

Entwicklung eines Signalwandlers zur Amplitudenbestimmung mittels ToT Messung

Lukas Scholz

Matrikelnummer: 1124334

Einreichung der Bachelorarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal

Arbeitsgruppe Astroteilchen Physik

An der Universität Wuppertal

Datum der Abgabe: 29.10.2024

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation für diese Bachelorarbeit	5
2 Der A2TOT-Schaltkreis	7
2.1 Funktionsprinzip des A2TOT Schaltkreises	7
3 Messaufbau	11
3.1 Signalquellen	11
3.1.1 Impulsgenerator	11
3.1.2 Kosmische Myonen	12
3.2 Szintillationszähler	12
3.3 Das verwendete Oszilloskop	13
3.4 Analyse der erhaltenen Daten	13
4 Ergebnisse	15
4.1 Impulsgenerator als Signalquelle	15
4.2 Kosmische Myonen als Signalquelle	16
4.3 Korrelation Amplitudenhöhe gegen Ladung	17
4.4 Korrelation zwischen Signalbreite und Signalladung des Myonensignals	19
4.5 Korrelation Signalamplitude und A2TOT Signal	20
4.6 Von der Breite des A2TOT-Signals zur Ladung des Myonensignals	24
5 Zusammenfassung	27
Abbildungsverzeichnis	28
Appendices	31
A Weitere Abbildungen	33
Quellen	35

1 Motivation für diese Bachelorarbeit

Im CBM Detektor am Teilchenbeschleuniger der GSI in Darmstadt soll auf vielen tausend Kanälen, die Energie von Teilchen gemessen und ausgelesen werden. Aufgrund der großen Anzahl der Kanäle, soll eine möglichst kostengünstige, aber trotzdem möglichst genaue, Möglichkeit gefunden werden, diese Messungen durchzuführen und auszulesen. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich nun mit einer dieser kostengünstigen Möglichkeiten, die Energie von einem Teilchen zu messen. Auf die Energie eines Teilchens kann geschlossen werden, indem man den Strom, der dieses Teilchen in einem Szintillationszähler verursacht, als Funktion der Zeit darstellt und diese Funktion, dann über die Zeit integriert. Auf diese Weise erhält man die Ladung, die das Teilchen im Szintillationszähler ausgelöst hat. Über die Szintillator-Eigenschaften und nach einer geeigneten Kalibration des Szintillators, kann man dann auf die Energie des Teilchens schließen. So ist im optimalen Fall die im Szintillator ausgelöste Lichtmenge proportional zur Pulsladung des PMT (Photomultiplier). Also muss man durch die Kalibration nur eine Proportionalitätskonstante bestimmen. In der Praxis kann dies allerdings auch komplizierter werden. Theoretisch würde sich die Ladung mittels eines schnellen sampling ADCs auslesen lassen, dies wäre aber sehr teuer und verursacht bei den vielen Kanälen hohe Datenmengen, die verarbeitet werden müssen. Deutlich günstiger lässt sich die Breite von Pulsen bestimmen. Die Breite eines Pulses korreliert im Gegensatz zur Pulshöhe allerdings nur schwach mit der Pulsladung. Daher soll die starke Korrelation der Pulshöhe ausgenutzt werden. Der A2TOT-Schaltkreis ermöglicht nun einen Eingangspuls in einen Rechteckpuls umzuwandeln, deren Breite von der Höhe des Eingangspuls abhängt. Zudem ist es einfacher und häufig kostengünstiger, die Breite eines Signals zu messen, als seine Amplitude. Hierfür wird ein Schaltkreis benötigt, dessen Ausgangssignalbreite von der Amplitude des Eingangssignals abhängt.

Diese Thesis beschäftigt sich mit der Funktionsweise des A2TOT-Schaltkreises und wie sowohl die Amplitudenhöhe und Ladung des Teilchens miteinander korrelieren, als auch das Ausgangssignal des A2TOT-Schaltkreises mit Amplitudenhöhe und Ladung korrelieren. Hierfür werden in dieser Arbeit ein kosmische Myonen als Sekundärteilchen der natürlichen kosmischen Strahlung verwendet, da sie immer zur Verfügung steht und gut mit einem Szintillationszähler detektiert werden können.

2 Der A2TOT-Schaltkreis

Der A2TOT-Schaltkreis wandelt ein eingehendes Signal, das er im Kontext dieser Thesis von einem Szintillationszähler erhält, in ein Zeitsignal mit fester Amplitude, aber variabler Breite um. Die Breite des Ausgangssignals soll nun möglichst linear mit der Amplitudenhöhe des Eingangssignals korrelieren. Dies wird im Wesentlichen dadurch gewährleistet, dass die Breite des Ausgangssignals an die Entladekurve eines in den Schaltkreis integrierten Kondensators gekoppelt wird und von der Entladekurve nur der obere Teil der Entladung betrachtet wird, der linear sehr gut angenähert werden kann. Der Schaltkreis wurde in der Elektronikabteilung an der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) in Darmstadt entwickelt.

2.1 Funktionsprinzip des A2TOT Schaltkreises

Im Folgenden wird die Funktionsweise des Schaltkreises anhand Abbildung 2.1 erläutert. Zunächst wird das Eingangssignal AC gekoppelt, das heißt es wird nur der Wechselspannungsanteil des Signals betrachtet. Ein eventueller Gleichspannungsanteil wird mithilfe des Kondensators C_4 herausgefiltert. Im Folgenden wird auf das Signal mittels der Spannungsteiler R_3/R_4 eine Offset Spannung von 1 V hinzugefügt. Das so konditionierte Signal liegt

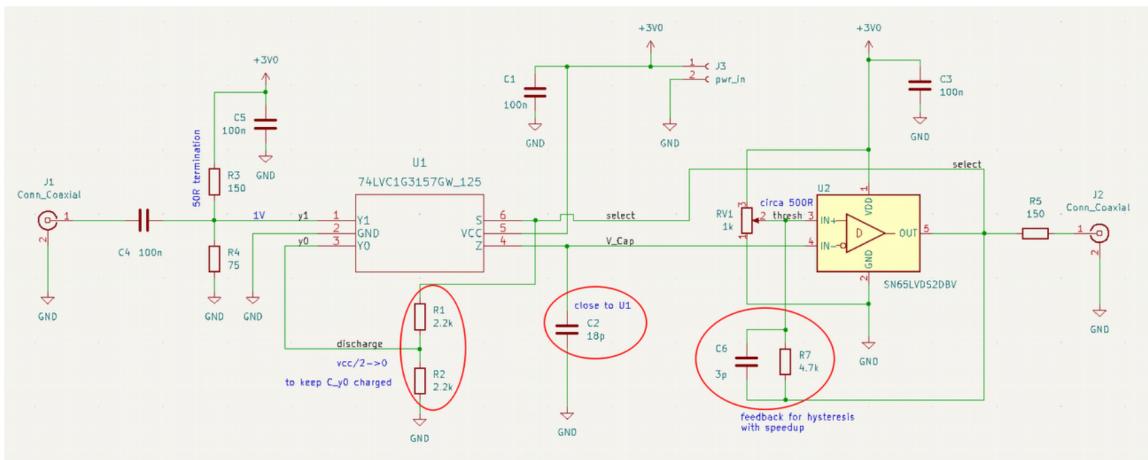


Abbildung 2.1: Schaltkreis des A2TOT-Wandlers. Im Wesentlichen besteht er aus einem Multiplexer und einem Komparator. Das zu messende Signal wird um den Offset von 1 V angehoben, damit für den Schaltvorgang am Komparator, nur der möglichst lineare Anteil der Entladekurve von Kondensator C_2 genutzt wird. Der Schaltplan des von Michael Wiebusch (GSI) entwickelten Wandlers wurde via [1] erhalten.

dann am Eingang y_1 des Multiplexers U_1 an. Ein Multiplexer ist im Wesentlichen ein analoger Schalter, der in Abhängigkeit vom SELECT-Eingang S, entweder Eingang y_1 oder Eingang

y_0 auf den Ausgang Z durchschaltet [3]. Im Ruhezustand ist der Eingang y_1 durchgeschaltet. Die Spannung am Kondensator C_2 folgt also dem Signalverlauf des Eingangspulses. Der Kondensator C_2 liegt am Eingangssignal IN^- des Komparators U_2 an. Der Komparator vergleicht die Spannungen an den beiden Eingängen IN^+ und IN^- und gibt entweder, wenn IN^+ größer ist als IN^- die Betriebsspannung $V_{cc} = 3 \text{ V}$ oder, wenn IN^- größer ist als IN^+ , die Spannung 0 V am Ausgang aus [4]. Übersteigt also die Spannung am Kondensator C_4 die Spannung am nicht invertierenden Eingang IN^+ , so gibt der Komparator die Spannung 0 V aus. Die Spannung an IN^+ wird über den Spannungsteiler RV_1 geregelt. Der Ausgang des Komparators ist außerdem mit dem SELECT-Eingang des Multiplexers gekoppelt, sodass der Multiplexer auf den y_0 Eingang schaltet, sobald am Ausgang der Komparators die Spannung auf 0 V fällt. Der y_0 Eingang des Multiplexers ist über den Spannungsteiler R_1/R_2 mit GND verbunden, sowie über den Ausgang Z mit dem Kondensator C_2 . Dieser kann nun gegen GND entladen. Die endliche Geschwindigkeit des Multiplexers und Komparators, sowie potenzielle Verzögerungen in der SELECT Leitung, sorgen für eine Verzögerung des Umschaltvorgangs, sodass der Entladevorgang in etwa im Maximum des Eingangssignals erfolgt. Dies muss je nach Bedarf an die Signalform angepasst werden. Der Kondensator wird also bis zur maximalen Signalamplitude aufgeladen und dann über die Widerstände R_1/R_2 entladen. An den nicht invertierenden Eingang des Bausteins ist mit R_7 und C_6 noch eine Hysterese geschaltet. Diese sorgt dafür, dass der Schaltpunkt, an dem die Ausgangsspannung wieder auf 3 V springt etwas nach unten verschoben wird. In der Zeit, in der die Ausgangsspannung des Komparators auf 3 V liegt, wird innerhalb des Multiplexers eine Kapazität (2.5 pF) über einen Spannungsteiler auf 1.5 V geladen. Wenn nun die Ausgangsspannung von U_2 auf 0 V fällt, so entladen die beiden Kondensatoren über den Spannungsteiler gegen GND. Der Umschaltvorgang ist allerdings so abgestimmt, dass die Kondensatoren nicht vollständig entladen. Fällt nämlich

