

Bestimmung der Lebensdauer von Myonen

Stefan Diehl, Hans - Georg Zaunick

II. Physikalisches Institut Uni Gießen

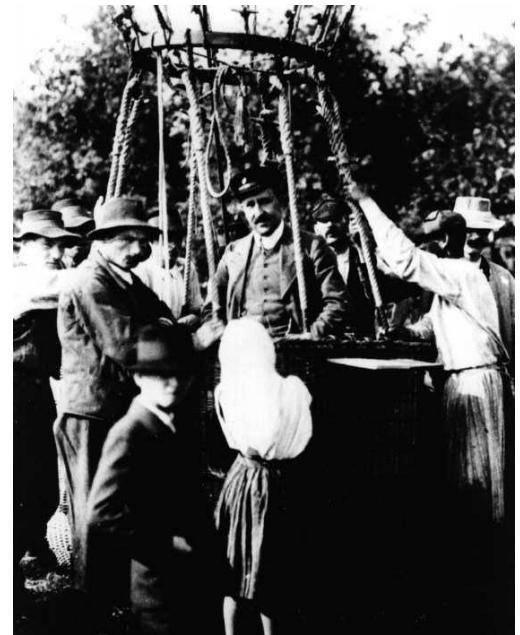
Überarbeitete und aktualisierte Version basierend auf der Anleitung von

P. Drexler, M. Kotulla, J. Weiß

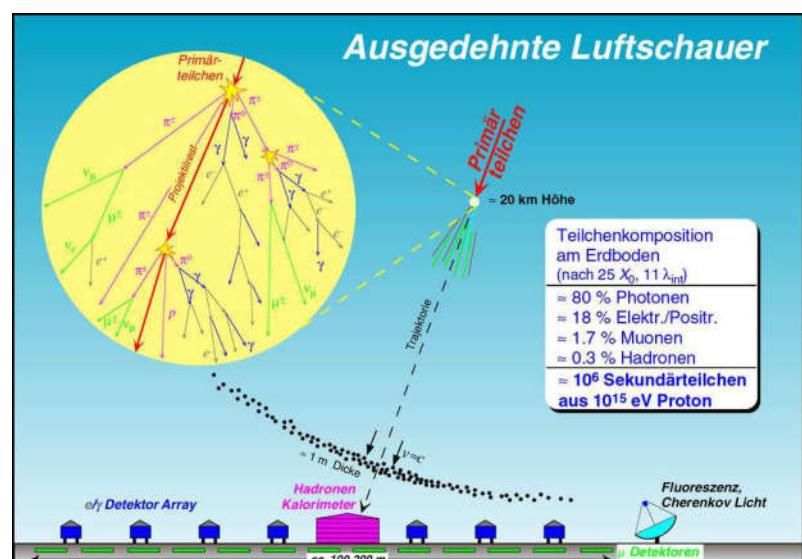
Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene: Versuch 2.5

1 Geschichte und Einleitung

Die Erde wird fortwährend von hochenergetischen Teilchen aus den Tiefen des Alls getroffen. Dieses Phänomen wurde 1912 vom österreichischen Physiker Viktor Franz Hess entdeckt. Zuvor war die natürliche Radioaktivität bereits bekannt und man ging davon aus, daß die an der Erdoberfläche gemessene ionisierende Strahlung von radioaktiven Nukliden in der Erdkruste verursacht wird. In einem Heißluftballon stieg Hess bis auf Höhen von 5000 m auf. Er führte mehrere Elektrometer zur Messung der Intensität von ionisierender Strahlung mit und entdeckte, daß die Intensität der Strahlung mit zunehmender Höhe ansteigt. Er folgerte daraus, daß uns diese Strahlung aus den tiefen des Universums erreicht und gab ihr den Namen kosmische Strahlung. Für seine Untersuchungen wurde er 1936 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.



Beim Aufprall auf die Erdatmosphäre erzeugt das primäre hochenergetische Teilchen einen großen Schauer.



Ein großer Anteil der sekundären dabei erzeugten Teilchen sind Myonen. Bei unserem Praktikumsversuch verwenden wir daher die kosmische Höhenstrahlung als "Myonenquelle". Das Myon, der schwere Bruder des Elektrons, wurde 1947 von Powell und Mitarbeitern erstmals entdeckt.

Die Bestimmung der Lebensdauer der Myonen stellt einen idealen Versuch dar, in die Welt der Elementarteilchen hineinzuschnuppern. Der apparative Aufwand ist gering, bietet aber trotzdem einen guten Einblick in die Methoden der experimentellen Teilchenphysik.

2 Aufgabenstellung

Die Lebensdauer kosmischer Myonen, die in einem Szintillationsdetektor gestoppt werden, wird mit Hilfe eines einfachen elektronischen Aufbaus bestimmt. Dies geschieht in folgenden Schritten:

1. Aufnahme des Energiespektrums einer ^{60}Co Quelle und Energieeichung
2. Bestimmung der Energiedeposition minimal ionisierender Myonen in dem verwendeten NaJ-Szintillationsdetektor
3. Aufbau des endgültigen Versuchsaufbaus, Durchführung einer Zeiteichung
4. Durchführung der Messung (ca. 1 Woche Datenaufnahme)

3 Versuchsvorbereitung

Für den Versuch sollten die folgenden Themen in einer schriftlichen Ausarbeitung knapp behandelt werden (ca. 4 DIN A4-Seiten). Die Ausarbeitung ist mit der Versuchsauswertung abzugeben.

