
25	40	45	25
25	40	46	10
25	40	48	1
25	40	63,5	0

Tabelle A.5: Delay-Kurve 3 für $n(1 \cdot 3) = 100$

A.2 Lebensdauerermessung

Count	Anzahl
1	99
2	146
3	142
4	144
5	159
6	134
7	131
8	139
9	133
10	127
11	114
12	117
13	113
14	117
15	101
16	108
17	109
18	109
19	109
20	79
21	89
22	81
23	89
24	73
25	91
26	85
27	82
28	86
29	78
30	97
31	73
32	85
33	78
34	61
35	72
36	63
37	66
38	64
39	55
40	51
41	55
42	54
43	68
44	52
45	49
46	60
47	58
48	45
49	54
50	51
51	43
52	58
53	49
54	52
55	42
56	39
57	54
58	37
59	48
60	35
61	41
62	33
63	29
64	39
65	27
66	29
67	33
68	33
69	29
70	35
71	33
72	29
73	34
74	20
75	30
76	28
77	22
78	31
79	35
80	29

Count	Anzahl
81	23
82	22
83	18
84	21
85	14
86	14
87	18
88	20
89	20
90	21
91	23
92	15
93	19
94	19
95	14
96	14
97	13
98	12
99	21
100	17
101	15
102	10
103	5
104	16
105	16
106	16
107	13
108	13
109	10
110	15
111	12
112	9
113	10
114	23
115	13
116	12
117	7
118	4
119	6
120	10
121	9
122	9
123	8
124	7
125	7
126	9
127	18
128	4
129	12
130	3
131	6
132	8
133	6
134	5
135	5
136	4
137	7
138	8
139	2
140	7
141	6
142	6
143	6
144	6
145	8
146	6
147	1
148	4
149	8
150	9
151	3
152	6
153	6
154	6
155	4
156	3
157	12
158	1
159	1
160	2

Count	Anzahl
161	4
162	5
163	3
164	8
165	5
166	1
167	4
168	2
169	2
170	7
171	3
172	3
173	2
174	2
176	2
177	4
178	4
179	2
180	2
181	4
182	1
183	1
185	5
186	5
187	2
188	1
189	2
190	1
191	5
192	3
194	4
195	1
196	1
197	4
199	1
200	2
201	1
202	4
203	1
204	1
205	1
206	2
208	1
209	3
210	1
211	1
213	1
214	2
215	3
216	1
218	1
221	3
224	1
225	1
226	2
227	1
229	2
230	1
231	1
232	2
233	1
234	2
240	4
241	1
243	1
245	1
246	1
247	1
249	3
250	7
251	11
253	1
254	1
6587	

