

Müonenerfall

Eine Anleitung zum Fortgeschrittenenpraktikum

W. Volken

F. Stoffel

6. August 1998

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Müonen und Elementarteilchen	2
1.2	Müonen in der kosmischen Strahlung	3
1.3	Der Müonenzerfall und die Müon-Lebensdauer	3
2	Das Prinzip des Experimentes	5
3	Messungen	7
3.1	Einschalten der Hochspannung für die Photomultiplier	7
3.2	Einstellen des Timings für die logischen Signale	7
3.3	Einstellung der Hochspannung	8
3.4	Kontrolle der Diskriminator-Schwellwerte	8
3.5	Messung des Zeitspektrums der Zerfallselektronen	9
3.6	Eichung der Zeitmessung	10
4	Auswertung	11

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Müonen und Elementarteilchen

Was sind die elementaren Bausteine der Materie? Man glaubte die Antwort bereits gefunden zu haben als man diejenigen Teilchen entdeckte, aus denen die Atome aufgebaut sind: Protonen, Neutronen und Elektronen. Mit der Entwicklung von grossen Beschleunigern (CERN, Fermilab, SLAC ...) wurden jedoch immer neue Teilchen entdeckt. Bald einmal verbuchte man einen Zoo von mehreren hundert verschiedenen Teilchen. Man war überzeugt, dass sich hinter dieser Vielfalt ein einfaches Schema verbirgt, so ähnlich wie das Periodensystem der Elemente Ordnung in die unzähligen chemischen Bindungen brachte. Das 'Periodensystem der Teilchenphysik' ist unter dem Namen *Standardmodell* bekannt. Demnach unterteilt man die Bausteine der Materie in zwei Gruppen: Quarks und Leptonen (siehe Tab. 1.1). Quarks treten in der Natur nicht als freie Teilchen auf sondern nur als gebundene Zustände von drei Quarks qqq (Baryonen genannt) und Quark-Antiquark-Paaren $q\bar{q}$ (Mesonen). Protonen und Neutronen gehören zur Gruppe der Baryonen, werden oft speziell auch als Nukleonen bezeichnet. Baryonen und Mesonen zusammen nennt man Hadronen. Die Kombinationsmöglichkeiten aus den 6 verschiedenen Quarksorten Hadronen zu bilden, macht die Vielfalt des Teilchenzoos aus. Die Leptonen hingegen sind direkt als einzelne Teilchen beobachtbar. Zu dieser Gruppe gehört auch das Müon (μ), um das es in diesem Versuch geht. Das Müon wird also nach der heutigen Theorie als elementar angesehen.

Nebst den Bausteinen der Materie beschreibt das Standardmodell auch die fundamenta-

Leptonen	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Quarks	u	c	t
	d	s	b

Tabelle 1.1: Quarks und Leptonen

len Kräfte (Wechselwirkungen WW) der Natur, die in der Teilchenphysik von Bedeutung sind. Es sind dies die starke, elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung. Die Gravitation als vierte fundamentale Kraft ist um viele Grössenordnungen schwächer als die schwache WW und spielt deshalb in der Teilchenphysik eine untergeordnete Rolle.

Kräfte zwischen Teilchen beruhen nach dem heutigen Verständnis auf dem Austausch von Quanten (Austauschteilchen oder auch Träger der WW genannt). Die fundamentalen Kräfte und ihre Träger sind in Tab. 1.2 zusammengefasst. Die μ -Lebensdauer, die in diesem Versuch gemessen werden soll, ist ein wichtiger Parameter der Physik. Unter Verwendung dieses Wertes (und des Weinbergwinkels) vermag das Standardmodell die Massen der intermediären Vektorbosonen (= Austauschteilchen der schwachen WW) vorauszusagen. Diese wurden 1983 im $p\bar{p}$ collider am CERN auch tatsächlich gefunden.

