



Bachelorarbeit

Verbesserung der elektronischen Auslese von Photoelektronenvervielfachern für den Bachelorpraktikumsversuch E4 (Kamiokanne)

Improvement of the readout electronics of photomultipliers for the Bachelor lab experiment E4 (Kamiokanne)

angefertigt am II. Physikalischen Institut der Georg-August-Universität Göttingen
von Tristan Koppe aus Niederdorla

Bearbeitungszeit: 14. April 2009 bis 3. August 2009

Betreuer/in: Fabian Kohn

Erstgutachter/in: Prof. Dr. Arnulf Quadt

Zweitgutachter/in: Prof. Dr. Ariane Frey

Externer Gutachter/in: Prof. Dr. Christian Zeitnitz

Identifikationsnummer: II.Physik-UniGö-Bachelor-2009/01

Abstract

This bachelor thesis describes the development of new readout electronics for the Bachelor lab experiment E4 (Kamiokanne), in particular with respect to an improved signal to noise ratio and a simplified design incorporating up-to-date components. This project was moreover designed for the company PHYWE to produce a commercial application for schools and universities.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Kosmische Strahlung	3
2.2. Myonen	4
2.3. Cherenkov-Effekt	6
2.4. Energieverlust geladener Teilchen in Materie	7
2.5. Photomultiplier	8
2.6. Mikrocontroller	10
2.6.1. Timer	11
2.6.2. Interrupt	11
2.6.3. Universal Serial Bus	12
2.6.4. Flash-EEPROM	13
2.6.5. Serial Peripheral Interface	14
3. Experimentelle Vorgehensweise	15
3.1. Ausgangssituation	15
3.2. Signalweg	15
3.2.1. Analogteil	16
3.2.2. Digitalteil	20
3.2.3. Zusammenfassung	28
3.3. Firmware	29
3.3.1. Systemstart	30
3.3.2. Aufnahme der Messdaten	30
3.4. Signaleinstreuung	32
3.5. Stromversorgung	33
4. Ergebnisse	35
4.1. Platinenlayout	35

Inhaltsverzeichnis

4.2. Messungen	35
4.2.1. Rate	35
4.2.2. Lebensdauer	37
4.2.3. Winkelverteilung	39
5. Diskussion	41
5.1. Elektronik	41
5.1.1. Präzision und Genauigkeit	41
5.1.2. Rauschen und Einstreuung	42
5.2. Bewertung der Ergebnisse	44
5.2.1. Ratenmessung	44
5.2.2. Lebensdauerermessung	44
6. Zusammenfassung	47
A. Anhang	49
Literaturverzeichnis	57

1. Einleitung

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts beschäftigte sich der deutsche Physiker und Lehrer Karl Bergwitz mit der ionisierenden Strahlung des Erdkörpers. Dabei war seinerzeit ungeklärt, ob und in welchem Maße diese Strahlung mit der Höhe abnimmt. So nutzte er 1908 einen Fesselballonflug eines Braunschweiger Luftsportvereins um die Ionisation der Luft in verschiedenen Höhen zu ermitteln. Dabei stellte er zunächst die erwartete Abnahme, dann jedoch mit anwachsender Höhe eine Zunahme der Ionisation fest. Dieses Ergebnis führte er aber auf einen Defekt seiner Messeinrichtung zurück. Wenig später griff der österreichische Physiker Viktor F. Hess das Resultat auf, führte eigene Messungen durch und entdeckte damit die Höhenstrahlung (Heute: Kosmische Strahlung (siehe Kap. 2.1)), für welche er 1936 den Nobelpreis für Physik erhielt.

Diese hochenergetische Strahlung wurde seit ihrer Entdeckung schon von sehr vielen Experimenten untersucht. Die wohl eindrucksvollste Anlage ist das *Super Kamioka Nucleon Decay Experiment* (Super-Kamiokande [1]) in Japan. Untersucht wird dort die Neutrinooszillation [2] und der spontane Protonenzerfall [3]. Um die eigentlich nur schwer detektierbaren Neutrinos erfassen zu können, lässt sich Cherenkov-Strahlung (siehe Kap. 2.3), welche von Elektronen nach Streuung an Neutrinos hervorgerufen wird, beobachten. Aufgefangen werden diese Lichtblitze von Photomultipliern (siehe Kap. 2.5), welche diese optischen Signale in elektrische Pulse umwandeln. Das Experiment selbst hat dabei enorme Ausmaße. Insgesamt befinden sich in den Auffangbehältern 50000 t reinstes Wasser und zur Detektion werden 11146 Photomultiplier eingesetzt. Im Jahre 2002 wurde auf Grund der mit Super-Kamiokande gefundenen Forschungsergebnisse der Nobelpreis für Physik an die Forscher R. Davis Jr., M. Koshiba und R. Giacconi verliehen [4].

Angelehnt an dieses Experiment ist der Versuchsaufbau Kamiokanne. In der Konstruktion ähnelt es seinem großen Vorbild Super-Kamiokande. Jedoch dient als Auffangbehälter kein riesiger Tank sondern eine handelsübliche Thermoskanne und statt 11000 Photomultipliern wird lediglich mit einem einzigen (Abb. 1.2) gemessen. Zu-

1. Einleitung

dem sollen hier nicht Neutrinos sondern kosmische Myonen (siehe Kap. 2.2) detektiert werden.

Ausgegangen wird bei der Entwicklung von schon vorhandenen Experimenten der Universitäten Mainz und Wuppertal. [5]

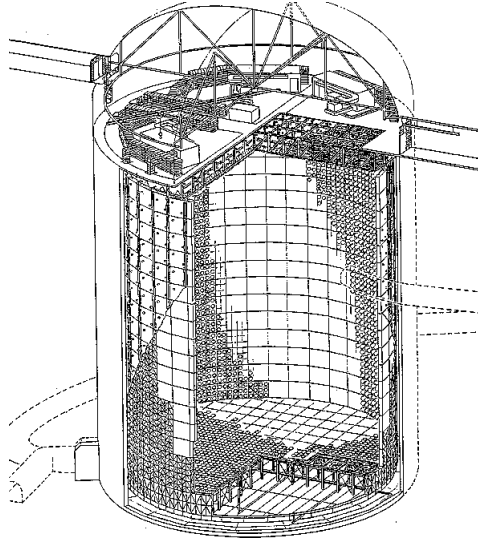


Abb. 1.1.: Aufbau des Detektors Super-Kamiokande



Abb. 1.2.: Eine gewöhnliche Thermoskanne mit aufgeschraubtem Photomultiplier

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert. Zunächst wird auf die Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung und die daraus erzeugten Myonen Bezug genommen. Anschließend wird auf die verschiedenen Formen des Energieverlusts geladener Teilchen in Materie eingegangen. Beendet wird das Kapitel mit technischen Grundlagen der verwendeten Elektronik.

2.1. Kosmische Strahlung

Die Kosmische Strahlung ist eine hochenergetische Teilchenstrahlung mit einer Energie zwischen $10^3 - 10^{20}$ eV (Tabelle 2.1), welche ununterbrochen auf die Erdatmosphäre auftrifft. Die Teilchenstrahlung resultiert zum einen aus Sonnenwinden und Sonneneruptionen, zum anderen aber auch direkt aus der Milchstraße, wo beispielsweise Supernovae als Teilchenquellen in Frage kommen. Bei Teilchen mit Energien im Bereich von 10^{20} eV wird ein extragalaktischer Ursprung angenommen. [6]

Tab. 2.1.: Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung geordnet nach Kernladungszahl Z und skaliert auf die Häufigkeit von Sauerstoff mit $F = 1$ (primäre kosmische Strahlung)[6]

[h] Z	Element	F	Z	Element	F
1	H	540	13-14	Al-Si	0.19
2	He	26	15-16	P-S	0.03
3-5	Li-B	0.40	17-18	Cl-Ar	0.01
6-8	C-O	2.20	19-20	K-Ca	0.02
9-10	F-Ne	0.30	21-25	Sc-Mn	0.05
11-12	Na-Mg	0.22	26-18	Fe-Ni	0.12

Von der hauptsächlich aus Protonen und Alphateilchen bestehenden Strahlung trifft aber nur ein geringer Anteil auf die Erdoberfläche. Dies lässt sich durch Spallationsreaktionen (unelastische Wechselwirkung eines Atomkerns mit einem Projektil)

2. Grundlagen

zwischen der Strahlung und der Erdatmosphäre erklären. Dabei bildet sich eine Vielzahl von neuen Teilchen, welche selbst oft nicht stabil sind und in Teilchenschauern zerfallen.

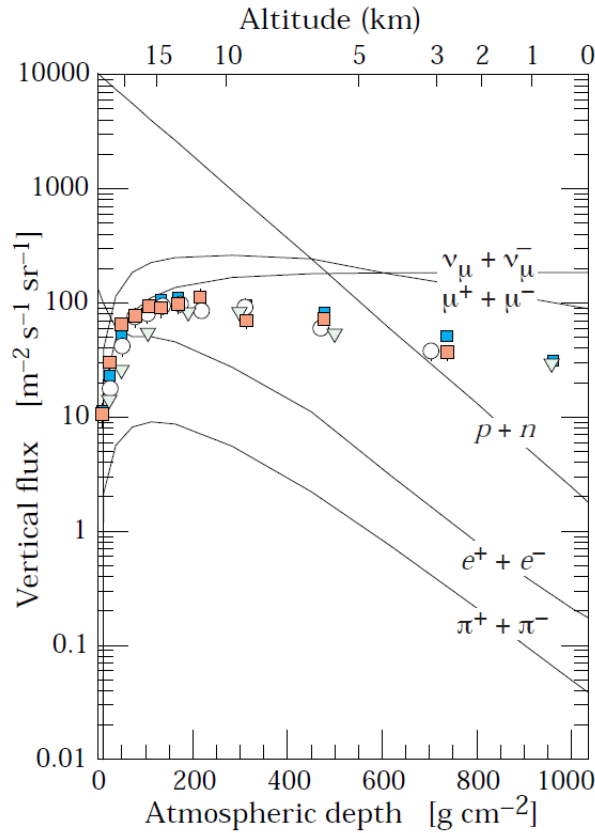


Abb. 2.1.: Zusammensetzung der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre (sekundäre kosmische Strahlung). Skaliert auf den Fluss der Elektronen und Positronen. Die Datenpunkte sind Messungen von negativen Myonen mit $E_\mu > 1 \text{ GeV}$. [6]

2.2. Myonen

Das Myon mit einer Lebensdauer von $\tau_\mu = 2.197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ist ein nicht stabiles Elementarteilchen. Nach ein paar Mikrosekunden zerfällt es über die schwache Wechselwirkung [7] in ein Elektron, ein Neutrino und ein Antineutrino (Abb. 2.2). Jedoch wird die Erdoberfläche ständig von diesen Teilchen getroffen. Produziert werden die Myonen in einer Höhe von ca. 10-15 km über dem Meeresspiegel als Zerfallsprodukte der Hadronenschauer, welche aus der Kosmischen Strahlung herrühren (Tab. 2.2).

Tab. 2.2.: Häufigste Zerfallskanäle für die Myonenproduktion über die kosmische Strahlung. [8]

Zerfallskanal	Wahrscheinlichkeit
$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu$	99.99 %
$\pi^- \longrightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$	99.99 %
$K^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu$	63.54 %
$K^+ \longrightarrow \pi^+ \pi^0$	20.68 %
$K^- \longrightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$	63.54 %
$K^- \longrightarrow \pi^- \pi^0$	20.68 %

Jedoch würden diese Elementarteilchen nach klassischer Betrachtungsweise [9] die Erdoberfläche niemals erreichen, da sie selbst mit Lichtgeschwindigkeit diese nur zu einem Anteil von 0.00003 % treffen würden (Gl. 2.2.1). Aufgrund der speziellen Relativitätstheorie und der daraus resultierende Längenkontraktion können jedoch Myonen mit beispielsweise einer Energie von $E_\mu = 1$ GeV die Erdoberfläche mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 22 % erreichen (Gl. 2.2.2). Weiterhin verlieren die Myonen auf ihrem Weg Richtung Erde lediglich Energie durch Ionisation und Anregung (siehe Kap. 2.3 und 2.4), nicht aber auf Grund ihrer hohen Masse von $m_\mu = 106$ MeV ($\approx 200 m_{elektron}$) durch Bremsstrahlung, da sich diese proportional zu $\frac{1}{m_\mu^2}$ verhält. Dies erklärt auch das hohe Durchdringungsvermögen dieser Teilchen von Materie.