- Charakterisierung der Myonen anhand ihrer Eigenschaften, Platz im Standardmodell der Elementarteilchen
- Entstehung der Myonen aus der kosmischen Strahlung; Reaktionen und Erhaltungssätze, die bei diesen Prozessen eine Rolle spielen
- Zurückgelegte Strecke während der Lebensdauer, relativistische Effekte
- Prozesse bei in Materie gestoppten Myonen (unterschiedlich je nach Ladung)
- Zerfallsgesetz, Halbwertszeit, mittlere Lebensdauer
- Abschätzung folgender Werte (dazu sollen die im Anhang angegebenen Tabellen und Diagramme verwendet werden):
 - Zählrate im Detektor (ca. $12 \times 12\text{cm}^2$ Fläche) aus der integralen Energieverteilung der Myonen in Meereshöhe
 - Grenzenergie, bis zur der Myonen in 10 cm NaI gestoppt werden können
 - mittlere Energie, die ein durchfliegendes minimal ionisierendes Myon im Detektor deponiert

- Funktionsweise eines Szintillationsdetektors (Szintillator und Photomultiplier) erläutern, auf Unterschiede beim Nachweis von geladenen Teilchen und Photonen eingehen.
- Wechselwirkung von Teilchen (insbesondere Myonen) mit Materie
- Beschreibung des prinzipiellen Messaufbaus und des Meßprinzips

4 Versuchsdurchführung

4.1 NaI-Szintillator, Photomultiplier

Die Betriebsspannung des Szintillators liegt bei $U = +850$ V während der gesamten Messzeit. Der Spannungsteiler (Base) des Photomultipliers besitzt 2 Eingänge und 2 Ausgänge. Die beiden Eingänge sind für die Spannungsversorgung einmal des Photomultipliers (850 V) und zum anderen eines eingebauten Vorverstärkers (25 V). Dementsprechend gibt es zwei Ausgänge, einmal das Signal direkt nach dem Photomultiplier, und zum anderen das Signal nach dem Vorverstärker. Während des Versuches wird der eingebaute Vorverstärker nicht benutzt.

4.2 Messung der Energiespektren einer ^{60}Co -Quelle und von minimal ionisierenden Myonen

Dieser Teil des Versuchs dient hauptsächlich dazu sich mit der Elektronik des Versuchs vertraut zu machen. Im Gegensatz zu der Lebensdauermessung ist die Messdauer sehr kurz, so daß mögliche Probleme sofort erkannt werden können.

Der schematische Aufbau für die Aufnahme des Energiespektrums ist in Abbildung 1 gegeben. Das Ausgangssignal des Photomultipliers wird auf den Hauptverstärker gegeben und invertiert (der ADC besitzt einen positiven Eingang). Die Shaping-Time ist so einzustellen, daß sie den gesamten Anstieg der Kante des Eingangssignals umfaßt, d.h. sie muß mindestens der Signaldauer des originalen Signals hinter dem Photomultiplier entsprechen. Das Ausgangssignal (Unidirektional) des Hauptverstärkers wird auf den Eingang der ADC-Karte gegeben und die Datenaufnahme gestartet.

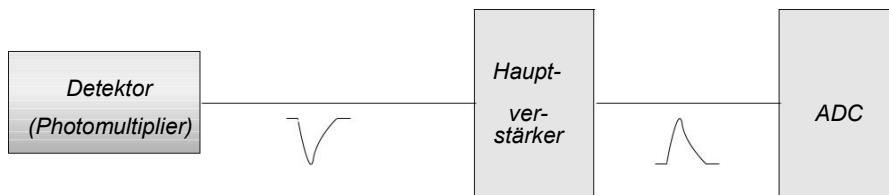


Abbildung 1: Aufbau zur Energiemessung

Das ^{60}Co -Spektrum soll zweimal aufgenommen werden. Einmal ist die Verstärkung so einzustellen, daß das Ausgangssignal den Akzeptanzbereichs des ADC möglichst gut abdeckt. Das andere Mal soll das aufgenommene Spektrum zur Energieeichung verwendet werden. Dabei ist die in Abschnitt 3 abgeschätzte Energiedeposition der minimal ionisierenden Myonen zu beachten und die entsprechende Verstärkung zu wählen.

4.3 Prinzip der Lebensdauermessung

Das Prinzip des Versuches besteht darin, einfallende kosmische Myonen in einem Szintillationsdetektor zu stoppen und die Zeit bis zum Zerfall zu messen. Dabei wird die Zeitdifferenz der Signale ermittelt, die beim Stoppen und beim Zerfall erzeugt werden. Man erhält so ein Diagramm $dN(t)/dt$, aus dem man die Lebensdauer ermitteln kann. Die prinzipielle Schaltung ist in Abbildung 2 dargestellt.

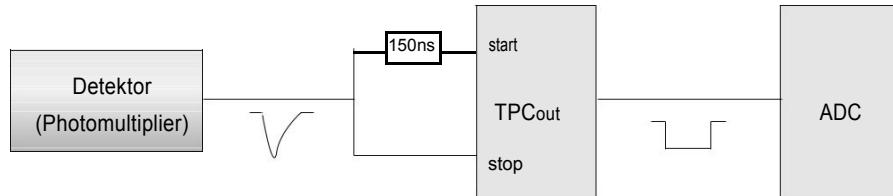


Abbildung 2: Prinzip der Zeitmessung

Da es nicht möglich ist, die ankommenden Signale nach Start und Stopp individuell zu selektieren (zu unterscheiden), muß jedes ankommende Signal sowohl als Start als auch als Stopp dienen. Die Anzahl der gestoppten Myonen ist klein im Vergleich zu der Anzahl aller Teilchen (Myonen), die den Szintillationskristall passieren. Das Delay im Startzweig dient dazu, die unnötige Digitalisierung von Zeitdifferenzen von durchfliegenden Myonen zu vermeiden.

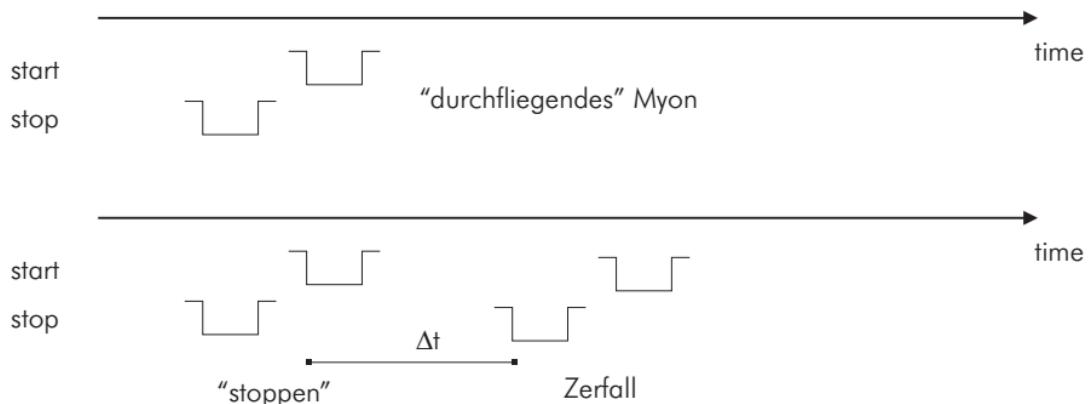


Abbildung 3: Signalfolge bei der Lebensdauermessung. Für gestoppte Myonen erfolgt nach dem Stoppimpuls ein zweiter Impuls aus dessen Verzögerung die Lebensdauer bestimmt werden kann.