Kraft	Träger	wirkt auf	
		Leptonen	Quarks
starke	Gluonen: g_1, g_2, \dots, g_8	nein	ja
elektromagnetische	Photon: γ	ja	ja
schwache	Intermed. Vektorbosonen: W^+, W^-, Z^0	ja	ja

Tabelle 1.2: Wechselwirkungen und Austauschteilchen

1.2 Müonen in der kosmischen Strahlung

Die Atmosphäre der Erde steht unter einem ständigen Bombardement von hochenergetischen Teilchen aus dem Weltall. Diese Strahlung besteht vorwiegend aus Protonen und α -Teilchen sowie, mit weit geringerem Anteil allerdings, aus schweren Kernen, Elektronen und Photonen. In der Atmosphäre kommt es zu Wechselwirkungen mit den Atomkernen der Luft, wobei Sekundärteilchen (u.a. Photonen, Neutronen und Pionen) erzeugt werden. Die geladenen Pionen machen entweder weiter Reaktionen in der Atmosphäre oder zerfallen in Müonen und Neutrinos. Falls die Energie der so produzierten Müonen gross genug ist, dann erreichen diese die Erdoberfläche oder dringen gar bis zu mehreren Kilometern tief ins Erdinnere ein. Auf Meereshöhe sind ca. 75% aller geladenen Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung Müonen. Der Rest sind u.a. Elektronen sowie ganz wenige Hadronen. Der Fluss der geladenen kosmischen Strahlung auf Meereshöhe beträgt ca. $180 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (senkrechte Komponente). Die Müonen wurden in Experimenten der kosmischen Strahlung entdeckt. Es dauerte jedoch einige Zeit, bevor sie als schwere Version des Elektrons erkannt wurden.

1.3 Der Müonenzerfall und die Müon-Lebensdauer

Müonen sind nicht stabil sondern zerfallen gemäss:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{und} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Der Zerfall der Müonen wird charakterisiert durch ihre Lebensdauer τ , analog der Lebensdauer beim radioaktiven Zerfall instabiler Kerne. Die Anzahl der zerfallenen Müonen

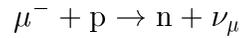
$\Delta N_\mu(t)$ im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ ist proportional zur Anzahl der Müonen $N_\mu(t)$ zur Zeit t :

$$\Delta N_\mu(t) = -\frac{1}{\tau} N_\mu(t) \Delta t \quad (1.1)$$

Integration dieser Gleichung ergibt:

$$N_\mu(t) = N_\mu(0) e^{-t/\tau} \quad (1.2)$$

Der genaue Wert der Müonenlebensdauer wurde in Experimenten an Teilchenbeschleunigern bestimmt und beträgt $(2.19703 \pm 0.00004) \mu s$. In diesem Experiment werden wir die Lebensdauer von Müonen in der kosmischen Strahlung mit Hilfe von Szintillationszählern messen. Da μ^- im Absorbermaterial jedoch gemäss



zusätzlich absorbiert werden können, ist die effektive Lebensdauer für μ^- kleiner. In Szintillatoren wurden hierfür eine Lebensdauer von $1.9 \mu s$ gemessen. Das Verhältnis von positiv geladenen Müonen zu negativ geladenen beträgt 1.25 - 1.30.

Im Kapitel 2 wird das Prinzip der Messung beschrieben. Die Durchführung der Messungen und die Datenanalyse werden in den Kapiteln 3 und 4 erläutert.

Kapitel 2

Das Prinzip des Experimentes

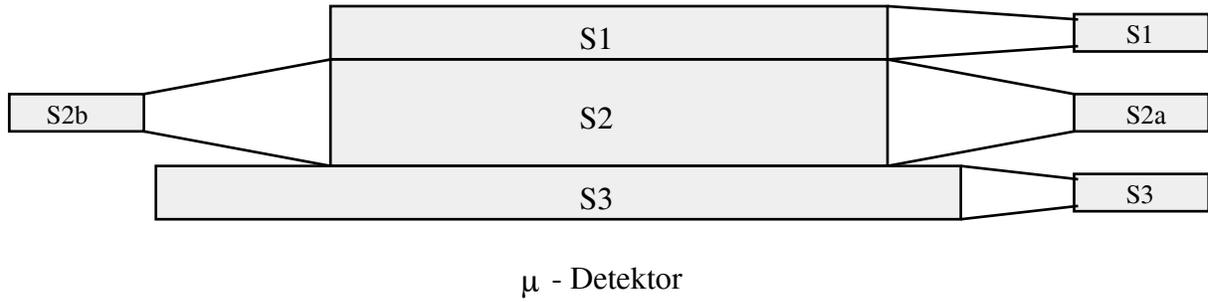
Die Idee der Messung ist die folgende: Wenn ein Müon in Materie stoppt, wird eine Uhr gestartet. Diese wird gestoppt, sobald das Müon zerfällt d. h. wenn das Zerfallselektron beobachtet wird. Ausgehend von Gleichung 1.2 überlege man sich, dass das so gemessene Zeitspektrum der Zerfallselektronen dN_e/dt proportional zu $e^{-t/\tau}$ ist. Aus dieser Verteilung kann somit die gesuchte Lebensdauer τ ermittelt werden.

