

Versuch 01 – Lebensdauer der Myonen

Marco Lafrentz Philipp Leser

12.02.2007 – Abtestiert am 27.02.2007

Ziel des durchgeführten Versuchs ist die Bestimmung der Lebensdauer des Myons.

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	2
1.1. Einleitung	2
1.2. Die Lebensdauer als statistische Größe	2
2. Versuchsaufbau und Durchführung	3
3. Auswertung	6
3.1. Einjustierung der Koinzidenzapparatur	6
3.2. Kalibrierung der Zeitachse	6
3.3. Bestimmung der Untergrundrate	8
3.4. Bestimmung der Lebensdauer von Myonen	9
A. Anhang	14
A.1. Literatur	14
A.2. Messdaten	14

1. Theorie

1.1. Einleitung

Im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik nimmt man zwei Gruppen von elementaren Teilchen an: Quarks, aus denen die Nukleonen und andere schwere Teilchen zusammengesetzt sind und die der starken Wechselwirkung unterliegen, sowie Leptonen wie beispielsweise das Elektron oder das Myon, die nur schwach und elektromagnetisch wechselwirken¹.

Innerhalb der Leptonen unterscheidet man zwischen drei Familien, die nach Lebensdauer und Masse sortiert sind, beginnend mit den leichtesten Teilchen:

- Elektron e^- , Positron e^+ , (Anti)-Elektronneutrino $\nu_e, (\bar{\nu}_e)$,
- Myon μ^- , Antimyon μ^+ , (Anti)-Myonneutrino $\nu_\mu, (\bar{\nu}_\mu)$,
- Tauon τ^- , Antitauon τ^+ , (Anti)-Tauneutrino $\nu_\tau, (\bar{\nu}_\tau)$.

Die Masse des hier interessierenden Myons ist etwa 207 mal größer als die des Elektrons ($m_e = 511 \text{ keV}$). Das Myon und sein Antiteilchen zerfallen unter der schwachen Wechselwirkung nach einer charakteristischen Lebensdauer über folgende Prozesse, deren FEYNMAN-Graphen in der Abbildung 1 zu finden sind:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.\end{aligned}$$

Die charakteristische Lebensdauer, nach der die genannten Zerfälle stattfinden ist Gegenstand dieses Versuchs.

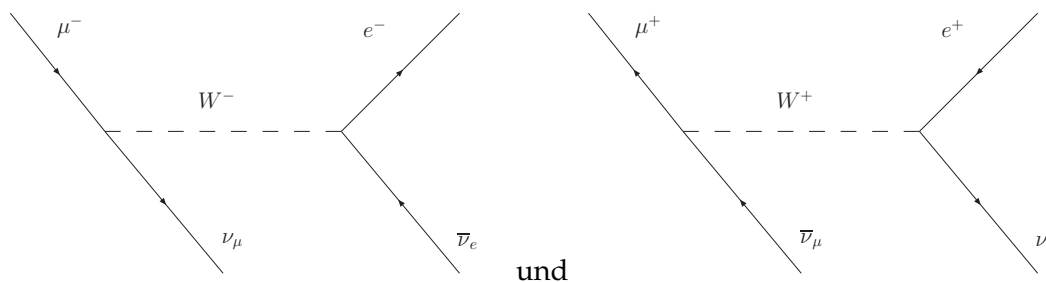


Abbildung 1: FEYNMAN-Diagramme der Myonzerfälle. Der Zerfall findet über die schwache Wechselwirkung durch Austausch eines W -Bosons statt.

1.2. Die Lebensdauer als statistische Größe

Der Zerfall eines Myons ist ein statistischer Prozess. Man geht davon aus, dass für infinitesimale Zeiten eine Proportionalität zwischen der Wahrscheinlichkeit des Zerfalls dW und dem Zeitintervall dt besteht:

$$dW = \lambda dt.$$

¹Die Gravitation bleibt in der Teilchenphysik außen vor.