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_\mu}\right) = \exp\left(-\frac{s}{c\tau_\mu}\right) = \exp\left(-\frac{10 \text{ km}}{3 \cdot 10^5 \text{ km/s} \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}}\right) = 2.6 \cdot 10^{-7} \quad (2.2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} &= \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau_\mu}\right) = \exp\left(-\frac{s}{c\tau_\mu \cdot \sqrt{\left[\frac{E_\mu}{E_0}\right]^2 - 1}}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{10 \text{ km}}{3 \cdot 10^5 \text{ km/s} \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot \sqrt{\left[\frac{1 \text{ GeV}}{0.1 \text{ GeV}}\right]^2 - 1}}\right) = 0.22 \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

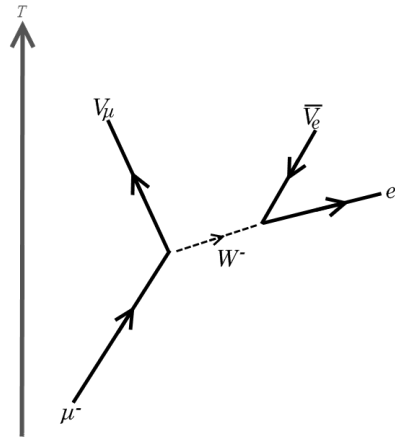


Abb. 2.2.: Feynmangraph für den Zerfall eines negativen Myon

2.3. Cherenkov-Effekt

Wenn sich geladene Teilchen mit einer höheren Geschwindigkeit als der Phasengeschwindigkeit des Lichtes in einem dielektrischen Medium bewegen, lassen sich kurze Lichtpulse beobachten. Pawel Čerenkov erklärte diesen Effekt über die Polarisaton der Atome des Mediums, durch welches sich das Teilchen bewegt [10]. Durch diese Polarisaton werden die angeregten Atome zu elektromagnetischen Dipolen (Abb. 2.3). Da sich das Dipolfeld durch die Bewegung des geladenen Teilchens zeitlich ändert, emittieren die einzelnen Dipole elektromagnetische Wellen. Auf Grund der symmetrischen Polarisaton löschen sich diese Schockwellen weitestgehend aber wieder aus. Wenn die geladenen Teilchen jedoch eine stoffspezifische Grenzggeschwindigkeit ($v = \frac{c_{vac}}{n}$) überschreiten, ist diese Polarisaton nicht mehr symmetrisch. Nun kompensieren sich die elektromagnetischen Wellen nicht mehr gegenseitig und es entsteht ein Lichtkegel der Form:

$$\cos\Theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2.3.1)$$

Hier beschreibt Θ den Öffnungswinkel, n den stoffspezifische Brechungsindex und β die Geschwindigkeit des Teilchens in Einheiten von c_{vac} . Dieser Kegel ist vergleichbar mit dem Mach-Kegel bei Überschallgeschwindigkeiten. Für diese Erklärung erhielt der russische Physiker zusammen mit Ilja Michailowitsch Frank und Igor Jewgenjewitsch Tamm 1958 den Nobelpreis für Physik.

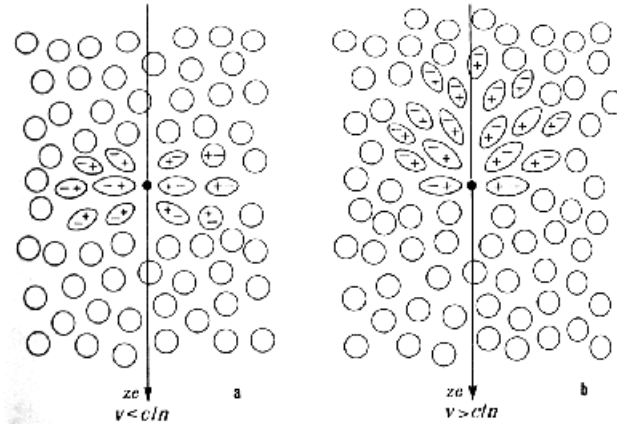


Abb. 2.3.: Bei $v < \frac{c_{vac}}{n}$ bildet sich ein symmetrisches Dipolfeld. Bei höheren Geschwindigkeiten wird die Polarisation asymmetrisch. [11]

2.4. Energieverlust geladener Teilchen in Materie

Durchqueren geladene Teilchen ein Material, interagieren sie mit den Hüllenelektronen der Atome im Stoff. Dabei kann es zu Anregung oder zur Ionisation der Atome kommen. Daraus resultiert ein Energieverlust und damit ein Abbremsen der hochenergetisch geladenen Teilchen.

Der deutsch-US-amerikanische Physiker Hans Bethe fand 1930 eine nichtrelativistische und 1932 eine relativistische Formel (Gl. 2.4.1) für die Beschreibung des Energieverlustes bewegter geladener Teilchen in Materie.

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (2.4.1)$$

Gl 2.4.1: Relativistische Bethe-Bloch-Gleichung[8].

β Geschwindigkeit [c], z Ladung des Teilchens [e], γ Lorentzfaktor, E Energie des Teilchens, e Elementarladung, m_e Elektronenmasse, r_e klassischer Elektronenradius, $T_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$, A atomare Masse des Absorbers, Z Ordnungszahl des Absorbers, $\delta(\beta\gamma)$ Korrektur des Energieverlustes durch Ionisation, $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$

In dieser Form beschreibt die Bethe-Bloch-Gleichung beispielsweise die Energieverluste von Pionen mit einer Energie zwischen 6 MeV und 6 GeV in Kupfer mit einer Genauigkeit von 1% (Abb. 2.4). Für niedrigere und höhere Energien müssen weitere Korrekturen angewendet werden.

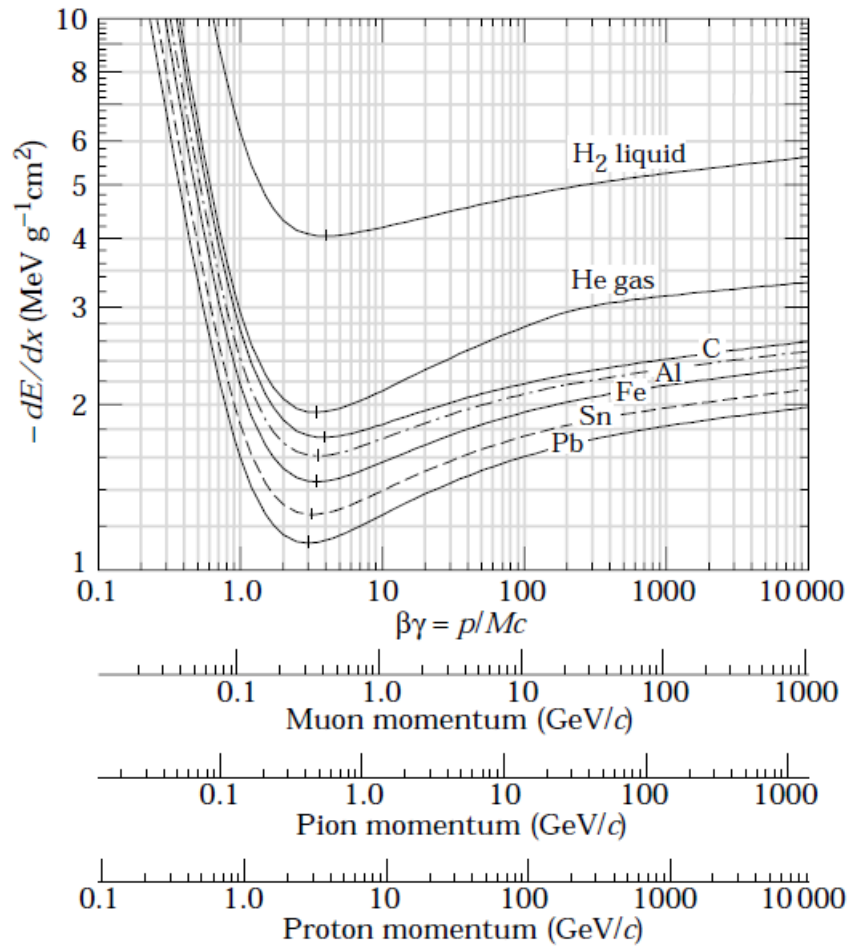


Abb. 2.4.: Energieverlustrate in flüssigen Wasserstoff, gasförmigen Helium, Kohlenstoff, Aluminium, Eisen, Zinn und Blei aufgetragen für Myon-, Pion- und Protonenimpulse. [8]

2.5. Photomultiplier

Für die Detektion der Cherenkov-Strahlung der Myonen wird in diesem Versuch ein Photomultiplier verwendet. Dieses Bauteil dient zur Umwandlung optischer Photonen in elektrische Signale. Dafür müssen die Lichtpulse auf eine Photokathode treffen und dort durch den Photoelektrischen Effekt [12] Elektronen aus dieser auslösen. Nun werden die Elektronen durch ein anliegendes äußeres elektrisches Feld in Richtung einer Elektrode (Dynode) beschleunigt. Die Austrittsarbeit für Elektronen ist bei Dynoden sehr gering. Wenn die beschleunigten Elektronen auf diese auf treffen, lösen sie weitere Elektronen aus der Dynode aus. Jetzt beschleunigen die

ausgelösten Elektronen weiter zur nächsten Dynode und lösen somit eine Kaskade von Elektronen aus. Möglich ist dies, da die weiter hinten liegenden Dynoden jeweils auf einem positiveren Potential liegen als die vorderen. Pro auftreffendem Elektron werden in so einer Verstärkerstufe 3-5 neue Elektronen freigesetzt. Meist befinden sich 10-15 Dynoden als Verstärkerstufen in einem Photomultiplier und die gesamte Beschleunigungsspannung liegt zwischen 1-2 kV. Das ergibt beispielsweise für einen Photomultiplier mit 10 Dynoden und einem Verstärkungsfaktor von 4 Elektronen pro Stufe eine Gesamtverstärkung um den Faktor $4^{10} \approx 10^6$. Diese Elektronenlawine trifft letztendlich auf die Anode auf. An ihr lässt sich ein Spannungspuls über einen Widerstand abgreifen.

Nach dem Puls laden sich die Dynoden wieder auf, was nur wenige Nanosekunden andauert. Danach können sofort neue Pulse detektiert werden, was eine hohe Zeitauflösung garantiert.

Jedoch wird hier nicht nur Cherenkov-Licht detektiert. Auch thermische Elektronen können aus den Dynoden weitere Elektronen ausschlagen, was auch zu einem messbaren Puls führt.

