

# 2.6 Höhenstrahlung

## Ausarbeitung

Fortgeschrittenenpraktikum an der TU Darmstadt  
Versuch durchgeführt von: Mussie Beian, Florian Wetzel  
Versuchsdatum: 02.02.2009  
Betreuer: Dipl. Phys. Martin Konrad



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

## Inhaltsverzeichnis

1.....	Theorie zum Versuch .....	3
1.1.	Höhenstrahlung .....	3
1.2.	Elektronische Bauteile .....	4
1.2.1.	Detektoren.....	4
1.2.2.	Diskriminatoren.....	4
1.2.3.	Koinzidenzeinheiten .....	4
1.2.4.	Delay. ....	4
1.2.5.	TAC (Time-to-Amplitude-Converter) .....	4
1.2.6.	ADC (Analog-to-Digital-Converter).....	4
2.....	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	6
2.1.	Signale der einzelnen Elektronikkomponenten prüfen .....	6
2.2.	Energiekalibrierung .....	6
2.3.	Winkelverteilung .....	6
2.4.	Energiemessung von Myonen .....	8
2.5.	Zeiteichung.....	8
2.6.	Zeitausgleich .....	10
2.7.	Geschwindigkeit von $\gamma$ -Strahlen.....	11
2.8.	Geschwindigkeit von Myonen.....	12
2.9.	Statistik der Schauermessung ( <i>nicht selbst durchgeführt – alte Daten</i> ) .....	12

# 1. Theorie zum Versuch

## 1.1. Höhenstrahlung

Höhenstrahlung, oder auch kosmische Strahlung genannt, ist wie der Name verrät Strahlung, die uns aus dem Kosmos erreicht. Dabei klassifiziert man in Primär- und Sekundärstrahlung.

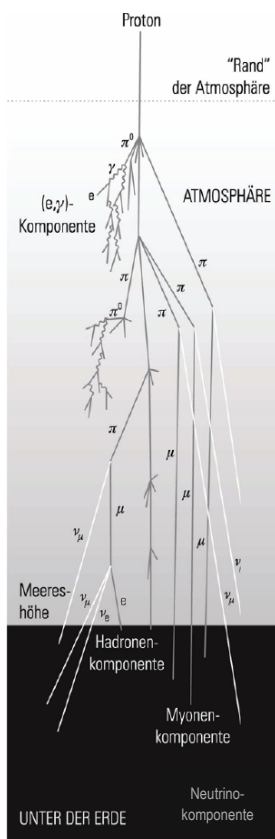
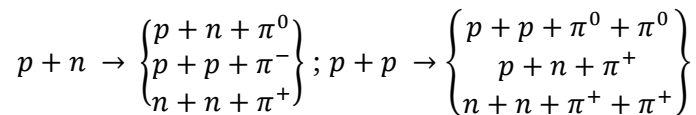
Unter Primärstrahlung versteht man die Strahlung, die unsere Atmosphäre erreicht, die Sekundärstrahlung ist die Strahlung, die wir auf der Erdoberfläche messen können.

Die Primärstrahlung setzt sich zu 99% aus ionisierten Kernen (84% Wasserstoffkerne, 12,5 % Heliumkerne, 2,5 % Kerne mit  $Z \geq 3$ ) und ca. 1% Elektronen zusammen.

Wasserstoffkerne kann man als Bausteine der übrigen Atome auffassen. In Sternen verbrennt Wasserstoff zu Helium. Brennt ein Stern aus (Supernova), so werden Temperaturen und Drücke erreicht unter denen Kernfusion stattfinden kann. Dadurch entstehen Kerne mit höheren Ordnungszahlen. (bis  $\text{Fe}^{58}$  – dort ist die größte Bindungsenergie pro Nukleon erreicht)

Aus dieser Darstellung der Entstehung von Atomen ist ersichtlich, dass Wasserstoff und Helium sehr viel häufiger in der Natur vorkommen als Atome mit höheren Ordnungszahlen.

Da die Kerne in der Atmosphäre wechselwirken, erreicht uns die Primärstrahlung auf der Erdoberfläche nicht. Allerdings entstehen bei diesen Wechselwirkungsprozessen neue Teilchen, die wir als Sekundärstrahlung messen können. Da die Lebensdauer von freien Neutronen lediglich bei ca. 15 min liegt, wogegen man heutzutage die Lebensdauer von freien Protonen auf nahezu unendlich schätzt, sind es hauptsächlich Protonen, die die Atmosphäre erreichen. Diese wechselwirken dann mit Neutronen oder Protonen in der Atmosphäre nach folgenden Schemata:



Die in diesen Prozessen entstandenen Protonen und Neutronen wechselwirken wiederum mit anderen Teilchen in der Atmosphäre, wodurch ein Ausgangsproton bis zu  $10^6$  Sekundärteilchen erzeugen kann.

Die Pionen zerfallen zu Gammastrahlen ( $\pi^0$ ), bzw. zu Myonen und Neutrinos ( $\pi^+, \pi^-$ ).

Viele dieser Teilchen bleiben jedoch in der Atmosphäre, einige erreichen die Meereshöhe. Je nach Energie kann man diese dann in unterschiedlichen Erdtiefen nachweisen. Die auf Meereshöhe registrierte Sekundärstrahlung setzt sich zu 80% aus Myonen, zu ca. 20% aus Elektronen und Positronen und zu ca. 1% aus Hadronen zusammen.

Erstmals wurde die Höhenstrahlung 1912 vom österreichischen Physiker Victor F. Hess nachgewiesen, der mithilfe einer Ionisationskammer die Strahlung in verschiedenen Höhen maß. Diese Versuche führte er in einem Heißluftballon durch. Dabei stellte er fest, dass die Strahlungsintensität bis ca. 700m NN. abnahm und dann scheinbar ohne ein Ende absehen zu können anstieg. Daraus

Quelle: Anleitungsblatt

---

schloss er richtig, dass die Erde eine gewisse Strahlungsquelle darstellt, jedoch auch eine andere Strahlungskomponente mit beteiligt war, deren Ursache er aus dem Weltall vermutete. Um die Sonne als Quelle zu untersuchen führte er den gleichen Versuch mit den gleichen Resultaten während einer Sonnenfinsternis durch und schloss die Sonne als verantwortliche Quelle aus.