Betrachtet man nun die Änderung der Gesamtteilchenzahl dN , so erhält man

$$dN = -\lambda N dt.$$

Diesen Ausdruck kann man integrieren, um die zeitliche Entwicklung der Gesamtteilchenzahl N zu ermitteln:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Möchte man die Verteilungsfunktion der Lebensdauer t erhalten, bestimmt man die Anzahl der Teilchen, deren Lebensdauer im Intervall dt liegt. Die gefundene Verteilungsfunktion bezeichnet man als *Exponentialverteilung*:

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \lambda e^{-\lambda t} dt.$$

Den Erwartungswert der Lebensdauer $\mathbb{E}t = \tau$ ermittelt man wie von anderer Stelle her bekannt als Integral über das Produkt aus der Observablen und der Verteilungsfunktion. Man stellt fest, dass gilt

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Die eingangs definierte Größe λ bezeichnet man als *Zerfallskonstante*; sie ist reziprok zur Lebensdauer τ . Durch Einsetzen von τ in $N(t)$ erkennt man, dass τ die Zeit ist, nach der noch $1/e \cdot N_0$ Teilchen übrig sind. Im Gegensatz zu dieser Größe benutzt man in der Kernphysik meist die Halbwertszeit, die die Zeit darstellt, nach der noch die Hälfte der ursprünglichen Teilchenzahl vorhanden ist.

2. Versuchsaufbau und Durchführung

Die Myonen, die in diesem Versuch untersucht werden sollen, entstehen bei π -Mesonenzerfällen in der oberen Atmosphäre und gelangen wegen ihrer hohen Geschwindigkeit anteilhaft bis hinunter zur Erdoberfläche. Wichtig für diesen Versuch ist, dass die Myonen nicht "altern", d.h. die Zerfallswahrscheinlichkeit ist konstant. Aus diesem Grund kann man die Messung hier auf der Erdoberfläche stattfinden und die Quelle der Myonen spielt keine weitere Rolle.

Es wird nun ein Szintillationsdetektor benutzt, um die Lebensdauer der Myonen in der Szintillatormaterie zu ermitteln. Vereinfacht dargestellt funktioniert der Messprozess wie folgt: Die Myonen fallen mit hoher Geschwindigkeit (nahe c) in den Szintillator ein und regen die Materie² an, was zu einem Lichtblitz führt. Durch diesen Lichtblitz wird eine Stoppuhr gestartet. Nach kurzer Zeit zerfällt das Myon, wobei Energie frei wird, die einen erneuten Lichtblitz erzeugt. Dieser wird detektiert und stoppt die Zeitmessung. Die gemessene Zeit wird aufgenommen und es kann eine weitere Messung beginnen.

In der Praxis führen einige störende Effekte dazu, dass größere Umsicht geboten ist und aufwendigere Technik notwendig ist. Die benutzte Apparatur wird wie

²Hier wird Benzol genutzt. Einige Bindungselektronen des Benzols sind fast frei, ähnlich wie in einem Festkörper. Diese Elektronen werden primär angeregt.

in der Abbildung 2 dargestellt beschaltet. Zunächst muss bedacht werden, dass die Lichtblitze einzelner Zerfälle nur sehr schwach sind. Die an den Enden des Detektor angebrachten Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) sind dennoch in der Lage, die Lichtblitze nachzuweisen und in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Die Lichtblitze und Spannungsimpulse haben eine Dauer von etwa 10 ns, was klein gegenüber der Lebensdauer des Myons ist. Die unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften der SEV kann man durch die eingebaute Verzögerungsleitung ausgleichen, welche hier auf 0.5 ns eingeregelt wird.

Als nächstes finden sich in der Schaltung Diskriminatoren. Diese lassen nur Signale ab einer bestimmten Stärke hindurch, womit ein Rauschen durch thermische Elektronenemission unterdrückt werden soll. Ebenfalls geben sie ein digitales Signal bestimmter Länge aus, hier 50 ns.

Die folgende Koinzidenzlogik dient ebenfalls dem Zweck der Rauschunterdrückung: Es kann passieren, dass die SEV ohne durch das Myon erzeugte Lichtblitze auslösen, was man vermeiden will. Die Koinzidenzlogik lässt das Signal nur durch, wenn beide SEV innerhalb einer kurzen Zeitspanne (< 4 ns) einen Blitz melden. Da das Rauschen statistisch verteilt ist, werden wohl kaum beide Detektoren gleichzeitig ein solches falsches Signal liefern. Die Eigenschaften der Koinzidenzschaltung kann man mit der variablen Verzögerungsleitung testen, indem man die Zählraten hinter der Schaltung bei verschiedenen Verzögerungen aufnimmt. Praktisch findet man die optimale Einstellung der Verzögerung jedoch leicht mit einem schnellen Oszilloskop.