4.3.1 Aufbau der Zeitmessung

Die Lebensdauermessung wird mit der Schaltung nach Abbildung 4 durchgeführt. Statt des Ausgangs des Vorverstärkers wird nun direkt das noch unverstärkte Signal benutzt. Warum, wird deutlich, wenn man sich den zeitlichen Verlauf der Signale anschaut (Zeitauflösung). Dieses Signal wird an den Timing Filter Amplifier (TFA) gelegt. Die Verstärkung sollte klein gehalten werden, um das Signal nicht unnötig zu verzerrern, da damit die Zeitauflösung beeinträchtigt wird.

Aus dem gleichen Grund sollten die Einstellungen von Integrationszeit und Differentiationszeit (zum glätten des Signals) nicht zu groß gewählt werden (klein genug gegenüber der Anstiegszeit des Signals). Das Ausgangssignal des TFA wird auf einen Diskriminatorkanal gegeben, der so eingestellt wird, daß der natürliche radioaktive Untergrund abgetrennt wird. Für eine definierte Einstellung bietet sich die Summenlinie des ^{60}Co Energiespektrums an.

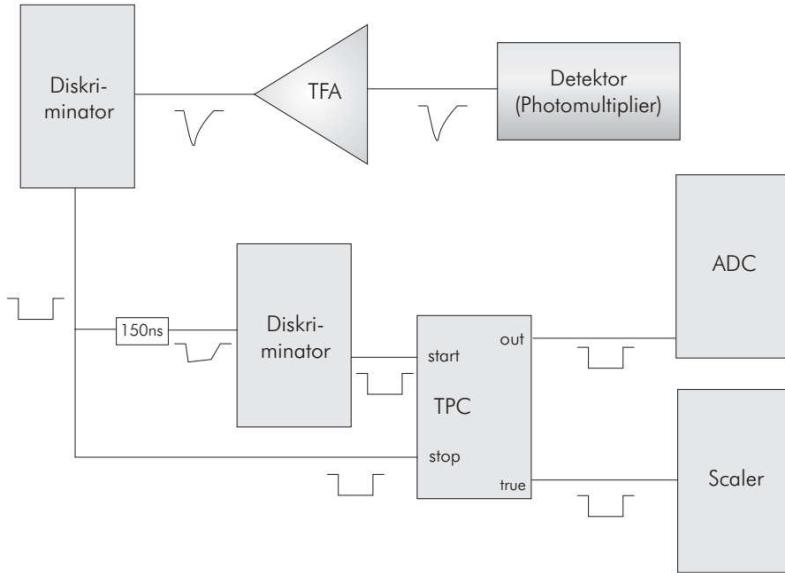


Abbildung 4: Aufbau zur Lebensdauermessung. Die Funktionsweise der Elektronikmodule ist im Anhang beschrieben.

Das verzögerte Startsignal wird nach dem 300 ns Delay ebenfalls noch einmal über einen Diskriminatorkanal geführt. Das geschieht deswegen, da das Kabeldelay das durchlau-fende Signal verzerrt. Dies kann man für das benutzte logische NIM-Signal rückgängig machen, indem man einen Diskriminator mit verschwindender Schwelle nachschaltet. Die Breite muß wieder auf den richtigen Wert reguliert werden. Der Ausgang des TPC wird an den ADC gelegt, der TRUE START Ausgang auf den kaskadierten Scaler, um die Zahl der Starts zu zählen.

4.3.2 Einstellung der Diskriminatorschwelle

Die Diskriminatorschwelle lässt sich am besten mit folgender Methode einstellen. Man gibt das Detektorsignal auf einen Kanal des Oszilloskops und den Ausgang des Diskri-minators auf einen zweiten Kanal. Den Trigger stellt man nun auf den zweiten Kanal ein. Dadurch erreicht man, daß nur Signale, die den Diskriminator passieren (also oberhalb der Schwelle liegen) auf dem Oszi dargestellt werden. Die Schwelle stellt man nun so ein, daß die Summenlinie gerade verschwindet. Der Scaler sollte nun mit einer Frequenz von ca. 6 Hz zählen. Wieviele zeitzuflige Ereignisse würde man bei dieser Rate in einer Woche Meßzeit unter Verwendung eines Zeitintervalls von 0 bis 5 μs erwarten?

4.3.3 Zeiteichung

Zur Ermittlung der Lebensdauer muß die Zeitmessung erst noch geeicht werden. Außerdem muß ein vernünftiger Meßbereich des ADCs selektiert werden, d.h. die maximale Ausgangsspannung des TPC muß dementsprechend gewählt werden. Bei der Einstellung des TPC sind folgende Punkte zu beachten:

1. Die maximal zu messende Zeitspanne (Range) sollte einige wenige Lebensdauern betragen.
2. Die dazugehörige Ausgangsspannung ist so zu wählen, daß eine vernünftige Zahl von Kanälen abgedeckt wird. Dabei ist abzuwegen zwischen einer genügend hohen Zahl von Counts in einem Kanal (statistischer Fehler) und einer ausreichenden Zahl von Kanälen (Zeitauflösung). Zur Abschätzung dieser Einstellung sei die Information gegeben, daß man während der Messung pro 100 Sekunden Meßzeit ca. 1 Eintrag im Spektrum erhält.

Zur eigentlichen Zeiteichung werden die vorhandenen Delays benutzt und für verschiedene Delays der jeweilige Kanal im Zeitspektrum notiert. Dazu wird nun nicht der Starteingang, sondern der Stoppeingang um die jeweilige Delayzeit verzögert. Zur Einstellung des Meßbereichs wird zunächst das gesamte zur Verfügung stehende Delay verkabelt und die Ausgangsspannung des TPC so eingestellt, daß das Signal in den richtigen Kanal läuft. Um hinreichend Zählrate zu erhalten, kann kurzfristig die Verstärkung des TFA hochgedreht werden und die Quelle wieder vor den Detektor gebracht werden. Nach der Zeiteichung aber nicht vergessen, den Ausgangszustand wiederherzustellen!