## **1.2. Elektronische Bauteile**

### **1.2.1. Detektoren**

Die in unserem Versuch verwendeten Szintillationsdetektoren beinhalten ein organisches Material, welches beim Auftreffen von elektromagnetischer Strahlung angeregt wird. Beim Zurückfallen auf den Grundzustand sendet dieses dann Photonen aus, die durch ein lichtdurchlässiges Material über Alufolie auf eine Photozelle treffen, wo pro Photon ein Elektron herausgeschlagen wird. Danach wird dieses durch einen Photomultiplier geschickt. In diesem wird das Elektron nacheinander auf geschickt angeordnete Dynoden beschleunigt, wo es weitere Elektronen herausschlägt, wodurch es zu einer Kettenreaktion kommt. Das Ausgangssignal ist dann proportional zur Energie der im Szintillator deponierten Energie.

### **1.2.2. Diskriminatoren**

Diskriminatoren wandeln Signale, die eine gewisse Bedingung erfüllen in logische Signale um. Dadurch erhält man ein rauschfreies Signal, verliert allerdings die Amplitudenform.

Es gibt verschiedene Arten von Diskriminatoren. Der Leading-Edge-Diskriminator gibt Signale weiter, die einen gewissen Schwellenwert überschreiten.

Da Signale unterschiedlicher Amplituden zu verschiedenen Zeitpunkten erkannt werden, gibt es Constant-Fraction-Diskriminatoren, die durch geschicktes Übereinanderlegen des Ausgangssignals und des verzögerten invertierten Signals amplitudenunabhängig einen Nulldurchgang erzeugen, zu dessen Zeitpunkt das Signal weitergegeben wird.

### **1.2.3. Koinzidenzeinheiten**

Koinzidenzeinheiten vergleichen Signale auf unterschiedlichen Kanälen miteinander. Somit kann beispielsweise ein Signal weitergegeben werden, wenn auf einem beliebigen Signal ankommt, oder aber nur, wenn auf allen ausgewählten Kanälen zeitgleich ein Signal eintrifft. Dieses Ausgangssignal kann zudem in seiner Breite verändert werden. Beispielsweise lag das Eingangssignal in unserem Versuch im Nanosekundenbereich; das Koinzidenzmodul gab dann Signale im Mikrosekundenbereich aus.

### **1.2.4. Delay**

Ein Delay ist ein simples Bauteil zur Verzögerung des Signals und besteht meist aus aufgewickelten Kabeln. Dabei wird ausgenutzt, dass ein Signal 5 ns benötigt um einen Meter Kabel zurückzulegen.

### **1.2.5. TAC (Time-to-Amplitude-Converter)**

Ein Time-to-Amplitude-Converter (TAC) wandelt eine Zeitdifferenz zwischen zwei Signalen in eine Amplitude um. Dabei wird proportional zur Zeitdifferenz eine Amplitude ausgegeben, sofern das zweite Signal (STOP-Eingang am TAC) innerhalb eines gewissen Zeitfensters nach dem ersten Signal (START-Eingang am TAC) eintrifft.

### **1.2.6. ADC (Analog-to-Digital-Converter)**

Ein Analog-to-Digital-Converter (ADC) wandelt ein analoges Signal in ein digitales Signal um, damit es beispielsweise mit einem PC ausgewertet werden kann. Dabei wird jeweils nach einem bestimmten

---

Zeitintervall der aktuelle Amplitudenwert gemessen und dieser Wert in digitaler Form weitergegeben. Die Zeitinformation ergänzt meist, falls nötig, ein Mikrocontroller oder der PC. Der jeweilige Amplitudenwert wird in der Ausgabe des ADC einem von 1024 Kanälen zugeordnet.

## 2. Versuchsdurchführung und Auswertung

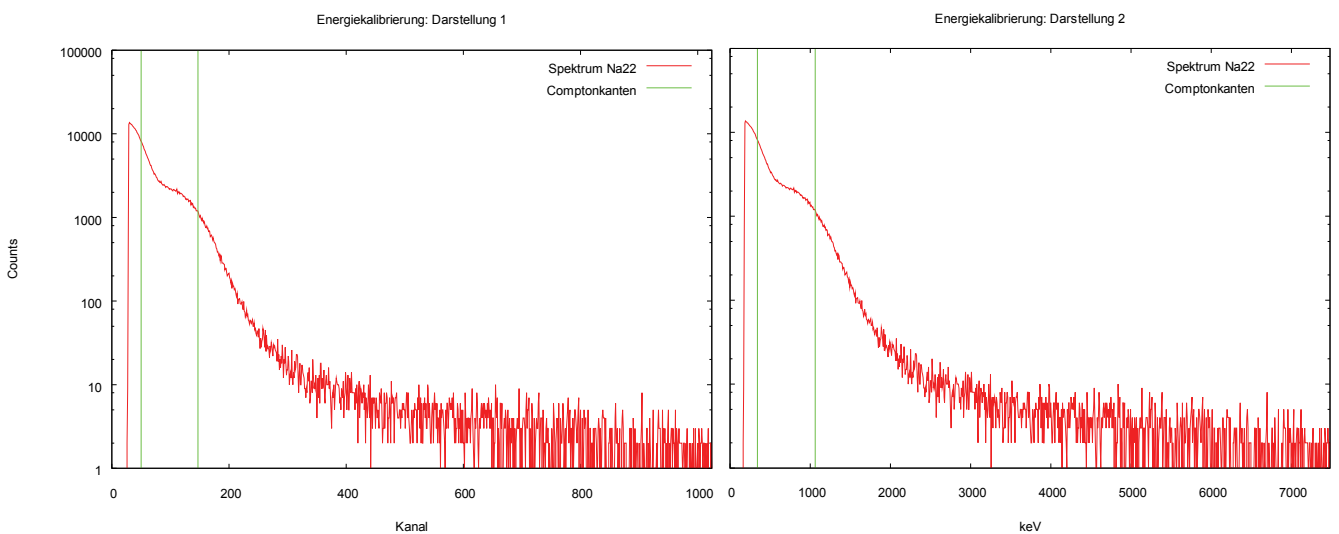
### 2.1. Signale der einzelnen Elektronikkomponenten prüfen

Zunächst haben wir mithilfe eines Oszilloskops das Ausgangssignal des Detektors, das verstärkte Signal des Vorverstärkers, das logische Signal des Diskriminators und das Ausgangssignal der Koinzidenzeinheit anhand der Beispiele aus der Vorbereitungsmappe überprüft.