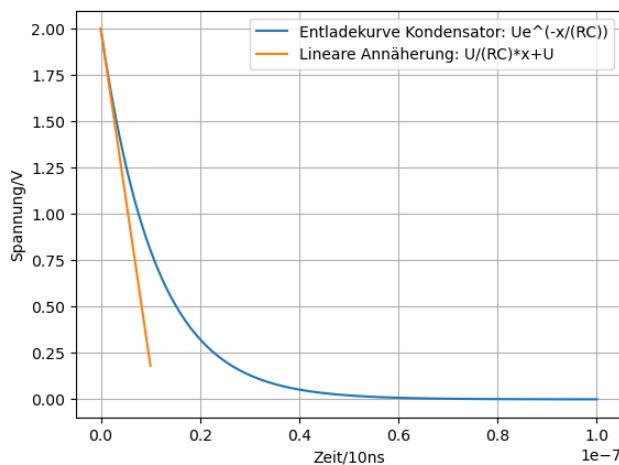


Abbildung 2.2: Entladekurve der Kondensatoren C_2 . Beispielhaft für ein Signal mit der Signalamplitude 1 V . C_2 lädt C_2 daher auf 2 V (1 V Amplitude + 1 V Offset) auf. Die Entladung wird aber, bevor 1 V erreicht wird, wieder beendet. Daher bewegt sich die Entladung im linear angenäherten Bereich.

die Spannung von C_2 wieder unter die eingestellte Schwelle am Potentiometer, so gibt der Komparator am Ausgang wieder 3 V aus und der Multiplexer schaltet auf den Eingang y_1 an dem eine 1 V Spannung anliegt. Diese Spannung liegt dann auch wider an C_2 an. Insgesamt wird C_2 nur im Bereich von $U_{\text{signal}} + U_{\text{offset}}$ bis zur Offsetspannung U_{offset} entladen. Die Offsetspannung liegt hier bei 1 V. Dieser Entladebereich hat eine angenähert lineare Form. Somit ist die Variation der Breite des Ausgangssignals auch angenähert linear. Ein Beispiel hierfür sieht man in Abbildung 2.2. Wenn man beispielsweise die Schwelle am Potentiometer auf 200 mV einstellt, dann entlädt sich der Kondensator nicht so weit, dass er in den hochgradig nicht linearen Bereich kommt.

3 Messaufbau

Im folgenden Kapitel sollen kurz die verschiedenen Signalquellen, Messgeräte und Analysemethoden vorgestellt werden. Alle Komponenten des Messaufbaus sind im Photo in Abbildung 3.1 erkennbar und farblich umrandet.

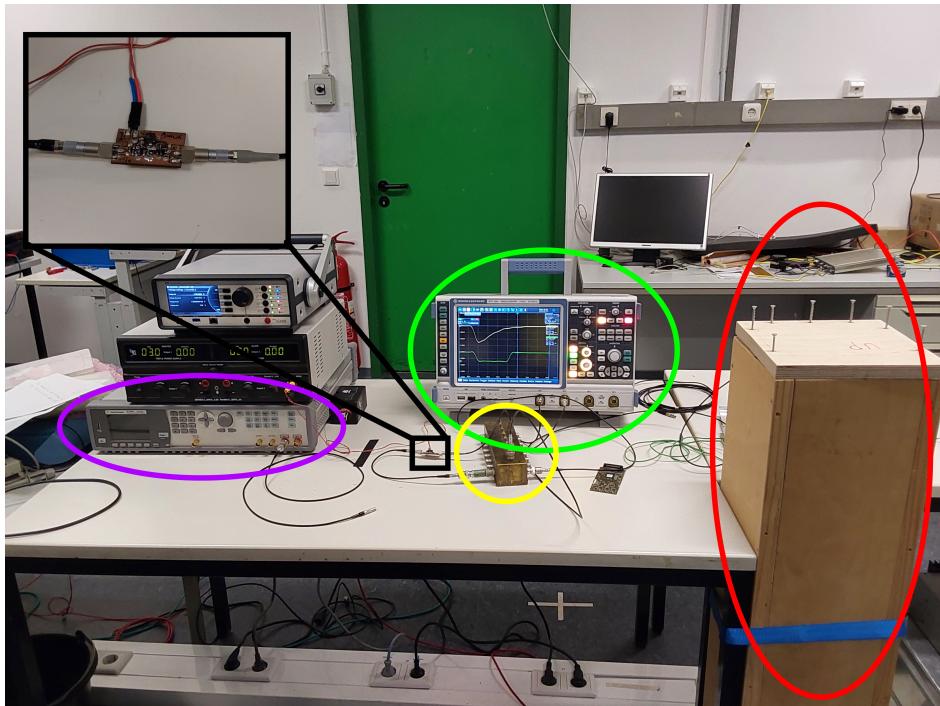


Abbildung 3.1: Photo des Messaufbaus. Die wesentlichen Geräte wurden farblich markiert.

Als schwarzer zoom-in/pop-out ist der A2TOT-Wander dargestellt. lila umrandet: Impulsgenerator, gelb umrandet: Inverter, grün Umrandet: Oszilloskop, rot umrandet: Szintillationszähler.

3.1 Signalquellen

Für die Vermessung der Linearität des A2TOT-Schaltkreises wurden Messungen mit verschiedenen Signalquellen aufgenommen. In diesem Abschnitt werden beide Quellen, ihre Eigenschaften und ihre Verwendung kurz diskutiert.

3.1.1 Impulsgenerator

Die erste Quelle ist der Impulsgenerator. In Abbildung 3.1 ist dieser lila umrandet. Mit diesem können exakte Pulse erzeugt werden, die nur geringen Schwankungen unterliegen. Das hat den Vorteil, dass der A2TOT Schaltkreis so auf seine Exaktheit getestet werden kann. Wenn

man entsprechend bei gleichen Eingangssignalen verschiedene Ausgangssignale erhält, kann dies nur am Schaltkreis liegen und nicht am Eingangssignal.

3.1.2 Kosmische Myonen

Als zweite Signalquelle werden kosmische Myonen verwendet, diese werden mithilfe eines Szintillationszählers (in 3.1 rot umrandet und im Abschnitt hiernach besprochen) detektiert. Kosmische Myonen werden verwendet, da diese leicht zur Verfügung stehen. Myonen haben eine etwa 200-mal so große Masse wie Elektronen und entstehen damit bei einer Energie von etwa $106 \frac{\text{MeV}}{c^2}$. Solche Energien und höhere sind häufig das Resultat kosmischer Strahlung, sodass Myonen in der oberen Erdatmosphäre als Sekundärstrahlung der kosmischen Strahlung entstehen. Das Myon hat eine Halbwertszeit von $2.2 \mu\text{s}$ (entnommen [2]). Wenn man davon ausgeht, dass es sich nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegt, so legt es eine Strecke von weniger als 660 m in dieser Zeit zurück. Dies ist nicht weit genug, um die Erdoberfläche von der oberen Atmosphäre zu erreichen. Da sich das Myonteilchen allerdings mit so hohen Geschwindigkeiten bewegt, ist es ein stark relativistisches Teilchen und damit vergeht aus der Sicht von der Erdoberfläche für das Myonteilchen weniger Zeit, oder aus der Sicht des Myonteilchens legt es eine geringere Strecke zurück, sodass das Myonteilchen auf der Erdoberfläche detektiert werden kann. Des Weiteren hat das Myon eine negative Elementarladung. Dies ist wichtig, damit es von einem Szintillationszähler detektiert werden kann.