Experimentell benötigt man also eine Apparatur, die den μ -Stopp sowie das Zerfallselektron nachweisen kann, und eine Uhr welche die Zeit zwischen diesen Ereignissen misst.

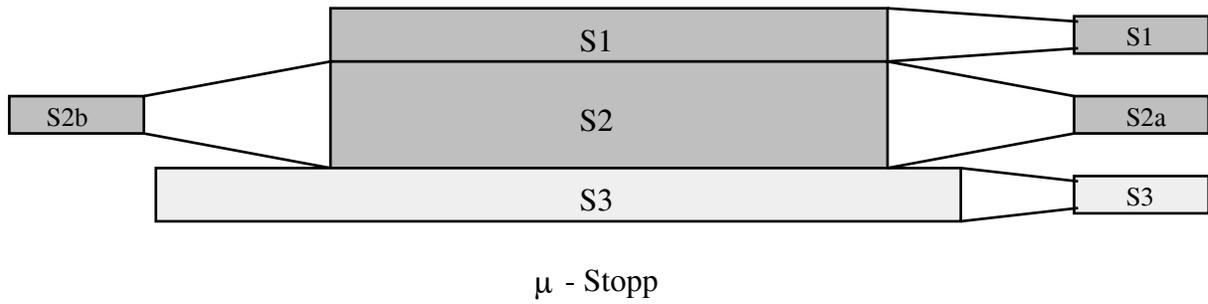
Um geladene Teilchen nachzuweisen werden in der Teilchenphysik oft Szintillationszähler verwendet. Durchquert ein geladenes Teilchen einen Szintillator, erzeugt es in diesem Lichtquanten. Das Licht wird mit einem Photomultiplier (PM) in elektrische Signale umgewandelt. Mit drei Szintillationszählern kann eine Apparatur gebaut werden, die den obigen Anforderungen genügt (Fig. 2.1a). Der oberste Zähler wird als S1, der mittlere als S2 und der unterste als S3 bezeichnet. Im Zähler S2 sollen die Müonen gestoppt werden. Da die Stopprate proportional zur Masse ist, muss S2 ein entsprechendes Volumen haben damit in endlicher Zeit genügend viele Müonen gestoppt werden können. Die Müonstopprate beträgt dabei etwa $1 \text{ gr}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$. Gemäss der Zähleranordnung ist die Signatur für einen Müonstopp gegeben durch $S1 \cdot S2 \cdot \bar{S}3$ (Fig. 2.1b). Das beim Zerfall des Müon's auftretende Elektron wird mit S2 detektiert. Um sicher zu sein, dass das Signal von S2 auch tatsächlich vom Zerfallselektron stammt und nicht bloss ein durch thermische Effekte im Photomultiplier generiertes Signal ist, wird S2 von zwei PMs (S2a und S2b) ausgelesen und Koinzidenz verlangt: $S2 = S2a \cdot S2b$.