### 2.2. Energiekalibrierung

Anschließend haben wir die 1024 Kanäle der Spektralsoftware auf dem PC mit Hilfe der Compton-Kanten von  $^{22}\text{Na}$  geeicht. Dazu haben wir das Signal von Detektor 2 an den ADC weitergeleitet, der an den PC angeschlossen war.

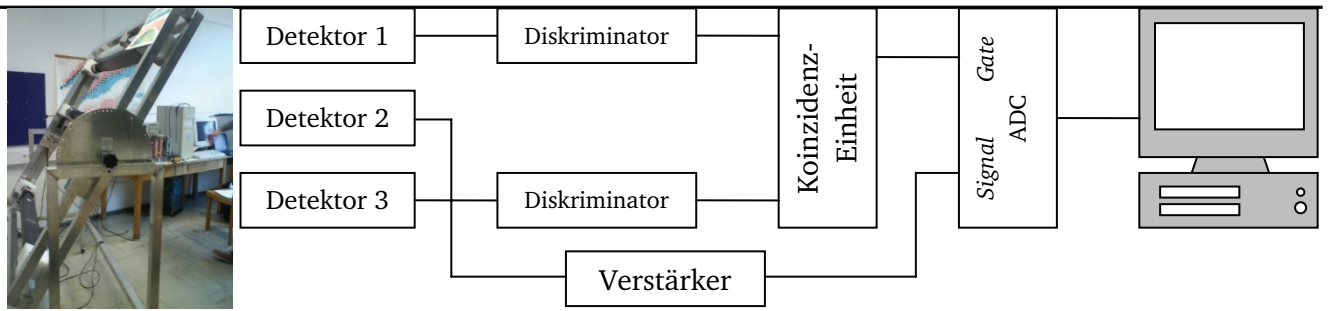
Die Compton-Kanten waren in unserem Diagramm nicht klar zu erkennen, daher haben wir eine Eichung dieser bekannten Werte auf die Mitten zwischen je zwei Plateaus geeicht:



Die drei Plateaus haben wir bei 13400, 2200 und 5 Counts abgelesen und daraufhin die Compton-Kanten zu 7800 und 1100 berechnet, was den Kanälen 50 und 147 entspricht. Diese haben wir dann auf die bekannten Energien von 341 und 1062 keV geeicht.

### 2.3. Winkelverteilung

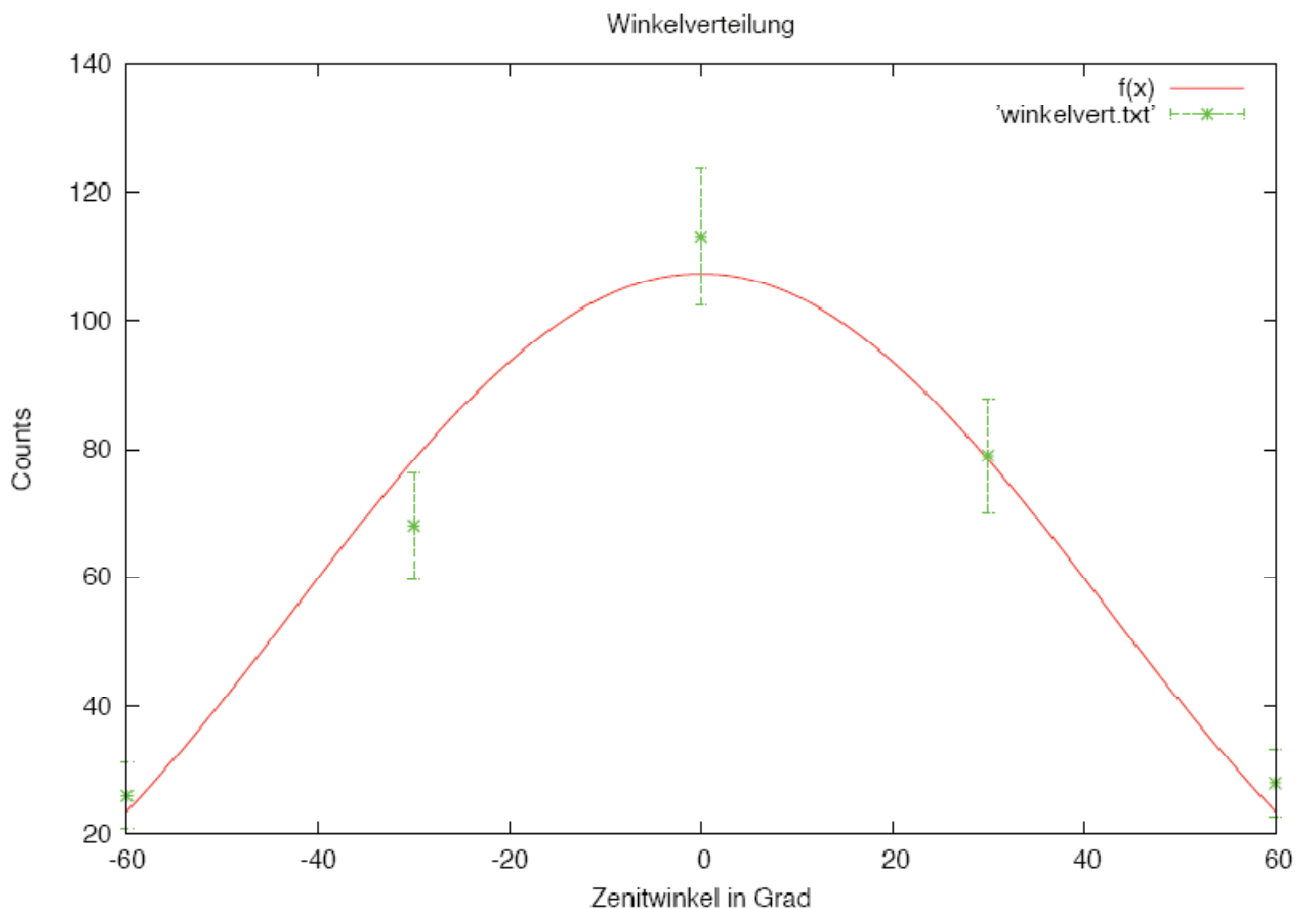
Um die Winkelabhängigkeit der kosmischen Strahlung zu untersuchen, haben wir die Intensitäten der Myonen unter verschiedenen Winkeln gemessen. Aufgrund der durch das Erdmagnetfeld bedingten Ablenkung der kosmischen Strahlung haben wir die Detektoren in Nord-Süd-Richtung aufgebaut. Anschließend haben wir jeweils eine 10-minütige Messung unter  $-60^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $+30^\circ$ ,  $+60^\circ$  durchgeführt. („Westcoast“ ist positiv, „Eastside“ ist negativ) Die noch fehlende Messung unter  $0^\circ$  haben wir aus der anschließenden Messung (Energimessung von Myonen) entnommen und hier bereits in der Auswertung verwendet. Bei allen Messungen haben wir mit folgendem Versuchsaufbau gearbeitet:



Die Signale aus den Detektoren 1 und 3 werden zunächst jeweils an einen Diskriminator mit eingestelltem Schwellenwert von 0,14V weitergeleitet. Von dort aus gelangen sie in eine Koinzidenzeinheit, die nur dann ein Signal weitergibt, wenn auf beiden Kanälen gleichzeitig ein Signal eintrifft. Dies hat den Hintergrund, dass man lediglich Myonen detektieren möchte, die aus dem jeweilig eingestellten Winkel auf die Detektoren treffen, also alle Detektoren durchlaufen. Da die Reaktionszeit der Messapparatur langsamer ist, als das Zeitintervall, das ein Myon zwischen dem ersten und dritten Detektor durchläuft, kommen diese Signale zeitgleich in der Koinzidenzeinheit an. Da bereits in den Diskriminatoren die Amplitudeninformation verloren gegangen ist, nutzt man das Ausgangssignal der Koinzidenzeinheit lediglich als Gate (~Trigger) für das verstärkte Signal von Detektor 2, welches dann an den PC weitergegeben wird.

An unsere Messdaten konnten wir die Verteilungsfunktion  $I(\theta) = A \cos^n(\theta)$  fitten und erhielten  $A = 107,3$   $n = 2,18$ :

$$I(\theta) = 107,3 \cos^{2,18}(\theta)$$

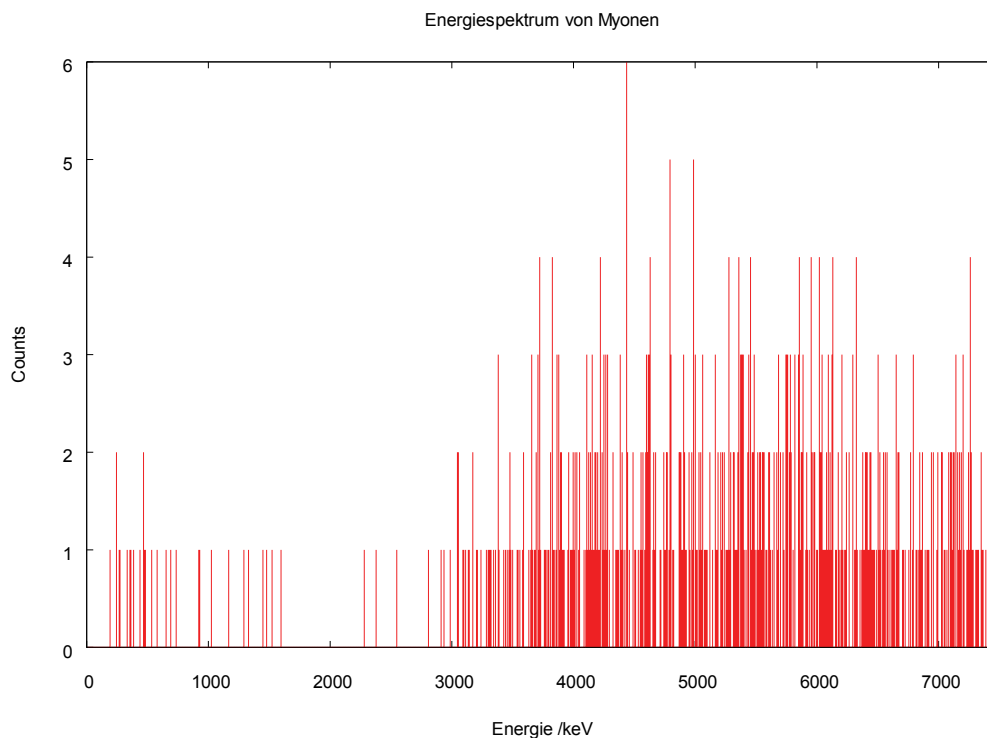


Würde man diesen Versuch besser kalibrieren und länger durchführen, so könnte man wahrscheinlich auch den Ost-West-Effekt erkennen. Allerdings wäre ein solches Ergebnis aufgrund der unterschiedlich dicken Wände in die entsprechenden Richtungen wohl auch fraglich.

*Ost-West-Effekt: Aufgrund des Erdmagnetfeldes werden ionisierte Teilchen auf dem Weg zur Erde auf spiralförmige Trajektorien gelenkt, deren Richtung von der Ladung abhängt. Da kosmische Strahlung hauptsächlich aus positiv geladenen Teilchen besteht, ragen einige Bahnen im Osten nicht in den Weltraum hinein, wodurch aus dieser Richtung weniger kosmische Strahlung die Erde erreichen kann.*

## 2.4. Energiemessung von Myonen

Zur Energiemessung von Myonen verwendeten wir den Versuchsaufbau aus dem vorigen Teilversuch (Winkelverteilung) und nahmen eine 60-minütige Messreihe unter einem Winkel von  $0^\circ$  auf.



Aus dem erhaltenen Spektrum kann man nun die durchschnittliche Energie mitteln, die ein Myon an einen Detektor abgibt. Unser Versuch ergab eine mittlere Energie von 5152,96 keV.

## 2.5. Zeiteichung

Um die nachfolgenden Zeitspektren richtig deuten zu können, führten wir zunächst eine Zeiteichung mit einer  $^{22}\text{Na}$ -Probe durch. Dabei wollten wir aufgrund unterschiedlicher Kabellängen und unterschiedlicher Elektronik die Zeitverzögerung zwischen dem Signal von Detektor 1 und Detektor 3 ausgleichen.