3.2 Szintillationszähler

Ein Szintillationszähler dient zur Detektion von geladenen Teilchen. Die geladenen Teilchen regen im Szintillatormaterial Moleküle an, welche diese Anregungsenergie durch Strahlung wieder abgeben. Diese Strahlung gelangt auf einen hinter dem Szintillatormaterial angebrachten Photomultiplier. Der Photomultiplier (PMT) ist eine vakuumierte Glaskugel welche es erlaubt geringe Lichtmengen bis hin zu einzelnen Photonen zu detektieren. Hierfür ist die Vorderseite des PMTs mit einer Photokathode versehen, auf welcher mittels Photoeffekt für eintreffende Photonen einzelne Elektronen ausgelöst werden. Diese Elektronen werden dann mittels einer angelegten Hochspannung auf mehrere hintereinandergeschaltete Dynoden beschleunigt, wo sie wiederum weitere Elektronen auslösen um so quasi eine Elektronenlawine zu erzeugen. Der daraus resultierende Strom sorgt dann für einen Spannungsabfall, an entsprechend geschalteten Widerständen, sodass man eine messbare Spannung erhält, die mit einem Oszilloskop detektiert werden kann. Der für diese Bachelorarbeit verwendete Szintillatormaterial soll exakt in dieser Form auch für das CBM Experiment verwendet werden. Insofern sind alle Messungen unter Verwendung von z.B. Myonen und die entsprechenden Resultate direkt auf das spätere Experiment anwendbar.

3.3 Das verwendete Oszilloskop

Die eingehenden Signale, ob nun aus dem Impulsgenerator oder dem Szintillator, werden mittels eines Splitters (in 3.1 gelb umrandet) auf den A2TOT-Schaltkreis, sowie auf das Oszilloskop (grün umrandet) gegeben. Vor den Eingang des A2TOT-Schaltkreises wird noch ein Inverter geschaltet, da der Schaltkreis mit positiven Signalen arbeitet und das Signal aus dem Photomultiplier immer negativ ist. Das Ausgangssignal des A2TOT-Schaltkreises wird auch auf das Oszilloskop gegeben. Die so gemessenen Daten werden in einem zweidimensionalen Datenfile gespeichert. Im ersten File werden hier die Daten für das Signal aus der Signalquelle gespeichert und im zweiten File werden die Daten gespeichert, die man aus dem Ausgang des A2TOT-Schaltkreises erhält. Das verwendete Oszilloskop ist das RTO1044 von der Firma Rhode und Schwarz und hat die Möglichkeit vier Files gleichzeitig aufzunehmen und hat eine sehr hohe Samplerate von $20 \frac{\text{Gs}}{\text{s}}$, was eine sehr genaue Messung im Zeitbereich erlaubt.

3.4 Analyse der erhaltenen Daten

Mittels eines in Python geschriebenen Skripts werden die Daten aus dem von dem Oszilloskop bereitgestellten File analysiert. Es wird für das Signal aus der Signalquelle die Amplitudenhöhe gemessen, sowie die Ladung des Signals. Des Weiteren wird auch die Signalbreite gemessen. Für das Ausgangssignal des A2TOT-Schaltkreises wird lediglich die Signalbreiten gemessen, da es sich hierbei um ein Rechtecksignal handelt, welches immer die gleiche Höhe hat. Die Ladung wird nach folgender Formel 3.1 berechnet

$$Q_{\text{Myon}} = \sum_{i=1}^{1000} \frac{u_i \cdot \Delta t_{\text{aufl}}}{R_{\text{term}}} \quad (3.1)$$

Zum Schluss werden die so erhaltenen Werte miteinander korreliert. Mit dem Pythonprogramm werden des Weiteren die geplotteten Werte in Bins eingeteilt, die Mittelwerte der Messwerte und Standardabweichung berechnet. Über die Mittelwerte wird dann unter Einbeziehung der Standardabweichung eine lineare Funktion in die Datenpunkte gefüttet.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Messungen zur Bewertung des A2TOT-Schaltkreises besprochen und analysiert. Dabei wird die Linearität des Schaltkreises zuerst mittels wohldefinierten Rechtecksignalen getestet um anschließend den linearen Zusammenhang zwischen Signalamplitude und Pulsbreite des A2TOT-Ausgangssignals, mittels realistischer Signale ausgelöst von kosmischen Myonen, zu verifizieren.

4.1 Impulsgenerator als Signalquelle

Um zu überprüfen, wie exakt der A2TOT-Schaltkreis arbeitet, wird dieser als Erstes mit dem Impulsgenerator getestet. In Abbildung 4.1 sieht man die Breite des A2TOT-Signals aufge-

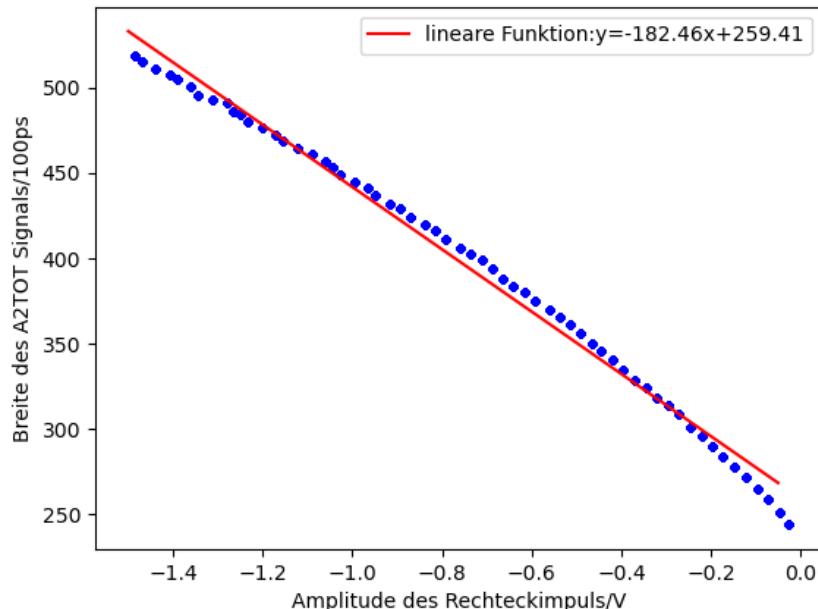


Abbildung 4.1: Breite des A2TOT-Signals aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des durch den Impulsgenerator generierten Rechtecksignals.

tragen, gegen die Amplitudenhöhe des Rechtecksignals. Es ist ein leicht negativ logarithmischer Verlauf der Datenpunkte zu erkennen. Jeder der sichtbaren Punkte entspricht tausend Rechtecksignalen, welche aufgrund ihrer Ähnlichkeit in der Abbildung exakt übereinander liegen und entsprechend nicht voneinander zu unterscheiden sind. Das lässt zum einen auf die Genauigkeit des Impulsgenerators, wie auch auf die Genauigkeit des A2TOT-Schaltkreises schließen. Erst durch die gefittete Gerade fällt auf, dass die Messwerte einem leicht logarith-

mischen Verlauf folgen. Entsprechend lässt sich schließen, dass der A2TOT-Schaltkreis für diese simple und robuste Signalform eine gute Linearität aufweist und somit die Amplitude des Eingangssignals nahezu linear mit der Breite des Ausgangssignals am A2TOT-Schaltkreis korreliert.

4.2 Kosmische Myonen als Signalquelle

Nun wird der A2TOT-Schaltkreis mit kosmischen Myonen getestet, um zu sehen, wie der Schaltkreis auf reale Signale reagiert. In Abbildung 4.2 ist ein solches Myonensignal zu sehen. Die gesamte Breite des Fensters umfasst $T_{\text{Fenst}} = 100 \text{ ns}$ und die Auflösung im Zeitbereich beträgt $\Delta t_{\text{aufl}} = 100 \text{ ps}$. Das Signal hat einen steilen negativen Anstieg und fällt dann etwas flacher wieder ab. Um Reflexionen zu vermeiden, wird das Signal im Oszilloskop mit $R_{\text{term}} = 50 \Omega$ terminiert. Der Szintillator wird mit einer Spannung von $U_{\text{szin}} = 1500 \text{ V}$ betrieben. Von solchen Signalen werden so jeweils tausend bei drei verschiedenen Triggerschwellen

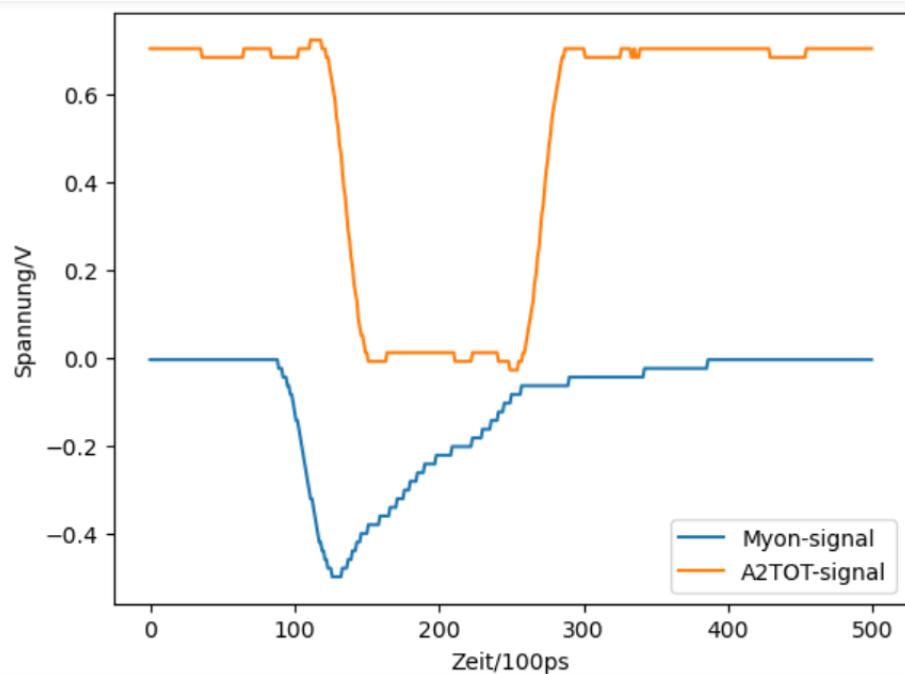


Abbildung 4.2: In der Abbildung ist ein typisches Signal zu sehen, dass von einem Myon in einem Szintillator ausgelöst wird und von einem Oszilloskop ausgelesen wird. Die Breite des Fensters beträgt 100 ns und die Auflösung auf der Zeitachse beträgt 100 ps. In Orange ist das Signal zu sehen, welches der A2TOT-Schaltkreis ausgibt.

