

Versuch 01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Jonah Nitschke
lejonah@web.de

Sebastian Pape
sepa@gmx.de

Durchführung: 22.11.2017
Abgabe: 2. Dezember 2017

1 Zielsetzung

Der vorliegende Versuch behandelt die Ermittlung der Lebensdauer kosmischer Myonen. Zu Beginn wird in die Theorie des Versuches eingeleitet. Daraufhin wird die Messapparatur und die Durchführung der Messung beschrieben.

2 Theorie

Myonen μ sind Leptonen der zweiten Generation und besitzen eine Masse von $\approx 106 \text{ MeV}$. Sie entstehen zum Großteil in der oberen Atmosphäre durch Pion-Zerfälle und besitzen, resultierend aus dem Zerfall eine hohe kinetische Energie.

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

Myonen sind ca. 207 mal so schwer wie eine Elektron und Elektronen sind die leichtesten Leptonen. Somit ist klar, dass Myonen nicht stabil sein können.

Myonen zerfallen nach den folgenden Zerfallsgleichungen.

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (3)$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (4)$$

2.1 Lebensdauer

Die Lebensdauer τ eines instabilen Teilchens beschreibt die Zeit, nachder eine Teilchenpopulation auf $\frac{1}{e}$ ihrer ursprünglichen Anzahl abgefallen ist. Der Zerfall eines Teilchens ist ein stochastischer Prozess, der durch ein Exponentialgesetz der Form:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp -\frac{t}{\tau} \quad (5)$$

beschrieben wird. Die Zerfallskonstante λ entspricht der reziproken Lebensdauer.

3 Versuchsaufbau

Damit die Lebensdauer von Myonen bestimmt werden kann, dürfen nur Myonen gemessen werden, von denen die Einlaufzeit in den Versuchsaufbau bekannt ist und weiterhin deren Zerfallszeit nach eindringen gemessen wurde. Somit sind nur Myonen, die auch in dem Versuchsaufbau zerfallen relevant für die Messung. Im Folgenden wird der verwendete Versuchsaufbau beschrieben, der das herausfiltern dieser relevanten Ereignisse ermöglicht.

Grundlegend wird für die dedektion von Teilchen ist ein Szintillator. Geladene Teilchen, die den Szintillator durchqueren wechselwirken mit den Atomen im Szintillatormaterial. Durch diese Wechselwirkung können die Atome im Szintillator in einen angeregten Zustand überführen werden. Myonen haben eine hohe kinetische Energie und können mehrere MeV ihrer kinetischen Energie an das Szintillatormaterial abgeben. Die angeregten Szintillatoratome geben bei dem Übergang von dem angeregten Zustand in den Grundzustand einen Lichtquant ab, der von einer optisch an den Szintillator gekoppelten Photokathode dedektiert werden kann. An der Photokathodeliegt ein sekundärer Elektronenvervielfältiger (SEV) an. Der SEV verstärkt die Signale aus der Photokathode, damit sie dedektiert werden können.

Das Filtern der Ereignisse von Myonen, die auch in dem Szintillator zerfallen geschieht durch eine logische Schaltung. Diese Schaltung ist in Abb. 1 durch die beiden AND-Gatter und den Monoflop/Univibrator realisiert. Anliegende Spannungen werden im Folgenden als up und das fehlen von Spannungen als down bezeichnet. Wenn ein up aus der Koinzidenz (vgl. Abb. 1), deren Funktion im Verlauf der Durchführung noch erklärt wird, in die untere Schaltung einläuft wird zunächst der rechte Eingang des 1. und 2. UND-Gatter auf up gesetzt. Das aus der Koinzidenz stammende up wird mit einer Verzögerung von 30 ns an den Univibrator abgegeben. An dem einen Ausgang des Univibrators, der mit dem 1. UND verbunden ist, liegt im down Zustand ein up an (vgl 1; OÜT). Der zweite Ausgang ist mit dem 2. UND verbunden und gibt im down Zustand des Univibrators ein down weiter (OUT). Somit sind an dem 1. UND beide Eingänge mit einem up belegt und das Startsignal wird an einen Zeit-Amplituden-Konverter und Impulszähler gegeben. Der Impulszähler zählt lediglich die Anzahl der eintreffenden Startsignale. Der Zeit-Amplituden-Konverter wandelt die vergehende Zeit zwischen einem up an dem Starteingang und einem up an dem Stopeingang in eine dazu proportionalen Impuls. Die Zeit wird in der Höhe des Impulses kodiert. Ein einlaufendes up in den Univibrator kehrt die up und down Signale an den Ausgängen um. Nach einer eingestellten Zeit T_s geht der Monoflop in seinen Grundzustand zurück. T_s stellt die Suchzeit des Intervalls einer Myonenlebensdaueremessung dar. In dem Versuch wird $T_s = 10 \mu\text{s}$ gewählt. Der linke Eingang des 2. UND-Gatters empfängt nachdem der Monoflop ein up erhalten hat ebenfalls ein up, welches für die eingestellte Zeit T_s anliegt. Wird in diesem Zeitraum ein weiteres Signal von der Koinzidenz an den rechten Eingang des 2. UND-Gatters geleitet wird ein up an den Stop-Eingang des Zeit-Impuls-Konverters gegeben und die Zeitmessung ist abgeschlossen. Die in einem Impuls kodierte Zerfallszeit wird in ein