Hinter der Koinzidenzlogik findet sich nun die eigentliche Stoppuhrschaltung. Im Ruhezustand ist ein Eingang des 1. AND-Gatters auf H geschaltet. Fällt nun ein Myon ein und die Koinzidenzlogik liefert ein Signal, so wird auch der andere Eingang des 1. AND-Gatters kurzzeitig auf H gelegt. Dadurch wird ein Startsignal an den Zeit-Amplituden-Konverter (TAC) durchgereicht. Dieser beginnt nun zu zählen. Gleichzeitig wird jedoch auch der Univibrator gestartet, was dazu führt, dass nun auf einem Eingang des 2. AND-Gatters H anliegt. Fällt innerhalb der Suchzeit des Univibrators ein zweiter Lichtblitz ein (Zerfall des Myons), so wird das 2. AND-Gatter durchgeschaltet, wodurch der TAC gestoppt wird. Dieser gibt dann ein zur Dauer proportionales Signal an den Vielkanalanalysator weiter.

Verstreicht die Zeit, ohne dass ein zweites Signal eintritt, geht der Univibrator und damit die gesamte Schaltung wieder in die Ausgangssituation zurück. Als *Time Range* für den TAC sowie als Zeitkonstante für den Univibrator wird hier eine Zeitdauer von $20\mu\text{s}$ gewählt.

Nach einer genügend langen Messzeit (> 20 h) liegen nun im Vielkanalanalysator Daten vor, aus denen man die Verteilungsfunktion und damit die Lebensdauer der Myonen empirisch ermitteln kann.