am Oszilloskop detektiert, sodass insgesamt dreitausend Signale detektiert werden. Mit der oben genannten Auflösung von 100 ps und der Fensterbreite von 100 ns werden also insgesamt drei Millionen Messwerte aufgenommen. Die Amplitude jedes Signals wird durch das Minimum dieser Werte, je aufgenommenem Myonensignal ermittelt. Dieses Vorgehen ist valide, da kein Spannungsoffset in den Daten vorhanden ist. Die Ladung der Myonensignale wird über die Formel 3.1 berechnet. Die Daten werden mit drei verschiedenen Triggerschwellen aufge-

nommen, da die Wahrscheinlichkeit, dass die Myonen senkrecht in den Szintillator gelangen und dadurch Signale mit hohen Amplituden auslösen, sehr gering ist, wodurch wesentlich mehr Signale detektiert werden, die eine geringe Ladung haben, als Signale mit einer hohen Ladung. Um nun auch Aussagen über ein größeres Energiespektrum von Signalen treffen zu können, werden Daten für verschiedene Triggerschwellen am Oszilloskop aufgenommen.

4.3 Korrelation Amplitudenhöhe gegen Ladung

Im Folgenden soll überprüft werden, wie die Ladung eines Myonensignals mit der Amplitudenhöhe des Myonensignals korreliert. In Abbildung 4.3 sind die Amplitudenhöhen gegen die am PMT ausgelöste Ladung aufgetragen. Zusätzlich wird das Fenster in Bins der Breite

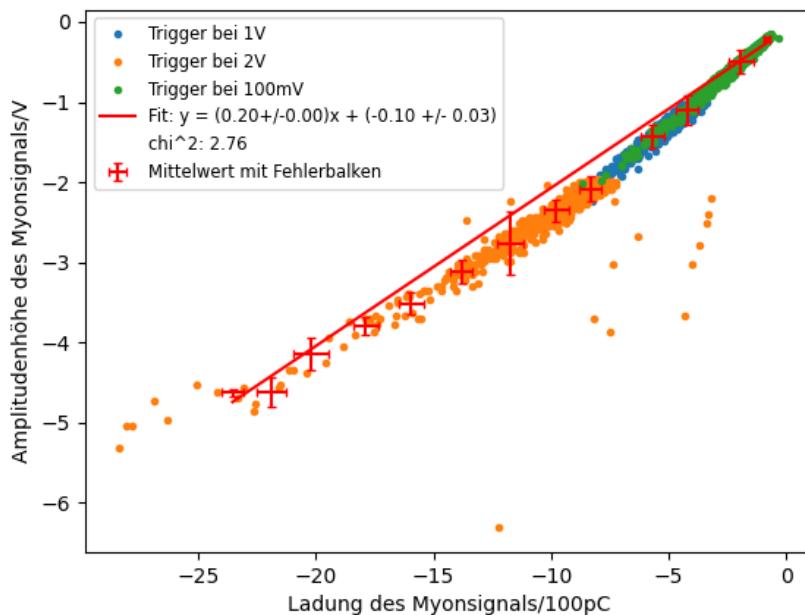


Abbildung 4.3: Die Abbildung zeigt die Amplitudenhöhe der Myonensignale aufgetragen gegen die Ladung der Myonensignale für drei verschiedene Triggerschwellen am Oszilloskop. In die Werte wird eine lineare Funktion gefittet.

200 pC unterteilt und für jedes Bin der Mittelwert der darin enthaltenen Messwerte gebildet, sowie die Standardabweichung berechnet. Die maximale Standardabweichung liegt bei $\sigma = 0.40 \text{ V}$ und die mittlere Standardabweichung liegt bei $\sigma = 0.16 \text{ V}$. Über die Mittelwerte wird nun eine lineare Funktion gefittet. Diese hat einen χ^2/ndf -Wert von 2.76. Allerdings sieht man bereits, dass der gefittete Graph oberhalb der Punkteschar verläuft. Außerdem gibt es auch ein paar Messpunkte, die weit um die Mittelwerte streuen. Dies vergrößert die Standardabweichungen und macht den χ^2/ndf -Wert niedriger, da bei diesem durch die quadratische Standardabweichung geteilt wird. Dass die Gerade oberhalb der Punkteschar verläuft, hat damit zu tun, dass für betragsmäßig hohe Amplitudenhöhen der Verlauf der Punkteschar abflacht. In Abbildung 4.4 kann man dieses Verhalten nachvollziehen. Hier werden Signale

mit verschiedenen Amplitudenhöhen normiert.

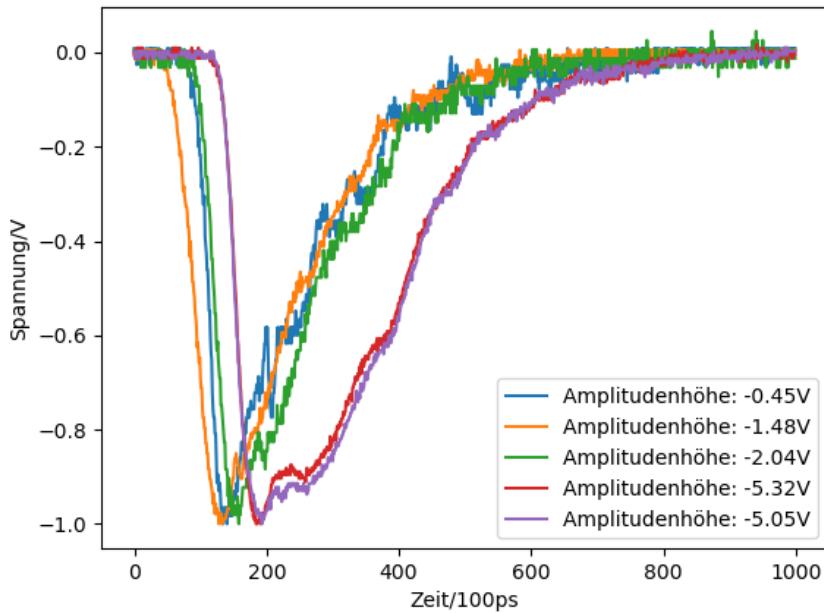


Abbildung 4.4: Signalspuren verschiedener Myonensignale unterschiedlicher Amplituden. Hierbei sind alle Signale auf eine Höhe von 1 skaliert. Die ursprüngliche Höhe ist in der Legende vermerkt.

Man kann feststellen, dass Signale mit niedrigen Amplituden einen schmaleren Verlauf haben als Amplituden mit hohen Amplituden. Dies führt dazu, dass der Verlauf der Datenpunkte in Abbildung 4.3 in negativer Richtung hin abflacht, da die Ladung nach Formel 3.1 betragsmäßig größer wird. Für die Trigger -100 mV und -1 V erscheint der Verlauf der Datenpunkte sehr viel linearer zu verlaufen. Später wird ersichtlich, dass der A2TOT-Schaltkreis für hohe Spannungen keine sinnvollen Werte liefert, daher wird hier nur auf die Myonensignale eingegangen, die eine Amplitudenhöhe bis zu -1.5 V haben. Damit entfällt der Bereich, der mit dem Trigger -2 V vollständig. Hier wird noch einmal eine lineare Funktion gefittet. In Abbildung 4.5 ist der auf den gerade genannten Bereich limitierte Plot zu sehen. Wieder wird hier, um die Plots besser vergleichen zu können, eine Binbreite von 200 pC gewählt. In jedem dieser Bins werden jeweils die Mittelwerte gebildet und jeweils eine σ Umgebung ermittelt, wobei die größte Streuung mit einem $\sigma = 0.14\text{ V}$ auftritt. Dann wird über die Mittelwerte ein linearer Fit geplottet. Dieser hat die Form

$$y = (0.25 \pm 0.02)x + (0 \pm 0.04) .$$

Das χ^2/ndf liegt hier bei 0.02 und ist damit deutlich besser als der Wert über alle Werte. Insgesamt verbessern sich die Parameter, wenn man den Messbereich auf -1.5 V einschränkt. So verringert sich χ^2 um 99.3% und die maximale Standardabweichung verringert sich um 65%.