Die Zeitdifferenz zwischen Müonstopp und Emission des Zerfallselektrons (Fig. 2.1c) wird mit einem Time-to-Amplitude-Converter (TAC) gemessen. Das ist ein Gerät, welches die Zeitdifferenz von elektronischen Signalen zwischen Start- und Stopp-Eingang misst und einen Spannungspegel (Amplitude) generiert, der der Zeitdifferenz proportional ist. Das Amplitudenspektrum kann dann mit einem Multichannel Analyzer (MCA) aufgezeichnet werden. Damit erhält man ein Spektrum, das proportional zum Zeitspektrum der Zerfallselektronen ist.

a)



b)



c)

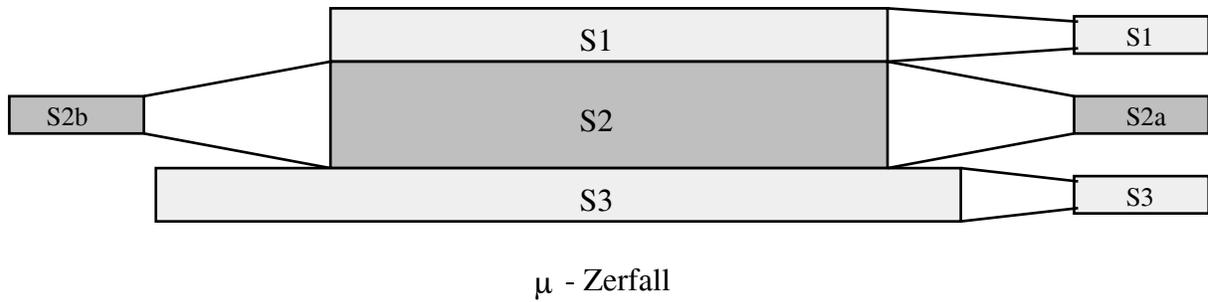


Abbildung 2.1: a) Aufbau des Müonenteleskops. b) Wenn das Müon im mittleren Zähler (S2) stoppt, gibt der unterste Szintillationszähler (S3) nicht an. c) Nachweis des Zerfallselektrons im mittleren Szintillationszähler.

Kapitel 3

Messungen

3.1 Einschalten der Hochspannung für die Photomultiplier

Für die Hochspannung der 4 Photomultiplier werden 2 Hochspannungsgeräte verwendet. Die Rohre S1, S2a und S2b werden via Verteilerbox von einem Power Supply gespeist. Der Zähler S3 ist an einem einzelnen Hochspannungsgerät angeschlossen. Nachdem Sie kontrolliert haben, dass die Schalter am HV-Gerät auf 0 V und die Polarität **positiv** eingestellt sind, betätigen Sie den Schalter POWER ON. Nach ca. 30 s leuchtet die Lampe STAND-BY auf. Schalten Sie jetzt HV ON. Erhöhen Sie die Hochspannung langsam in Schritten von 500 V bzw. 100 V auf etwa 2000 V für jeden Zähler.

Achtung: Bei eingeschalteter Hochspannung dürfen die Hochspannungskabel nicht mehr manipuliert werden.

Betrachten Sie am Oszillographen (KO) die PM-Signale. Bei tiefem Trigger level des KO's sehen Sie nur das Rauschen der PMs (hohe Rate; hohe Intensität auf dem KO). Durch Erhöhen des Trigger levels sehen Sie die realen Signale.

3.2 Einstellen des Timings für die logischen Signale

Um die elektrischen Signale der Photomultiplier (PM) logisch zu verarbeiten, müssen diese zuerst in logische Signale umgewandelt werden. Dies geschieht mit sogenannten Diskriminatoren. Falls das PM-Signal am Diskriminatoreingang einen gewissen Schwellwert (Threshold) übersteigt, wird am Ausgang ein logisches Signal zeitlich definierter Breite (Width) erzeugt. Threshold und Width können über Schraubpotentiometer an der Frontplatte des Diskriminators eingestellt werden. Die Threshold kann an einem Spannungsabgriff auf der Frontplatte kontrolliert werden.

Achtung: Der Wert an diesem Spannungsabgriff ist mit einem Faktor 10 multipliziert.

Eine Koinzidenzschaltung (logisches 'und'), wie z.B. $S1 \cdot S2 \cdot S3$ (sprich: S1 und S2 und S3) ist nur dann sinnvoll, wenn die logischen Signale untereinander zeitlich abgestimmt werden (Timing). Um das Timing einzustellen gebe man die PM-Signale auf die Eingänge der entsprechenden Diskriminatoren. Man stelle die Thresholds aller Diskriminatoren auf

50 mV ein. Dann schaue man die logischen Signale mit dem KO an. Unter Verwendung der Delay-Boxen stelle man das Timing entsprechend Fig. 3.1 ein. Es ist dabei wichtig, dass S1, S2a und S2b ganz innerhalb von S3 liegen. (Warum ? Hinweis: Der μ -Stopp ist definiert als $S1 \cdot S2a \cdot S2b \cdot \bar{S3}$). Nachdem das Timing eingestellt ist, kann die Hochspannung der einzelnen Photomultiplier eingestellt werden.