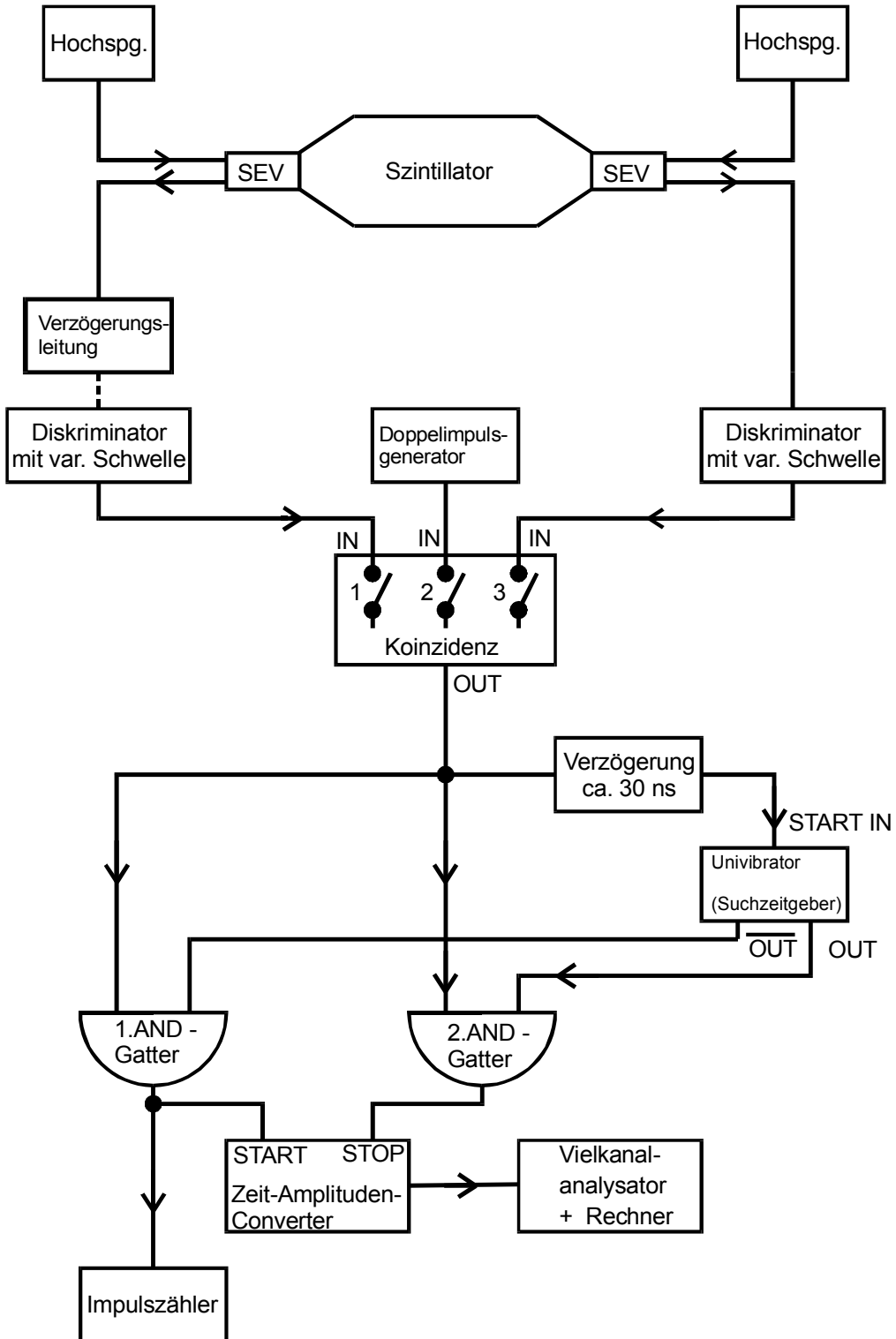


Abbildung 2: Schaltplan für die Apparatur zur Lebensdauerermessung von Myonen. [1]

3. Auswertung

3.1. Einjustierung der Koinzidenzapparatur

Um mögliche Differenzen in den Kabelängen der Messkanäle auszugleichen, werden systematisch zusätzliche Verzögerungen eingebaut. Es werden die in einem Zeitintervall von 20s registrierten Start-Signale in Abhängigkeit von den Verzögerungen gemessen:

Counts	$t_{VZ}[ns]$	Counts	$t_{VZ}[ns]$
475	0		
501	+0,5	420	-0,5
484	+1,0	452	-1,0
488	+1,5	420	-1,5
460	+2,0	463	-2,0
438	+2,5	469	-2,5
479	+3,0	451	-3,0
457	+3,5	439	-3,5
463	+4,0	445	-4,0
465	+4,5	499	-4,5

Das Pluszeichen steht für eine zusätzliche Verzögerung des Signals vom rechten SEV, das Minuszeichen für die des linken SEVs. Es zeigt sich ein kleines Maximum bei einer zusätzlichen Verzögerung von 0,5ns des rechten SEV. Diese Einstellung wird während des gesamten Versuchs beibehalten, obwohl sie bei einer Signallänge von 50ns nur wenig ausmacht.

Die Daten reichen nicht aus um die Auflösungszeit Δt der Koinzidenzschaltung genau zu bestimmen. Sie lässt sich jedoch auf $\Delta t \approx 20 - 30ns$ abschätzen.

Ein Vergleich der Zählraten (gemessen über 60s) $N_{vor}=1861$ vor und $N_{hin}=1456$ hinter der Koinzidenzschaltung zeigt ihre Notwendigkeit, die thermischen Effekte an den Photokathoden der SEVs zu unterdrücken.

3.2. Kalibrierung der Zeitachse

Zur Kalibrierung der 512 Kanäle des Vielkanalanalysators werden Doppelimpulse mit bekannten zeitlichen Abständen auf die Koinzidenzschaltung gegeben und die dann belegten Kanäle notiert (siehe Tabelle 1). Da die Zeitdifferenzen nicht immer eindeutig einem Kanal zugeordnet werden können, sondern zwischen zwei Kanälen liegen, ist es in solchen Fällen zweckmäßig eine Dezimalstelle anzugeben. Der sich zeigende lineare Zusammenhang folgt der Zuordnungsvorschrift (hier mit ORIGINPRO 7.5 gefittet)

$$\Delta t = (0,03942 \pm 0,00003)\mu s \cdot \text{Kanal} + (0,10723 \pm 0,00425)\mu s.$$