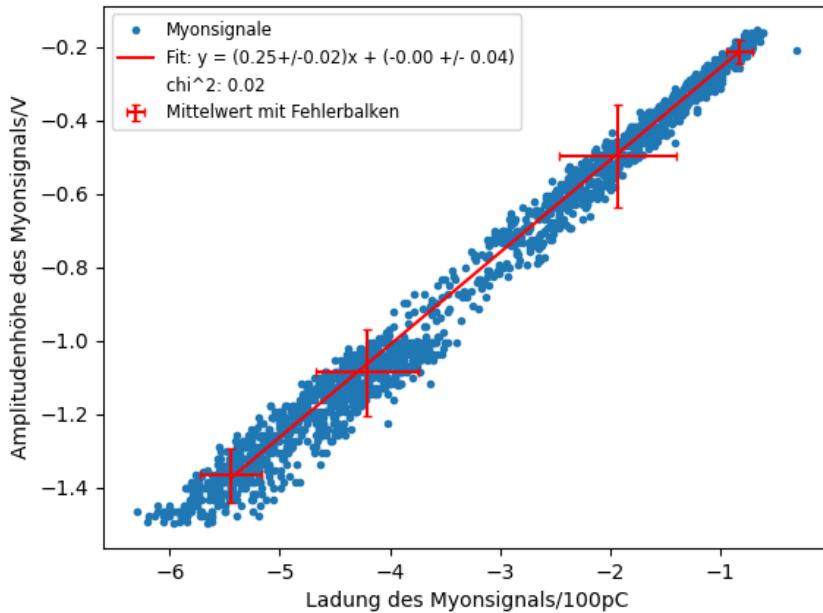


Abbildung 4.5: Messwerte aus Abbildung 4.3 eingeschränkt auf die maximale Amplitudenhöhe von -1.5 V .

4.4 Korrelation zwischen Signalbreite und Signalladung des Myonensignals

Im Folgenden wird untersucht, wie die Signalbreite mit der Signalladung korreliert. Es könnte ja sein, dass dies bereits eine gute Möglichkeit ist, auf die Energie eines Teilchens zu schießen.

Hierfür wird untersucht, wie die Breite eines Signals bestimmt werden kann. Abbildung A.2 im Anhang zeigt mehrere Schwellen, an denen man die Breite der Myonensignale messen kann. In Abbildung 4.6 sind nun jeweils die Breiten der Myonensignale gegen die jeweilige Ladung aufgetragen. Zum einen kann man erkennen, dass wenn die Ladung nahe bei 0 V gemessen wird, es keinen sinnvollen Verlauf der Punkteschar gibt, da die gemessene Breite nahezu immer das komplette Messfenster überstreckt. Wenn man allerdings die Messschwelle zu hoch setzt, so können Signale verloren gehen. Wie bei der Messschwelle -0.17 V bei geringen Ladungen im Plot zu erkennen ist. Insgesamt folgen alle Punktescharen, unabhängig von der gewählten Messschwelle, einem negativen logarithmischen Verlauf. Auffällig ist lediglich, dass bei höher werdender Messschwelle mehrere "Knicks" im Spektrum sichtbar werden, welche auf die Signalform des Myons im Szintillationszähler zurückzuführen sind.

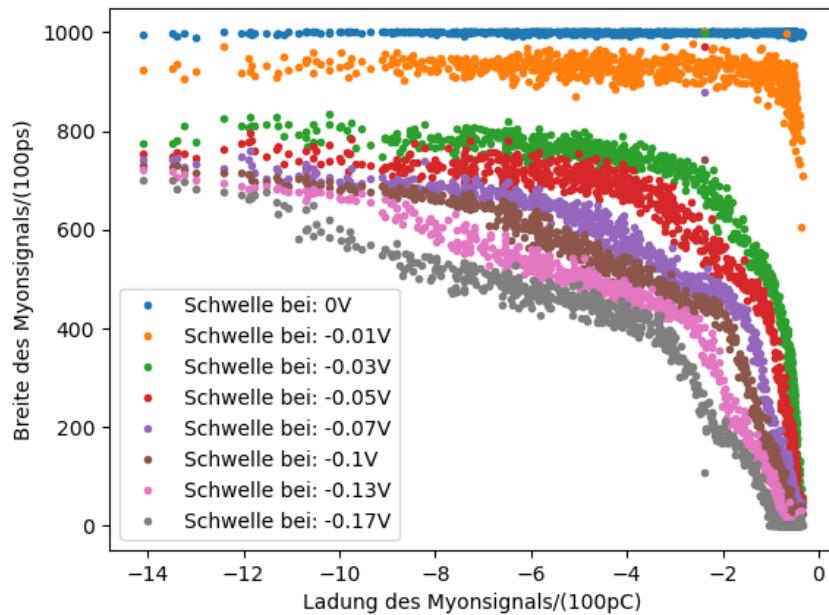


Abbildung 4.6: Breite eines Myonensignals aufgetragen gegen die Ladung des Myonensignals für verschiedene Messschwellen zur Ermittlung der Pulsbreite. Der negativ logarithmische Verlauf der Punktescharen ist zu erkennen.

4.5 Korrelation Signalamplitude und A2TOT Signal

Als Nächstes wird die Korrelation zwischen der Amplitudenhöhe des Myonensignals und der Länge des Ausgangssignal untersucht. Hierfür muss der A2TOT-Schaltkreis mit dem Szintillationszähler und dem Oszilloskop verbunden werden.

Die Schwelle, ab der A2TOT-Schaltkreis reagiert, wird auf etwa -200 mV eingestellt. Die Einstellung auf -200 mV wird mithilfe eines Signalgenerators durchgeführt. Es werden Rechteckimpulse auf den A2TOT-Schaltkreis gegeben und mit dem Oszilloskop wird das Signal ausgelesen. Dann wird am Potentiometer gedreht, bis das A2TOT-Signal verschwindet. Nun wird der A2TOT-Schaltkreis mit dem Szintillationszähler verbunden. Hierfür wird vor den A2TOT-Schaltkreis ein Inverter geschaltet, da die Ladungen vom Szintillator negativ sind und der A2TOT-Schaltkreis auf positive Ladungen reagiert. Das Signal aus dem Szintillator wird außerdem gesplittet, damit das Myonensignal gleichzeitig mit dem A2TOT-Signal im Oszilloskop ausgewertet werden kann. Eine Beispielaufnahme für solche Signalspuren zeigt z.B. Abbildung 4.2, oder auch Abbildung A.1 im Anhang. Wenn das Myonensignal die eingestellte Schwelle von -200 mV erreicht, fällt das A2TOT Signal, nach einer kurzen zeitlichen Verzögerung, von etwa 0.75 V auf 0 V . Der A2TOT-Schaltkreis wird mit 3 V betrieben. Das Ausgangssignal von 0.75 V kommt zustande, da im Oszilloskop für die Termination ein Widerstand mit $R_{\text{term}} = 50\Omega$ geschaltet ist und mit dem Widerstand $R_5 = 150\Omega$ einen Spannungsteiler bildet. Es wird nun die Länge der Zeit, die das A2TOT Signal unterhalb von 0.5 V verbringt, gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals aufgetragen. Dies ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Im Grunde ist es nicht wichtig, an welchem Punkt man anfängt, die

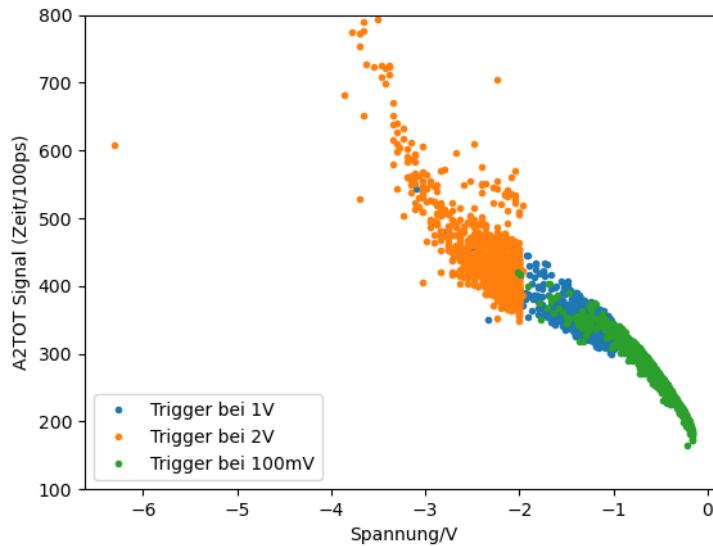


Abbildung 4.7: Breite des A2TOT-Signals aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals bei einer Betriebsspannung des Szintillationszählers von 1500 V.

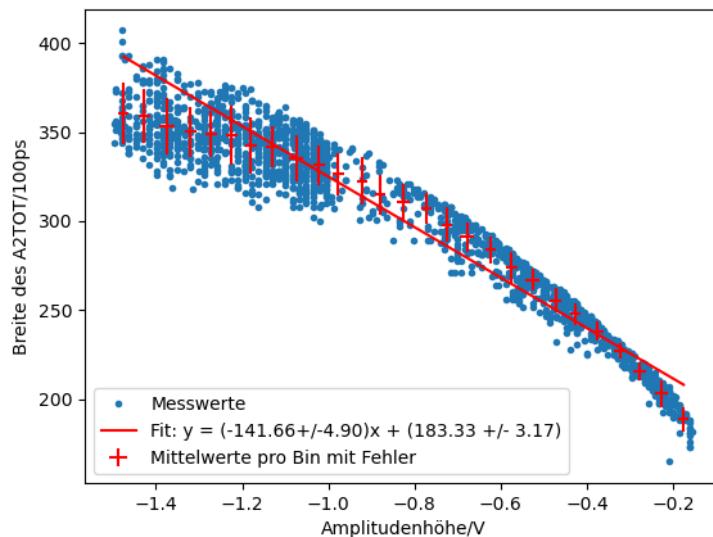


Abbildung 4.8: Signalbreite des A2TOT-Schaltkreises aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals, eingeschränkt auf den Amplitudenbereich $-1.5 \text{ V} - 0 \text{ V}$ für eine Versorgungsspannung des PMT von 1500 V.