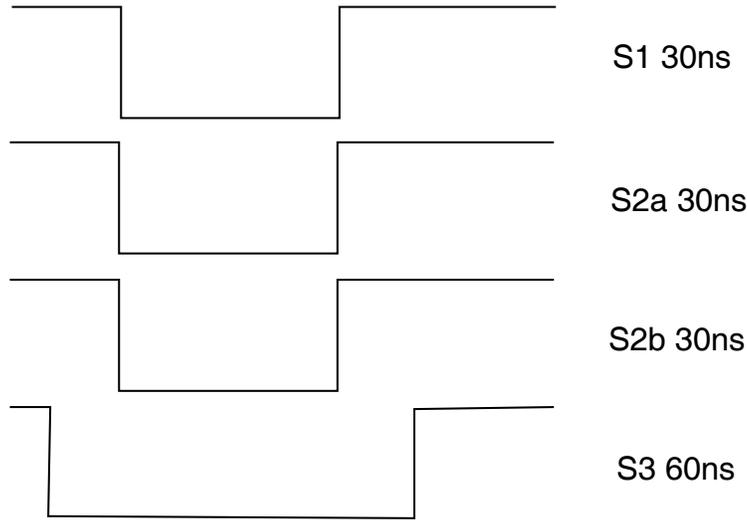


Abbildung 3.1: Timing der Signale S1, S2a, S2b und S3

3.3 Einstellung der Hochspannung

Aufgrund des bekannten Myonenflusses (vgl. Einleitung) und den bekannten Zählerdimensionen lässt sich die Myonenrate für die einzelnen Zähler abschätzen. (Wie gross sind diese Primärraten?). Die Hochspannungen der verschiedenen PMs sind nun im Prinzip so einzustellen, dass jeder Zähler mindestens diese Primärrate detektiert. Aus verschiedenen Gründen sind diese Raten jedoch zu klein. (Nenne ein paar Gründe!). Wähle deshalb die Hochspannungen so, dass die gemessenen Raten die Primärraten um einen Faktor 5 - 8 überschreiten.

3.4 Kontrolle der Diskriminator-Schwellwerte

Die Zähler sind jetzt effizient für durchgehende Teilchen eingestellt. S2a und S2b müssen aber zusätzlich sensitiv für das Zerfallselektron sein. Die Energiedeposition eines durchgehenden Teilchens im Szintillator beträgt im Mittel etwa 2 MeV/cm. Im mittleren Zähler (10 cm Dicke) werden etwa 20 MeV deponiert. Dieser Wert kann zur Eichung der Amplitudenspektren von S2a und S2b verwendet werden:

Die Ladung des PM-Signales (Fläche unter der Kurve) ist proportional zur Energiedeposition des Teilchens im Zähler. Zeichnet man die Ladungen der PM-Signale auf, so spricht

man von einem Amplitudenspektrum (= Energiespektrum der Teilchen). Das Amplitudenspektrum wird mit einem Multichannel Analyser (MCA) aufgenommen. Die PM-Signale sind jedoch zu schnell (Anstiegszeit ca. 2-3 ns) für den MCA-Eingang. Sie müssen zuerst mit einem Shaping-Amplifier in langsamere Signale (Anstiegszeit ca. $1 \mu\text{s}$) umgewandelt und invertiert werden (invertierender Eingang des Shaping-Amplifiers verwenden). Das Signal am Ausgang des Shaping-Amplifiers ist der Ladung des PM-Signales proportional. Für die Zerfallselektronen beträgt die Energiedeposition oft weniger als 20 MeV jenachdem wo das Müon gestoppt hat und in welcher Richtung das Elektron emittiert wurde. Deshalb muss der Diskriminator deutlich unterhalb von 20 MeV abschneiden. Ein vernünftiger Wert beträgt etwa 5 MeV. Damit man sieht, wo der Diskriminator abschneidet, nimmt man das totale Amplitudenspektrum (PM-Signale direkt d.h. ohne Diskriminator) und das diskriminierte Amplitudenspektrum (nur PM-Signale die über dem Diskriminator-Schwellwert liegen) auf. Das diskriminierte Spektrum erhält man, indem man vom Diskriminatoreingang ein 'Gate' für den MCA ableitet. Totales und diskriminiertes Spektrum müssen für gleiche Zeiten (ca. 5 Minuten) akkumuliert werden. Uebereinanderlegen der beiden Spektren lässt erkennen, bei welchem Wert der Diskriminator abschneidet. Die Diskriminator-Schwellwerte sind entsprechend zu korrigieren.