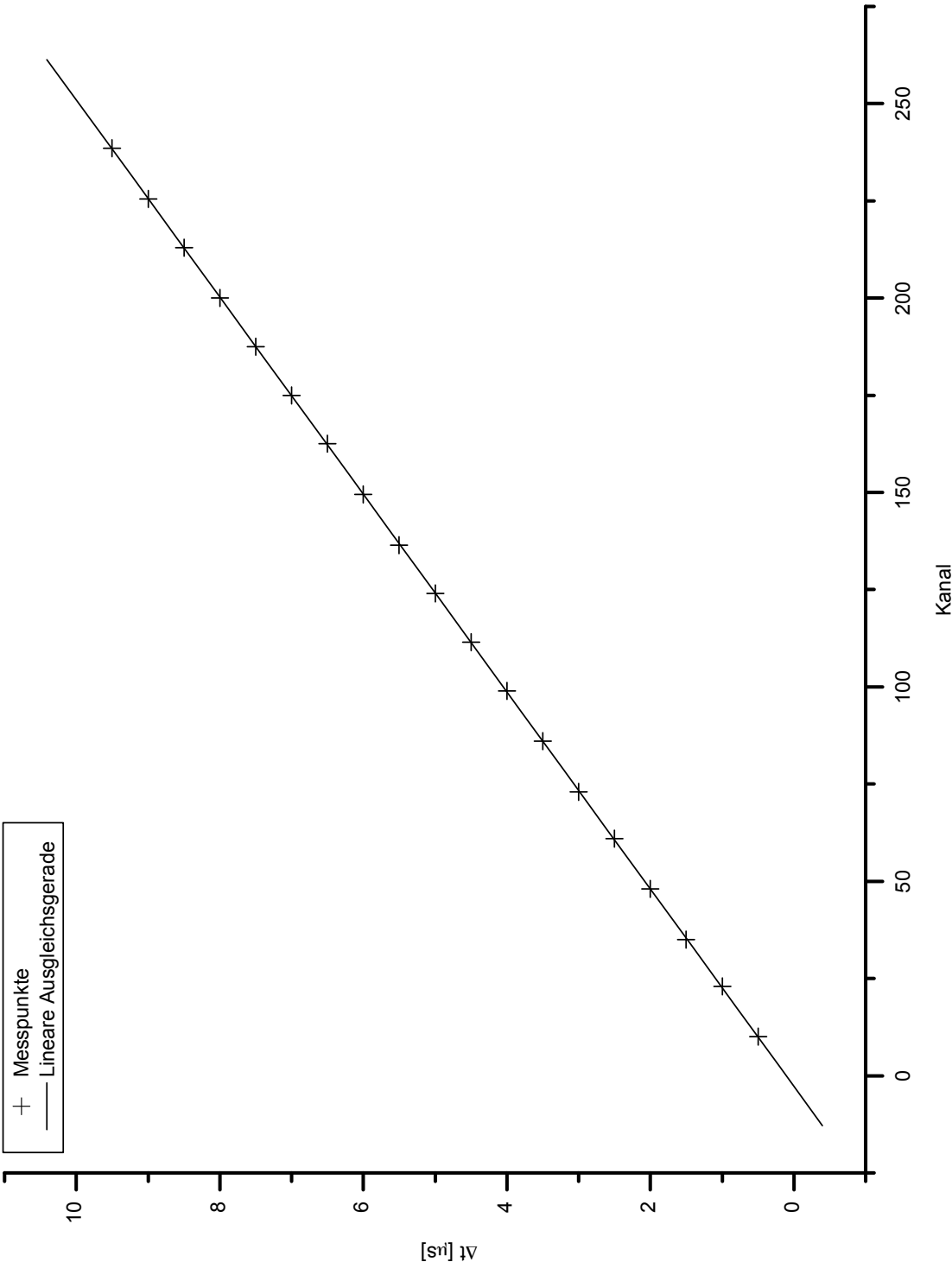


Abbildung 3: Lineare Regression der Kalibrierungsmessreihe

Δt [μs]	Kanal
0,5	10,0
1,0	23,0
1,5	35,0
2,0	48,0
2,5	61,0
3,0	73,0
3,5	86,0
4,0	99,0
4,5	111,5
5,0	124,0
5,5	136,5
6,0	149,5
6,5	162,5
7,0	175,0
7,5	187,5
8,0	200,0
8,5	213,0
9,0	225,5
9,5	238,5

Tabelle 1: Messreihe zur Kalibrierung der Zeitachse

3.3. Bestimmung der Untergrundrate

Die gesamte Messzeit beträgt $T = 87149\text{s}$ mit $N_{\text{Start}} = 2006514$ registrierten Startimpulsen. Im Mittel ergibt sich eine Startimpulsrate von

$$\langle N \rangle = \frac{N_{\text{Start}}}{T} = 23,02 \frac{1}{\text{s}},$$

welche innerhalb des geforderten Bereichs von 20 bis 40 Myonen pro Sekunde liegt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein weiteres Myon während der Suchzeit $T_S = 20\mu\text{s}$ den Szintillatortank durchquert ist poissonverteilt. Folglich wird mit einer Wahrscheinlichkeit von