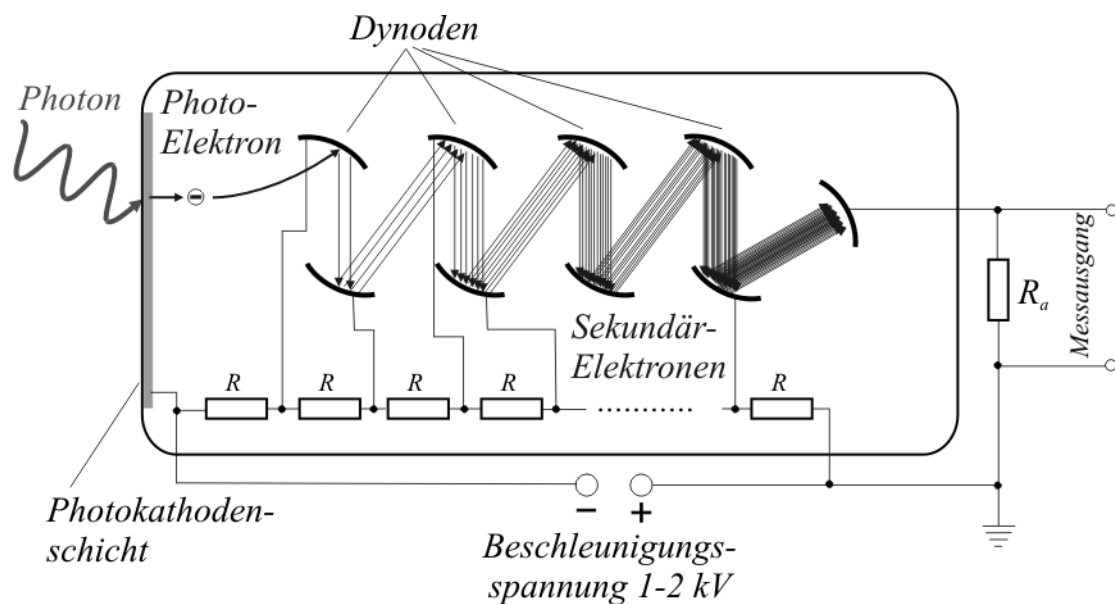


Abb. 2.5.: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers

2.6. Mikrocontroller

Ein Mikrocontroller ist ein Prozessor, der mit Peripherieschnittstellen, wie beispielsweise SPI(Kap. 2.6.5) oder USB(Kap. 2.6.3), ausgestattet ist. Dabei befinden sich die einzelnen Elemente alle auf einem einzigen Halbleiterchip, wodurch Schaltungen mit Mikrocontrollern meist nur noch aus wenigen Bauelementen bestehen. Heutzutage sind außerdem auch oft der Arbeits- und der Programmspeicher teilweise oder sogar ganz auf diesen Chips integriert, weshalb für das Arbeiten mit solch einem Chip lediglich eine Spannungs- und eine Taktversorgung bereitgestellt werden muss.

Das hauptsächliche Unterscheidungskriterium ist die Breite des Datenbusses, mit der der Mikrocontroller intern arbeitet. Durch die Datenbusbreite ist die Größe der Zahlen begrenzt, die innerhalb einer Rechenoperation bearbeitet werden können. So kann ein 8-Bit-Controller in einer Rechenoperation lediglich Zahlen in einem Bereich von 0-255 verarbeiten. Größere Werte müssen in mehreren Rechenschritten berechnet werden.

Produziert werden diese Controller in den verschiedensten Ausführungen. Dabei reichen die Angebote von sechsbeinigen 4-Bit-Controllern zur Steuerung einer Armbanduhr bis hin zu universellen großen 32-Bit-Controllern, welche neueste multimediale Geräte ansteuern können.

Für die Durchführung dieser Arbeit kommt ein PIC32MX460F512L (Abb. 2.6) zum Einsatz. Details zu diesem Controller werden in Kapitel 3.2.2 angegeben.

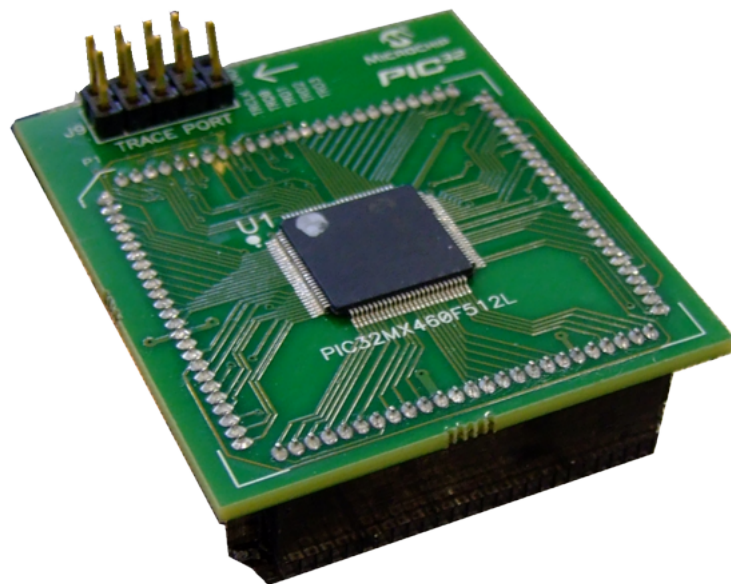


Abb. 2.6.: Mikrocontroller PIC32MX460F512L der Firma Microchip

2.6.1. Timer

In den meisten heutigen Mikrocontrollern sind Timer verbaut. Die Funktion dieser Bausteine ist das Zählen von Signalen. Dabei hat ein Timer Zugriff auf ein spezielles Speicherregister, welches immer um eins inkrementiert wird, falls ein Puls von außen zugeschickt wird. Dient als Signalgeber beispielsweise ein Quarzoszillator, lässt sich so aus der bekannten Frequenz des Quarzes ein Zeitintervall bestimmen, indem das Timerregister zu verschiedenen Zeiten ausgelesen wird. Dabei gibt es sehr viele verschiedene Modi, in denen diese Zähler betrieben werden können. So kann das Triggersignal über einen externen Pin eingespeist oder aber aus der Taktfrequenz des Mikrocontrollers gewonnen werden (siehe Abb. 2.7a). Weiterhin können Timer je nach Ausstattung des Chips auch von einem extra Eingang aktiviert (siehe Abb. 2.7b) und deaktiviert werden. Zudem können vor den Timern auch noch Frequenzteiler verbaut sein, sodass ein Inkrementieren des Registers nicht bei jeder aufsteigenden Flanke erfolgt.

Unterschieden wird bei den Timern zwischen synchronen und asynchronen Zählern. Die synchronen Timer können ein Register nur im Rhythmus des Haupttaktes des Mikrocontrollers verändern, während asynchrone dazu jederzeit in der Lage sind.

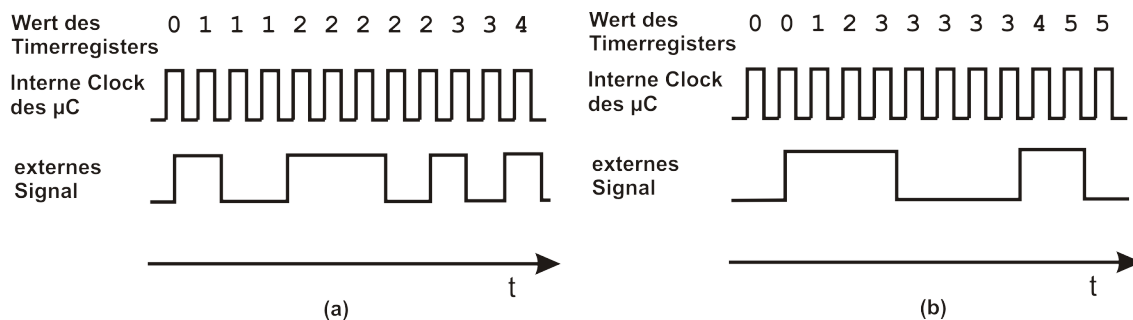


Abb. 2.7.: (a) der Timer erhöht seinen Registerwert bei jeder aufsteigenden Flanke
 (b) Timer ist nur aktiv, wenn der Signaleingang auf logisch High liegt. Als Trigger dient der interne Takt.

Die Spezifikationen der hier verwendeten Timer werden in Kapitel 3.2.2 angegeben.

2.6.2. Interrupt

Mit Hilfe von Interrupts, zu deutsch Unterbrechungen, lassen sich ereignisorientierte Programme realisieren. Mögliche Interruptquellen sind beispielsweise sich ändernde

2. Grundlagen

Pegel an Pins, übergelaufene Timer oder bestimmte Registerzustände. Im Falle eines solchen Ereignisses springt der Prozessor unmittelbar an eine vorher definierte Codestelle und führt zunächst diesen Programmteil aus, bevor er mit seinen vorherigen Aufgaben fortfährt. Dadurch ist der Mikrocontroller in der Lage, zeitnah auf externe Ereignisse zu reagieren, ohne ständig die Ereignisbedingungen abfragen zu müssen. Dieses Verfahren macht den Code schneller und flexibler. Jedoch kann unter Umständen die Lesbarkeit des Programms negativ beeinträchtigt werden.

2.6.3. Universal Serial Bus

Entwickelt wurde der universelle serielle Bus (USB [13]) 1996 von der Firma Intel. Dabei handelt es sich um einen seriellen Bus mit lediglich vier Leitungen (Abb. 2.8). Die Datenübertragung erfolgt symmetrisch (zwei Signalleitungen, bei der eine das invertierte Signal zur anderen besitzt) und ist so unanfälliger gegenüber äußeren Einstreuungen.

In einem USB-Netz gibt es immer einen Host (meistens ein PC), der bis zu 127 Endgeräte verwaltet. Die Endgeräte werden dafür vom Host mit eindeutigen Nummern belegt und über diese angesprochen. In der physikalischen Vernetzung ist dieser Bus aber eigentlich kein Bus, da an jede Buchse laut Spezifikation nur ein Gerät angeschlossen werden darf. Um mehrere Geräte gleichzeitig betreiben zu können, wird ein Verteiler ein sogenannter Hub [13] benötigt.

Aktuell gibt es drei Geschwindigkeitsstandards für die Datenübertragung via USB. Zum einen USB 1.1 (low speed) mit einer Datenrate von maximal 12 Mbit/s und USB 2.0 (high speed) mit höchstens 480 Mbit/s , was den Einsatz der USB-Schnittstelle in vielen Anwendungen, wie in der Unterhaltungselektronik oder für Massenspeicher, ermöglicht. Seit Anfang 2009 ist ein neuer USB 3.0 (Super Speed [14]) Standard auf dem Markt, mit dem bis zu 4.8 Gbit/s übertragen werden können.

Der in dieser Arbeit verwendete Mikrocontroller besitzt eine USB 2.0-Schnittstelle. Details hierzu werden in Kapitel 3.2.2 diskutiert.

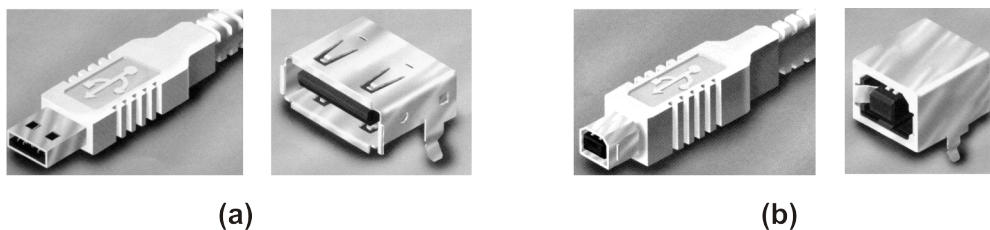


Abb. 2.8.: Die USB-Stecker besitzen zwei Datenleitungen und zwei Versorgungsleitungen (GND und +5 V)
 (a) Buchsen- und Steckertyp „A“ als Anschluss und Zuführung zum Host
 (b) Buchse und Stecker vom Typ „B“ für Endgeräten oder Hubs [13]

2.6.4. Flash-EEPROM

Der Flash-EEPROM geht aus den normalen EEPROM¹ hervor. Dabei handelt es sich um Speicherbausteine, welche aus einer Matrix von Floating-Gate-Transistoren [15] bestehen und mit Hilfe des Tunneleffektes [16] programmiert werden. Im Gegensatz zu den EEPROMs können bei Flash-EEPROMs zwar auch je nach Bauform einzelne Speicheradressen direkt gelesen oder beschrieben werden, jedoch lassen sich nur ganze Speicherblöcke auf einmal löschen. Durch diesen Umstand werden viele Verdrahtungen eingespart, wodurch eine höhere Speicherdichte erzielt wird. Weiterhin werden in den modernen Flash-Speichern pro Transistor nicht nur ein Bit, sondern durch Abstufung der Ladungsmenge mehrere Bits gespeichert.