Länge der Zeit zu messen. Wenn man die Messschwelle zu weit unten oder zu nahe an den 0.75 V setzt, könnte es bei Messschwankungen allerdings zu Fehlern kommen. Daher wird die Messschwelle auf 0.5 V gesetzt. Man kann erkennen, dass der Verlauf der Messwerte für kleine Signalamplituden einen leicht negativ logarithmischen Verlauf hat und je größer die Signale werden, desto mehr streuen gemessenen Längen des A2TOT Signals. Für sehr hohe Amplituden, die mit dem Trigger -2 V am Oszilloskop aufgenommen werden, erscheint der Verlauf der Messwerte sogar exponentiell. Dies kann auf den A2TOT Schaltkreis zurückzuführen sein, dass der A2TOT-Schaltkreis für höhere Spannungen nicht ausgelegt ist. Daher werden wieder die Myonensignale betrachtet, die eine Amplitudenhöhe bis -1.5 V haben. Diese Messwerte sind in Abbildung 4.8 zu sehen. Die Messwerte zeigen einen logarithmischen Verlauf. Wobei die Messwerte bis zu einer Amplitudenhöhe von -1 V eine gute lineare Annäherung erahnen lassen. Insgesamt streuen die Messwerte für höhere Amplitudenhöhen noch sehr. Die maximale Streuung liegt hier bei $\sigma = 1662\text{ ps}$. Wie schon in Kapitel 4.3 erwähnt scheint es, als sei der A2TOT-Schaltkreis nur bis Spannungen von 1.5 V konzipiert worden. Um Messwerte in diesem Bereich zu erhalten werden zwei weitere Messreihen aufgenommen, bei denen der PMT mit einer Spannung von 1350 V und 1200 V versorgt wird. In Abbildung 4.9 sind die Messpunkte der drei Messreihen zu sehen. Alle Messreihen werden am Oszilloskop mit

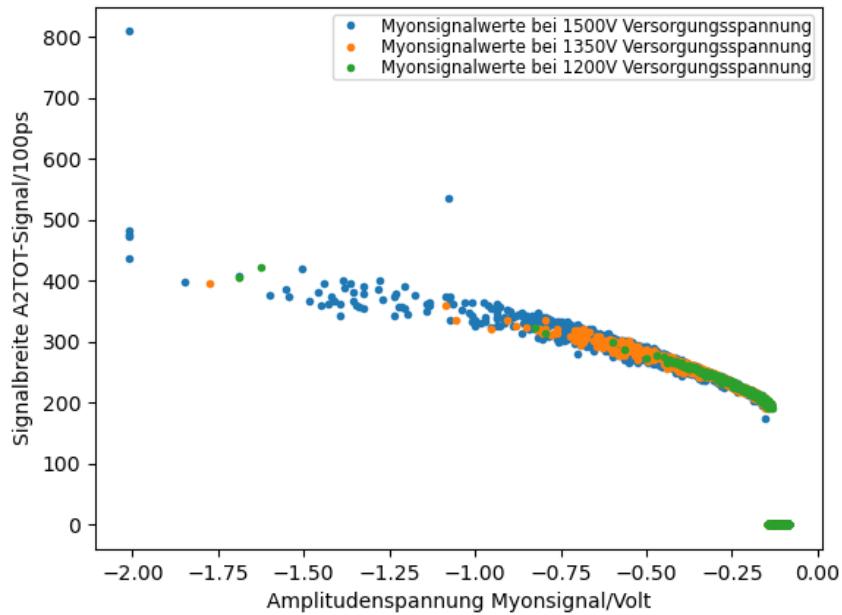


Abbildung 4.9: Als Streudiagramm aufgetragene Breiten der A2TOT-Signale aufgetragen gegen die Amplitudenhöhen der Myonensignale für drei verschiedene Versorgungsspannungen des Szintillationszählers.

einem Trigger von -100 mV aufgenommen. Es fällt auf, dass die Aufnahme mit 1200 V , einen sehr viel schmaleren Verlauf hat, als die Aufnahme mit 1500 V und 1350 V . Die Schwelle am A2TOT-Schaltkreis ist auf etwa 200 mV eingestellt. So kommt es, dass bei der Aufnahme für 1200 V , es 438 Signale gibt, die kein A2TOT-Signal auslösen, während es bei der Aufnahme

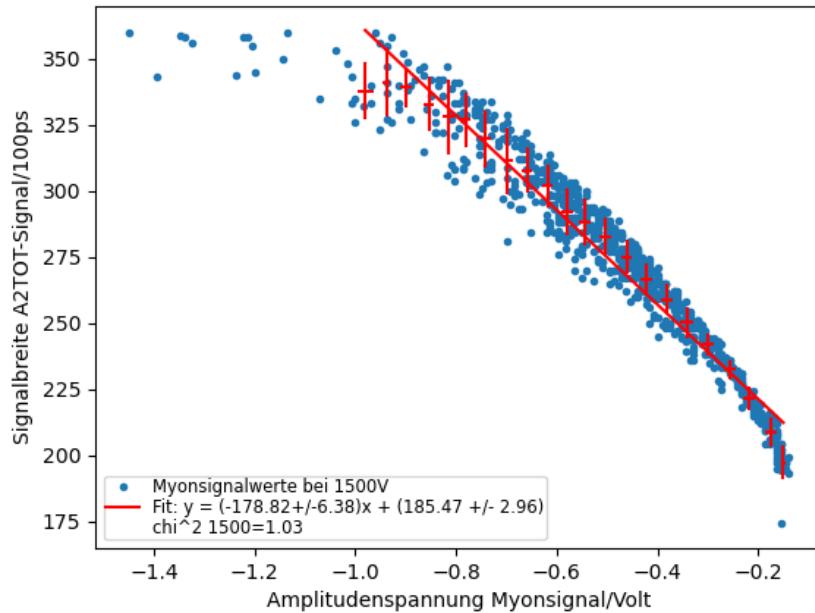


Abbildung 4.10: Streudiagramm der Breiten der A2TOT-Signale gegen die Amplitudenhöhen der im Szintillator erzeugten Myonensignale.

für 1500 V nur 111 Signale gibt, die kein A2TOT-Signal auslösen. Es ist zudem zu erkennen, dass es für kleine Amplituden einen nicht linearen Effekt gibt. Dafür erhält man aber einen sehr viel schärferen Verlauf der Datenpunkte bei 1200 V. Um dies quantisiert zu zeigen, werden die drei Aufnahmen in äquidistante Bins unterteilt. Die Aufnahme für eine Versorgungsspannung von 1200 V ist in Abbildung 4.11 gezeigt. Ein Bin hat hier eine Breite von 0.04 V. Für jeden Bin ist der Mittelwert über die im jeweiligen Bin befindlichen Messwerte berechnet und die Standardabweichung bestimmt. Mithilfe der Mittelwerte und der Standardabweichung wird eine lineare Funktion angefittet. So liegt die maximale Streuung für die A2TOT-Signale bei einer Spannung von 1500 V für den Szintillationszähler bei $\sigma = 1402$ ps und die durchschnittliche Standardabweichung bei $\sigma = 811$ ps. Um die Linearität zu quantifizieren, wird die χ^2 -Methode verwendet. Es ergibt sich ein reduziertes $\frac{\chi^2}{\text{ndf}} = 1.03$ für eine Spannung von 1500 V, welches dem Fit bei der gegebenen Streuung eine gute Korrektheit zuschreibt. Um das χ^2/ndf zu berechnen, werden durch das Quadrat der Standardabweichung jedes Bin-Mittelwertes geteilt.

Die gefittete lineare Funktion hat die Form

$$y_{1500V} = (-178.82 \pm 6.38)x + (185.47 \pm 2.96).$$

Diese Werte werden nun mit den Werten verglichen, die man erhält, wenn man den Szintillationszähler mit einer Spannung von 1200 V betreibt. Um die Standardabweichungen vergleichen zu können, wird auch bei dieser Messreihe eine Binbreite von 0.04 V pro Bin gewählt. Die maximale Streuung liegt hier bei $\sigma = 508$ ps und die durchschnittliche Standardabweichung

liegt bei 323 ps. Das χ^2/ndf liegt hier bei 0.72. Die gefittete Gerade hat die Form

$$y_{1200V} = (-241.50 \pm 13.9)x + (168.83 \pm 3.99).$$

Somit sind die meisten Daten für 1200 V Versorgungsspannung besser. Die maximale Streuung liegt hier um 63.8% niedriger und die durchschnittliche Standardabweichung liegt um 60.0% niedriger als bei einer Versorgungsspannung von 1500 V. Auch die χ^2 -Werte sind besser, so liegt der χ^2/ndf -Wert um 30.1% niedriger als bei einer Versorgungsspannung von 1500 V. Allerdings ist der Fehler der Steigung der gefitteten Geraden etwa doppelt so hoch. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass über einen kleineren Bereich gefittet wird.