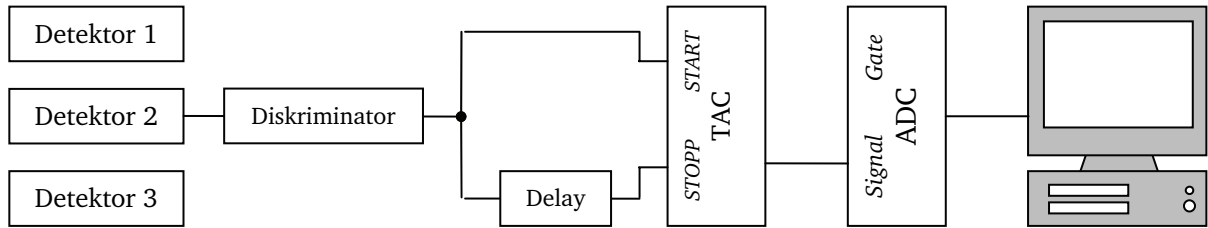
$^{22}\text{Na}$  kann entweder durch einen  $\beta^+$ -Zerfall oder den Elektroneneinfang zerfallen, wobei die Wahrscheinlichkeit für den  $\beta^+$ -Zerfall mit ca. 90% wesentlich größer ist.

Beim  $\beta^+$ -Zerfall werden jeweils zwei  $\gamma$ -Quanten frei, die sich aufgrund der Impulserhaltung entgegengesetzt voneinander fortbewegen.



Wenn wir nun die Probe genau in die Mitte von Detektor 1 und Detektor 3 positionieren, so kann man davon ausgehen, dass die frei werdenden  $\gamma$ -Quanten-Paare gleichzeitig die beiden Detektoren erreichen.

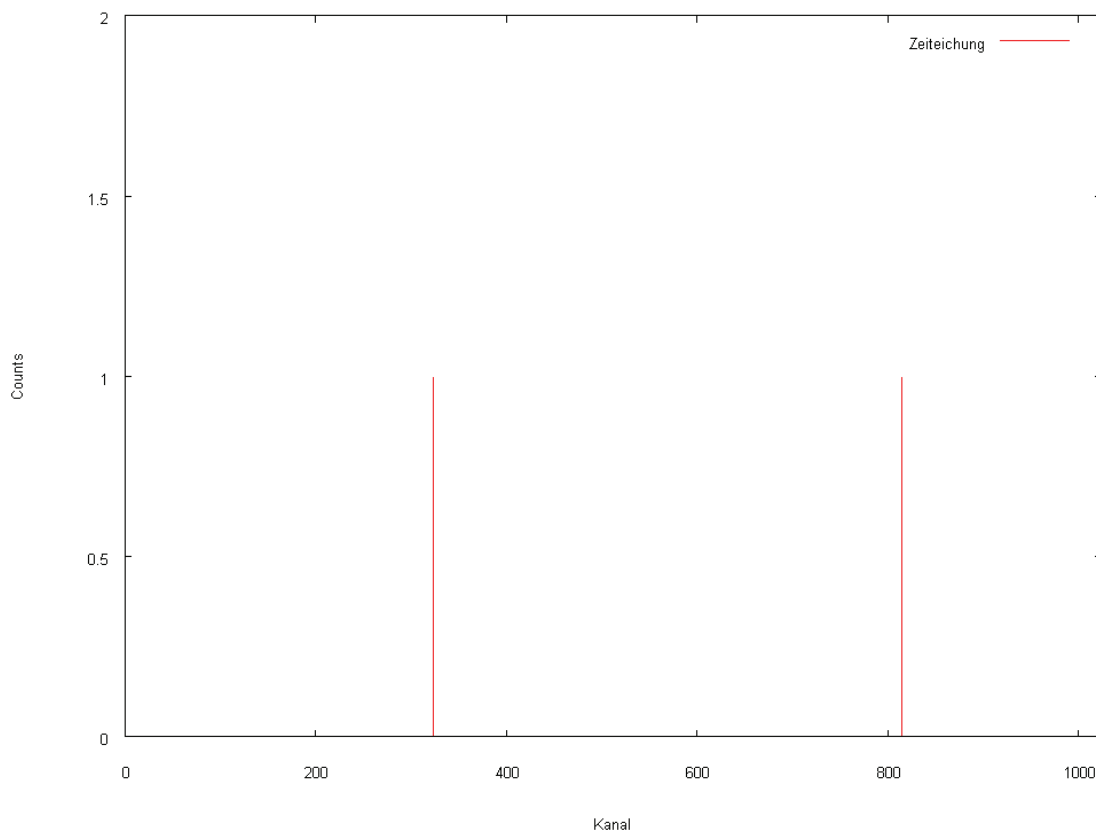
Dadurch werden an den Detektoren zeitgleich Signale erkannt, mit Hilfe derer die Zeiteichung durchgeführt werden kann.



Das Signal von Detektor 2 wird zunächst mithilfe eines Diskriminators (Schwellenwert: 0,011 V) ausgewertet und anschließend gesplittet. Ein Teil wird unmittelbar an den START-Eingang und der andere über ein Delay an den STOPP-Eingang des Delay geleitet.

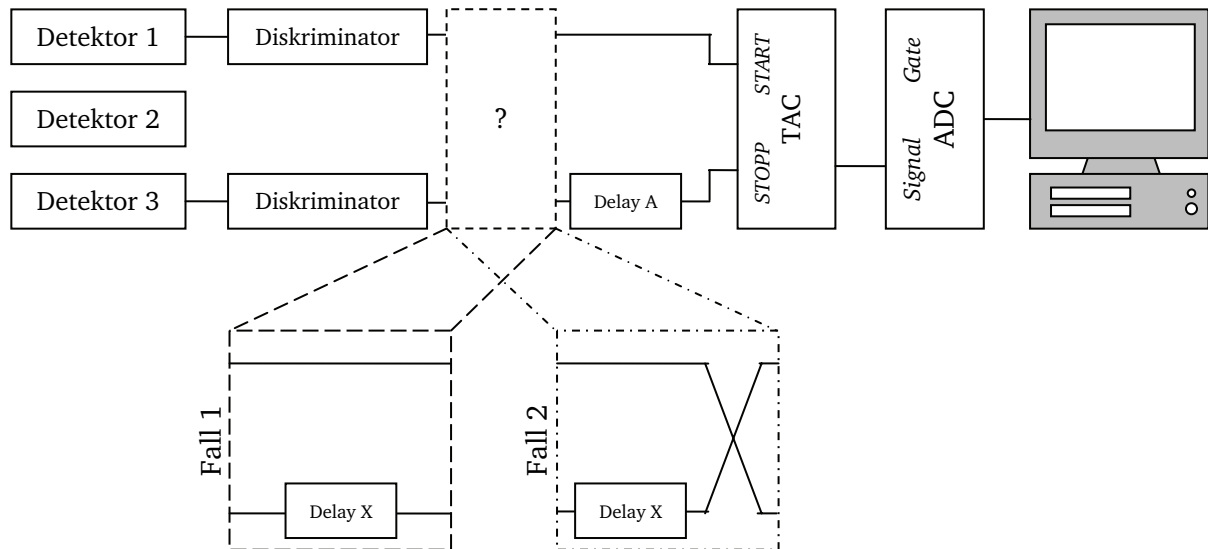
Führt man jetzt jeweils eine Messung mit zwei unterschiedlichen Delay-Zeiten durch, so entspricht die Differenz der beiden Zeiten dem Abstand der beiden Messdaten im Diagramm auf dem PC. Mit diesen Daten kann man nun die Zeit kalibrieren.