Vielkanalanalysator gegeben, welcher mit einem Computer verbunden ist. Der Rechner verarbeitet das Signal mit der geeigneten Software.

In dem Versuch sollen nur die durch Myonen erzeugten Ereignisse behandelt werden. Jedoch werden durch thermische Prozesse in dem Szintillatormaterial statistisch verteilt Elektronen gelöst, welche von den SEV als Myonenereignisse interpretiert werden. Um dieses thermische Rauschen zu unterdrücken gibt es zwei parallel angewendete Mechanismen. Die thermischen Störungen lösen in der Regel eine niedrige Spannung als die Myonenereignisse aus. Durch einen Diskriminator werden nur Ereignisse durchgelassen, die einen einstellbaren Schwellenwert U_0 übersteigen durchgelassen. Damit können thermische Ereignisse signifikant unterdrückt werden. Zudem werden die Ereignisse die den Schwellenwert des Diskriminatros übersteigen mit einheitlicher Spannungsamplitude weitergeleitet. Vor den Diskriminatoren sind Verzögerungen angebracht, damit Materialeigenschaften der Diskriminatoren kompensiert werden können.

Der zweite rauschunterdrückende Mechanismus ist die Koinzidenz. Diese lässt nur nahezu gleichzeitig einlaufende Signale passieren. Die einlaufenden Signale dürfen einen Zeitversatz von $\Delta t_k \approx 4 \text{ ns}$ besitzen. Die thermisch gelösten Elektronen entstehen örtlich verteilt in dem Szintillator und sind deutlich langsamer als durch Myonen entstehende Ereignisse und erreichen die Koinzidenz mit nur einer geringen Wahrscheinlichkeit in dem Zeitintervall Δt_k .

Der Versuch wird mit dem Aufbau aus Abb. 1 durchgeführt. In dem realen Aufbau ist ein weiterer Verzögerer vor dem rechten Diskriminator angebracht, sodass eine Verzögerung der beiden Messkanäle relativ zu einander eingestellt werden kann.

Der in Abb. 1 dargestellte Doppelimpulsgenerator wird für die Zeiteichung des Vielkanalanalysators verwendet, worauf in der Durchführung näherdrauf eingegangen wird.

Es wird ein organischer Szintillator verwendet, da dieser im Vergleich zu einem anorganischen Szintillator eine kürzere Totzeit besitzt. Insgesamt fasst der Szintillator 50l und ist mit Toluol befüllt.

3.1 Durchführung

Zu Beginn des Versuches wird der Versuchsaufbau gemäß 1 aufgebaut. Dabei wird der Aufbau während des Aufbaus mit einem Zwei-Kanal-Oszilloskop auf seine Funktionsfähigkeit überprüft. Die Schwellenwerte U_0 der Diskriminatoren werden so eingestellt, dass die Impulsrate der aus beiden Kanälen ungefähr übereinstimmt. Für das Zählen der Impulsrate werden die Messkanäle an den Impulszähler angeschlossen. Die Impulsrate sollte zwischen 20 und 40 Impulsen pro Sekunde liegen. Falls der aufgenommene Wert nicht in diesem Intervall liegt, kann die Schwellenspannung U_0 variiert werden, bis die Impulsrate den Anforderungen genügt.