Anhang B

Programme

B.1 Auswertungsprogramm

```
1  #!/usr/bin/octave -qf
2
3  ## Auswertungsprogramm Praktikum "Experimentelle Teilchenphysik"
4  ## GNU Octave 3.0.0
5  ## WS 2007/08
6
7  ## convert labview timestamp to ISO string representation
8  function t=labview_ts(timestamp)
9      t = timestamp + mktime(strptime("1904-01-01_01:00:00", "%F_%T" ));
10     t = strftime("%F_%T", localtime(t));
11 endfunction
12
13 ## read in samples from files and return all samples concatenated
14 function x=read_samples(filenamees)
15     x = [];
16     for fname=filenamees
17         fname=fname{1};
18         printf(" reading samples from '%s'...\n", fname);
19         l = load(fname);
20         printf(" got %d samples (%s to %s)\n", \
21             length(l), labview_ts(l(1,1)), labview_ts(l(end,1)))
22         x = [x;l];
23     endfor
24     printf(" read %d samples in total\n", length(x))
25 endfunction
26
27 ## make histogram of samples x according to limits defined by edges
28 ## nk = |{y|edgesk ≤ y < edgesk+1, x ∈ y}|
29 function n=dohist(x, edges)
30     n=[];
31     for edge=edges
32         n(end+1) = sum(x >= edge);
33     endfor
34     n(end+1) = sum(x > edges(end));
35
36     n = n(1:end-1) - n(2:end);
37
38     n(end) = []; # throw away last entry
39 endfunction
40
41 ## print current figure
42 function doprint(name)
43     fname = [name, ".fig"];
44     ## print(fname, "-dpvc2", "-landscape", "-F:8");
45     print(fname, "-mono", "-dfig", "-F:5");
```

```

46     printf(" wrote plot to '%s'\n", fname);
47 endfunction
48
49 #####
50 ## helper functions for exponential distribution
51
52 ##  $f_{\tau}(t) \equiv \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$ 
53 function d=exp_pdf(tau, t)
54     d = exp(-t/tau)/tau;
55 endfunction
56
57 ##  $c = F_{\tau}(t) = \int_0^t \frac{1}{\tau} e^{-\frac{x}{\tau}} dx$ 
58 function c=exp_cdf(tau, t)
59     c = 1 - exp(-t./tau);
60 endfunction
61
62 ## inverse CDF  $t = F_{\tau}^{-1}(c)$ 
63 function t=exp_inv_cdf(tau, c)
64     t = -tau*log(1-c);
65 endfunction
66
67 ## Integrate  $f$  from  $t_{min}$  to  $t_{max}$ , i.e.  $F_{\tau}(t_{max}) - F_{\tau}(t_{min})$ 
68 function n=exp_int(tau, tmin, tmax)
69     ##  $n_j = \int_{t_{min}}^{t_{max}} \frac{1}{\tau_j} e^{-\frac{t}{\tau_j}} dt$ 
70     n = exp_cdf(tau, tmax) - exp_cdf(tau, tmin);
71 endfunction
72
73 ## generate exponentially distributed vector of dimension  $n$  with
74 ## values between  $t_{min}$  and  $t_{max}$  and parameter  $\tau$ 
75 function t=exp_rand(tau, tmin, tmax, n)
76     umin = exp_cdf(tau, tmin);
77     umax = exp_cdf(tau, tmax);
78
79     ## generate  $n$  uniformly distributed random numbers between  $u_{min}$  and  $u_{max}$ 
80     u = umin + rand(1, n) * (umax-umin);
81
82     ## finally map uniform random vector through inverse CDF
83     t = exp_inv_cdf(tau, u);
84 endfunction
85
86 ## generate  $n$  exponentially spaced values between  $t_{min}$  and  $t_{max}$ 
87 function t=exp_space(tau, tmin, tmax, n)
88     umin = exp_cdf(tau, tmin);
89     umax = exp_cdf(tau, tmax);
90
91     u = linspace(umin, umax, n);
92
93     t = exp_inv_cdf(tau, u);
94 endfunction
95
96 #####
97
98 ## find  $min_x$  for which  $y_{min_x} = \min(\vec{y})$ 
99 function [minx, sigma, chi2, c, minidx]=find_min(x, y)
100     [_, minidx] = min(y);
101
102     ## find 2nd order polynomial
103     xp = x([minidx-1, minidx, minidx+1]);
104     A = [xp.^2, xp.^1, xp.^0];
105

```

```

106     yp = y([minidx-1, minidx, minidx+1])';
107
108     c = A\yp; ##  $\vec{c} = A^{-1}\vec{y}_p$ 
109
110     ## calc return values
111     minx = -c(2)/(2*c(1)); #  $\min(x) = -\frac{c_2}{2c_1}$ 
112
113     sigma = 1/sqrt(c(1)); #  $\sigma = 1/\sqrt{c_1}$ 
114
115     ##  $\chi^2 = c_3 - \frac{c_2^2}{4c_1}$ 
116     chi2 = (4*c(1)*c(3) - c(2)^2) / (4*c(1));
117 endfunction
118
119 function [tautilde, sigma, chi2] = auswertung(t, binlim, visualize)
120 if nargin < 3
121     visualize = 0;
122 endif
123 use_likelyhood = 0;
124
125 ## use local tmin/tmax derived from bin limits
126 tmin = binlim(1);
127 tmax = binlim(end);
128
129 t = t(t >= tmin);
130 t = t(t < tmax);
131 n = dohist(t, binlim); #  $n_k = |\{t' | \text{binlim}_k \leq t' < \text{binlim}_{k+1}, t' \in t\}|$ 
132
133 N = sum(n); #  $N = \sum_k n_k$ 
134
135 ##  $\tau_j$ 
136 tau = linspace(1.5, 2.6, 24);
137
138 ##  $f_{norm_j} = \exp_{int}(\tau_j, t_{min}, t_{max})$ 
139 fnorm = exp_int(tau, tmin, tmax);
140
141 if use_likelyhood
142     ##  $L(\tau) = \prod_j \frac{f_\tau(t_j)}{F_\tau(t_{max}) - F_\tau(t_{min})}$ 
143     L = -log(tau);
144     L = L - log(fnorm);
145     L = L - (mean(t) ./ tau);
146     M = -2*L*N;
147     ##plot(tau, L); pause;
148 else
149     ## evaluation of  $M_j \equiv M(\tau_j)$ 
150     M = [];
151     for k=1:length(n)
152         ##  $p_j = \exp_{int}(\tau_j, \text{binlim}_k, \text{binlim}_{k+1}) / f_{norm_j}$ 
153         p = exp_int(tau, binlim(k), binlim(k+1));
154         p = p ./ fnorm;
155
156         ##  $M_{kj} = \frac{(n_k - Np_j)^2}{Np_j}$ 
157         M(k,:) = (n(k) - N*p).^2 ./ (N*p);
158     endfor
159
160     M = sum(M); # reduce  $M_{kj}$  to vector  $M_j = \sum_k M_{kj}$ 
161 endif
162
163 ## find tau: for which  $M(\tau) = \text{minimum}$ 
164 [tautilde, sigma, chi2, coeff, lmin] = find_min(tau, M);

