

V01

Lebensdauer der Myonen

Durchführung: 14.05.2018

Abgabe: 29.05.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	1
1.1	Entstehung und Detektion der Myonen	1
1.2	Lebensdauer der Myonen	1
2	Durchführung	2
2.1	Versuchaufbau	2
2.2	Aufbau und Justierung des Versuchs	4
3	Auswertung	5
3.1	Bestimmung der Auflösungszeit	5
3.2	Bestimmung der Untergrundrate	6
3.3	Kalibrierung des VKA	7
3.4	Bestimmung der Lebensdauer	8
4	Diskussion	9

1 Theorie

1.1 Entstehung und Detektion der Myonen

Ziel dieses Versuchs ist es, die Lebensdauer kosmischer Myonen zu bestimmen. Durch Wechselwirkung hochenergetischer Protonen mit Luftmolekülen aus dem All entstehen in der Hochatmosphäre Pionen. Diese zerfallen aufgrund ihrer geringen Lebensdauer in Myonen und ihre entsprechenden Neutrinos. Der Zerfall verläuft wie folgt:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \text{ und } \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1)$$

Die so entstehenden Myonen bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit Richtung Boden. Die am Boden ankommenden Myonen können mithilfe eines Szintillationsdetektors nachgewiesen werden. Dies ist möglich, da die Myonen beim Durchqueren der Szintillatiormaterie ihre kinetische Energie im Szintillatiormaterial abgeben. Diese Energie führt dazu, dass die Szintillatiormoleküle angeregt werden und beim Abregen ein Photon emittiert wird. Dieses Photon kann durch einen Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) nachgewiesen werden. Der SEV absorbiert dabei das Photon und lässt ein Elektron aus. Dieses Elektron wird nun durch eine Beschleunigungsspannung weiter beschleunigt und trifft erneut auf einen Halbleiter oder ähnliches. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis zu einer Verstärkung von circa 10^5 . Da ein Großteil der Energie der Myonen in der Atmosphäre verloren geht, können drei verschiedene Fälle im Szintillator auftreten:

1. Das Photon tritt in den Szintillator ein und zerfällt dort. Hiermit kann die individuelle Lebensdauer der kosmischen Myonen bestimmt werden, da das Myon beim Eintritt und beim Zerfall ein Signal erzeugt. Das beim Zerfall entstehende Signal entsteht durch das Elektron des zerfallenen Myons, da dieses auch mit dem Szintillator wechselwirkt.
2. Das eintretende Myon ist negativ geladen. Dabei entsteht in der Szintillatiormaterie ein myonisches Atom durch Absorption. Das Myon füllt also einen leeren Platz in der Atomhülle auf.
3. Das eintretende Myon hat noch genug Energie um sich durch den Szintillator hindurch zu bewegen. Das Eintreten erzeugt zwar einen Impuls, dieser kann aber nicht zur Lebensdauerermessung genutzt werden. Mehr dazu in Kapitel Durchführung

1.2 Lebensdauer der Myonen

Zur Bestimmung der Lebensdauer wird zunächst die Wahrscheinlichkeit dW benötigt. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Myon im infinitesimalen Bereich zerfällt. Es wird ein proportionaler Zusammenhang zum Beobachtungszeitraum angenommen. Damit folgt dann der Zusammenhang:

$$dW = \lambda dt \quad (2)$$

λ stellt hierbei eine charakteristische Zerfallskonstante dar. Es zeigt sich, dass die Lebensdauer nicht vom Alter des Myons abhängig ist. Unter Annahme dieses Zusammenhangs und der Unabhängigkeit mehrerer Teilchen lässt sich folgern:

$$dN = -N dW = -\lambda N dt \quad (3)$$

Dabei ist dN die Zahl der Teilchen die im Zeitraum dt zerfallen sind, wenn N Teilchen beobachtet werden. Formel 3 lässt sich nun integrieren:

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Dabei ist λ die Zerfallskonstante, t die Zeit und N_0 die Gesamtanzahl der betrachteten Teilchen. Für die Lebensdauer folgt daraus eine Exponentialverteilung auf dem Intervall t bis dt .