Weiterhin gilt es die Verzögerer, die vor dem Diskriminatoren montiert sind ab zu gleichen, sodass die materialbedingte Verzögerung der Diskriminatoren kompensiert wird. Dies

ist essentiell für die Arbeitsweise der Koinzidenz. Dafür werden jeweils fünf Messwerte für die Einstellungsmöglichkeit der Verzögerer genommen. Währenddessen wird die Impulsrate mittels des angeschlossenen Impulszählers, welcher hinter der Koinzidenz liegt aufgenommen. Die Verzögerung, bei der die Impulsrate maximal ist, ist die von nun an einzustellende.

Die Koinzidenzapparatur kann durch Vergleich der Anzahl der vor ihr liegenden Impulse mit der hinter ihr überprüfen. Stimmen beide Werte überein, ist die Funktion als Rauschunterdrücker nicht gewährleistet und die Einstellungen müssen verändert werden.

Der Zeit-Amplituden-Konverter kann überprüft werden, indem vor die Koinzidenz ein Doppelimpulsgenerator angeschlossen wird. Der zeitliche Abstand der Doppelimpulse kann in Stufen von $1 \cdot 10^{-1} \mu\text{s}$ variiert werden. Die Funktionsfähigkeit des Doppelimpulsgenerator kann mit Hilfe des Zwei-Kanal-Oszilloskops überprüft werden. Der Zeit-Amplituden-Konverter arbeitet einwandfrei, wenn an seinem Ausgang Spannungsimpulse entstehen, die proportional zu der eingestellten Zeit des Doppelimpulsgenerators sind. Mit dem Zwei-Kanal-Oszilloskop ist die Arbeitsfähigkeit des Zeit-Amplituden-Konverter zu überprüfen.

Der Vielkanalanalysator wird justiert durch eine Kalibrierungsmessung. Dafür werden mit dem Doppelimpulsgenerator Spannungsimpulse erzeugt. Es werden so viele Werte aufgenommen, bis sich auf dem Rechner deutlich erkennbare Balken in den Kanälen entstanden sind. Die Zeit der aufeinanderfolgenden Doppelimpulse wird in Schritten von $1 \mu\text{s}$ erhöht von 0 bis auf $\approx 10 \mu\text{s}$.