```

```

165
166   if visualize
167       figure(3)
168
169       ## visualize M with tau lattice
170       plot(tau, M, 'ro');
171       title('M( $\tau$ )');
172       xlabel([' $\tau$  (min=', num2str(tautilde), \
173             '\ ;  $\sigma$  =', num2str(sigma), \
174             '\ ;  $\chi^2$  =', num2str(chi2), ')' ]);
175
176       hold on;
177
178       plot_steps = 1000;
179
180       ## plot of fitted 2nd order polynomial
181       x = linspace(tau(1), tau(end), plot_steps);
182       y = coeff(1)*x.^2 + coeff(2)*x + coeff(3);
183       plot(x,y);
184
185       plot([1,1]*tautilde, [min(M)*0.9, max(M)]);
186       ##x = tautilde * ones(1,plot_steps);
187       ##y = linspace(0, chi2, plot_steps);
188       ##plot(x,y);
189
190       x = [tautilde-sigma, tautilde+sigma];
191       y = [1, 1]*chi2+1;
192       plot(x,y);
193
194       doprint("visualization_M");
195   endif
196
197   endfunction
198
199   function v=bincenters(binlimits)
200       v = (binlimits(1:end-1)+binlimits(2:end))/2;
201   endfunction
202
203   #####
204   ## main program ##
205   #####
206
207   ## parameters
208
209   tmin = 0.8; #  $\mu s$ 
210   tmax = 9.4; #  $\mu s$ 
211
212   timebase = 0.05; ## each count corresponds to 0.05  $\mu s$ 
213   roundbase = timebase;
214
215   ## define our bin edges
216   bincount = 10;
217   taubin=2;
218
219   binlim = exp_space(taubin, tmin, tmax, bincount+1);
220   ## binlim = linspace(tmin, tmax, bincount+1);
221
222   ## round bin limits and update tmin & tmax
223   binlim = floor(binlim/roundbase)*roundbase;
224   binlim = binlim + (roundbase/2);
225   tmin = binlim(1);
226   tmax = binlim(end);