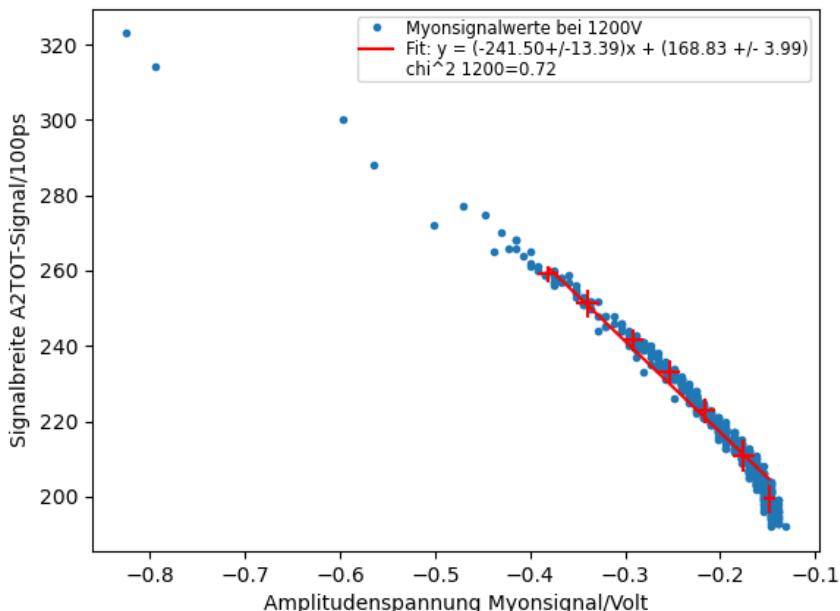


Abbildung 4.11: Als Streudiagramm dargestellte Breiten der A2TOT-Signale aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals, bei einer Betriebsspannung für den Szintillationszähler von 1200 V.

4.6 Von der Breite des A2TOT-Signals zur Ladung des Myonensignals

Wenn man nun, von der Signalbreite, des A2TOT Ausgangssignals auf die Ladung des detektierten Teilchens schließen möchte, so sollte wie in Abbildung 4.12 die Breite des A2TOT-Signals auf der x -Achse liegen und wie in Abbildung 4.13 die Ladung des Myonensignals auf der y -Achse. Nun kann mittels der gefitteten linearen Funktion aus Abbildung 4.13 die Ladung des Myonensignals berechnet werden. Die x -Werte in der Funktion entsprechen den y -Werten der gefitteten Funktion aus Abbildung 4.12.

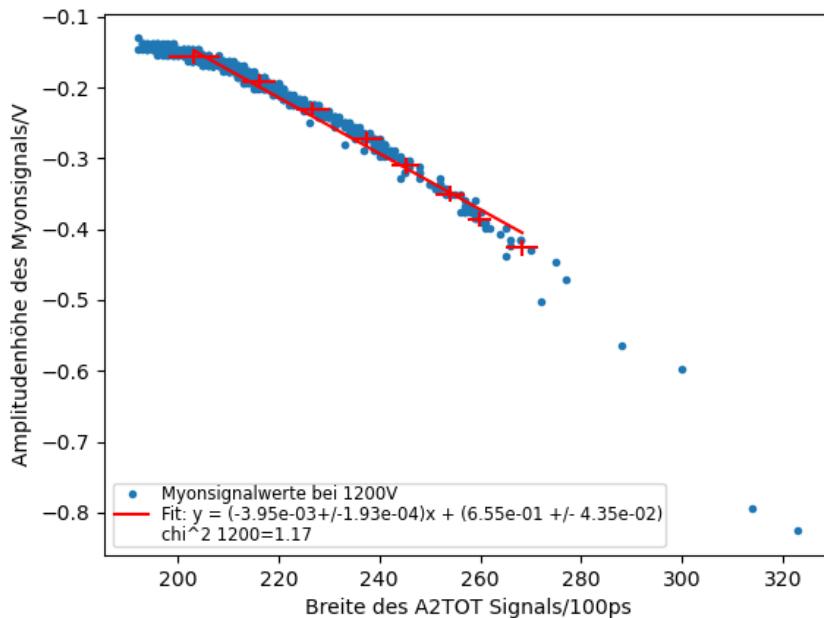


Abbildung 4.12: Als Streudiagramm dargestellte Amplitudenhöhen der Myonensignale aufgetragen gegen die gemessenen Breiten des A2TOT-Ausgangssignals.

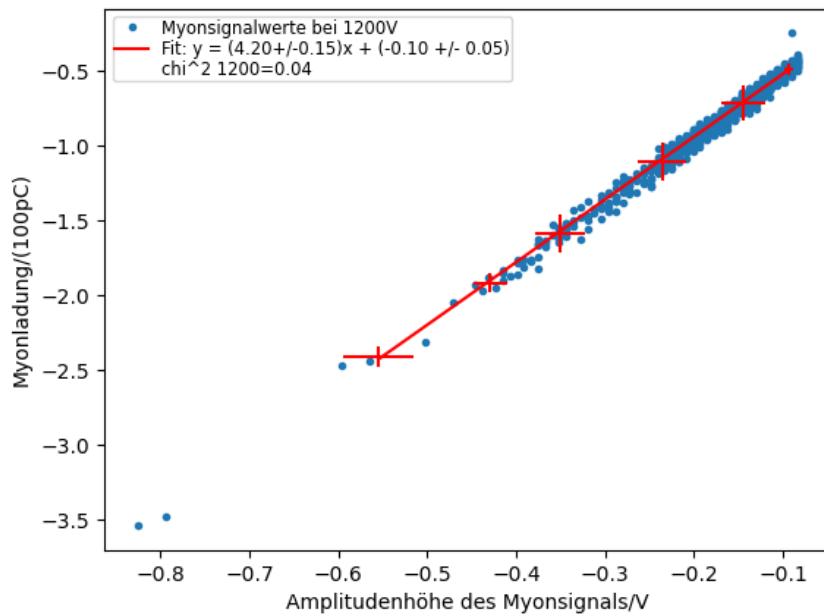


Abbildung 4.13: Als Streudiagramm dargestellte Amplitudenhöhen der Myonensignale aufgetragen gegen die Ladung des Myonensignals für eine Betriebsspannung des Szintillationszählers von 1200 V.

Man erhält auf diese Weise eine lineare Funktion der Form

$$Q = (-0.01659 \pm 0.00062) \frac{\text{pC}}{\text{ps}} \cdot t_{\text{A2TOT}} + (2.651 \pm 0.188) \text{ pC}. \quad (4.1)$$

Die Formel 4.1 wird nun dazu verwendet, um die Gerade in 4.14 zu plotten. Man kann gut erkennen, wie die Gerade dem Verlauf der Punkteschar folgt. Die Fehler in der Formel werden aus den Fehlern der linearen Funktionen ermittelt, auf der die Funktion beruht. Hierfür wird die Gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet. Die Streuung der Messwerte findet hierbei zwar keinen direkten Einzug in die Formel, aber trotzdem könnte man sie direkt für spätere Messungen als erste Kalibration verwenden.

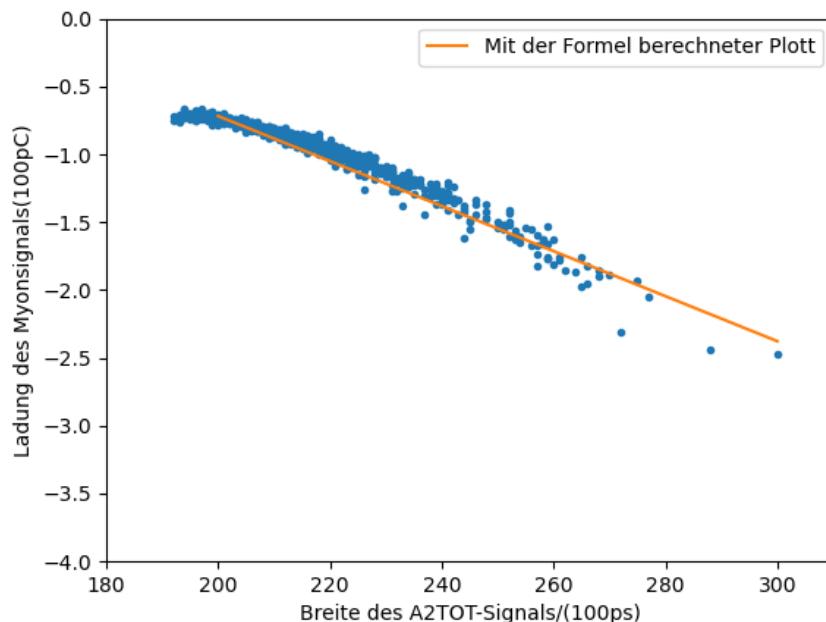


Abbildung 4.14: Ladungen der Myonensignale aufgetragen gegen die Breiten der A2TOT-Ausgangssignale. Die eingezeichnete Gerade folgt dem Verlauf von Formel 4.1.

5 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde der A2TOT-Schaltkreis diskutiert und charakterisiert. Dieser Schaltkreis kann dazu verwendet werden, die Amplitudenhöhen eingehender Signale in eine Pulsbreite zu umzuwandeln. Dazu verwendet dieser, dass der Anfang des Entladevorgangs eines Kondensators gut linear angenähert werden kann. Ein solcher Schaltkreis ist besonders hilfreich, da in vielen Experimenten eine kostengünstige Möglichkeit gesucht wird, um Pulsladungen, welche häufig stark mit der jeweiligen Pulsamplitude korreliert sind, messbar zu machen. Da Zeit-Digital-Wandler meistens günstiger sind als Ladungs-Digital-Wandler, kann ein solcher A2TOT-Schaltkreis evtl. eine Lösung für dieses Problem sein.