4.3.4 Starten und Beenden der Messung

Nach diesen Vorbereitungen kann die Messung gestartet werden. Scaler und ADC/MCA müssen vorher zurückgesetzt werden. Die Uhrzeit soll ebenfalls notiert werden (zur Bestimmung der Meßzeit). Die Zählrate im Spektrum sollte nun in der Gegend von 1 Count pro 100 Sekunden liegen.

Wie groß ist der Anteil zeitzufällige Ereignisse?

Nach ca. einer Woche (nach Rücksprache mit dem Betreuer sind auch längere Meßzeiten möglich) wird die Datenaufnahme des ADCs und der Scaler gestoppt. Dabei soll die Uhrzeit und die Anzahl der Starts aufgeschrieben werden, um daraus später den zeitzufälligen Untergrund bestimmen zu können. Die Daten können auf USB-Stick mit nach Hause genommen werden.

4.3.5 Bemerkung zum Versuchsprotokoll

Zuletzt einige Bemerkung zum Versuchsprotokoll:

- alles direkt ins Protokollheft schreiben
- sämtliche Signale, die von den einzelnen Modulen verarbeitet werden, sowie die dazugehörigen Ausgangssignale während des Versuchsaufbaus mittels eines Oszilloskops anschauen und mitprotokollieren

5 Auswertung

5.1 Aufbereitung der Daten

Die Daten werden als Textfile mit den Histogrammeinträgen oder wahlweise als root-file zur Verfügung gestellt.

5.2 Zeiteichung

Die Gerade zur Zeiteichung kann mit einer "normalen" linearen Regression gebildet werden (Fehler nicht vergessen), entweder von Hand mit den üblichen Formeln (siehe z.B. Lichten) oder auf dem Rechner mit entsprechender Software.

Die Regression der logarithmischen Darstellung der Lebensdauermessung sollte allerdings mit einer Methode durchgeführt werden, die die Fehler der einzelnen Meßpunkte wichtet! Dazu können Standardprogramme wie Excel oder Origin, etc. benutzt werden (gewichtete Regression siehe Angang). Bitte bei der Angabe von Zwischen- und Endresultaten, sowie bei den Meßergebnissen überlegen wieviele Nachkommastellen sinnvoll sind und wie man den Fehler am besten angibt.

5.3 Untergrundabschätzung

Um den zeitzufälligen Untergrund der Messung abschätzen und von der Zählrate abziehen zu können, muss aus der Gesamtzahl der „True Starts“ und der Messdauer die Zählrate ausgerechnet werden. Daraus kann dann die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, mit der zwei unkorrelierte Signale innerhalb der Meßzeit des TPC eintreffen können. Mit dieser Zahl, die für ein Ereignis gilt, kann dann wiederum die Anzahl der Untergrundereignisse der gesamten Messzeit berechnet werden. Diese Zahl wird soll dann von den gemessenen Zählraten abgezogen.

5.4 Grafische Darstellung

Die gemessenen Werte sollen zuallererst grafisch dargestellt werden. Um statistische Schwankungen in den einzelnen Kanälen zu verkleinern, ist es im allgemeinen notwenig, Kanäle zusammenzufassen. Fassen Sie soviele Kanäle zusammen, bis der Verlauf der Zerfallskurve gut zu erkennen ist. Wenn die Daten eine Abweichung vom exponentiellen (bzw. vom linearen) Verhalten zeigen (z.B. Spitzen, die von Reflektionen im ADC-Kabel kommen können), lassen Sie bei der Auswertung diesen Bereich des Spektrums unberücksichtigt¹.

5.5 Fehlersuche

Wenn am Ende der Auswertung ein Resultat rauskommt, daß sich um Größenordnungen vom Literaturwert unterscheidet, dann kann davon ausgegangen werden, daß die Auswertung noch Fehler enthält. (Dies ist ein sehr dankbarer Versuch, bei dem selten etwas schief geht!) Gehen Sie dann schrittweise die Auswertung nochmal durch: stimmen die Formeln, die Summen, sind die Einheiten konsistent . . .

6 Fragen, die man sich stellen sollte

- Beeinflussen die Zerfallsprozesse myonischer Atome² die Lebensdauermessung?
- Wenn jedes Signal gleichzeitig Start und Stopp ist, werden dann pro Ereignis immer zwei Einträge ins ADC-Spektrum gefüllt?
- Nach welcher Statistik sind Zählraten verteilt? Wie kann man den Fehler (eigentlich: die Standardabweichung) dieser Verteilung bestimmen?
- Warum ist es sinnvoll, die Lebensdauer mit einer gewichteten Regression zu bestimmen? Und warum genügt für die Zeiteichung eine „normale“ Regression?
- Ändert sich der Zählratenfehler durch das Logarithmieren?
- Woher kommt der zeitzufällige Untergrund? Kann man etwas dagegen tun?

¹ Eigentlich müsste man in einem solchen Fall versuchen, den Fehler herauszufinden und den Meßaufbau verbessern, aber angesichts der langen Meßzeit muß man sich wie hier dargestellt behelfen.

² siehe theoretischer Teil: gestoppte Myonen in Materie

Anhang

A.1 Literatur

- Frauenfelder Henley, *Teilchen und Kerne*, R.Oldenbourg Verlag
- G. Musiol et al., *Kern- und Elementarteilchenphysik*, VCH S.980
- E. Lohrmann, *Hochenergiephysik*, Teubner
- J. Orear, *Physik*, Carl Hanser Verlag
- W. Greiner, *Theoretische Physik Mechanik I*, HarriDeutsch
- H.U. Schmidt, *Meßelektronik in der Kernphysik*, Teubner
- W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer Verlag
- W. Lichten, *Scriptum der Fehlerrechnung*, Springer Verlag

Diese Bücher sind in der Uni-Bibliothek vorhanden und können dort eingesehen werden. Informationen zu Myonen gibt es natürlich auch im Internet, z.B. auf der Seite der Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov/>).

A.2 Beschreibung der verwendeten Elektronik

In diesem Teil sollen die verwendeten Geräte und das Prinzip dieses Versuches erläutert werden. Da sich für einige der benutzten Geräte in der Literatur nur schwer eine Beschreibung finden lässt, ist in diesen Fällen im nächsten Kapitel eine kurze Anleitung angegeben (diese Beschreibung der Funktionsweise der Elektronik braucht nicht ins Protokollheft übernommen werden).