```

```

227
228 ## get command line arguments
229 arg_list = argv();
230
231 if length(arg_list) == 0
232 #####
233 ## if no arguments given, perform simulation ##
234     printf("performing evaluation with simulated data ... \n");
235
236     tausim=2.2;
237
238     Nsim=750;
239     N=100;
240
241     for k=1:N
242         tsim = exp_rand(tausim, tmin, tmax, Nsim);
243
244         [tautildesim(k), sigmasim(k), chi2sim(k)] = auswertung(tsim, binlim);
245     endfor
246
247     figure(1)
248
249     ## Histogramm der Taus
250     subplot(1,3,1);
251     hist(tautildesim,10);
252     title([' $\tau$  for ', num2str(N), \
253           '\ simulations ', num2str(Nsim), '\ samples ', \
254           '\  $\bar{\tau} = ', num2str(tausim), '']');
255     ylabel('frequency');
256     xlabel([' $\bar{\tau} = ', num2str(mean(tautildesim)), \
257           '\, \sigma_{\tau} = ', num2str(std(tautildesim))]);
258
259     ## Histogramm der Sigmas
260     subplot(1,3,2)
261     hist(sigmasim,10);
262     title([' $\sigma$  for ', num2str(N), '\ simulations']);
263     ylabel('frequency');
264     xlabel([' $\bar{\sigma} = ', num2str(mean(sigmasim))]);
265
266     ## Histogramm der Chi2s
267     subplot(1,3,3)
268     hist(chi2sim,10);
269     title([' $\chi^2$  for ', num2str(N), '\ simulations']);
270     ylabel('frequency');
271     xlabel([' $\bar{\chi}^2 = ', num2str(mean(chi2sim))]);
272
273     doprint("hist_simulation");
274
275     #####
276     ## if data files are provided as arguments, analyze them ##
277     else
278         texp = read_samples(arg_list');
279         texp = texp(:,2); # throw away timestamp row
280         printf("analyzing real data ... \n");
281
282         texp = texp * timebase;
283
284         ## do average
285         upper_lim = timebase*250
286
287         tmp = texp(texp>tmin);
288         tmp = tmp(tmp<=(upper_lim));$$$$ 
```

```

289 tmp = tmp - tmin;
290 length(tmp)
291 mean(tmp)
292
293 ## Histogramm der Rohdaten, gleiche Binbreite
294 figure(2)
295 subplot(1,2,1)
296 hist(texp,10);
297 lims = linspace(tmin, tmax, bincount+1);
298 n=dohist(texp, lims);
299 bar(bincenters(lims), log(n), 1.0);
300 title(['Raw_data_', num2str(length(texp)), '_samples', '_uniform_bins']);
301 ylabel('log(frequency)');
302 xlabel('τ [μs]');
303
304 ## Histogramm der Rohdaten, variable Binbreite
305 subplot(1,2,2)
306 n = dohist(texp, binlim);
307 bincenters = bincenters(binlim);
308 bar(bincenters, n, 1.0);
309 title(['Cut_raw_data_', num2str(sum(n)), '_samples', '_adaptive_bins']);
310 ylabel('frequency');
311 xlabel('τ [μs]');
312
313 doprint(" hist_experiment");
314
315 ## evaluate tautilde from samples...
316 binlim
317 tmin
318 tmax
319 timebase
320 roundbase
321
322 [tautilde, sigma, chi2] = auswertung(texp, binlim, 1)
323 endif
324
325 printf("done ... press_any_key_to_quit ...\n");
326 pause;
327
328 ### EOF

```

Anhang C

Versionsgeschichte

Version 37	2008-05-20T15:41:08.982653Z
Statistik Teil von Iris eingebaut und ergänzt	
Version 36	2008-05-20T12:25:09.898722Z
minimale korrektoren	
Version 35	2008-05-18T18:27:07.505185Z
Diverse Text- und Grafik-Beiträge von Natasche integriert.	
Version 34	2008-05-17T07:52:40.561849Z
Zusammenfassung von Dominik integriert.	
Version 33	2008-05-14T18:58:34.966493Z
Beschreibung der Untergrundmessungen korrigiert und erweitert; kleinere Ausbesserungen; Beschreibung der Resultate hinzugefügt.	
Version 32	2008-05-08T06:40:41.564089Z
Von Dominik: Unterabschnitt "Rechter Cut" integriert; Untergrundaufzeichnungen von Iris nachgefügt.	
Version 31	2008-05-03T21:16:13.881848Z
Korrekturen und Verbesserungen von Natascha eingearbeitet.	
Version 30	2008-04-28T05:27:09.314230Z
NIM Verschaltung Blockdiagramm und Bildquelle für Kosmische Strahlung von Natascha eingebaut	
Version 29	2008-04-22T20:02:57.022591Z
NIM logik steckbild von iris eingebaut	
Version 28	2008-04-22T12:52:42.730574Z
Beitraege von Iris bez. Anfangsbedingungen und Messverlauf integriert	
Version 27	2008-04-22T12:33:02.775332Z
added section "Signalverarbeitung" from Dominik	
Version 26	2008-03-27T09:37:25.482222Z
beitrag von natascha ueber myonen und untergrundmessungsablauf integriert	
Version 25	2008-03-27T08:57:50.682356Z
korrekturvorschlaege von natascha eingearbeitet	
Version 24	2008-02-21T08:09:23.988773Z
von iris: einfuehrungskapitel NIM logik eingearbeitet	