$$dN(t) = N_0 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt \quad (5)$$

Der Erwartungswert der Verteilung wird als charakteristische Lebensdauer τ der Myonen identifiziert:

$$\langle t \rangle = \tau = \int_0^\infty \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

2 Durchführung

2.1 Versuchaufbau

Der Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 1 dargestellt. Der organische Szintillator befindet sich in einem zylinderförmiger Edeltank. An beiden Enden findet sich je ein SEV, der optisch an den Szintillator gekoppelt ist. Das Szintillatormaterial hat eine Abklingzeit von 10 ns. Die gesuchte Messgröße hier ist die Zeit zwischen zwei Lichtimpulsen. Diese Zeit kann mit einem Zeit-Amplituden-Konverter (TAC) gemessen werden. Der TAC gibt infolge eines Spannungsimpuls ab, dessen Amplitude ist proportional zur gemessenen Zeit zwischen den beiden Lichtimpulsen. Das Signal des TACs wird an einen Vielkanalanalysator weitergeleitet der das Signal histogrammiert. Die Daten werden dann von einem Computer aufgenommen und gespeichert. Die Daten können für eine

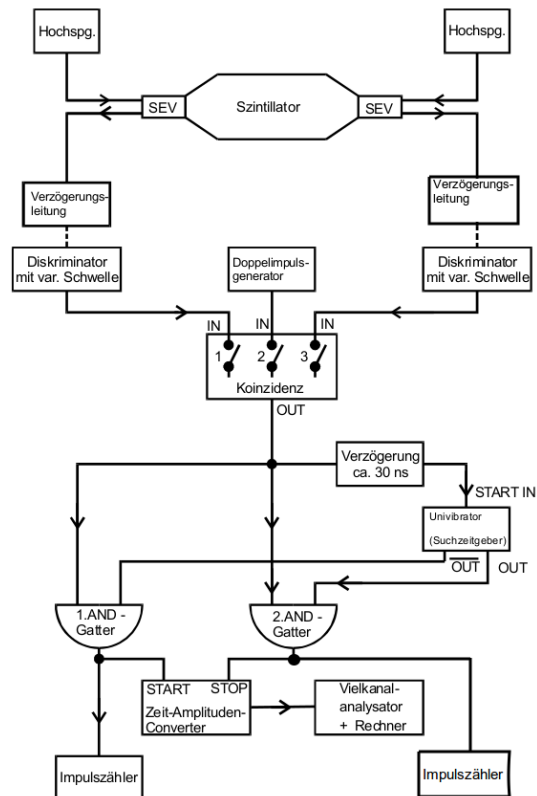


Abbildung 1: Veränderte schematische abbildung des Versuchsaufbaus nach [Abb].

nicht-lineare Ausgleichsrechnung für die Lebensdauer der kosmischen Myonen genutzt werden.

Die in Kapitel 1.1 beschriebenen Fälle müssen abgefangen werden. Ein Störprozess ist die spontane Elektronenemission der Photokathoden, da diese eine endliche Temperatur besitzen. Diese Elektronenemission führt auch zu einem Impuls, obwohl kein Myon gemessen wurde. Jedoch sind diese Signale relativ schwach. Sie werden mithilfe eines Diskriminators gefiltert, welcher alle Impulse unterdrückt, die zu klein sind. Für alle Signale die stark genug sind gibt der Diskriminator ein logisches Signal ab. Mit diesem logischen Signal lässt sich ein logischer Schaltkreis erstellen. Zudem wird ein zweiter SEV genutzt, da eine zu hohe Schwelle am Diskriminator auch echte Signale filtert. Die SEV werden an die Koinzidenz angeschlossen. Kommt nun in einem Zeitintervall Δt_K auf beiden Eingängen der Koinzidenz ein Signal an, so gibt die Koinzidenz ein Signal aus. Anders gesagt gibt die Koinzidenz also ein Signal falls beide SEV ein Myon gleichzeitig messen. Da der Lichtweg von einem SEV zum anderen circa 4 ns beträgt, kann es auch nicht zu einem Fehlsignal durch ein Elektron kommen, da die Wahrscheinlichkeit dafür das beide SEV in diesem Intervall ein Elektron emittieren sehr gering ist. Jedoch müssen der Kabelweg und schaltungstechnische Unterschiede berücksichtigt werden. Dies wird hier mithilfe zweier Verzögerungsleitungen bewerkstelligt.