Die Flash-Speicher werden überall dort eingesetzt, wo große Datenmengen auf kleinen Raum untergebracht werden müssen. Das bekannteste Beispiel sind wahrscheinlich die SD-Speicherkarten, welche auf diese Technologie zurückgreifen. Zudem sind heutzutage auch viele Mikrocontroller im Programmspeicher mit Flash-EEPROMs ausgestattet.

Die Lebensdauer dieser Bausteine ist jedoch durch die Anzahl der Schreib- und Löschzyklen begrenzt. Zwar können die gespeicherten Daten quasi beliebig oft gelesen werden, aber bei jedem Löschzyklus wird die Oxidschicht im Floating-Gate-Transistor leicht beschädigt, sodass irgendwann Ladungen aus den Transistoren abfließen können und sie dadurch ihre Fähigkeit zu Speichern verlieren.

Der in diesem Projekt benutzte Mikrocontroller verwendet für seinen Programmspeicher Flash-EEPROMs. Details hierzu werden in Kapitel 3.2.2 erläutert.

¹Bedeutung: „electrically erasable programmable read-only memory“

2.6.5. Serial Peripheral Interface

Das von Motorola entwickelte Serial Peripheral Interface (SPI [17]) Bus-System ist ein Standard für einen synchronen seriellen Datenbus, welcher von SD-Karten unterstützt wird. Dabei eignet sich dieses System hervorragend für die Implementierung an einem Mikrocontroller, da lediglich vier frei definierbare Pins benötigt werden. Ihre jeweilige Bedeutung wird in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 2.3.: Die vier Leitungen für die Kommunikation mittels SPI Bus-System

Leitung	Erklärung
\overline{SS} (Slave Select)	Dient zur Aktivierung eines Slaves (hier die SD-Karte). Dabei nimmt die Karte nur Kommandos entgegen, wenn die Leitung auf Masse liegt.
MOSI (Master out Slave in)	Dateneingang der SD-Karte (wird an Pin SDO von Mikrocontroller angeschlossen)
MISO (Master in Slave out)	Datenausgang der SD-Karte (wird an Pin SDI von Mikrocontroller angeschlossen)
SCK (Serial Clock)	Ist der Taktgeber für die Datenübertragung, welcher vom Mikrocontroller geliefert wird.

Die Datenübertragung erfolgt dabei Byteweise (also werden Datenpakete immer in einer Größe von 8 Bit versendet) und kann im Vollduplexmodus (gleichzeitiges Empfangen und Senden) durchgeführt werden.

3. Experimentelle Vorgehensweise

3.1. Ausgangssituation

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll die Analog- und Digitalelektronik für den Versuch Kamiokanne verbessert werden. Dabei wird in Zusammenarbeit mit der Firma PHYWE ein neues Produkt entwickelt, welches später an Schulen und Universitäten zum Einsatz kommen kann.

In den letzten Jahren wurden schon einige Versionen einer Ausleseelektronik für dieses Experiment entwickelt [5]. Diese dienen hier als Grundlage und sollen in dieser Bachelorarbeit weiterentwickelt und mit neuen Funktionen ausgestattet werden. Beispielsweise soll ein SD-Karten-Interface implementiert werden, was auch Messungen ohne einen nebenstehenden PC ermöglicht. Besonderer Wert wird zudem auf eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses gelegt. Jedoch sind die Vorgängerboards in ihrer Funktion nicht mehr direkt erweiterbar, da der steuernde Mikrocontroller voll ausgelastet und die Elektronik auf den vorhandenen Funktionsumfang optimiert ist.

Aus diesem Grund muss das Boardlayout weitestgehend neu erstellt werden.

3.2. Signalweg

Der Spannungspuls vom Photomultiplier wird dabei zunächst verstärkt und anschließend durch einen einstellbaren Komparator ausgewertet und digitalisiert. Danach wird das Signal über ein Flip-Flop für den darauf folgenden Mikrocontroller vorbereitet. Dieser verarbeitet die gemessenen Pulse und schickt die Daten via USB an einen PC. Zudem können die Daten im neuen Layout auch direkt auf eine SD-Karte gespeichert werden. Im Folgenden wird chronologisch der Verlauf der Signalverarbeitung beschrieben.

3.2.1. Analogteil

Der Analogteil besteht aus einer Verstärkereinheit und einem Komparator. Die Verstärkereinheit kann über ein Drehpotentiometer kalibriert werden, um ein optimales Verstärkungs- zu Rauschverhältnis zu erreichen. Am Komparator muss für jede Messung eine Schwellspannung eingestellt werden. Dieser Schaltungsteil ist für jeden Eingang separat aufgebaut.

Ausgangssignal

Als Ausgangssignal dienen die Pulse des Photomultipliers. Diese haben in etwa eine Dauer von 30 ns und eine Amplitude zwischen 10-20 mV (Abb. 3.1). Die Übertragung des Signals wird über ein Koaxialkabel mit BNC-Steckern (Abb. 3.2) realisiert, welches durch seine geschirmte Bauform relativ unanfällig gegenüber äußeren elektromagnetischen Einstreuungen ist. So lassen sich problemlos einige Meter zwischen der Kanne mit Photomultiplier und der Ausleseelektronik überwinden.

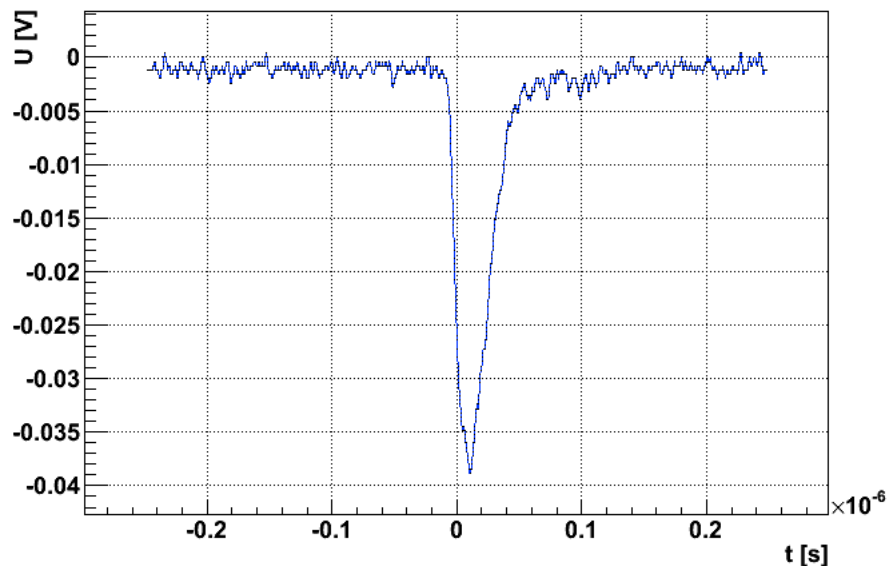


Abb. 3.1.: Myonpuls direkt aus dem Photomultiplier.



Abb. 3.2.: Koaxialkabel mit BNC-Stecker [18]. Durch die geschlossene Schirmung der Signalleitung im Inneren des Kabels werden äußere Einstreuungen stark abgeschwächt.

Verstärkung der Eingangssignale

Diese Eingangssignale sind von ihrer Amplitude zu schwach, um sie auswerten zu können. Dafür müssen sie um mindestens eine Größenordnung verstärkt werden. Realisiert werden kann dies über *Operationsverstärker*. Diese Bauelemente sind in der Lage, Eingangssignale linear zu verstärken. Für die Schaltung werden die Verstärker AD8002 [19] gewählt. Dabei befinden sich in einem Gehäuse immer zwei Verstärker. Diese werden in Reihe geschaltet und erzielen eine Gesamtanhebung des Pegels um den Faktor 30. Der Verstärkungsfaktor kann über einen regelbaren Widerstand auf der Platine geeicht werden. Somit werden aus den 10-20 mV-Pulsen bis zu 600 mV große invertierte Pulse generiert (Abb. 3.3).

3. Experimentelle Vorgehensweise

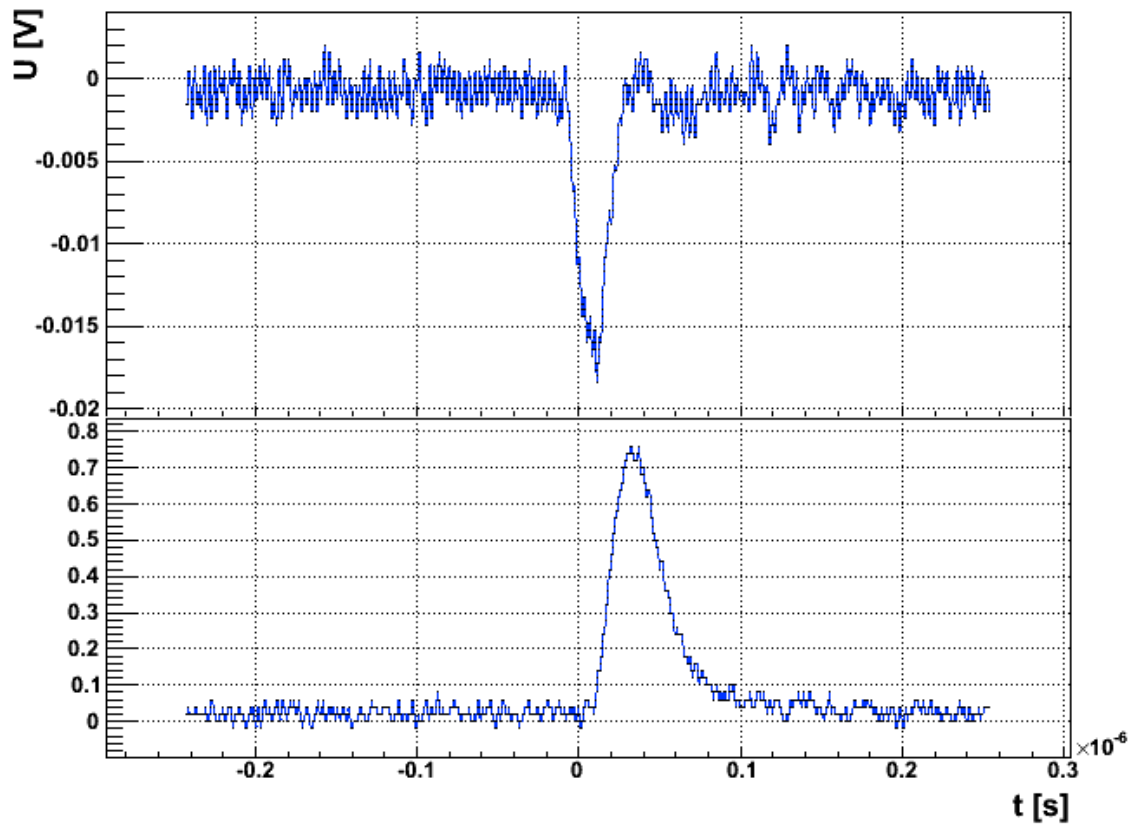


Abb. 3.3.: Oben der Originalpuls des Photomultipliers. Unten das verstärkte Signal am Ausgang des AD8002.

Umwandlung in Digitalsignal

Ein Mikrocontroller kann analoge Spannungspulse nicht verarbeiten. Er benötigt logische digitale Signale. Dabei gibt es nur die Zustände „0“ oder „1“, welche beispielsweise in einer Transistor-Transistor-Logik (TTL [20]) durch 0 V und 5 V repräsentiert werden. Zur Umwandlung wird ein MAX902 [21] verwendet. Das ist ein Komparator, der einen Eingangssignal mit einem vorgegebenen Referenzpegel vergleicht. Liegt das Eingangssignal über dem Referenzpegel setzt das Bauteil seinen Ausgang auf logisch „1“, andernfalls auf logisch „0“. Das Referenzsignal kann über ein Potentiometer in seiner Höhe verändert werden. So kann entschieden werden, ab welcher Höhe ein Puls als Signal betrachtet wird. Da der Puls nur sehr kurz ist, liegt auch der Signaleingang des Komparators nur sehr kurz über der Referenzspannung. Somit werden auch nur kurze digitale Pulse am Ausgang erzeugt (Abb. 3.4).