- **Amplifier (Hauptverstärker)**

Er dient dazu, ein Eingangssignal um ein Vielfaches zu verstärken, welches er vorher über eine einstellbare Zeit (Shaping-Time) integriert. Dies ist für eine Energiemessung notwendig, da das Ausgangssignal eines Szintillators so beschaffen ist, daß die abgegebene Ladungsmenge und nicht die Höhe des Signals proportional zur Energie ist.

- **Timing Filter Amplifier (TFA)**

Der Unterschied zum vorhergehenden Typ besteht hauptsächlich in der niedrigeren Verstärkung und den kleineren einstellbaren Zeitkonstanten für Integration und Differentiation. Diese liegen im Bereich bis einige 100 Nanosekunden. Man benutzt dies zur Glättung von Signalen ohne die generelle Form dieses Signals zu verändern.

- **Diskriminator**

Der von uns verwendete Diskriminatior gibt auf seinem Ausgang ein definiertes logi-sches Signal (NIM-Signal) aus, wenn das Eingangssignal eine einstellbare Schwelle überschreitet. Sowohl diese Schwelle als auch die Breite des Ausgangssignals können über eine Stellschraube justiert werden. Die Breite der benutzten Aus-gangsssignale sollte etwa 150 ns betragen, da dies der Norm eines logischen NIM-Signales entspricht.

- **Delay**

Unter einem Delay versteht man eine Vorrichtung, mit der ein Signal um eine gewisse Zeit verzögert werden kann. Uns stehen zwei verschiedene Arten von Delays zur Verfügung. Dies ist einmal ein Delay, welches aus aufgerollten Kabeln besteht, so daß das Eingangssignal um die Kabellaufzeit verzögert wird (dies ist die einzige Möglichkeit analoge Signale zu verzögern, deren Form man nicht kennt), zum anderen gibt es ein logisches Delay, welches dazu dient, definierte logische Signale (hier NIM-Signale) zu verzögern. Da man die Signalform kennt, kann dies elektronisch geschehen, so daß am Ausgang wieder ein frisches Signal zur Verfügung steht.

- **Time to Pulse Height Converter (TPC)**

Ein TPC macht nichts anderes als die zeitliche Differenz zwischen einem Start- und einem Stoppsignal in ein Signal umzuwandeln, dessen Höhe proportional dieser Zeitdifferenz ist. Hier können die maximale Zeitspanne in einem weiten Bereich sowie die Amplitude, die diesem Zeitintervall entsprechen soll, eingestellt werden. Zusätzlich zu diesem Ausgangssignal stellt der TPC noch ein logisches TTL-Signal zur Verfügung, welches das Starten einer Zeitmessung anzeigt (TRUE START). An diesen Ausgang kann man einen Zähler (Scaler) anschließen, um später Abschätzungen für den Untergrund machen zu können.

- **Analog to Digital Converter (ADC)/Multi Channel Analyzer (MCA)**

Der ADC/MCA ist in unserem Fall direkt über eine USB Leitung mit dem PC verbunden. Er wandelt die Höhe des Eingangssignals in einen dazu proportionalen digitalen Wert um. Der benutzte ADC/MCA hat einen Messbereich von 8192 Kanälen (13 bit). Dies entspricht etwa einem dynamischen Bereich des Eingangssignals von 8 Volt. Diese Spannung sollte nicht überschritten werden.

- **Scaler**

Ein Scaler ist einfach nur ein Zähler, der die eingehenden (TTL-)Signale zählt. Uns stehen zwei zur Verfügung, die kaskadiert werden können.

A.3 Gewichtete Regression³

Diese ist die genauste Methode, Messwerte eines exponentiellen Zusammenhangs zu behandeln.

Dabei werden wie üblich die y-Werte (in diesem Fall sind das die Zählratenwerte) logarithmiert und es wird eine lineare Regression für diesen Zusammenhang durchgeführt. Alle Daten erhalten dabei jedoch einen Gewichtsfaktor w, der mit dem jeweiligen Fehler zusammenhängt. In den Ausdrücken für die statistischen Standardgrößen (Mittelwert, Steigung, Achsenabschnitt und alle Standardabweichungen) werden die Summen nun mit einer Gewichtung der Summanden versehen, indem der Gewichtsfaktor folgendermassen eingeführt wird:

$$\begin{array}{lll} N \rightarrow \sum w & \sum x \rightarrow \sum wx & \sum x^2 \rightarrow \sum wx^2 \\ \sum y \rightarrow \sum wy & \sum y^2 \rightarrow \sum wy^2 & \sum xy \rightarrow \sum wxy \end{array}$$

Die Gewichtsfaktoren sind dem Quadrat der Fehler in y umgekehrt proportional:

$$w = (y/\sigma_y)^2$$

Diese Berechnungen können z.B. in einer Tabellenkalkulation (Excel, Calc) durchgeführt werden, es darf aber auch ein eigenes Programm geschrieben werden (C, C++, Mathematika . . .). Wichtig ist, daß die einzelnen Summen und Zwischenwerte als Ausdruck mit ins Protokoll aufgenommen werden, um etwaige Fehler im Nachhinein verfolgen zu können.

³ aus: William Lichten, Skriptum Fehlerrechnung

A.4 Tabellen und Plots

6. ATOMIC AND NUCLEAR PROPERTIES OF MATERIALS

Table 6.1. Revised April 1998 by D.E. Groom (LBNL). Gases are evaluated at 20°C and 1 atm (in parentheses) or at STP [square brackets]. Densities and refractive indices without parentheses or brackets are for solids or liquids, or are for cryogenic liquids at the indicated boiling point (BP) at 1 atm. Refractive indices are evaluated at the sodium D line. Data for compounds and mixtures are from Refs. 1 and 2.