Ein weiterer Störprozess ist die Aussendung eines Impulses. Um dies abzufangen, wird schaltungstechnisch eine Suchzeit T_S installiert. Diese Zeit startet bei einem Startimpuls des Myons und endet nach dem Eintreffen des Zerfallsimpulses. Falls kein Stop-Impuls angekommen, wird die Suche nach dem Stop-Impuls nach der Suchzeit abgebrochen. Dies wird hier mittels einer monostabilen Kippstufe und zweier AND-Gatter realisiert. Der stabile Zustand der monostabilen Kippstufe gibt ein Signal an das zweite AND-Gatter, welches die Suche abbricht. Also sollte der instabile Zustand der Kippstufe für die Suchzeit aufrecht erhalten bleiben. Die monostabile Kippstufe wird durch das Signal der Koinzidenz ausgelenkt. Am ersten AND-Gatter liegt nun ein Startimpuls, also ein H-Signal, an. Nach einer gewissen Verzögerung wird die Kippstufe angestoßen und der TAC misst nun die Zeit. Wird jedoch in der Suchzeit kein Signal vom zweiten AND-Gatter geliefert wird die Messung verworfen und der TAC gibt keinen Impuls von sich. Um zu wissen wie viele Messungen verworfen wurden, wird ein weiterer Impulszähler hinzugeschaltet. Falls jedoch zwei Myonen gleichzeitig in den Tank eintreten kommt es zu einem Fehlsignal. Diese Fehlsignale werden als Untergrundrate U bezeichnet. Da der Zeitabstand in dem zwei Myonen eintreffen ein statistischer Prozess ist, füllen sich die Kanäle des Vielkanalanalysators gleichmäßig auf. Diese Methode wird Stop-Uhr-Methode genannt.

2.2 Aufbau und Justierung des Versuchs

Zunächst wird überprüft, ob beide SEV funktionieren. Dies wird mit einem Oszillographen realisiert. Zur Vermeidung von Reflexionen sollte ein $50\ \Omega$ Widerstand zugeschaltet sein.

Danach werden die SEVs an die Diskriminatoren angeschlossen. Diese werden an den Oszillographen angeschlossen. Es sollten Impulse der gleichen Höhe und Breite zusehen sein von 20 ns. Falls dies nicht der Fall ist muss die Einstellung des Diskriminators nachjustiert werden. Als nächstes wird die Koinzidenz und die Verzögerung angeschlossen. Das Signal der Koinzidenz wird auf ein Zählwerk gegeben und die Verzögerungen werden variiert. Die Zählrate wird nun gegen die relative Verzögerung aufgetragen, um so ein Maximum zu bestimmen. Die Verzögerung sollte im mittleren Bereich dieses Plateaus liegen. Nun wird die Zählrate vor und nach dem Diskriminator gemessen. Ist kein Unterschied festzustellen, sollte die Diskriminatorschwelle gesenkt werden, da der Diskriminator sonst hier unnütz ist und zu viele Signale unterdrückt.

Der bis hierhin angeschlossene Teil wird nun abgeklemmt und durch einen Doppelimpulsgenerator ersetzt. Nun wird die Verzögerung und der Univibrator angeschlossen. Nun ist es möglich die Suchzeit T_S einzustellen. Der TAC wird nun auf die Suchzeit eingestellt. Jetzt können die AND-Gatter angeschlossen werden und mit dem Oszillographen überprüft werden. Es wird gemessen, ob die Signale, die in den TAC gehen, den passenden Zeitabstand haben. Die Messzeit am TAC liegt bei $20\ \mu\text{s}$. Durch Variation der Abstände der Doppelimpulse kann nun eingestellt werden, welcher Kanal welcher Zeit entspricht. Danach kann mit der Messung begonnen werden.