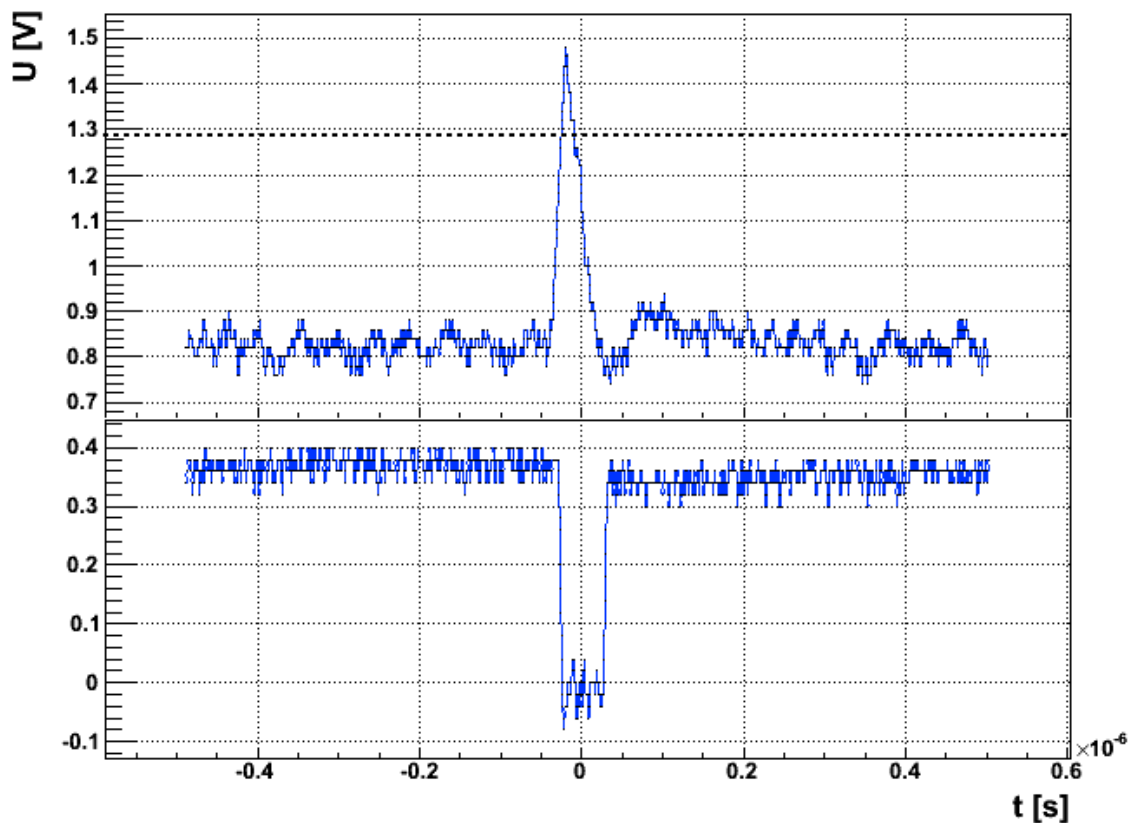


Abb. 3.4.: analoger verstärkter Puls (oben, gestrichelte Linie entspricht Schwellspannung), welcher in einen Digitalpuls umgewandelt wird (unterer Plot, Tastkopfverhältnis 1/10)

3.2.2. Digitalteil

Interessant für die Messung der Myonen sind die exakten Zeitpunkte des Auftretens der Cherenkovstrahlung. Diese müssen vom Digitalteil der Schaltung ermittelt werden.

Pulsverarbeitung

Die aus im Analogteil erzeugten Digitalpulse müssen für die Messung mittels Timer am Mikrocontroller aufbereitet werden. Entschieden wurde sich hier für die Nutzung der Gatefunktion der internen Timer (siehe Kap. 2.6.1). Um dies zu realisieren, wird ein HTC74M-Baustein [22] verwendet. Dabei handelt es sich um ein D-Flip-Flop, welches mit einer speziellen Verschaltung zu einem Toggle-Flip-Flop (T-Flip-Flop) umgewandelt werden kann (Abb. 3.5). Nun invertiert das Flip-Flop bei jedem Signalpuls seinen Ausgang (Abb. 3.6).

So lässt sich bei der Messung von Doppelereignissen (siehe Kap. 4.2.2) der Abstand der beiden Pulse direkt aus der Zeitspanne bestimmen, in welcher das Flip-Flop an seinem Ausgang einen Highpegel liefert. Dies kann über den Gate-Timer ausgelesen werden.

Tritt jedoch nur ein Einzelpuls auf, verharrt das Flip-Flop so lange auf dem High-Pegel, bis irgendwann ein neues Ereignis detektiert wird. Dies wird verhindert, indem das T-Flip-Flop nach einer gewissen Zeitspanne (hier $100\ \mu\text{s}$) manuell über einen extra Pin am Mikrocontroller zurückgesetzt wird (Abb. 3.7).

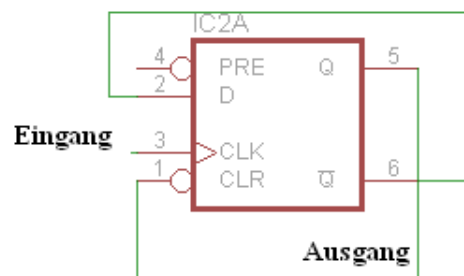


Abb. 3.5.: Durch das Verbinden von Dateneingang und negativen Ausgang wird ein D-Flip-Flop zu einem T-Flip-Flop. Die Signalpulse werden dann über den Takteingang verarbeitet.

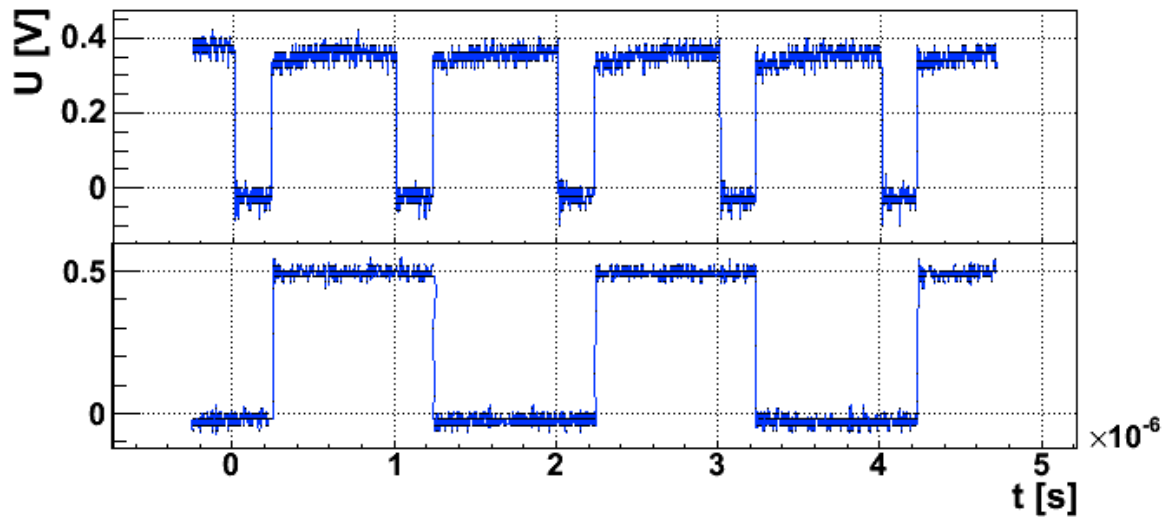


Abb. 3.6.: Das Flip-Flop wird über einen Funktionsgenerator getriggert (Plot oben, Tastkopfverhältnis $1/10$) und invertiert bei jeder steigenden Flanke seinen Ausgang (Plot unten, Tastkopfverhältnis $1/10$).

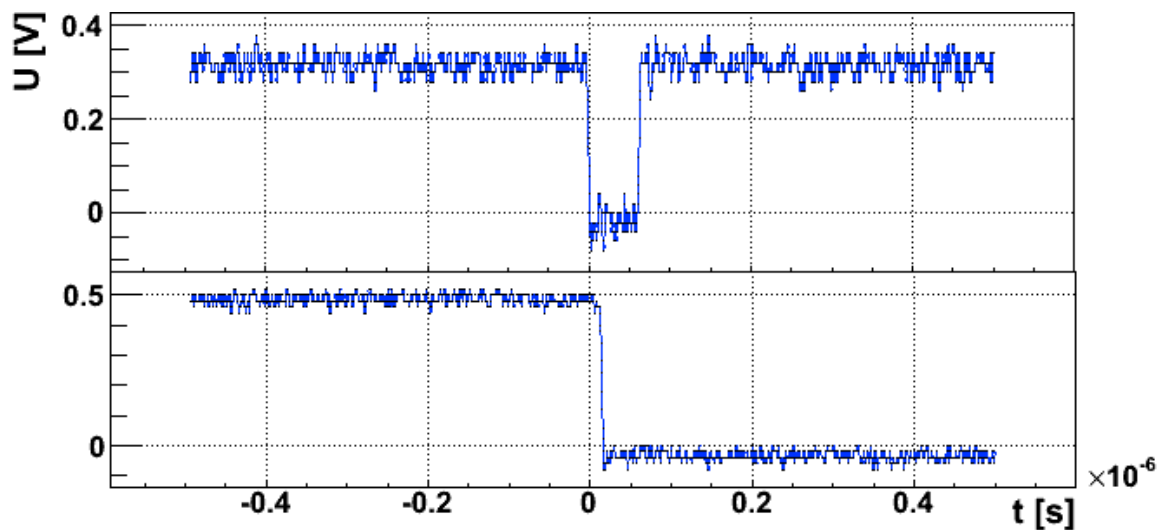


Abb. 3.7.: Sobald der PIC32 den Reset-Eingang des Flip-Flops auf logisch „0“ legt (Plot oben, Tastkopfverhältnis $1/10$), stellt dieses seinen Ausgang ebenfalls auf „0“ (Plot unten, Tastkopfverhältnis $1/10$).

Mikrocontroller

Das Zentrum der Auslese- und Verarbeitungselektronik ist die zentrale Steuereinheit – der Mikrocontroller. Für dieses Experiment sind für die Messung der Lebensdauer der Myonen eine gute Zeitauflösung und die Möglichkeit der Ansteuerung vieler Peripheriegeräte wichtig. Deshalb sollte der genutzte Chip mit einer möglichst hohen Taktfrequenz arbeiten und Raum in Form von genug Pins und Speicher zur Verfügung stellen. Die Wahl fiel hier auf einen PIC32MX460F512L [23] der mit seinen maximal 80 MHz, 100 Anschlusspins, 32 kB RAM und 512 kB Programmspeicher eine gute Basis für das Projekt bildet. Zudem ist er mit einem Einzelstückpreis von ca. 7 € recht erschwinglich.

- **Programmierung**

Der Mikrocontroller wird ohne eine lauffähige Firmware (Programm auf dem Chip) ausgeliefert. So muss der Chip erst extern programmiert werden. Realisiert wird dies über sogenannte Programmierer. Durchgesetzt haben sich dafür die ISP- und die JTAG-Schnittstelle [24]. Mit diesen Schnittstellen ist es sogar möglich, den Chip in einer Schaltung komplett zu integrieren und erst im Nachhinein zu programmieren.