Hinweise zur Ableitung des Gates für den MCA:

Das Signal des Diskriminatoreinganges kann verwendet werden, um mit Hilfe einer Timing-Unit das Gate für den MCA zu generieren. Mit der Timing-Unit kann die nötige Verzögerung und die Breite des Gate's eingestellt werden. Der Gate-Eingang des MCA benötigt TTL-Signale. Deshalb muss das NIM-Signal der Timing-Unit mit einem NIM \rightarrow TTL Wandler angepasst werden.

3.5 Messung des Zeitspektrums der Zerfallselektronen

Nach diesen Vorbereitungen kann nun das Zeitspektrum der Zerfallselektronen mit dem Time-to-Amplitude-Converter (TAC) aufgenommen werden. Folgende Koinzidenzen werden zur Steuerung des TAC verwendet:

$S1 \cdot S2a \cdot S2b \cdot \bar{S}3$ (Müon Stopp) \rightarrow TAC-Start

$S2a \cdot S2b$ (Zerfallselektron) \rightarrow TAC-Stopp

Man sieht sofort, dass die Sache ohne zusätzliche Massnahmen nicht gut kommt, da der Müon-Stopp neben einem TAC-Start auch gleich einen TAC-Stopp generiert. Man muss $S2a \cdot S2b$ zu diesem Zeitpunkt am TAC-Stopp-Eingang ausblenden. Das erreicht man, indem man für den TAC-Stopp die Koinzidenz $S2a \cdot S2b \cdot \text{Gate}_{TAC}$ verwendet (siehe Fig. 3.2). Die Länge von Gate_{TAC} definiert den Zeitbereich, in dem man nach dem Zerfallselektron schaut. Er sollte etwa 8-10 μs gewählt werden. Der Messbereich des TAC ist auf 20 μs einzustellen. Das Zerfallselektron kann selbst einen Müon-Stopp generieren, falls dieses S1 durchquert. Das würde bedeuten, dass unmittelbar beim TAC-Stopp ein zweiter TAC-Start generiert wird. Um dies zu verhindern, muss die Länge des $S1 \cdot S2a \cdot S2b \cdot \bar{S}3$ Signales grösser als Gate_{TAC} gewählt werden (Fig. 3.2). Die Start- und Stopp-Signale des TAC reagieren auf die (negative) Flanke, und somit wird während der Länge von $S1 \cdot S2a \cdot S2b \cdot \bar{S}3$ kein weiterer Startimpuls akzeptiert. Der TAC-Ausgang liefert Pulse, deren Amplitude der Zeitdifferenz zwischen Müon-Stopp und Zerfallselektron proportional sind. Mit dem MCA kann diese Amplitudenverteilung monitoriert werden. Um genügend Statistik zu

erhalten, sollte die Messzeit ca. 2 bis 3 Tage sein. Der MCA verfügt über eine logarithmische Darstellung auf der man den exponentiellen Charakter des Zerfallsspektrums sofort erkennen kann. Nach Beendigung der Messung kann mit Hilfe von cursern der Inhalt des MCA-Spektrums herausgelesen werden. Es sind dabei Intervalle von etwa 5 Kanälen zu bilden.