3 Auswertung

Die Messdauer betrug $t_{mess} = 153\,877\text{ s}$, welches ungefähr 42,45 h entspricht. Es wurden $N_{start} = 3551842$ Startsignale und $N_{stop} = 21418$ Stoppsignale gemessen. Die Gesamtheit der Counts, die der VKA registrierte, beträgt $N_{VKA} = 20031$ und als Suchzeit wurde $T_{such} = 20\ \mu\text{s}$ eingestellt. Die Anzahl der Kanäle, die gefüllt wurden, betrug $N_{Kanal} = 450$. Gefüllte Kanäle sind Kanäle, in die mindestens ein Signal eingelesen wurde und leere Kanäle, die zwischen zwei gefüllten Kanälen liegen.

3.1 Bestimmung der Auflösungszeit

Zur Bestimmung Auflösungszeit wurde T_{VZ} variiert und die Anzahl der Startimpulse gemessen. Die Messwerte befinden sich in der Tabelle im Anhang und sind in der folgenden Abbildung aufgetragen. Die Unsicherheiten können nach dem \sqrt{N} -Gesetz berechnet werden.

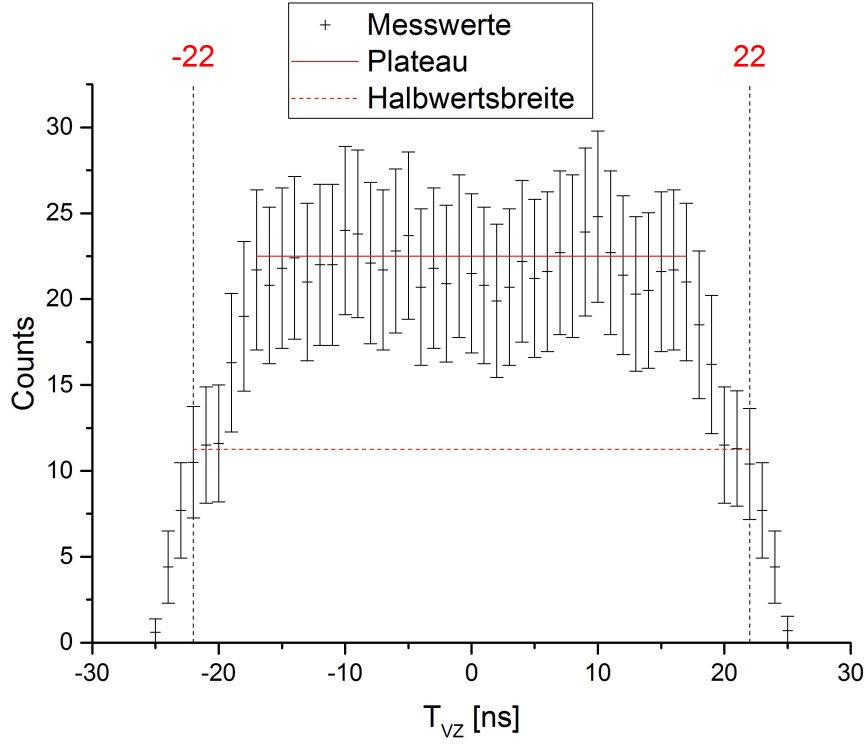


Abbildung 2: Fit zur Bestimmung der Auflösungszeit

Aus dem Fit wird eine Halbwertsbreite von $\Delta t = 44 \text{ ns}$ bestimmt. Damit berechnet sich Δt_K zu:

$$\Delta t_K = 2 \cdot 20 \text{ ns} - \Delta t = -4 \text{ ns} . \quad (7)$$

3.2 Bestimmung der Untergrundrate

Die durchschnittliche Anzahl der Myonen, welche in der Suchzeit T_{such} den Tank durchqueren, kann durch

$$\nu = \frac{N_{start}}{t_{mess}} = (23,08 \pm 0,01) \frac{1}{s} \quad (8)$$

berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass k weitere Myonen während der Suchzeit T_{such} eintreffen ist poisson-verteilt und wird durch

$$P_{T_{such} \cdot \nu}(k) = \frac{(T_{such} \cdot \nu)^k}{k!} e^{-T_{such} \cdot \nu} \quad (9)$$

berechnet. Für die Wahrscheinlichkeit, dass genau ein Myon während der Suchzeit T_{such} in den Tank eintritt, ergibt sich:

$$P_{T_{such} \cdot \nu}(1) = T_{such} \cdot \nu e^{-T_{such} \cdot \nu} = (0,046 \pm 0,002)\% . \quad (10)$$