Der PIC32 unterstützt dabei beide Programmierschnittstellen. Komfortabler ist die JTAG-Schnittstelle, da es mit dieser auch möglich ist, den Chip während seines gesamten Betriebs zu überwachen. Dabei kann sogar direkt auf die internen Register zurückgegriffen und jeder einzelne Pin über die Zeit beobachtet werden. Jedoch werden dafür neue Programmierer von der Firma Microchip benötigt, die nicht zur Verfügung standen. Deshalb wurde zur Programmierung die ISP-Schnittstelle verwendet.

Der Hersteller Microchip bietet für seine Produkte umfangreiche Bibliotheken und Programmbeispiele an. Darunter befindet sich auch ein USB-Bootloader. Da diese Chips die Möglichkeit bieten ihren eigenen Programmcode zu überschreiben, kann dies für eine Selbstprogrammierung genutzt werden. So wird lediglich ein Bootloader über einen Programmierer auf den Chip gespielt und das eigentliche Programm über USB vom Bootloader auf den Chip geschrieben. Dafür muss der Mikrocontroller in zwei verschiedenen Modi arbeiten, zum Einen im Programmiermodus und zum Anderen mit dem eigentlichen Programm. Gelöst wird dies in der Regel mit einem Pin am Chip, der von außen bei Start auf logisch „1“ oder logisch „0“ gelegt werden muss. Der Bootloader

entscheidet daraufhin in welchem Modus der Chip startet (Abb. 3.8).

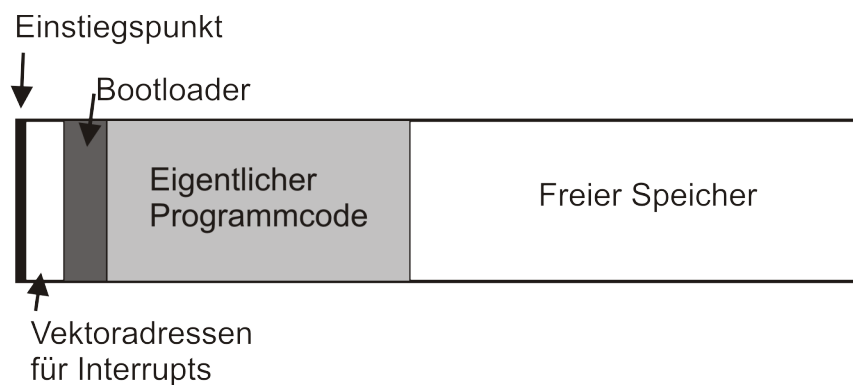


Abb. 3.8.: Aufteilung des Programmspeichers im Mikrocontroller. Vom Einstiegspunkt wird direkt zum Bootloader gesprungen. Dieser entscheidet je nach Pegel des Einstellungspin, ob er seinen Programmiermodus aktiviert oder an den Beginn des eigentlichen Programmspeichers springt.

- **Taktgenerierung**

Der PIC32 besitzt intern einen 8 MHz-Oszillator, welchen er für die Taktgenerierung verwenden kann. Jedoch ist dieser Oszillator nicht besonders präzise. Die Abweichungen von Chip zu Chip liegen im Prozentbereich, sodass jeder Mikrocontroller einzeln kalibriert werden müsste um ein einheitliches Verhalten zu garantieren. Da es sich bei den vorzunehmenden Messungen aber um Präzisionsmessungen handelt, scheidet diese Taktquelle aus. Stattdessen kann an den Chip auch ein externer Taktgenerator angeschlossen werden. Hier werden vorzugsweise Quarzoszillatoren genutzt, da diese auch bei sehr hohen Frequenzen einen sehr stabilen und präzisen Takt liefern können. Für dieses Experiment wurde ein 20 MHz Oszillator ausgewählt, da dieser preisgünstig und verbreitet sind.

An den Controller könnte auch ein Quarz mit höherem Takt angeschlossen werden, da der Chip mit einer Maximalfrequenz von 80 MHz betrieben werden kann. Quarze mit höheren Frequenzen sind aber oft Oberwellenquarze. So kann es vorkommen, dass diese am Mikrocontroller nur mit ihrer Grundwelle schwingen und dadurch auch der Arbeitstakt nur der Grundwelle entspricht. Weiterhin gibt es mit zunehmender Frequenz Probleme durch Einstreuungen von außen. Beispielsweise liegen Radiosender in Frequenzbereichen zwischen 80-110 MHz.

3. Experimentelle Vorgehensweise

Jedoch lässt sich auch aus einem niedrigeren Takt ein höherer generieren. Möglich ist dies über eine sogenannte *Phase-locked-loop*-Schaltung (PLL [25] (siehe Abb. 3.9)). Ein Phasendetektor vergleicht dafür die Phasen seiner beiden Eingänge und gibt als Ausgang eine Fehlerspannung aus. Wenn die beiden Eingänge in Phase sind wird diese Spannung minimal. Anhand der Fehlerspannung stellt der dahinter liegende Schleifenfilter eine Spannung für einen spannungsgesteuerten Oszillator ein. Die Frequenz aus diesem Oszillator wird über einen Vorteiler zurück zum Phasendetektor geführt. Dabei reguliert sich die Schaltung so lange, bis der Fehlerstrom verschwindet. Nach diesem „Einrasten“ findet sich am Ausgang eine Frequenz $f_{Out} = N \cdot f_{ref}$. Optimiert ist der f_{ref} -Eingang bei PIC-Prozessoren für Frequenzen von 4-5 MHz. Vor dem Eingang befindet sich im PIC32 deshalb noch ein Spannungsteiler, welcher für dieses Experiment auf einen Faktor 5 gestellt wird. So lässt sich mit $N = 20$ aus einer 20 MHz-Frequenz ein 80 MHz-Takt erzeugen ($f_{Out} = 20 \cdot \frac{20\text{MHz}}{5} = 80\text{ MHz}$).

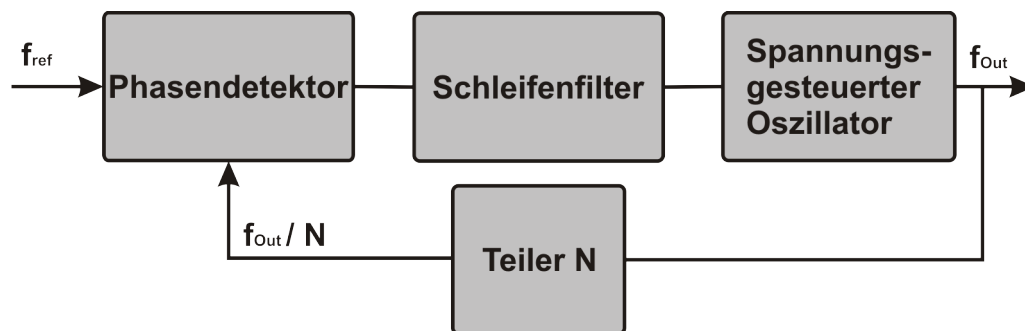


Abb. 3.9.: Eine PLL-Schaltung zur Generierung eines hochfrequenten Taktes.

- **Timer**

Im PIC32 befinden sich insgesamt 5 interne Timer. Davon sind 4 asynchron und einer synchron. Jeder Timer kann dabei durch externe Trigger an einem Pin am Mikrocontroller angesprochen werden. Alle Zähler besitzen eine Auflösung von 16 Bit, sind also in der Lage, Werte zwischen 0-65535 anzunehmen und können maximal mit der Taktfrequenz des Prozessors arbeiten.

Diese Höchstgeschwindigkeit wird in diesem Experiment voll ausgereizt. Durch den 80 MHz-Takt des Prozessors lässt sich damit eine Auflösung von 12.5 ns erreichen. Betrieben werden die Timer im Gate-Modus (Kap. 2.6.1).

Zu Beginn jeder Messung werden die Timerregister auf einen Wert von 0 ge-

setzt. Wird nun ein Myon detektiert, wird der Ausgang des T-Flip-Flops (Kap. 3.2.2) auf logisch „1“ gesetzt. Daraufhin beginnt der dort angeschlossene Timer mit dem Zählen und erhöht stetig sein Register. Geht der Pegel des Flip-Flops innerhalb von $100\ \mu\text{s}$ wieder auf logisch „0“ zurück, wird ein Interrupt (Kap. 2.6.2) ausgelöst. Nun befindet sich im Timerregister ein Wert proportional zum zeitlichen Abstand der beiden gemessenen Pulse, der weiter ausgewertet werden kann. Anderenfalls wird das Flip-Flop vom Mikrocontroller über einen Clear-Pin wieder in seinen Ausgangszustand zurückgesetzt und das nächste Ereignis abgewartet.

Die Präzision der Timer wurde dabei mit Hilfe eines Funktionsgenerators verifiziert (Abb. 3.10). Hierbei wird der Eingang des Timers für ein vorgegebenes Zeitintervall auf logisch „1“ eingestellt und das Messergebnis gegen das Intervall aufgetragen.

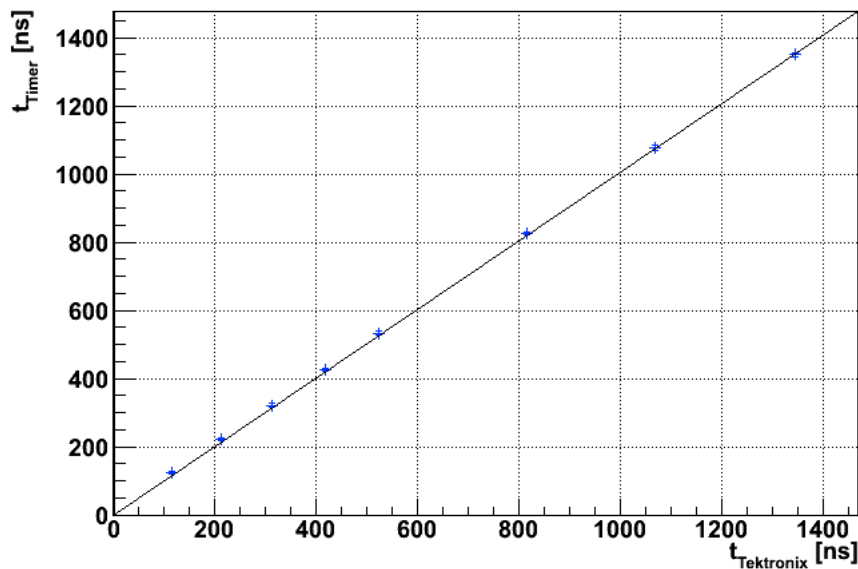


Abb. 3.10.: Dargestellt ist die Zeitmessung eines Timers des PIC32 gegenüber der des professionellen Oszilloskops TDS2014B von Tektronix [26]

- **AD-Wandler**

Um die Schwellspannungen am Komparator präzise und vor allem reproduzierbar einstellen zu können, ist es nötig, diese direkt abzugreifen und auszuwerten. Dies lässt sich an einem PIC32 über den intern verbauten Analog-Digital-

3. Experimentelle Vorgehensweise

Wandler realisieren. Dieser bietet ein 10 Bit breites Register zur Aufnahme der Daten an, was einer Auflösung von etwa 4 mV bei einer Referenzspannung von 3.3 V entspricht. Der AD-Wandler kann dabei verschiedene Pins als Eingänge verwenden. So lassen sich beide Schwellspannungen am Komparator gleichzeitig überwachen. Dabei zeigt der Wandler über seinen ganzen Arbeitsbereich ein sehr lineares Verhalten (Abb. 3.11).