Um den A2TOT-Schaltkreis zuerst prinzipiell zu testen wurde ein Impulsgenerator verwendet, der den Vorteil hat, dass sehr exakte Pulse generiert werden können. Hier weist der A2TOT-Schaltkreis eine gute, wenn auch nicht perfekte Linearität zwischen Eingangssignalamplitude und Ausgangssignalbreite im Amplitudenbereich 0 V – 1.5 V auf. Für einen Test mit realistischen Signalen wurden kosmische Myonen verwendet, welche mit einem Szintillationszähler detektiert wurden. Hier wurde die Korrelation zwischen Amplitudenhöhe und Ladung des Myonensignals untersucht und auch die Korrelation zwischen Amplitudenhöhe und Breite des A2TOT-Signals. Hierbei wurde der Szintillationszähler auch mit niedrigeren Versorgungsspannungen betrieben, um auch Myonensignale welche mehr Photonen auslösen, in einen für den A2TOT-Wandler noch sinnvollen Amplitudenbereich zu verschieben. Zum Schluss wurde erläutert, wie sich aus dem Ausgangssignal des A2TOT-Schaltkreises auf die Ladung des Myonensignals schließen lässt. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der A2TOT-Wandler bei realistischen Myonensignalen mit Amplituden bis 1.5 V eine stark lineare Korrelation zwischen der Amplitude des Eingangssignals und der Pulsbreite erzeugt. Dies wird insbesondere in Abbildung 4.11 verdeutlicht. Im Vergleich zu Abbildung 4.6 wird erneut deutlich, dass die Korrelation deutlich linearer ist als die der Pulsbreite des Ursprungssignals mit dessen Ladung.

Abbildungsverzeichnis

2.1	A2TOT-Schaltkreis	7
2.2	Entladekurve Kondensator	8
3.1	Photo des Messaufbaus. Die wesentlichen Geräte wurden farblich markiert. Als schwarzer zoom-in/pop-out ist der A2TOT-Wander dargestellt. lila umrandet: Impulsgenerator, gelb umrandet: Inverter, grün Umrandet: Oszilloskop, rot umrandet: Szintillationszähler.	11
4.1	Breite A2TOT-Signal gegen Amplitudenhöhe des Myonensignals	15
4.2	Myonensignal mit A2TOT-Signal	16
4.3	Amplitudenhöhe des Myonensignals aufgetragen gegen die Ladung des Myonensignals	17
4.4	Normierte Myonensignale im Vergleich	18
4.5	Messwerte aus Abbildung 4.3 eingeschränkt auf die maximale Amplitudenhöhe von -1.5 V	19
4.6	Breite der Myonensignale aufgetragen gegen die Ladung des Myonensignals	20
4.7	Breite des A2TOT-Signals aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals	21
4.8	Breite des A2TOT-Signals aufgetragen gegen Amplitudenhöhe	21
4.9	Breite des A2TOT-Signals aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals	22
4.10	Streudiagramm der Breiten der A2TOT-Signale gegen die Amplitudenhöhen der im Szintillator erzeugten Myonensignale.	23
4.11	Breite des A2TOT-Signals aufgetragen gegen die Amplitudenhöhe des Myonensignals	24
4.12	Amplitudenhöhe des Myonensignals aufgetragen gegen die Breite des A2TOT-Signals	25
4.13	Amplitudenhöhe des Myonensignals aufgetragen gegen die Ladung des Myonensignals	25
4.14	Ladungen der Myonensignale aufgetragen gegen die Breiten der A2TOT-Ausgangssignale. Die eingezeichnete Gerade folgt dem Verlauf von Formel 4.1.	26
A.1	Einige Myonensignale mit den entsprechenden A2TOT-Signalen.	33
A.2	Myonensignal mit verschiedenen Messschwellen	33
A.3	Hier wird die Breite des A2TOT-Signals gegen die Amplitudenspannung aufgetragen, für eine Betriebsspannung des PMT von 1350V	34

Appendices

A Weitere Abbildungen

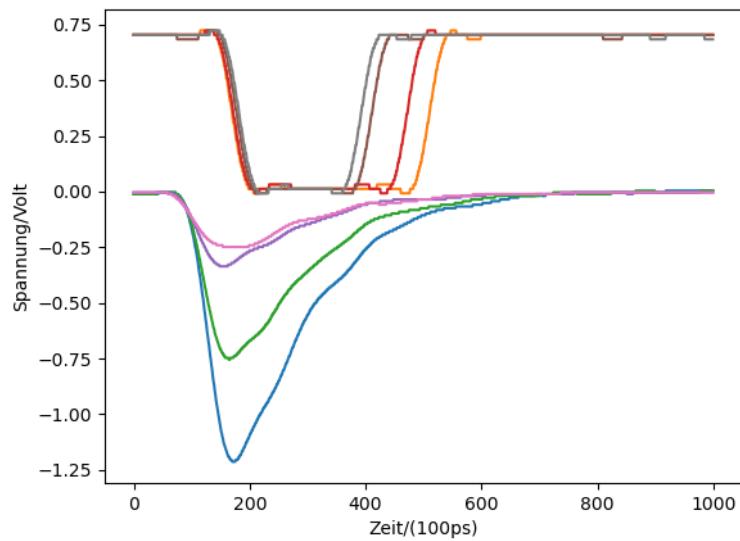


Abbildung A.1: Einige Myonensignale mit den entsprechenden A2TOT-Signalen.

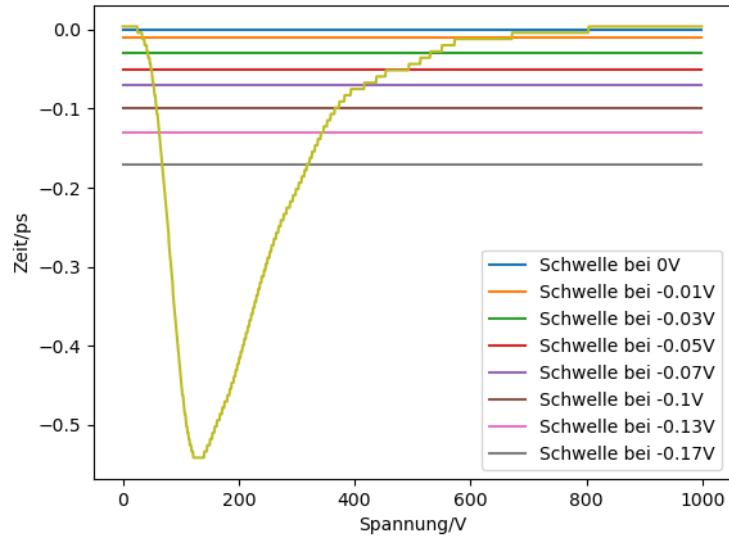


Abbildung A.2: Darstellung eines einzelnen Myonensignals zur Visualisierung der verschiedenen Möglichkeiten, bei welcher Schwelle/Höhe die Breite des Signals gemessen werden kann.

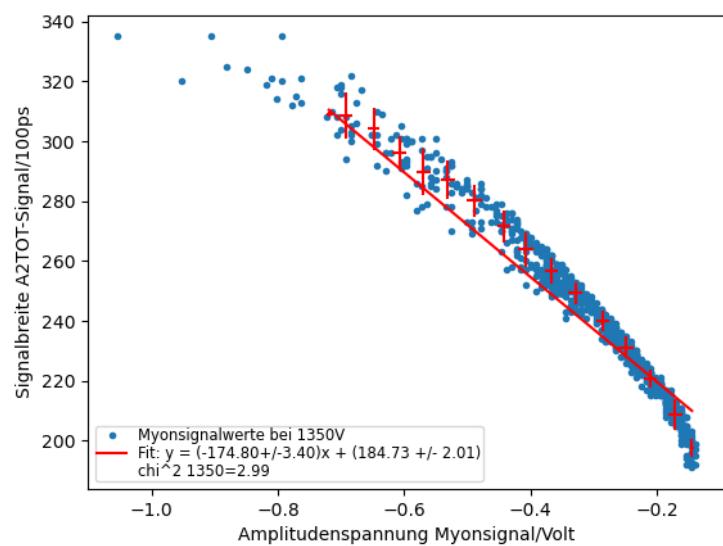


Abbildung A.3: Hier wird die Breite des A2TOT-Signals gegen die Amplitudenspannung aufgetragen, für eine Betriebsspannung des PMT von 1350V

Quellen

- [1] Jörg Förtsch. *Mail mit Betreff: "Vortrag von Christian zum Schaltkreis"*. private Kommunikation via Mail vom 2. Juli 2024, 14:46. Juli 2024.
- [2] Preston College Cosmic Ray Group. *Cosmic ray muons and relativistic time dilation*. abgerufen am 10. Oktober 2024, 14:46. 2024. URL: <archive.web.cern.ch/archiv/hst2000/teaching/expt/muoncalc/lifecalc.htm>.
- [3] *nexperia Multiplex Schalter*. abgerufen am 02. Oktober 2024, 15:46. 2024. URL: <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74LVC1G3157.pdf>.
- [4] *Texas Instruments LVDS Komparator*. abgerufen am 02. Oktober 2024, 15:46. 2024. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65lvds2.pdf?ts=1730192021492&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F.