Die Anzahl der Fehlmessungen berechnet sich zu:

$$N_U = N_{start} P_{T_{such} \cdot \nu}(1) = 1640 \pm 71. \quad (11)$$

Durch die Division der Kanalanzahl N_{Kanal} ergibt sich eine Untergrundrate von:

$$U = \frac{N_U}{N_{Kanal}} = (3,64 \pm 0,16) \frac{\text{counts}}{\text{Kanal}}. \quad (12)$$

3.3 Kalibrierung des VKA

Um den VKA zu kalibrieren, werden mittels eines Doppelpuls-Generators Doppelpulse mit unterschiedlichem Abstand erzeugt. Die Wertepaare von Kanalnummer in Abhängigkeit vom Doppelpulsabstand befinden sich in Tabelle 1. Für $T_{VZ} = 5$ s wurden Ereignisse in den Kanälen 110 und 111 registriert und daher wurde für die Kanalnummer ein gewichteter Mittelwert gebildet. Mit diesen wird ein linearer Fit (erstellt mit OriginPro 9.1) durchgeführt.

Tabelle 1: Messwerte für die Kalibrierung des VKA

Kanal	T_{VZ} [s]
22	1
44	2
66	3
88	4
110,82	5
133	6
155	7
177	8
199	9

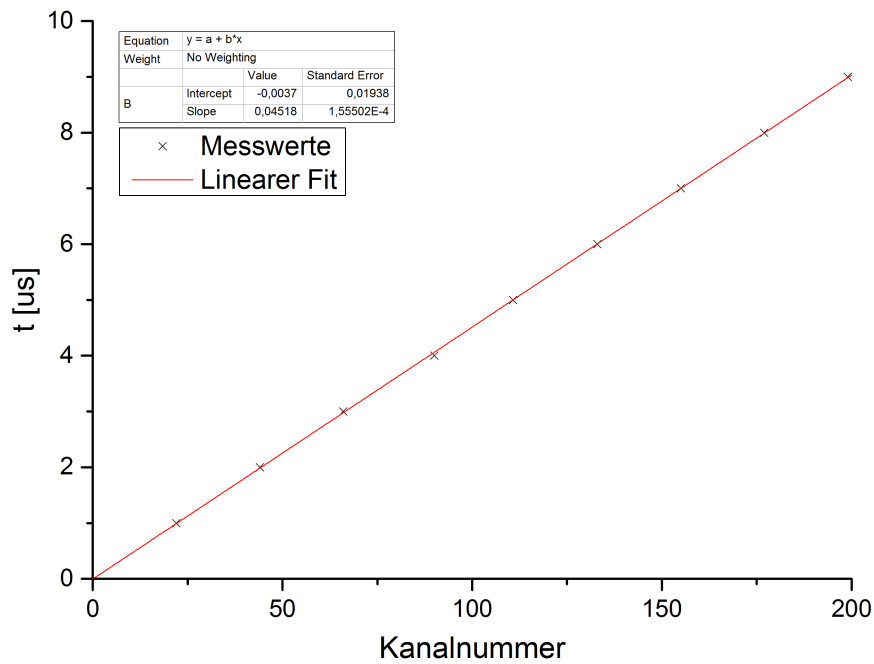


Abbildung 3: Linearer Fit zur Kalibrierung des VKA

Dem linearen Fit (erstellt mit OriginPro 9.1) wird

$$t = (0,04518 \pm 0,0002) \cdot \text{Kanalnummer} \cdot \mu\text{s} - (0,0037 \pm 0,01938) \mu\text{s} \quad (13)$$

entnommen.