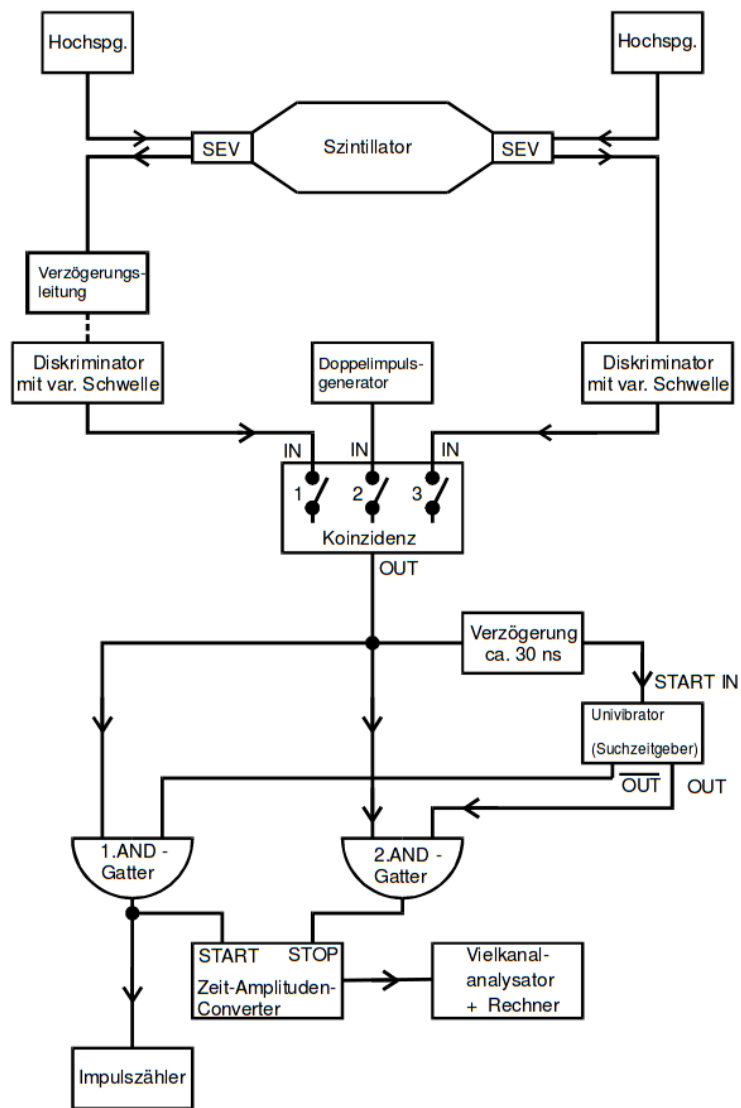


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau [1]

4 Auswertung

In dem folgenden Abschnitt sollen mithilfe der aufgenommenen Daten die Lebensdauer der Myonen bestimmt werden. Die Fehlerberechnung wird im folgenden mit dem Package *uncertainties* in *Python* durchgeführt. Da die Werte bei Berechnung des Plateaus sowie Ermittlung der Lebensdauer Fehlerbehaftet sind, wird für die Regression ein gewichteter Fit mit der Funktion *curve_fit* durchgeführt.

4.1 Einstellung der Verzögerungszeit

Um die abgegebenen Signale der Koinzidenzapparatur zu maximieren, wird während der Kalibrierung des Versuches die Verzögerungszeit T_{VZ} variiert. Die am Ausgang der Apparatur gemessene Anzahl an Signalen wird in Tabelle 1 wiedergegeben und ist in Abbildung 2 graphisch dargestellt. In den interessanteren Bereichen wurden mehrere Messwerte genommen, allerdings ist in Tabelle 1 immer nur der gemittelte Wert eingetragen. Die jeweiligen Zeiten sind mit einem Sternchen markiert. Ein negatives Vorzeichen bei der Verzögerungszeit entspricht einer Verzögerung bei dem linken SEV und ein positives Vorzeichen dementsprechend einer Verzögerung bei dem rechten SEV. Da es sich um eine Anzahl handelt, sind die Zahlen auf die 1er Potenz gerundet. Als Fehler wird für den Wert n immer \sqrt{n} angenommen.

Tabelle 1: Messwerte bei Einstellung der Verzögerungszeit.

T_{VZ} in ns	$N(T_{VZ}) \pm \Delta N$	T_{VZ} in ns	$N(T_{VZ}) \pm \Delta N$
-24	6 ± 2	0*	177 ± 8
-22	2 ± 1	1*	175 ± 7
-20	12 ± 3	2*	176 ± 7
-18	10 ± 3	4*	181 ± 7
-16	37 ± 6	6*	179 ± 7
-14	54 ± 7	8*	168 ± 6
-12	86 ± 9	10	140 ± 12
-10*	129 ± 8	12	120 ± 11
-8*	152 ± 6	14	63 ± 8
-6*	166 ± 6	16	40 ± 6
-4*	172 ± 7	18	0 ± 0
-2*	173 ± 7	20	0 ± 0
-1*	181 ± 8	0	0