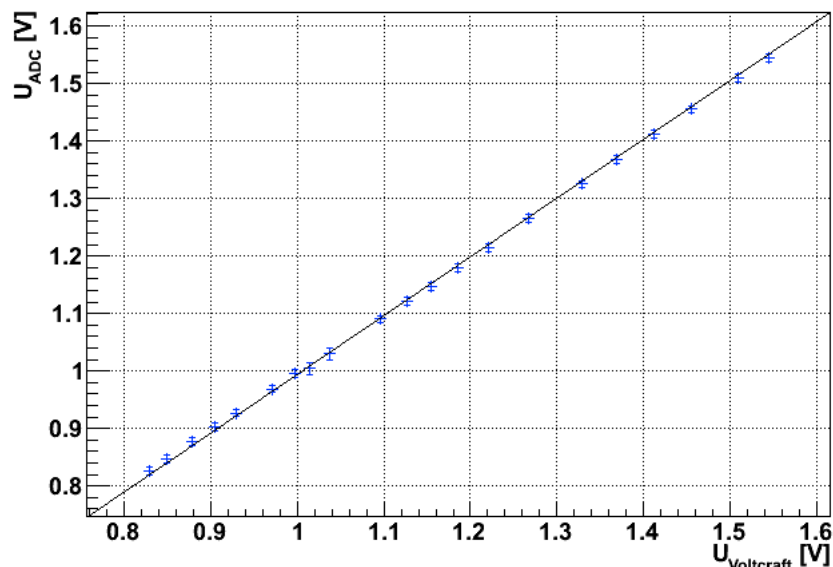


Abb. 3.11.: Verifizierung der Linearität des AD-Wandlers am PIC32. Aufgetragen gegen das Multimeter VC940 von Voltcraft [27]. Dabei ist zwar ein kleiner Knick in der Geraden zu erkennen, welcher aber noch im Fehlerbereich liegt.

USB-Schnittstelle

Das wichtigste Peripheriegerät des Mikrocontrollers ist die USB-Schnittstelle. Über diese wird die Firmware auf den Controller gespielt und Messdaten an den PC weitergegeben, bzw. von dort Steuersignale empfangen. Der PIC32 besitzt intern bereits einen vollständigen USB-2.0-Controller, welcher den Mikrocontroller als Host oder als Device (Endgerät) betreiben kann. In diesem Projekt soll er als Endgerät fungieren, da er an einen PC angeschlossen werden soll und diese immer die Hostfunktion übernehmen.

Die Verdrahtung des USB-Anschlusses besteht lediglich aus den in Kap. 2.6.3 beschriebenen 4 Kabeln, welche direkt an den Mikrocontroller angeschlossen werden

können.

Da USB-Geräte normalerweise immer Treiber für ihre Funktionstüchtigkeit benötigen und diese für jedes Betriebssystem oder sogar Betriebssystemversion neu geschrieben werden müssen, wird in diesem Versuch ein anderer Weg verfolgt. Der Mikrocontroller identifiziert sich am PC als sogenanntes *Human Interface Device* (HID [28]). Dieser Modus wird u. A. von Eingabegeräten wie Mäusen und Tastaturen verwendet. Dabei wird der Umstand ausgenutzt, dass für diese Geräte in den aktuellen Betriebssystemen immer schon ein Treiber vorhanden ist, auf den zurückgegriffen werden kann. Das hat den Vorteil, dass der PC selbst beim ersten Anschließen des Controllers diesen bereits erkennt und in der Lage ist mit ihm zu arbeiten. Lästige Treiberinstallationen entfallen dadurch. Der Betriebsmodus hat jedoch auch einen generellen Nachteil, weshalb er sich nicht für alle Anwendungen empfiehlt. Die Datenübertragung ist auf lediglich 64 kB/s beschränkt, was jedoch in diesem Experiment als Datenrate mehr als ausreichend ist. Ein Ereignis hat eine Größe von 16 Byte. Maximal können also $2000 \text{ Ereignisse/s}$ übertragen werden.

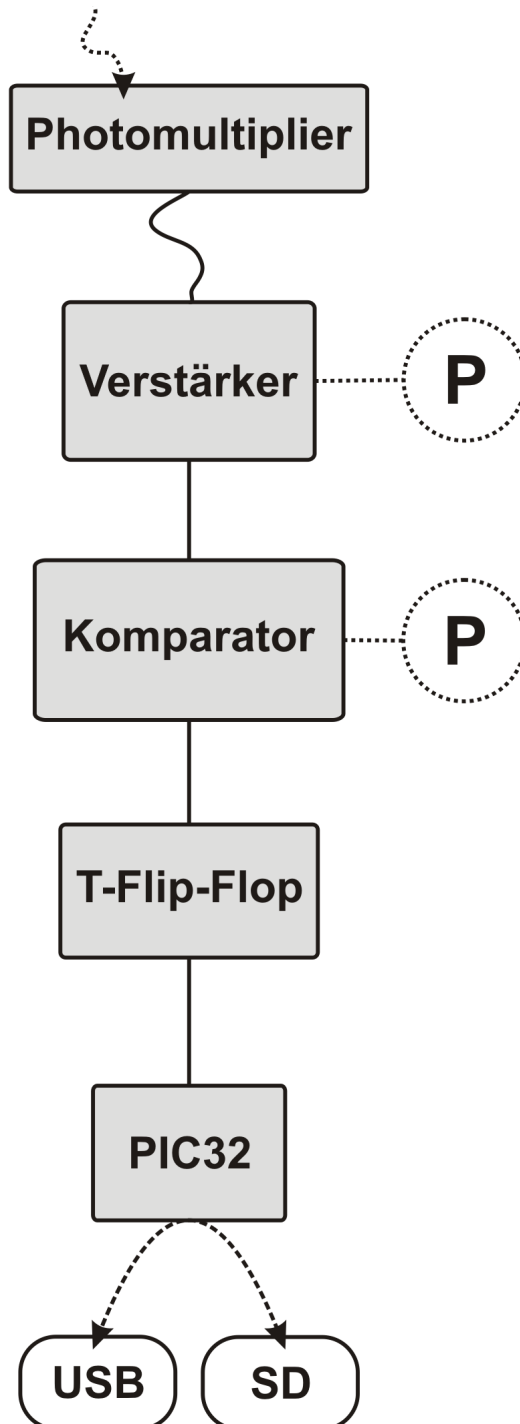
SD-Karte

Da die Versuchsanordnung auch ohne einen PC Daten aufzeichnen können soll, muss ein weiteres Medium zur Datenspeicherung zur Verfügung stehen. Dafür bieten sich SD-Karten an, welche heutzutage überall kostengünstig zu erwerben sind. Auf beispielsweise einer 2 GB Karte können ohne Unterbrechung Messungen von mehreren Monaten durchgeführt werden. Die SD-Karte kann mittels des SPI-Interfaces (siehe Kap. 2.6.5), welches der PIC32 hardwareseitig unterstützt, angesprochen werden. Dabei wird jedoch nicht direkt mit dem Flash-Speicher (siehe Kap. 2.6.4) der Karte interagiert, sondern über das SPI-Protokoll mit einem vor dem Speicher liegenden Mikrocontroller kommuniziert. Dieser verwaltet dann den eigentlichen Flash-Speicher. Somit werden nur sehr wenige Steuerbefehle benötigt, um mit solch einer Karte arbeiten zu können [29]. Angesteuert wird die Karte mit einer Taktgeschwindigkeit von 20 MHz, wodurch einige 100 kB Datenrate erreicht werden können. Dieser Wert hängt aber massiv vom Kartentyp ab.

Die Detektion einer SD-Karte wird hier interruptgesteuert realisiert, sodass auch während des Betriebes eine SD-Karte eingesteckt werden kann. Diese wird danach initialisiert und alle folgenden Messdaten werden in einer Datei gespeichert (siehe A.1). Um ein Überschreiben bereits vorhandener Daten zu verhindern, wird bei jeder neuen Messung eine neue Datei mit fortlaufendem Index erstellt.

3.2.3. Zusammenfassung

Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung des gesamten Signalweges gegeben. Der Aufbau ist hierbei bis zum Mikrocontroller zwei mal realisiert, sodass für Messungen zwei Kannen gleichzeitig angeschlossen werden können.



Der Photomultiplier detektiert die kosmischen Myonen über Cherenkov-Strahlung und wandelt diese in 10-20 mV-Pulse um.

Das Signal wird auf einen 300-600 mV-Puls verstärkt. Dafür lässt sich die Verstärkung über ein Potentiometer kalibrieren.

Der Komparator digitalisiert die Eingangspulse. Die Schwellspannung lässt sich über ein Potentiometer einstellen, um nur Pulse einer Mindestamplitude zu übertragen.

Die Pulse werden für die Gate-Funktion der Timer verarbeitet.

Die Myonenereignisse werden vom Mikrocontroller ausgewertet und aufgezeichnet.

Die Messdaten können über USB auf einem PC oder auf eine SD-Karte gespeichert werden.

Display

Zur besseren Übersicht und zur Kontrolle der Messungen befindet sich ein Display an der Frontplatte der Elektronik (Abb. 3.12). Seine 128x64 Pixel bieten ausreichend Raum zur Darstellung der Schwellspannungen am Komparator, den aktuellen Messmodus, Messdauer und vieler anderer Parameter. Angesprochen wird das Display über 4 Steuerleitungen sowie einem 8 Bit breiten Datenbus. Hinter dem Display befinden sich zwei Controller [30], welche die einzelnen Pixel direkt ansteuern. Diese Mikrocontroller werden vom PIC32 über die Daten- und Steuerleitungen angesprochen und erlauben eine segmentweise Ansteuerung (immer 8 Pixel) des Displays. Die Daten werden dabei mit einer Frequenz von etwa 500 kHz übermittelt. Weiterhin befinden sich neben dem Display drei Taster zur Navigation im Display-Menü.

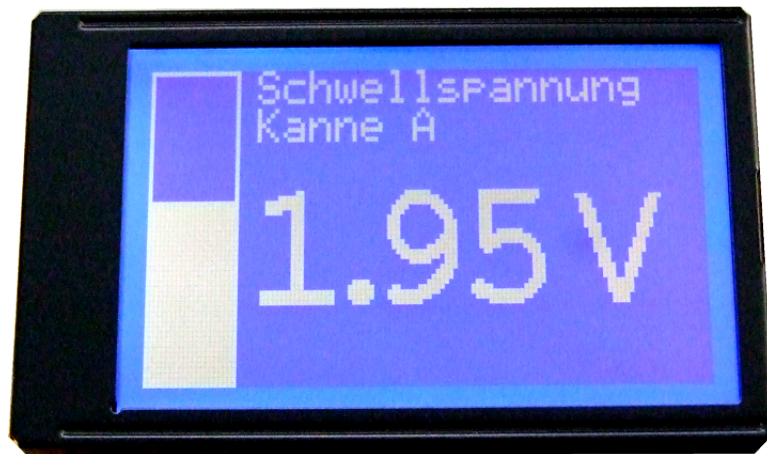


Abb. 3.12.: 128x64-Pixeldisplay

3.3. Firmware

Mikrocontroller sind universell einsetzbar und werden durch eine sogenannte Firmware gesteuert. Im Falle des PIC32 kann diese sogar in der Hochsprache C [31] entwickelt werden, was eine komfortablere Nutzung der Ressourcen des Controllers ermöglicht. Dies geht jedoch zu Lasten der Geschwindigkeit, da der Code compiliert und in die passende Assemblersprache [32] übersetzt werden muss. Da der PIC aber mit 80 MHz betrieben wird, reicht auch eine effektive Programmgeschwindigkeit von 10 MHz da lediglich Timerregister ausgelesen und die Daten zur Speicherung aufbereitet werden müssen. Wichtig ist jedoch, dass die Timer und Peripheriegeräte im

3. Experimentelle Vorgehensweise

vollen Prozessortakt laufen und damit eine hohe Auflösung der Messungen bzw. eine sichere Kommunikation mit dem PC garantiert wird.

3.3.1. Systemstart

Nach dem Einschalten der Betriebsspannung beginnt der Oszillator zu schwingen und der Prozessor startet am Einstiegspunkt seines Flash-Speichers mit der Programmabarbeitung. Dabei springt er zunächst in den Bootloader und führt diesen je nach Pegel des Programmierpins aus oder springt weiter in die eigentliche Firmware.