Material	Z	A	(Z/A)	Nuclear ^a collision length λ_T {g/cm ² }	Nuclear ^a interaction length λ_I {g/cm ² }	$dE/dx _{\min}^b$ $\left\{ \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right\}$	Radiation length ^c X_0 {g/cm ² }	Density {g/cm ³ } ({g/ℓ} for gas)	Liquid boiling point at 1 atm(K)	Refractive index n $((n - 1) \times 10^6$ for gas)
H ₂ gas	1	1.00794	0.99212	43.3	50.8	(4.103)	61.28 ^d (731000)	(0.0833)[0.0899]		[139.2]
H ₂	1	1.00794	0.99212	43.3	50.8	4.045 ^e	61.28 ^d 866	0.0708	20.39	1.112
D ₂	1	2.0140	0.49652	45.7	54.7	(2.052)	122.4 724	0.169[0.179]	23.65	1.128 [138]
He	2	4.002602	0.49968	49.9	65.1	(1.937)	94.32 756	0.1249[0.1786]	4.224	1.024 [34.9]
Li	3	6.941	0.43221	54.6	73.4	1.639	82.76 155	0.534	—	—
Be	4	9.012182	0.44384	55.8	75.2	1.594	65.19 35.28	1.848	—	—
C	6	12.011	0.49954	60.2	86.3	1.745	42.70 18.8	2.265 ^f	—	—
N ₂	7	14.00674	0.49976	61.4	87.8	(1.825)	37.99 47.1	0.8073[1.250]	77.36	1.205 [298]
O ₂	8	15.9994	0.50002	63.2	91.0	(1.801)	34.24 30.0	1.141[1.428]	90.18	1.22 [296]
F ₂	9	18.9984032	0.47372	65.5	95.3	(1.675)	32.93 21.85	1.507[1.696]	85.24	[195]
Ne	10	20.1797	0.49555	66.1	96.6	(1.724)	28.94 24.0	1.204[0.9005]	27.09	1.092 [67.1]
Al	13	26.981539	0.48181	70.6	106.4	1.615	24.01 8.9	2.70	—	—
Si	14	28.0855	0.49848	70.6	106.0	1.664	21.82 9.36	2.33	—	3.95
Ar	18	39.948	0.45059	76.4	117.2	(1.519)	19.55 14.0	1.396[1.782]	87.28	1.233 [283]
Ti	22	47.867	0.45948	79.9	124.9	1.476	16.17 3.56	4.54	—	—
Fe	26	55.845	0.46556	82.8	131.9	1.451	13.84 1.76	7.87	—	—
Cu	29	63.546	0.45636	85.6	134.9	1.403	12.86 1.43	8.96	—	—
Ge	32	72.61	0.44071	88.3	140.5	1.371	12.25 2.30	5.323	—	—
Sn	50	118.710	0.42120	100.2	163	1.264	8.82 1.21	7.31	—	—
Xe	54	131.29	0.41130	102.8	169	(1.255)	8.48 2.40	2.953[5.858]	165.0	[701]
W	74	183.84	0.40250	110.3	185	1.145	6.76 0.35	19.3	—	—
Pt	78	195.08	0.39984	113.3	189.7	1.129	6.54 0.305	21.45	—	—
Pb	82	207.2	0.39575	116.2	194	1.123	6.37 0.56	11.35	—	—
U	92	238.0289	0.38651	117.0	199	1.082	6.00 ≈0.32	≈18.95	—	—
Air, (20°C, 1 atm.), [STP]		0.49919	62.0	90.0	(1.815)	36.66	[30420] (1.205)[1.2931]	78.8	(273)	[293]
H ₂ O		0.55509	60.1	83.6	1.991	36.08	36.1 1.00	373.15	1.33	—
CO ₂		0.49989	62.4	89.7	(1.819)	36.2	[18310] [1.977]	—	[410]	—
Shielding concrete ^g		0.50274	67.4	99.9	1.711	26.7	10.7 2.5	—	—	—
Borosilicate glass (Pyrex) ^h		0.49707	66.2	97.6	1.695	28.3	12.7 2.23	—	1.474	—
SiO ₂ (fused quartz)		0.49926	66.5	97.4	1.70 ⁱ	27.05	12.3 2.20 ^j	—	1.458	—
Dimethyl ether, (CH ₃) ₂ O		0.54778	59.4	82.9	—	38.89	— —	248.7	—	—
Methane, CH ₄		0.62333	54.8	73.4	(2.417)	46.22	[64850] 0.4224[0.717]	111.7	[444]	—
Ethane, C ₂ H ₆		0.59861	55.8	75.7	(2.304)	45.47	[34035] 0.509(1.356) ^k	184.5	(1.038) ^k	—
Propane, C ₃ H ₈		0.58962	56.2	76.5	(2.262)	45.20	— (1.879)	231.1	—	—
Isobutane, (CH ₃) ₂ CHCH ₃		0.58496	56.4	77.0	(2.239)	45.07	[16930] [2.67]	261.42	[1900]	—
Octane, liquid, CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃		0.57778	56.7	77.7	2.123	44.86	63.8 0.703	398.8	1.397	—
Paraffin wax, CH ₃ (CH ₂) _{n≈23} CH ₃		0.57275	56.9	78.2	2.087	44.71	48.1 0.93	—	—	—
Nylon, type 6 ^l		0.54790	58.5	81.5	1.974	41.84	36.7 1.14	—	—	—
Polycarbonate (Lexan) ^m		0.52697	59.5	83.9	1.886	41.46	34.6 1.20	—	—	—
Polyethylene terephthalate (Mylar) ⁿ		0.52037	60.2	85.7	1.848	39.95	28.7 1.39	—	—	—
Polyethylene ^o		0.57034	57.0	78.4	2.076	44.64	≈47.9 0.92–0.95	—	—	—
Polyimide film (Kapton) ^p		0.51264	60.3	85.8	1.820	40.56	28.6 1.42	—	—	—
Lucite, Plexiglas ^q		0.53937	59.3	83.0	1.929	40.49	≈34.4 1.16–1.20	—	≈1.49	—
Polystyrene, scintillator ^r		0.53768	58.5	81.9	1.936	43.72	42.4 1.032	—	1.581	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon) ^s		0.47992	64.2	93.0	1.671	34.84	15.8 2.20	—	—	—
Polyvinyltoluene, scintillator ^t		0.54155	58.3	81.5	1.956	43.83	42.5 1.032	—	—	—
Barium fluoride (BaF ₂)		0.42207	92.0	145	1.303	9.91	2.05 4.89	—	1.56	—
Bismuth germanate (BGO) ^u		0.42065	98.2	157	1.251	7.97	1.12 7.1	—	2.15	—
Cesium iodide (CsI)		0.41569	102	167	1.243	8.39	1.85 4.53	—	1.80	—
Lithium fluoride (LiF)		0.46262	62.2	88.2	1.614	39.25	14.91 2.632	—	1.392	—
Sodium fluoride (NaF)		0.47632	66.9	98.3	1.69	29.87	11.68 2.558	—	1.336	—
Sodium iodide (NaI)		0.42697	94.6	151	1.305	9.49	2.59 3.67	—	1.775	—
Silica Aerogel ^v		0.52019	64	92	1.83	29.83	≈150 0.1–0.3	—	1.0+0.25ρ	—
NEMA G10 plate ^w			62.6	90.2	1.87	33.0	19.4 1.7	—	—	—