Wir führten unsere Messungen mit Delay-Zeiten von 10 und 30 ns durch. Die entsprechenden Signale waren auf den Kanälen 323 und 815 zu erkennen, woraus wir dem Abstand von 492 Kanälen eine Zeitdifferenz von 20 ns zwischen dem START- und STOPP-Signal des TAC zuordneten.



## 2.6. Zeitausgleich

Für die Geschwindigkeitsmessung von Teilchen ist es unbedingt notwendig, dass die Signalwege von Diskriminator 1 und 3 zum ADC gleich lang sind. Da dies von vorneherein nie zu 100% gegeben ist, ist es notwendig einen Zeitausgleich durchzuführen. Die Idee, die hinter dieser Durchführung steckt, liegt darin, den Kabelunterschied mit einem zusätzlichen Delay auszugleichen. Leitet man nun die Signale an den TAC weiter, so ist es bei Zeitgleichheit logischerweise unerheblich, welches Signal in welchen Eingang gegeben wird. Da der TAC bei Zeitgleichheit natürlich kein Ausgangssignal liefern würde, schaltet man ein festes Delay vor den STOPP-Eingang.

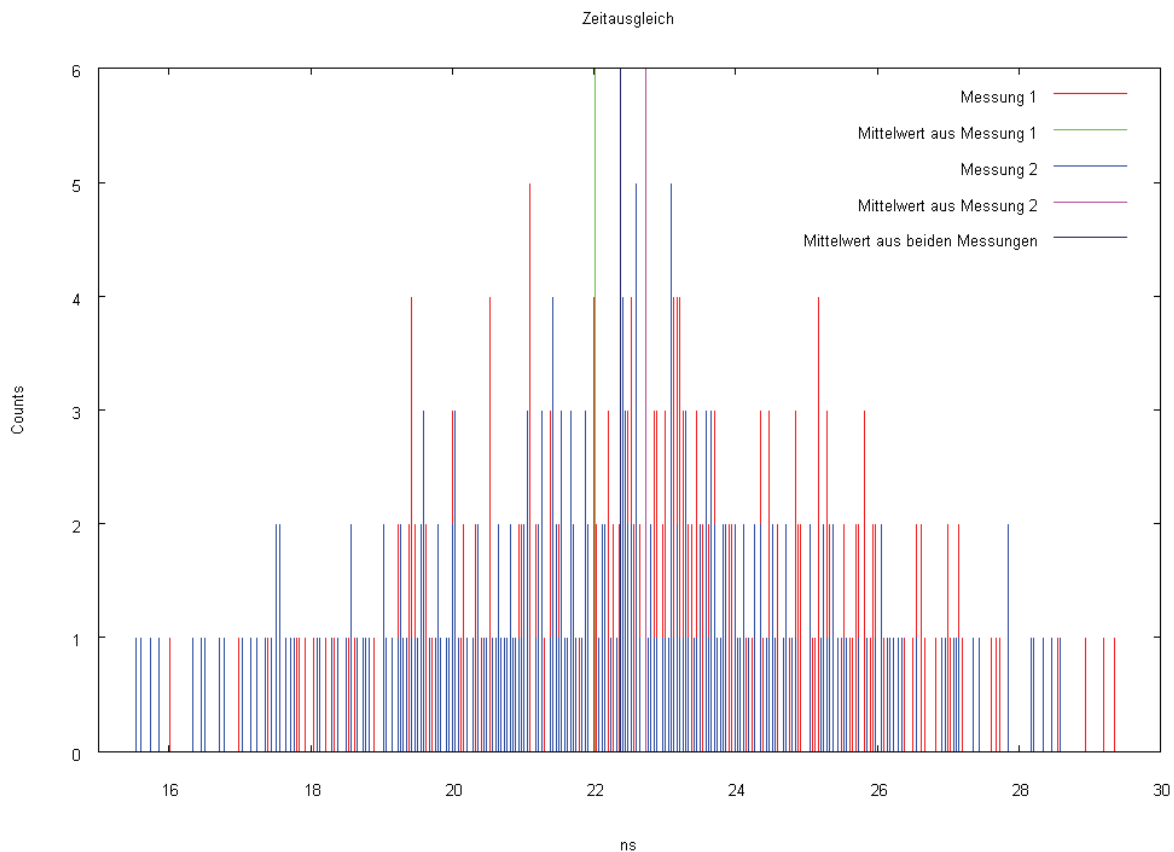


Den Zeitausgleich haben wir mit  $^{22}\text{Na}$  (in der Mitte der beiden Detektoren) durchgeführt und daher den Diskriminator-Schwellwert auf 0,011 V eingestellt.

Fall 1: Das logische Signal von Detektor 1 wird an den START-Eingang des TAC geleitet, das logische Signal von Detektor 3 wird zunächst in einem variabel einstellbaren Delay X verzögert und dann über ein auf 22,5 ns fest eingestelltes Delay A an den entsprechenden STOPP-Eingang des TAC weitergegeben.

Fall 2: Das logische Signal von Detektor 1 wird über das Delay A an den STOPP-Eingang des TAC geleitet; das logische Signal von Detektor 3 wird wieder mit dem variablen Delay X verzögert und dann an den START-Eingang des TAC weitergegeben.