$$P_{T_S \langle N \rangle}(k) = \frac{(T_S \langle N \rangle)^k}{k!} \exp(-T_S \langle N \rangle)$$

ein neu eintreffendes Myon als Stoppsignal interpretiert. Für $k = 1$ (genau ein weiteres Myon) werden also insgesamt

$$N_{\text{Fehl}} = P_{T_S \langle N \rangle}(1) N_{\text{Start}} = 924,38$$

Fehlmessungen registriert. Wird davon ausgegangen, dass die Fehlmessungen sich gleichmäßig auf alle Kanäle verteilen, ist eine Untergrundrate von

$$U = \frac{N_{\text{Fehl}}}{512 \text{ Kanäle}} = 1,81 \frac{1}{\text{Kanal}}$$

zu erwarten.

3.4. Bestimmung der Lebensdauer von Myonen

Die benötigten Messdaten sind den Tabellen 2-4 zu entnehmen. Um die Lebensdauer der Myonen zu bestimmen werden diese Daten nach dem Zerfallsgesetz (N counts, Kanalnummer X , Lebensdauer τ , Untergrund N_0)

$$N(X) = A \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau}X\right) + N_0$$

gewichtet gefittet (hier mit ORIGINPRO 7.5). Es wird eine statistische Gewichtung mit $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ gewählt, wobei $\sigma_i = \sqrt{N_i}$. Das sich bei dieser Gewichtung stellende Problem für Kanäle mit Null Zählern wird übergangen, indem in solchen Fällen die Gewichtung des vorherigen Kanals übernommen wird. Somit werden eng benachbarte Kanäle gleich gewichtet und der sich daraus ergebende Fehler bleibt vernachlässigbar klein. Des weiteren werden die ersten fünf Messpunkte ausgeschlossen, da sie kein sinnvolles Resultat liefern. Aus der Regression ergeben sich die Parameter wie folgt:

$$A = 139,3469 \pm 2,83563$$

$$N_0 = 1,4671 \pm 0,08648$$

$$\tau = 48,46959 \pm 0,82682$$

Die sich ergebende Untergrundrate von 1,47 Zählern pro Kanal entspricht in etwa der bereits vorausgesagten Rate von 1,81. Die Lebensdauer τ ist nun noch über die Zuordnungsvorschrift in eine Zeit umzurechnen. Wir erhalten schließlich experimentell einen Wert von

$$\tau_{\text{exp}} = (2,02 \pm 0,03)\mu\text{s} = 2,02\mu\text{s} \pm 1,5\%.$$

Der angegebene Fehler ergibt sich ausschließlich durch die Ausgleichsrechnung. Der Fehler durch die Umrechnung ist kleiner als 0,1% und somit zu vernachlässigen.

Der Vergleich mit einem Literaturwert³ von $\tau_{\text{Lit}} = 2,2\mu\text{s}$ ergibt eine Abweichung von 8,2%.