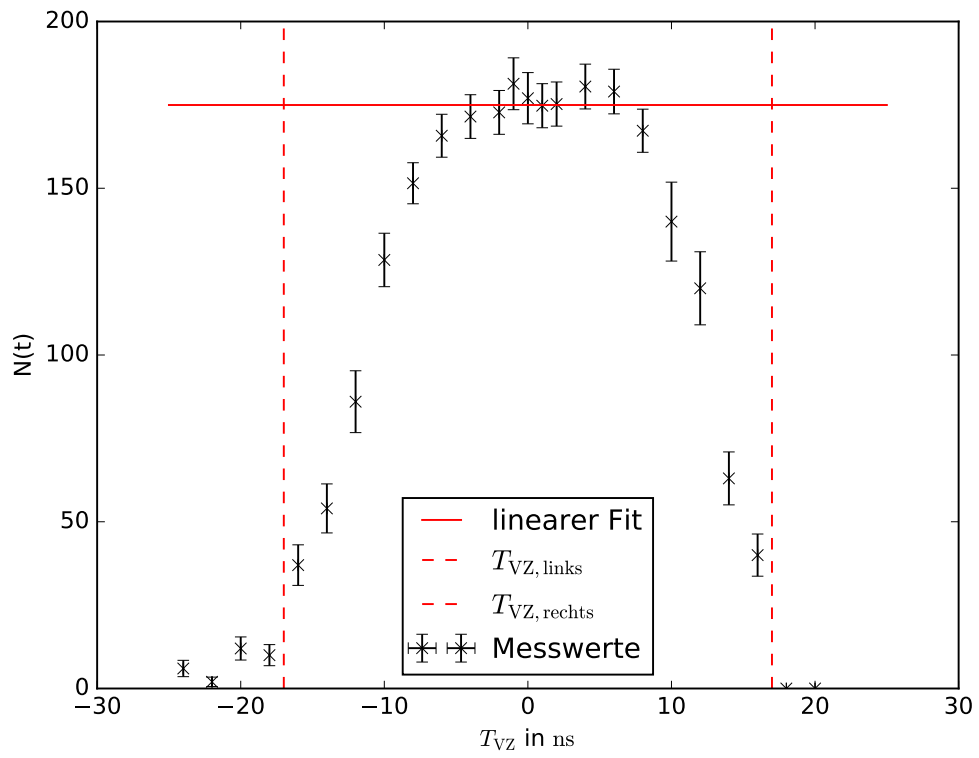


Abbildung 2: Plateau für die Impulsrate bei varrierter Verzögerungszeit.

$$N(T_{VZ}) = 0 \cdot T_{VZ} + N_{\max} \quad (6)$$

Durch die Werte im Intervall $T_{VZ} \in \{-6, 8\}$ wird ein linearer Fit ohne Steigung gelegt, so dass sich gemäß Formel (6) ein Maximalwert von $N_{\max} = (174 \pm 2)$ Impulsen pro Sekunde ergibt.

In Abbildung 2 ist erkenntlich, dass sich das Plateau über eine Verzögerungszeit von ca. 34ns erstreckt, also ungefähr der doppelten Breite der Impulslängen der einzelnen Impulse.

4.2 Kalibrierung des Vielkanalanalysators

Im nächsten Abschnitt wird die Kalibrierung des Vielkanalanalysators ausgewertet. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 2 eingetragen. Δt_{DI} gibt dabei den am Doppelimpuls-generator eingestellten zeitlichen Abstand an.

Tabelle 2: Belegte Kanäle bei der Kalibrierung mit eingestelltem Doppelpulsabstand.

Δt_{DI} in ns	0.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kanal	14	45*/46	90	135	179*/180	224	269	314	358/359*	403	444

Bei einigen Abständen wurden mehrere Kanäle belegt. Eigentlich muss hierfür eine Fehlerrechnung durchgeführt werden, im folgenden wird jedoch die Zuordnung von Impulsen bei der Kalibrierung in die mit einem Sternchen markierten Kanäle ignoriert. Somit wird eine fehlerlose Zuteilung der Kanäle zu den entsprechenden Zeiten angenommen, weshalb im folgenden keine Fehlerrechnung durchgeführt wird. Die Ergebniss sind noch einmal grafisch in Abbildung 3 dargestellt.

$$T(K) = A * K + B \quad (7)$$

Mithilfe von Formel (7) wird eine lineare Regression durchgeführt, um zu ermitteln, zu welchem Kanal welcher zeitliche Abstand gehört. Für die Parameter A und B ergeben sich dabei folgende Wert:

$$A = (0.02247 \pm 0.00005) \mu s \quad (8)$$

$$B = (-0.032 \pm 0.014) \mu s \quad (9)$$

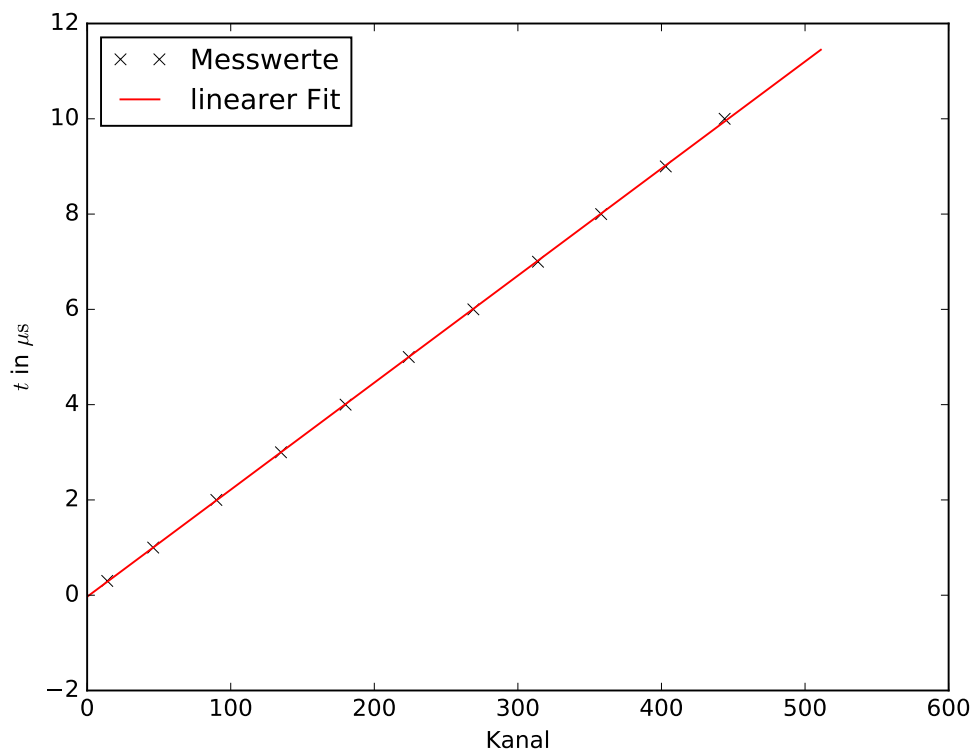


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Kanalbelegung und lineare Regression.

4.3 Bestimmung der Lebensdauer von kosmischen Myonen

In dem letzten Abschnitt der Auswertung wird die Lebensdauer der Myonen bestimmt. Die Messung wurde über einen Zeitraum von $T_{\text{ges}} = 81591$ s durchgeführt. Dabei wurden $N_{\text{Start}} = 1444133$ Startimpulse registriert sowie $N_{\text{Stop}} = 4255$ Stopimpulse. Die eingestellte Suchzeit beträgt $T_{\text{Search}} = 10 \mu\text{s}$. Mit diesen Werten lässt der Untergrund berechnen.

$$R = \frac{N_{\text{Start}}}{T_{\text{ges}}} = 17.7 \frac{\text{Impulse}}{\text{s}} \quad (10)$$

$$N_{\text{Search}} = R \cdot T_{\text{Search}} \quad (11)$$

$$W(1) = N_{\text{Search}} \cdot \exp N_{\text{Search}} \quad (12)$$

$$U_{\text{ges}} = W(1) \cdot N_{\text{Start}} \quad (13)$$

Zuerst wird die Rate der pro Sekunde ausgelösten Startsignale bestimmt (10), mit der dann die Anzahl von in der Suchzeit ausgelösten Signale (11) bestimmt wird. In der Versuchsanleitung wurde angegeben, dass die Wahrscheinlichkeit, dass k Myonen in der Suchzeit eintreffen gemäß einer Poisson-Verteilung gegeben ist. Somit ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Myon eintrifft $W = 0.00018$ %. Gemäß Formel (13) lässt sich dann die Anzahl der dem Untergrund zuzuordnenden Signale berechnen. Da sich die Untergrund Signale gleich auf jeden Kanal verteilen, ergeben sich pro Kanal $U_1 = 0.499$ Signale.

Im folgenden wird dieser Wert jedoch nicht verwendet, sondern lediglich mit einem durch die Regression ermittelten Wert verglichen. Die gemessene Verteilung der Stoppsignale auf die Kanäle ist in Tabelle ?? dargestellt. Für die Auswertung wurden dabei alle Kanäle vernachlässigt, deren gemessener Wert 0 ist. Jedem Kanal mit der Anzahl n wird als Fehler \sqrt{n} zugeteilt. Da hier ein gewichteter Fit durchgeführt wird, würden dabei Werte mit Fehler 0 eine Singularität hervorrufen.