Wir haben beide Messungen jeweils 300 s zunächst mit einer Verzögerung von  $\text{Delay X} = 11,5 \text{ ns}$  durchgeführt. Die Messungen streuten sehr stark, weshalb wir aus jeder Messung einen Mittelwert bildeten. Diese starke Streuung kann verschiedene Gründe haben; eine mögliche Erklärung ist der mögliche Compton-Effekt am Blei-Block, auf dem die Probe aufliegt.



Wir erhielten folgende Mittelwerte: Fall 1: 23,39 ns, Fall 2: 21,87 ns

Da die zeitliche Verzögerung genau dann ausgeglichen ist, wenn diese Werte übereinstimmen, verringerten wir die variable Verzögerungszeit von Delay X auf 11 ns. Die damit berechneten Mittelwerte ergaben sich folgendermaßen: Fall 1: 22,74 ns, Fall 2: 22,03 ns. Da unsere Delay-Zeiten nur in 0,5 ns-Schritten eingestellt werden konnten, begnügten wir uns mit dieser Einstellung und nahmen im Folgenden die beiden Signalwege als gleich lang an. Als Verzögerungszeit zwischen den Detektorsignalen wählten wir den Mittelwert:  $\Delta t = 22,38$  ns

## 2.7. Geschwindigkeit von $\gamma$ -Strahlen

Um die Geschwindigkeit von  $\gamma$ -Strahlen zu messen, haben wir die  $^{22}\text{Na}$ -Probe oben in den dafür vorgesehenen Bleiklotz positioniert.

Der Versuchsaufbau entspricht dem vorigen Fall 1. Bei der Messung erhielten wir eine Zeitdifferenz zwischen den Detektorsignalen von 22,36 ns. Im Vergleich mit der aus der Zeitausgleichsmessung bekannten Verzögerungszeit der Apparatur ( $22,38$  ns –  $22,36$  ns =  $0,02$  ns), berechneten wir die Geschwindigkeit der  $\gamma$ -Strahlen zu  $5 \cdot 10^{10} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . (Der Abstand der Detektoren beträgt  $\Delta x = 1$  m)

Dieses Ergebnis ist sehr unbefriedigend, wenn man bedenkt, dass sich  $\gamma$ -Strahlen nachgewiesenermaßen mit Lichtgeschwindigkeit ( $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) ausbreiten.

Mögliche Fehlerquellen sind unter anderem der doch sehr grobe Zeitausgleich und die kurze Messdauer.

## 2.8. Geschwindigkeit von Myonen

Um die Geschwindigkeit von Myonen messen zu können, verwendeten wir den gleichen Versuchsaufbau wie bei der vorherigen Messung (Geschwindigkeit von  $\gamma$ -Strahlen) und änderten den Diskriminator-Schwellwert auf 0,14 V.

Bei der Messung erhielten wir als Zeitdifferenz 22,64 ns und berechneten daraus nach obigem Schema die Geschwindigkeit von Myonen zu  $3,85 \cdot 10^9 \frac{m}{s}$

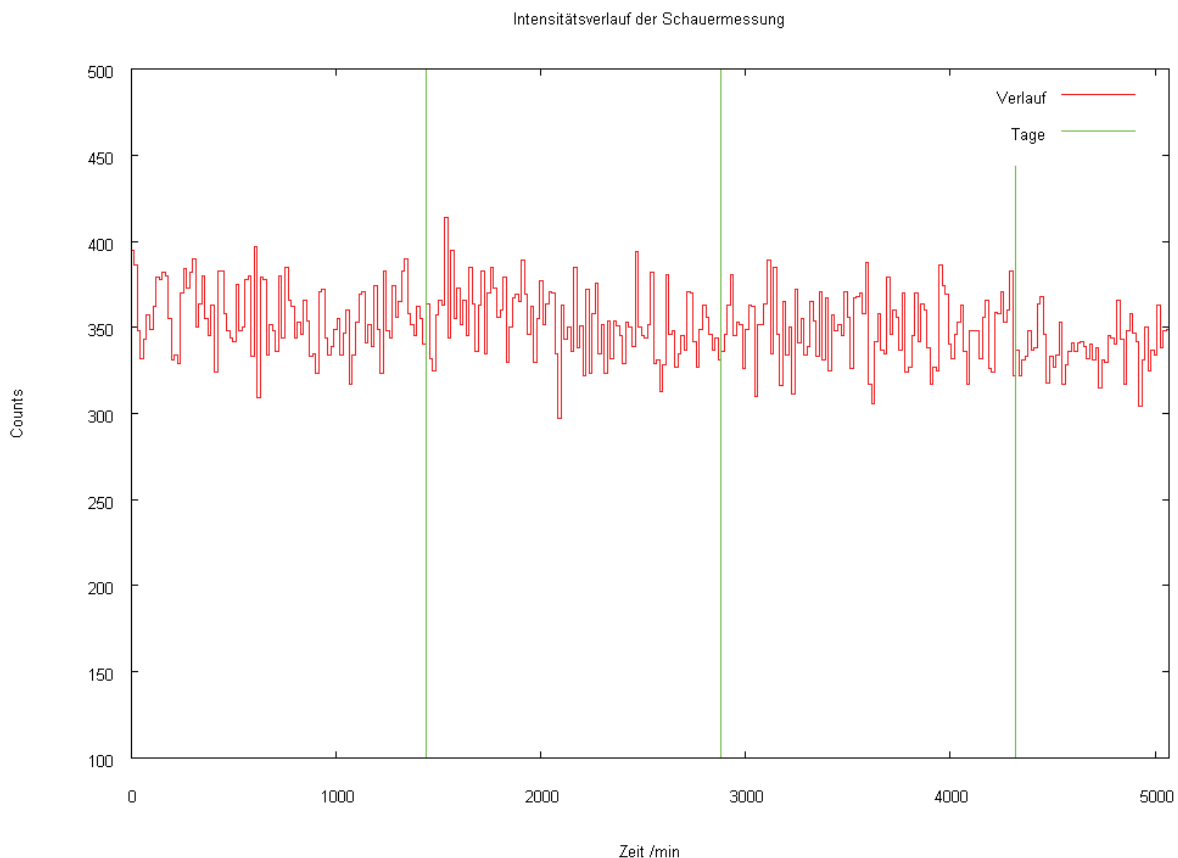
Dieses Ergebnis ist natürlich nicht viel besser als das vorige (Wir hätten wieder die Lichtgeschwindigkeit erwartet), da wir an der Apparatur keine Veränderungen, wie etwa einen neuen Zeitausgleich, vorgenommen haben.