³PARTICLE PHYSICS BOOKLET July 2006

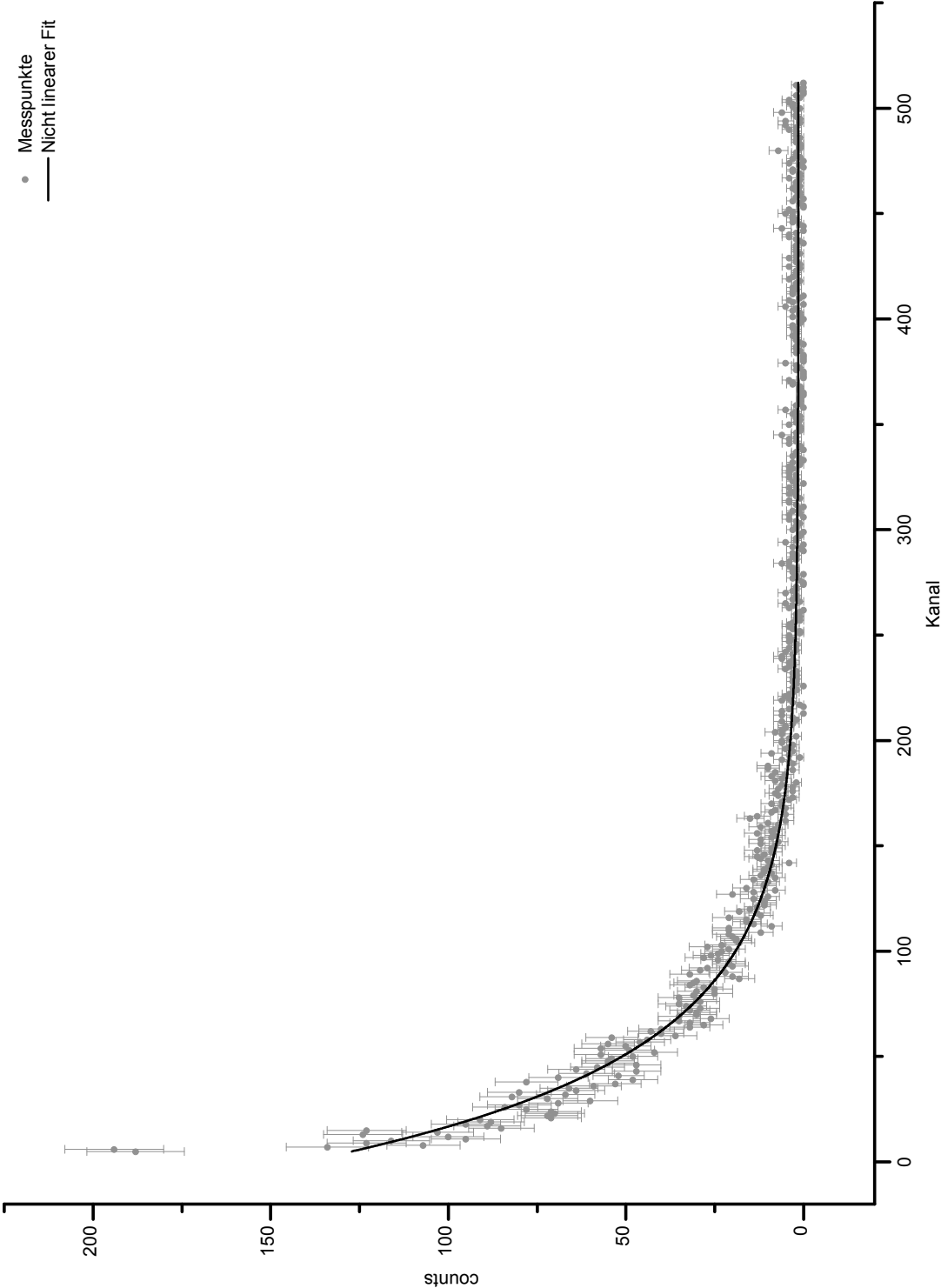


Abbildung 4: Gewichteter exponentieller Fit zur Bestimmung der Lebensdauer

Kanal	Counts	Kanal	Counts	Kanal	Counts	Kanal	Counts	Kanal	Counts
0	0	45	58	90	22	135	8	180	2
1	0	46	47	91	29	136	12	181	8
2	0	47	55	92	27	137	9	182	6
3	0	48	55	93	20	138	11	183	9
4	2	49	54	94	21	139	11	184	5
5	188	50	48	95	21	140	10	185	8
6	194	51	57	96	24	141	9	186	3
7	134	52	42	97	28	142	4	187	10
8	107	53	49	98	26	143	10	188	10
9	123	54	57	99	24	144	12	189	3
10	116	55	50	100	23	145	13	190	4
11	95	56	55	101	21	146	11	191	6
12	100	57	46	102	27	147	9	192	1
13	124	58	44	103	23	148	13	193	4
14	103	59	54	104	18	149	9	194	9
15	123	60	36	105	19	150	8	195	3
16	85	61	40	106	19	151	12	196	5
17	89	62	43	107	20	152	7	197	4
18	95	63	40	108	21	153	12	198	3
19	88	64	32	109	12	154	9	199	6
20	91	65	28	110	21	155	8	200	6
21	71	66	32	111	21	156	13	201	4
22	72	67	35	112	9	157	9	202	2
23	70	68	26	113	14	158	8	203	6
24	71	69	35	114	16	159	12	204	8
25	78	70	30	115	16	160	7	205	6
26	84	71	30	116	21	161	10	206	5
27	80	72	32	117	12	162	5	207	5
28	69	73	29	118	13	163	15	208	3
29	60	74	33	119	18	164	13	209	6
30	72	75	35	120	15	165	5	210	2
31	82	76	29	121	13	166	9	211	3
32	67	77	30	122	11	167	8	212	6
33	80	78	35	123	11	168	5	213	0
34	64	79	31	124	11	169	6	214	6
35	66	80	25	125	14	170	9	215	4
36	59	81	30	126	10	171	6	216	0
37	53	82	25	127	20	172	4	217	1
38	78	83	28	128	14	173	3	218	3
39	48	84	32	129	8	174	7	219	6
40	69	85	31	130	16	175	8	220	4
41	52	86	30	131	11	176	3	221	5
42	61	87	18	132	11	177	7	222	4
43	47	88	20	133	10	178	3	223	3
44	64	89	32	134	14	179	6	224	2