Abbildung 5: Atomic and nuclear properties of materials (Quelle: Particle Physics Booklet der Particle Data Group (July 1998) oder <http://www.cern.ch/pdg/>)

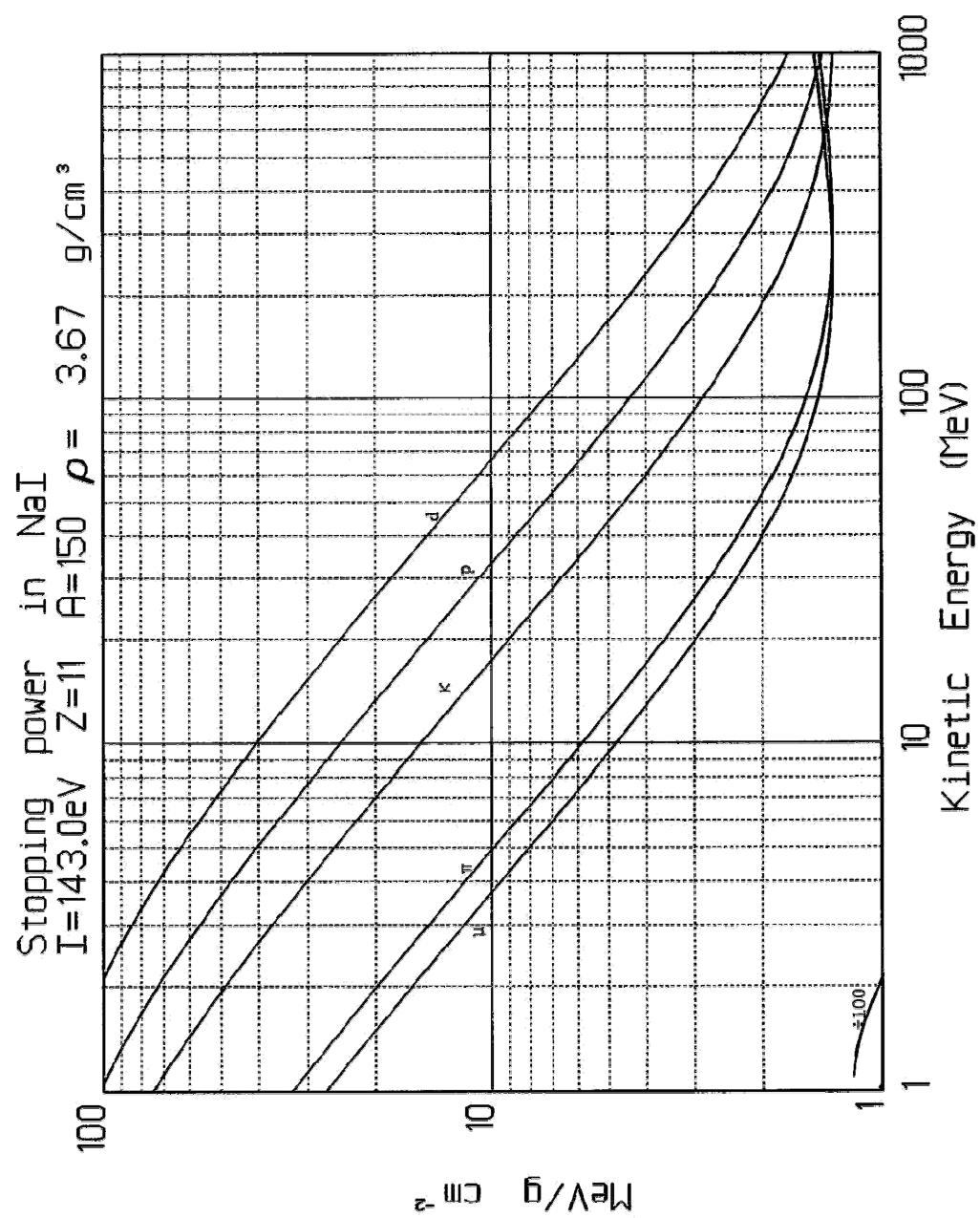


Abbildung 6: Bremsvermögen verschiedener Teilchen in NaI