$$N(t) = N_0 \cdot \exp -\lambda \cdot t + U_2 \quad (14)$$

Für die Auswertung der in Abbildung 4 dargestellten Werte wird an die Funktion (14) gefittet. Für die Parameter ergeben sich somit folgende Werte:

$$N_0 = (42 \pm 1) \quad (15)$$

$$\lambda = (0.558 \pm 0.018) \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s}} \quad (16)$$

$$U_2 = (1.02 \pm 0.13) \quad (17)$$

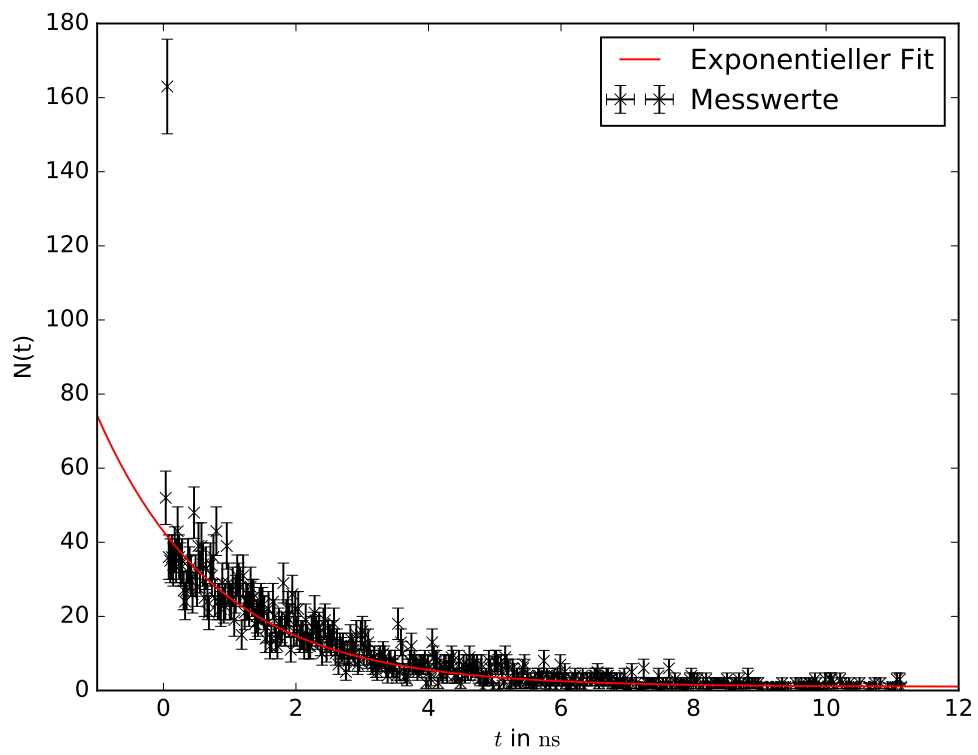


Abbildung 4: Gemessene Anzahl an Impulsen pro Kanal.

Durch die bestimmte Zerfallskonstante λ lässt sich dann die mittlere Lebensdauer τ der Myonen bestimmen:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = (1.79 \pm 0.06) \mu\text{s}. \quad (18)$$

5 Diskussion

6 Messwerte

Tabelle 3: Gemessene Impulse pro Kanal.