Tabelle 2: Messreihe zur Bestimmung der Lebensdauer - Teil 1

Kanal	Counts	Kanal	Counts	Kanal	Counts	Kanal	Counts	Kanal	Counts
225	3	270	5	315	1	360	1	405	2
226	0	271	3	316	2	361	1	406	5
227	2	272	2	317	4	362	1	407	0
228	3	273	2	318	3	363	1	408	3
229	2	274	0	319	2	364	0	409	4
230	3	275	0	320	4	365	0	410	1
231	2	276	1	321	2	366	1	411	0
232	3	277	3	322	0	367	1	412	3
233	2	278	2	323	3	368	1	413	3
234	5	279	0	324	2	369	3	414	2
235	4	280	3	325	4	370	3	415	3
236	3	281	3	326	2	371	4	416	2
237	4	282	3	327	4	372	0	417	2
238	3	283	4	328	4	373	0	418	1
239	6	284	6	329	3	374	0	419	4
240	6	285	4	330	4	375	0	420	3
241	3	286	2	331	1	376	2	421	2
242	5	287	3	332	3	377	1	422	2
243	2	288	2	333	0	378	2	423	2
244	4	289	3	334	1	379	5	424	1
245	2	290	0	335	3	380	0	425	4
246	2	291	1	336	2	381	0	426	1
247	4	292	3	337	2	382	0	427	2
248	3	293	0	338	0	383	0	428	2
249	4	294	5	339	1	384	2	429	4
250	4	295	2	340	1	385	1	430	2
251	1	296	2	341	4	386	2	431	1
252	1	297	1	342	2	387	2	432	2
253	3	298	1	343	4	388	0	433	2
254	4	299	0	344	2	389	1	434	2
255	4	300	3	345	6	390	2	435	2
256	3	301	2	346	2	391	2	436	0
257	1	302	2	347	1	392	3	437	1
258	2	303	1	348	1	393	2	438	2
259	1	304	2	349	1	394	2	439	4
260	2	305	4	350	4	395	2	440	4
261	1	306	0	351	2	396	3	441	2
262	0	307	4	352	1	397	3	442	0
263	4	308	1	353	2	398	1	443	6
264	3	309	3	354	1	399	1	444	0
265	5	310	1	355	3	400	0	445	1
266	1	311	0	356	2	401	3	446	3
267	3	312	2	357	5	402	1	447	2
268	2	313	4	358	0	403	1	448	3
269	2	314	4	359	2	404	3	449	3

Tabelle 3: Messreihe zur Bestimmung der Lebensdauer - Teil 2

Kanal	Counts	Kanal	Counts
450	5	495	1
451	3	496	2
452	4	497	2
453	0	498	6
454	0	499	2
455	1	500	1
456	3	501	3
457	0	502	3
458	2	503	4
459	1	504	4
460	1	505	1
461	2	506	2
462	3	507	0
463	1	508	0
464	2	509	1
465	2	510	0
466	1	511	2
467	4	512	0
468	1		
469	1		
470	3		
471	3		
472	0		
473	1		
474	4		
475	0		
476	3		
477	1		
478	2		
479	2		
480	7		
481	1		
482	1		
483	1		
484	2		
485	2		
486	1		
487	2		
488	2		
489	2		
490	4		
491	2		
492	5		
493	1		
494	5		

Tabelle 4: Messreihe zur Bestimmung der Lebensdauer - Teil 3

A. Anhang

A.1. Literatur

- [1] Die Abbildungen im Theorieteil stammen aus der Versuchsanleitung (<http://berners-lee.physik.uni-dortmund.de/praktikum/F-Anleitungen/Inhalt.htm>).

A.2. Messdaten

Messdaten liegen in digitaler Form vor.