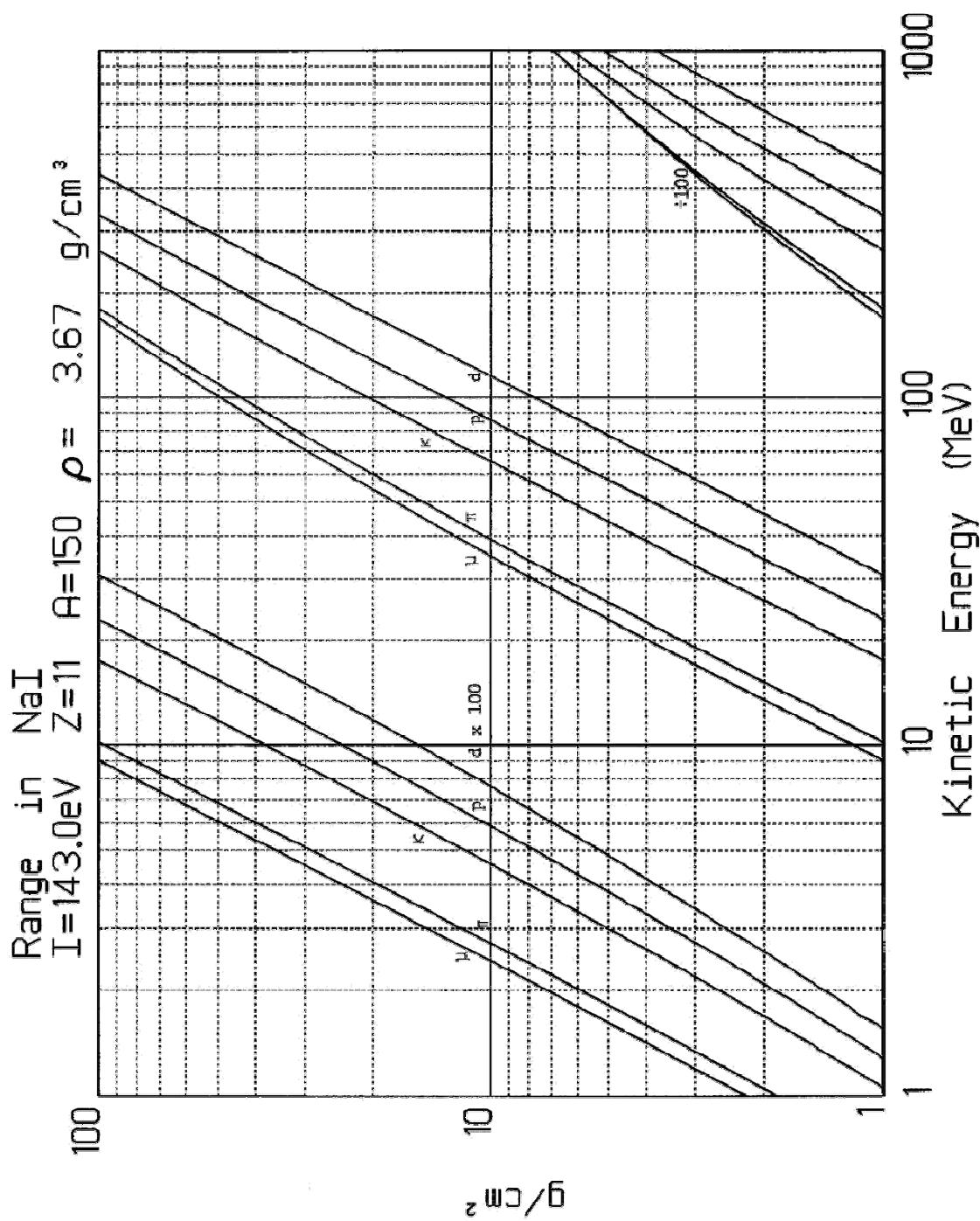


Abbildung 7: Reichweiten verschiedener Teilchen in NaI

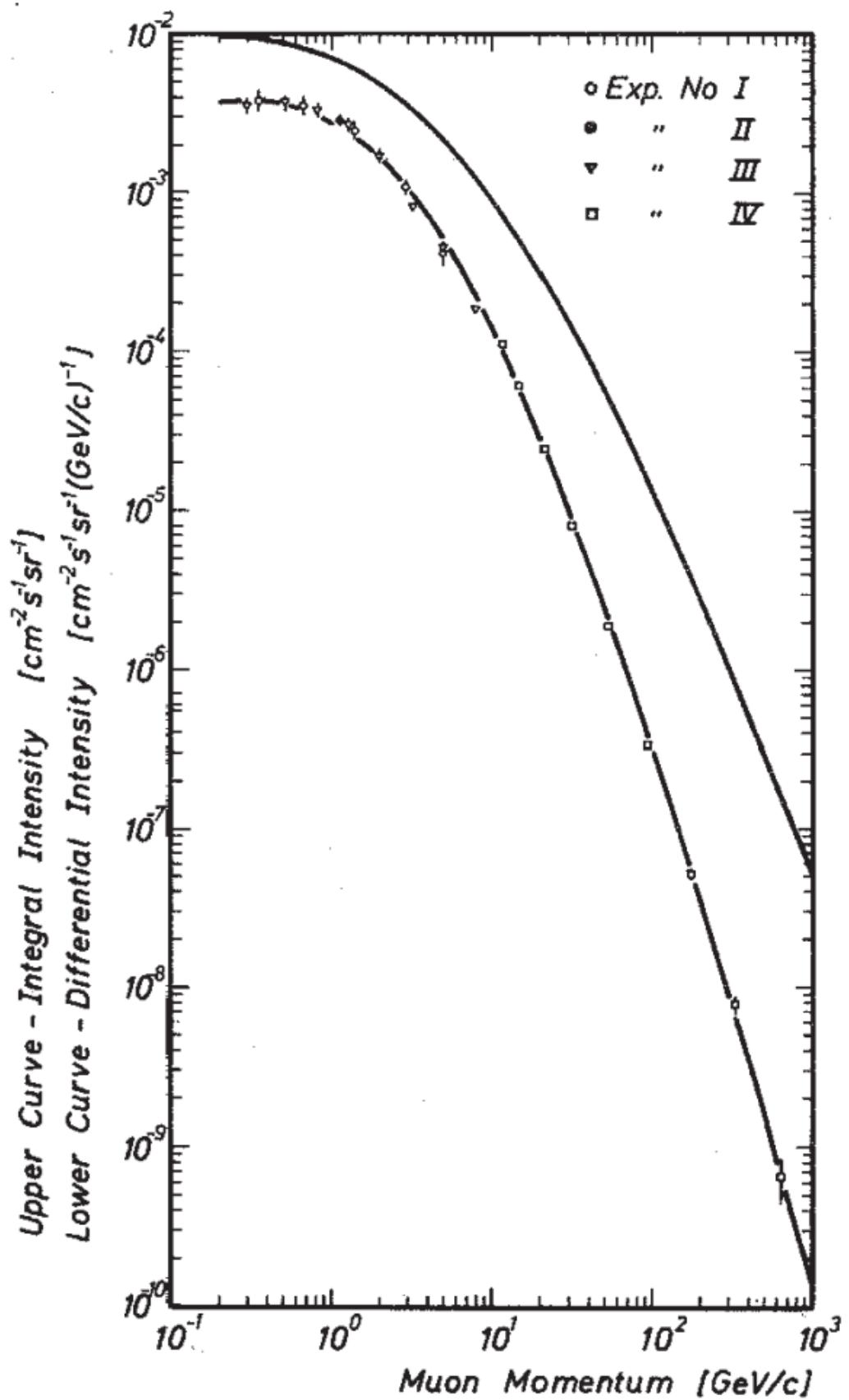


Abbildung 8: Absoluter vertikaler Myonenfluß auf Meereshöhe in Kiel
(O. C. Allkofer et al. Phys. Lett. 36 B (1971) 425)