Version 23	2008-02-20T10:06:03.370755Z
messaufbau jpeg durch monochrom png ersetzt; labview flussdiagramm korrigiert	
Version 22	2008-02-15T13:12:23.733404Z
versionsgeschichte zum anhang hinzugefuegt	
Version 21	2008-02-15T12:13:26.268028Z
beschreibung der IN1/IN2 signale ueberarbeitet	
Version 20	2008-02-15T07:49:03.014046Z
abschnitt messaufbau und photomultiplier von werner eingearbeitet	
Version 19	2008-02-14T12:48:04.295292Z
flussdiagramme fuer auswertungsprogramm hinzugefuegt; auswertungs- und datenerfassungsprogramm beschrieben; literaturverzeichnis hinzugefuegt	
Version 18	2008-02-13T17:43:05.750365Z
flussdiagramm fuer datenerfassung hinzugefuegt	
Version 17	2008-02-13T15:23:59.632086Z
von dominik: also ich hab jetzt von Natascha die eingescannten Hochspannungskurven geschickt bekommen und in das tex-file eingefuegt. Es sind zwar "nur" die handgezeichneten Abbildung, dafür sieht man recht schön die Tangenten und die gewählte Hochspannung. Ich kann auch ein Diagramm in Excell machen, aber da weiß ich nicht wie das mit den Tangenten geht. Meiner Meinung nach würds reichen aber ich richt mich ganz nach der Mehrheit.	
Version 16	2008-01-29T14:04:23.789187Z
delay kurven pdfs durch richtig zugeschnittene ersetzt	
Version 15	2008-01-29T14:01:21.238795Z
diverse diagramme/tabellen hinzugefuegt	
Version 14	2008-01-28T21:57:03.620572Z
histogramme der untergrundmessungen hinzugefuegt	
Version 13	2008-01-28T17:09:19.162706Z
bounding boxen von delay kurven diagrammen optimiert; physikalische einheiten besser gesetzt;	
Version 12	2008-01-28T16:45:18.406910Z
aenderungen von dominik eingepflegt: ich bins nochmal. hab nur ein paar kleinigkeiten verändert und versucht den weißen Rand unten bei den Abbildungen weg zu bekommen. im großen und ganzen hat sich aber kaum was geändert, aber ich schick dir mal die "neue" version vom tuning-teil. ciao Dominik	
Version 11	2008-01-26T10:20:01.953892Z
diagramme zum tuning vergessen	
Version 10	2008-01-26T10:09:47.474741Z
tuning teil von dominik integriert; ich schick dir mal meinen zweiten Teil fürs Protokoll. Die Abbildungen bei den Delay-Kurven hab ich eingefuegt, aber bei der Hochspannung fehlen noch die eingescannten Bilder vom RAM-Buch. Die Tabellen hab ich abgetipselt, aber vorerst im tex-file auskommentiert, weil das ganze sonst sehr unleserlich wird. Vielleicht sollten wir die Tabellen auch in einem Anhang sammeln? Den Aufbau der Messungen hab ich nur beschrieben (Abbildungen müsste mir bitte wieder wer einscannen falls wir welche wollen). Für Verbesserungsvorschläge bin ich dankbar!	

Version 9	2008-01-26T09:28:25.933528Z
simulationsdiagramm hinzugefuegt	
Version 8	2008-01-25T15:18:20.616833Z
aufgeraemtes und kommentiertes octave auswertungsprogramm eingebunden	
Version 7	2008-01-24T18:41:34.535240Z
labview abbildungen hinzugefuegt	
Version 6	2008-01-24T14:15:39.521875Z
Einfuehrung/Szintillator teil von dominik eingebaut.	
Version 4	2008-01-16T12:04:10.563857Z
framework fuer myonen protokoll	

Literaturverzeichnis

- [1] Winfried A. Mitaroff, Vorlesungsunterlagen *Data Analysis of Experiments with Particle Detectors*, 2008
- [2] William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987
- [3] Thomas Bergauer, Handout *Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen*, 2008
- [4] Louis Costrell et al., *Standard NIM Instrumentation System* (DOE/ER-0457T), U.S. Department of Energy, May 1990
- [5] Claus Grupen, *Kosmische Strahlung*, Physik in unserer Zeit, Band 16, Ausgabe 3, Seiten 69-77, 1985
- [6] W.-M. Yao et al. (Particle Data Group), *Review of Particle Physics*, Journal of Physics G 33, 1 (2006) and 2007 partial update for edition 2008, <http://pdg.lbl.gov>
- [7] Manfred Krammer, *Grundlagen der Teilchendetektoren*, Vorlesung SS07, Kapitel 5 - Szintillatoren
- [8] G. Zech, *Einführung in Statistik und Messwertanalyse für Physiker*, FB-Physik, Universität Siegen, 2004