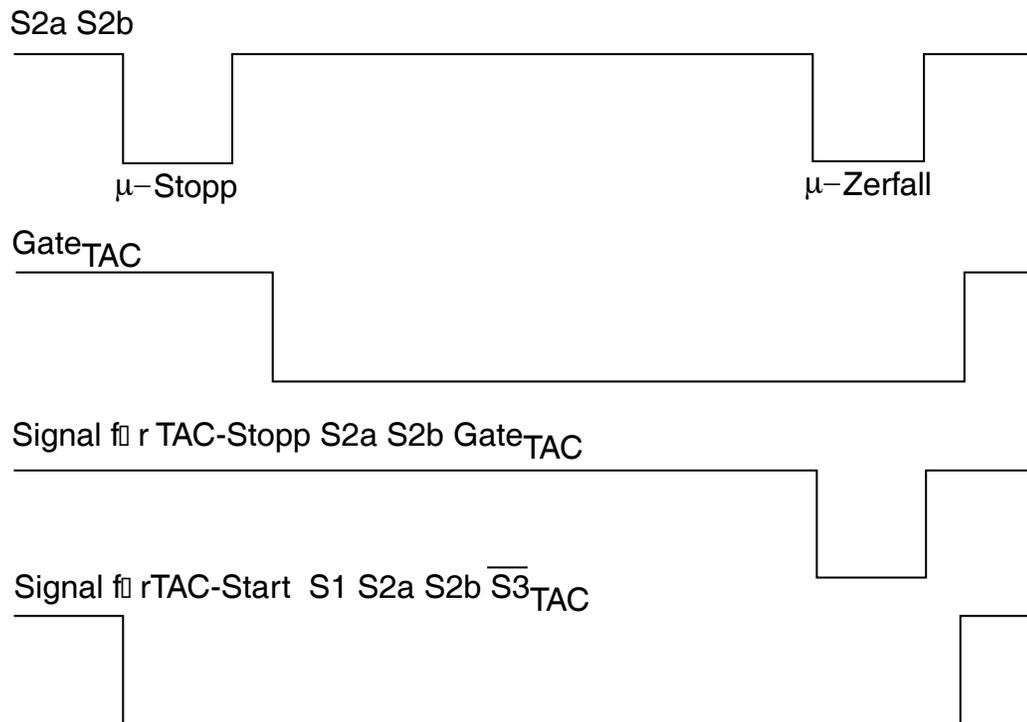


Abbildung 3.2: Signale zur Steuerung des TAC's

3.6 Eichung der Zeitmessung

Für die spätere Auswertung muss natürlich noch die x-Achse (Zeitachse) des MCA geeicht werden; d.h. man muss wissen, welcher Kanal welcher Zeit entspricht. Mit einer Timing-Unit können Start- und Stopp-Signale mit definiertem Zeitabstand generiert werden. Durch Variation dieses Zeitabstandes kann der Zusammenhang zwischen Kanalnummer und Zeit gemessen werden. Man prüfe die Linearität des TAC.

Kapitel 4

Auswertung

Die Datenanalyse beinhaltet die folgenden Punkte:

- Untergrund
- Bestimmen der Lebensdauer aus dem Spektrum
- Statistische Fehler
- Systematische Fehler

Der überwiegende Teil des Untergrundes sind zufällige Koinzidenzen, die nicht von zerfallenen Müonen herrühren. Da der Müonfluss viel grösser als die Müonstopprate ist, stammen die meisten Signale $S2a \cdot S2b$ nicht vom Zerfallselektron. Man überlege sich, dass der so induzierte Untergrund folgendermassen zu berechnen ist:

$$U_{tot} = N_s N_{S2aS2b} Gate_{TAC} / T \quad (4.1)$$

N_s ist die totale Anzahl der Müon-Stopps während der Messzeit T , N_{S2aS2b} ist die Zahl der $S2a \cdot S2b$ Signale in der Messzeit T und $Gate_{TAC}$ ist die Länge des $Gate_{TAC}$ -Signales.

Dieser Untergrund ist flach und von den Messwerten zu subtrahieren.

Der statistische Fehler für jeden Messpunkt ist gegeben durch \sqrt{N} wo N die Anzahl Events vor der Subtraktion des Untergrundes bedeutet.

Man bestimme nun die Lebensdauer des Müons.