3.4 Bestimmung der Lebensdauer

Mittels der im vorherigen Kapitel durchgeführten Kalibration werden die Kanalnummern in die Lebenszeit umgerechnet. Mit den Wertepaaren aus Counts und Lebenszeit wird ein nicht-linearer Fit der Form

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda \cdot t} + U_{Fit} \quad (14)$$

durchgeführt. Die gefittete Funktion ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

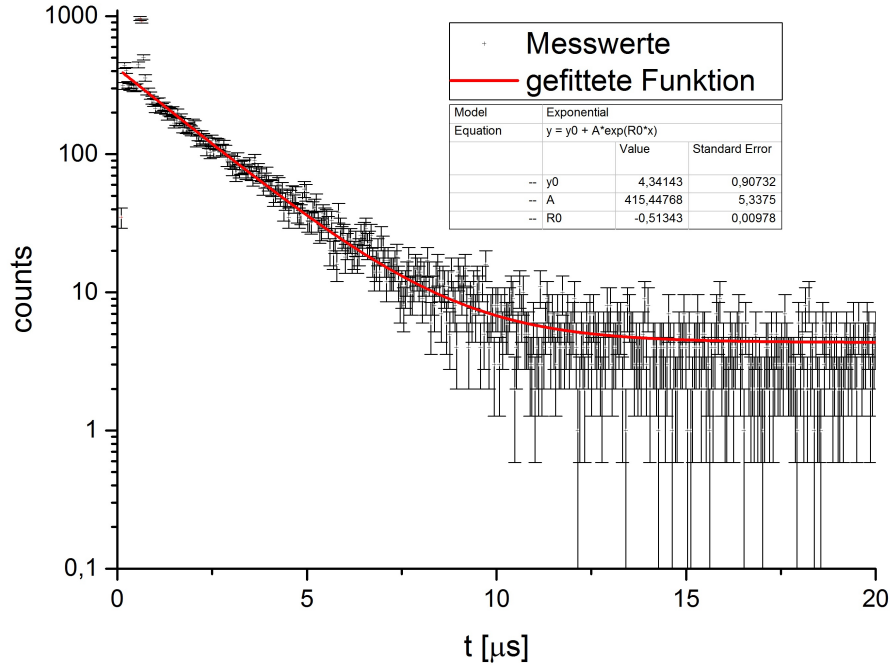


Abbildung 4: Counts in Abhängigkeit von der Lebensdauer

Die drei stark abweichenden Werte wurden im Fit nicht berücksichtigt, da diese durch Reflexionen in einem Kabel verursacht wurden. Es ergeben sich die Werte $N_0 = (415,5 \pm 5,3)$, $U_{Fit} = (4,34 \pm 0,91) \frac{\text{counts}}{\text{Kanal}}$ und $\lambda = (0,51343 \pm 0,00978) \frac{1}{\mu s}$. Somit ergibt sich für die Lebensdauer der Myonen

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = (1,95 \pm 0,04) \mu s.$$

4 Diskussion

Der Literaturwert für die Lebensdauer von Myonen beträgt $(2,1969811 \pm 0,0000022) \mu s$ [lifetime]. Der experimentelle Wert weicht um 11,2% ab, welches außerhalb der Fehlergrenze liegt. Als Fehlerquelle ist zu nennen, dass in der Szintillatormaterie durch Absorption von Myonen Myon-Atome entstehen können. Dies führt zu einer kürzeren Lebensdauer des absorbierten Myons. Des Weiteren weicht der theoretische Wert der Untergrundrate U_{Theo} vom experimentell bestimmten U_{Fit} ab:

$$U_{Theo} = \frac{N_U}{N_{Kanal}} = (3,64 \pm 0,16) \frac{\text{counts}}{\text{Kanal}}$$

$$U_{Fit} = (4,34 \pm 0,91) \frac{\text{counts}}{\text{Kanal}}.$$

Ein weiterer Fehler kommt durch die Kalibration zustande. Das verwendete Gerät hat einen empfindlichen Innenwiderstand und so kann der Schraubenzieher, der zur Einstellung der Verzögerungszeit T_{VZ} verwendet wurde, einen zusätzlichen Innenwiderstand liefern, falls er nicht komplett aus dem Gehäuse entfernt wurde. Das Zeitintervall $\Delta t_K = -4\text{ns}$ kann dadurch erklärt werden, dass zur genaueren Bestimmung mehr Messwerte an den Flanken benötigt werden. Es wurden $N_{stop} = 21148$ Stoppsignale gemessen und $N_{VKA} = 20031$ Signale im VKA registriert. Die Differenz ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass zwei Signale, die fast gleichzeitig eintreffen, vom VKA als ein Signal registriert werden.