1 - 80		81 - 160		161 - 240		241 - 320		321 - 400		401 - 480		481 - 512	
K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C
1	0	81	16	161	5	241	3	321	0	401	0	481	1
2	0	82	17	162	13	242	2	322	1	402	2	482	0
3	0	83	29	163	10	243	4	323	1	403	1	483	0
4	52	84	16	164	5	244	6	324	1	404	1	484	2
5	163	85	20	165	4	245	7	325	6	405	0	485	0
6	36	86	22	166	3	246	2	326	1	406	0	486	0
7	35	87	19	167	6	247	4	327	2	407	0	487	0
8	36	88	11	168	8	248	2	328	2	408	1	488	0
9	34	89	26	169	12	249	3	329	2	409	0	489	1
10	38	90	16	170	7	250	2	330	2	410	0	490	0
11	35	91	22	171	8	251	1	331	2	411	1	491	0
12	43	92	16	172	7	252	3	332	2	412	1	492	1
13	36	93	22	173	5	253	2	333	1	413	0	493	0
14	34	94	14	174	6	254	4	334	0	414	1	494	1
15	35	95	15	175	7	255	4	335	4	415	1	495	3
16	27	96	15	176	7	256	3	336	1	416	0	496	0
17	24	97	12	177	7	257	3	337	1	417	1	497	3
18	27	98	19	178	8	258	8	338	2	418	2	498	1
19	35	99	14	179	2	259	1	339	1	419	0	499	0
20	33	100	12	180	7	260	4	340	2	420	1	500	0
21	31	101	12	181	5	261	3	341	0	421	0	501	0
22	26	102	16	182	3	262	1	342	6	422	1	502	0
23	48	103	17	183	13	263	3	343	2	423	0	503	0
24	31	104	21	184	9	264	3	344	1	424	0	504	0
25	28	105	16	185	8	265	4	345	0	425	0	505	0
26	39	106	15	186	8	266	1	346	3	426	0	506	0
27	32	107	17	187	2	267	4	347	2	427	2	507	0
28	39	108	13	188	6	268	3	348	0	428	0	508	0
29	34	109	10	189	5	269	7	349	1	429	1	509	0
30	25	110	18	190	4	270	3	350	2	430	0	510	0
31	33	111	19	191	7	271	3	351	2	431	2	511	0
32	24	112	11	192	7	272	5	352	1	432	1	512	0
33	21	113	15	193	4	273	2	353	1	433	1		
34	34	114	14	194	7	274	1	354	2	434	1		
35	31	115	13	195	7	275	1	355	1	435	0		
36	36	116	15	196	9	276	2	356	3	436	2		
37	25	117	18	197	8	277	3	357	4	437	2		
38	43	118	10	198	4	278	3	358	0	438	1		
39	24	119	13	199	4	279	4	359	3	439	1		
40	24	120	7	200	4	280	1	360	2	440	3		

1 - 80		81 - 160		161 - 240		241 - 320		321 - 400		401 - 480		481 - 512	
K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C
41	22	121	12	201	8	281	0	361	3	441	2		
42	29	122	11	202	2	282	2	362	0	442	1		
43	23	123	12	203	5	283	3	363	1	443	1		
44	24	124	10	204	7	284	4	364	0	444	0		
45	39	125	5	205	4	285	1	365	2	445	0		
46	29	126	10	206	7	286	0	366	0	446	1		
47	24	127	8	207	5	287	3	367	3	447	3		
48	24	128	14	208	9	288	0	368	1	448	0		
49	28	129	12	209	5	289	3	369	1	449	1		
50	19	130	11	210	7	290	3	370	2	450	3		
51	26	131	10	211	7	291	0	371	0	451	3		
52	31	132	15	212	6	292	4	372	0	452	2		
53	29	133	7	213	7	293	4	373	2	453	1		
54	28	134	8	214	4	294	5	374	2	454	0		
55	15	135	15	215	3	295	2	375	2	455	0		
56	31	136	16	216	7	296	3	376	2	456	0		
57	21	137	10	217	1	297	3	377	2	457	3		
58	24	138	15	218	3	298	3	378	2	458	2		
59	24	139	9	219	4	299	0	379	2	459	0		
60	22	140	13	220	3	300	4	380	0	460	0		
61	28	141	10	221	8	301	4	381	3	461	1		
62	25	142	8	222	6	302	3	382	1	462	0		
63	25	143	7	223	3	303	3	383	0	463	2		
64	18	144	9	224	1	304	2	384	1	464	1		
65	20	145	6	225	8	305	1	385	1	465	0		
66	19	146	5	226	8	306	2	386	2	466	1		
67	23	147	8	227	7	307	3	387	2	467	0		
68	24	148	9	228	1	308	2	388	0	468	1		
69	23	149	8	229	7	309	3	389	3	469	0		
70	21	150	10	230	5	310	2	390	1	470	2		
71	14	151	9	231	2	311	2	391	0	471	0		
72	17	152	6	232	9	312	4	392	2	472	0		
73	22	153	4	233	7	313	1	393	0	473	0		
74	12	154	8	234	6	314	1	394	1	474	0		
75	14	155	8	235	1	315	1	395	4	475	0		
76	24	156	6	236	2	316	2	396	2	476	1		
77	20	157	6	237	6	317	5	397	0	477	1		
78	14	158	8	238	5	318	0	398	2	478	0		
79	12	159	4	239	2	319	0	399	0	479	0		
80	18	160	18	240	4	320	2	400	2	480	2		

Literatur

- [1] TU-Dortmund. *V01: Lebensdauer der Myonen*. 2. Dez. 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V01.pdf>.