## 2.9. Statistik der Schauerermessung (*nicht selbst durchgeführt – alte Daten*)

Für eine Schauerermessung verwendet man die bereits zuvor verwendete Schaltung und richtet die Detektoren horizontal aus ( $\cong 90^\circ$  der Winkelmessung).

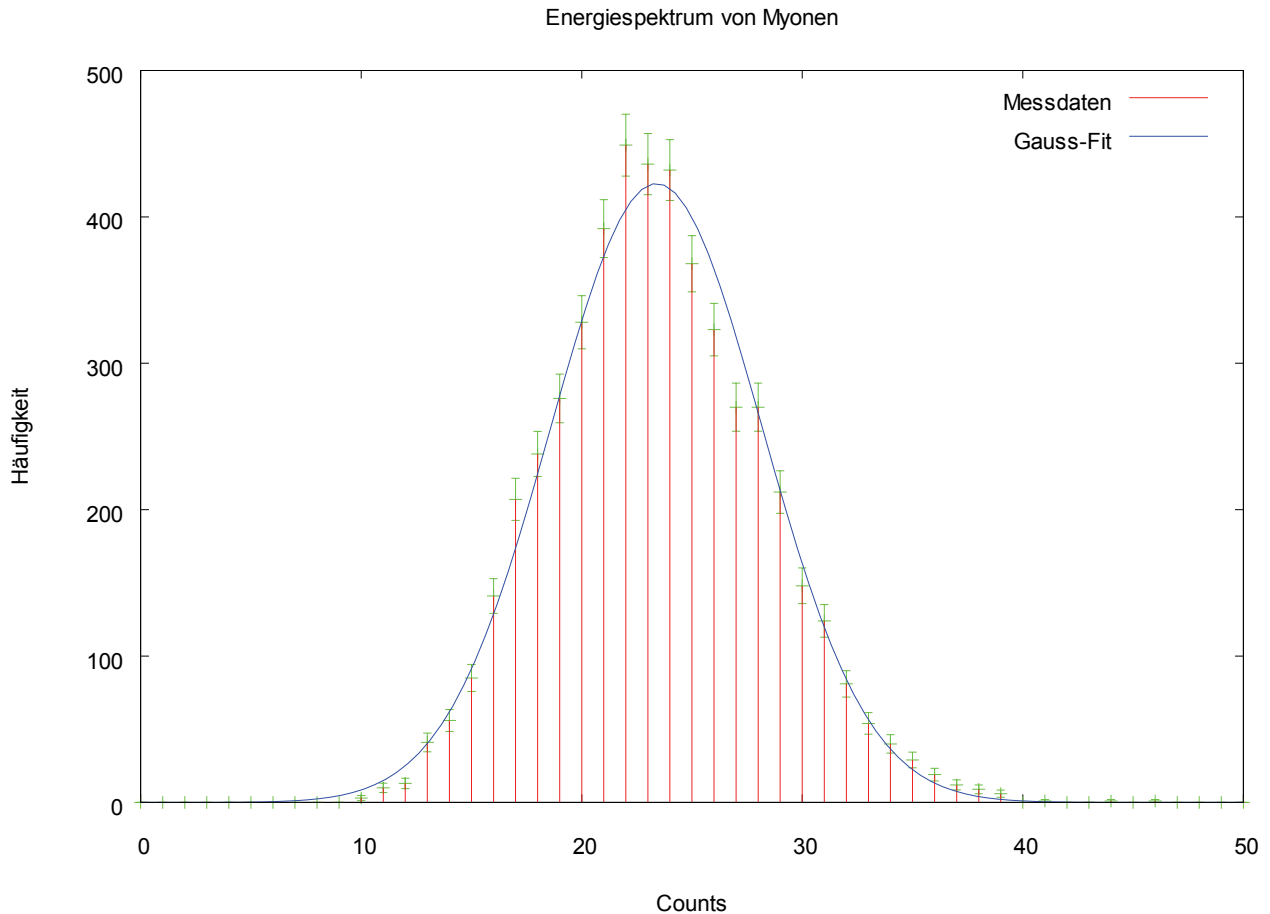
Da der für die Schauerermessung benötigte Rechner mit der entsprechenden Software defekt war, erhielten wir alte Messdaten zur Auswertung.

Diese Messreihe verlief über 82 Stunden, die wir in 15-minütige Zeitintervalle unterteilten, deren Counts wir jeweils zu einem Wert zusammenzählten. Im folgenden Diagramm sieht man den dazugehörigen Intensitätsverlauf.



Um den Intensitätsverlauf besser erkennen zu können, haben wir die Punkte mit Stufen miteinander verbunden. Für eine leichtere zeitliche Übersicht, ist jeweils nach 24 Stunden ein senkrechter grüner Stich eingefügt worden. Die gemessenen Ereignisse sind über die gesamte Schauerermessung hinweg einigermaßen konstant bei  $350 \pm 50$  Counts/15 min. Tageszeitabhängige Regelmäßigkeiten konnten wir anhand dieses Diagramms nicht erkennen.

Anschließend sollte die statistische Unabhängigkeit der Schauerereignisse überprüft werden. Dazu unterteilten wir die bereits zuvor verwendete Messreihe in Bins von 1 min Länge und erstellten ein Histogramm, in dem die Anzahlen der absoluten Häufigkeiten dargestellt werden:



Die Form des Histogramms erinnert stark an eine Gauß-Verteilung. Wäre dies tatsächlich der Fall, so wären die Schauerereignisse statistisch unabhängig. Um dies zu überprüfen, haben wir einen Gauß-Fit an die Daten aus dem Histogramm angelegt und einen  $\chi^2$ -Signifikanztest durchgeführt.

Aus den Messdaten berechneten wir im Voraus den Erwartungswert  $\mu \approx 23,39$  und die Standardabweichung  $\sigma \approx 4,79$ .

$$f(x) = \frac{A}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Als Fitparameter haben wir  $A = 5078,4$  erhalten.

Das dazugehörige reduzierte  $\chi^2_{red} = \frac{\sum_i \left(\frac{y_i - f(x_i)}{f(x_i)}\right)^2}{N-P}$  (N: Anzahl der Messwerte, P: Anzahl der Parameter) haben wir zu  $\chi^2_{red} \approx 5,09$  berechnet, was die Hypothese der Gauß-Funktion und damit die statistische Unabhängigkeit der Schauerereignisse bestätigt.