Falls die eigentliche Firmware startet, initialisiert diese sämtliche Timer (Tab. 3.1), das Display, die USB-Schnittstelle und den SPI-Port. Falls eine SD-Karte eingesteckt ist, wird diese auch initialisiert. Danach versucht sich der Controller über Interrupts an einem PC mittels der USB-Schnittstelle anzumelden. Dies wird auch während der gesamten Laufzeit des Programms fortgeführt, falls keine Verbindung hergestellt werden kann. So ist es auch möglich, während des Betriebs die Elektronik an einen PC anzuschließen und damit anzumelden. Nach wenigen Millisekunden ist der Chip auch ohne USB-Verbindung in der Lage Messungen vorzunehmen.

Tab. 3.1.: Die verschiedenen Aufgaben der Timer im PIC32. Beim Überlaufen eines Timers wird ein Interrupt ausgelöst und damit ein bestimmter Programmcode ausgeführt.

Timer	Aufgabe
1	keine Verwendung
2	Dient zur Messung von Doppelpulsen in Kanal A
3	Dient zur Messung von Doppelpulsen in Kanal B
4	Abfangen von Einzelereignissen und Koinzidenzmessungen mit einer Periode von 100 μ s
5	Übertragung von Daten an den PC via USB-Schnittstelle mit einer Periode von 1 ms.

3.3.2. Aufnahme der Messdaten

Je nach eingestelltem Modus werden verschiedene Daten auf der SD-Karte gespeichert oder an einen PC verschickt.

Ratenmessung

Da bei dieser Messung nur Einzelpulse detektiert werden sollen, gibt es keine Ausgabe des Abstandes zweier benachbarter Pulse, sondern lediglich einen Zeitstempel (in ms) des Auftretens eines Ereignisses mit Angabe des zugehörigen Kanals, also der zugehörigen Kanne.

Lebensdauermessung

Bei dieser Messung werden alle Einzelpulse ignoriert und nur Doppelereignisse (Abb. 3.13) im jeweiligen Kanal aufgezeichnet. Der erste Puls wird dabei vom einfallenden Myon durch Cherenkovlicht generiert. Beim Zerfall des Myons in der Kanne wird ein zweiter Puls vom entstandenen Elektron erzeugt. Erwartet werden Abstände im Bereich von Mikrosekunden. So wird bei jedem Doppelpuls ein Zeitstempel (in ms) und der Abstand der beiden Pulse, mit einer Auflösung von 12.5 ns gespeichert.

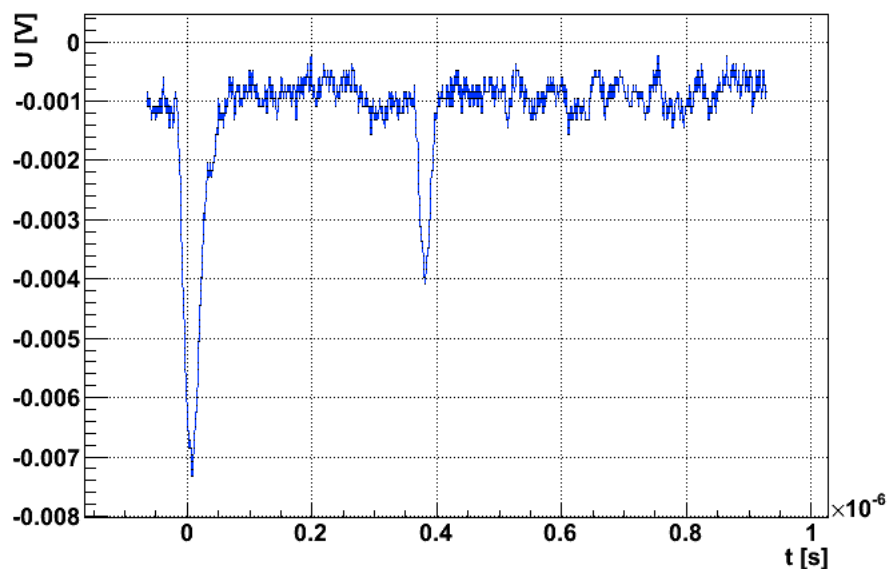


Abb. 3.13.: Ein Doppelpulssignal, gemessen am Ausgang des Photomultipliers

Koinzidenzmessung

Nur Pulse, die in beiden Kannen gleichzeitig auftreten, werden aufgezeichnet. Dabei werden Ereignisse als gleichzeitig betrachtet, wenn eine Zeitdifferenz von 500 ns nicht überschritten wird. Die Kannen können dabei in verschiedenen Ausrichtungen

3. Experimentelle Vorgehensweise

wie übereinander oder schräg zueinander aufgestellt werden. Somit lassen sich Rückschlüsse auf die Winkelverteilung der kosmischen Myonen gewinnen. Da die Myonen hauptsächlich von oben kommen, ist mit einer Abnahme der Rate zu rechnen, wenn der Aufstellungswinkel der Kannen zueinander erhöht wird.

In allen Messmodi werden die Schwellspannungen am Komparator mit in die Messdatei übertragen.

3.4. Signaleinstreuung

Die größte Problematik liegt in der Abschirmung des Analogteils der Schaltung. Dieser reagierte in Vorgängerversionen des Boards erheblich auf äußere induzierte elektromagnetische Felder (Abb. 3.14). Allein wenn im Raum, in welchem sich die Elektronik befindet, eine Neonröhre angeschaltet wurde oder ein Handy sich in ein Funknetz einwählte, wurden dutzende Signale registriert und mit in die Messung aufgenommen. Dies machte die Nutzung des Experimentes an stark frequentierten Örtlichkeiten nur eingeschränkt möglich, bzw. die Messdaten wurden erheblich durch diese äußeren Einflüsse verfälscht.

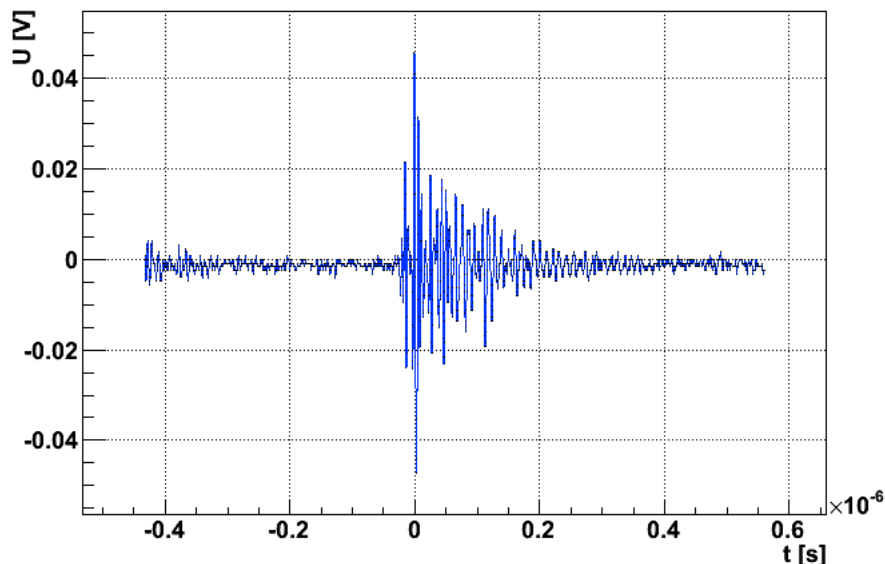


Abb. 3.14.: Signaleinstreuung induziert durch das Anschalten einer Leuchtstofflampe am Photomultiplier mit eingeschalteter Analogelektronik.

Als Lösungsansatz wird hier deshalb die Analogelektronik auf ein Minimum reduziert, da dort die Einstreuungen wesentliche negative Auswirkungen haben. Der Digitalteil hingegen ist recht unanfällig, was aus der Tatsache begründet ist, dass die Signale nicht weiter verstärkt werden. Zudem kann die Schirmung der gesamten Elektronik verbessert werden, da sich der Photomultiplier im Vorgängerversuch nur in einem Plastikgehäuse befindet. Weiterhin steht optional softwareseitig die Möglichkeit zur Verfügung, die Störeinflüsse vom Mikrocontroller heraus zu rechnen, da bei solch einer Störung meist viele „Myonen“ auf einer Zeitskala von etwa 1 ms detektiert werden. Diese Häufung der Ereignisse kann vom Mikrocontroller erkannt und als Einstreuung ignoriert werden.

Durch diese Maßnahmen ist die Elektronik selbst jetzt sehr unanfällig (siehe Abb. 5.2), jedoch der Photomultiplier nimmt die Einstreusignale wie eine Antenne direkt auf und gibt sie an die Elektronik weiter.

3.5. Stromversorgung

Auf der Platine wird von einer von außen zugeführten 12 V Gleichspannung ausgegangen. Diese wird durch drei sogenannte Spannungsregler [33] auf 8 V, 5 V und 3.3 V heruntergeregelt und jeweils durch 100 μF Elektrolytkondensatoren und 0.1 μF Keramik Kondensatoren (gegen Hochfrequenzstörungen) stabilisiert. Die 12 V Versorgung wird mit einem 1 mF Elektrolytkondensator stabilisiert, sodass auch bei kurzzeitig hohem Stromverbrauch beispielsweise durch das Einstecken einer SD-Karte keine Spannungseinbrüche zu befürchten sind. Weiterhin werden die Spannungsregler über Kühlkörper vor einer Überhitzung und einem daraus folgenden Spannungseinbruch geschützt (Abb. 3.15).

3. Experimentelle Vorgehensweise



Abb. 3.15.: Ein Spannungsregler mit angeschraubtem Kühlkörper. Dieser reduziert die Arbeitstemperatur des Reglers erheblich.

4. Ergebnisse

4.1. Platinenlayout

Der Entwurf für das fertige Layout setzt sich aus zwei Platinen zusammen (Abb. A.1 und A.2). Dabei befindet sich auf einer Platine die Steuerelektronik, der Analogteil der Schaltung, die Stromversorgung sowie der SD-Kartenslot und der USB-Anschluss. Diese Platine soll auf dem Boden des Gehäuses befestigt werden, sodass die Anschlüsselemente durch die Frontplatte hindurch ragen (Abb. A.3). Das Display sowie dessen Steuerknöpfe werden auf einer zweiten Leiterplatte verbaut. Diese wird direkt an die Frontplatte geklebt und mittels 26-Poligen Pfostenstecker an der unteren angeschlossen.

Im Analogteil wurde speziell darauf geachtet, dass die Signalwege von einem Bauteil zum nächsten möglichst kurz gehalten werden, um so der Rauschanfälligkeit entgegen zu wirken.

Die Potentiometer zum Einstellen einer Schwellspannung werden direkt an der Frontplatte über den Signaleingängen verschraubt und durch kurze abgeschirmte Drähte auf die Platine zurückgeführt.

Der erste Prototyp der Anordnung wurde gefräst (Abb. A.4) und bestückt.

4.2. Messungen

Im Folgenden werden die verschiedenen Experimente, welche mit der Kamiokanne möglich sind, mit einer jeweiligen Beispielmessung kurz erläutert.

4.2.1. Rate

Die Häufigkeit des Auftretens der kosmischen Myonen lässt sich durch eine Ratenmessung sehr gut veranschaulichen. Hierbei werden lediglich einzelne Myonenpulse gemessen und diese in Zeitintervalle eingetragen. Hierfür wird zunächst eine Mes-

4. Ergebnisse

sung des Untergrundes ohne Wasser in der Kanne vorgenommen. Dieser Untergrund besteht hauptsächlich aus thermischen Elektronen, welche im Photomultiplier Ereignisse auslösen können. Die Schwellspannung soll so eingestellt werden, dass in etwa 2-3 Ereignisse innerhalb von 10 Sekunden detektiert werden. Diese Schwelle hat sich in den Vorgängerexperimenten als guter Richtwert erwiesen. Nun wird die Messung (Abb. 4.1) gestartet.

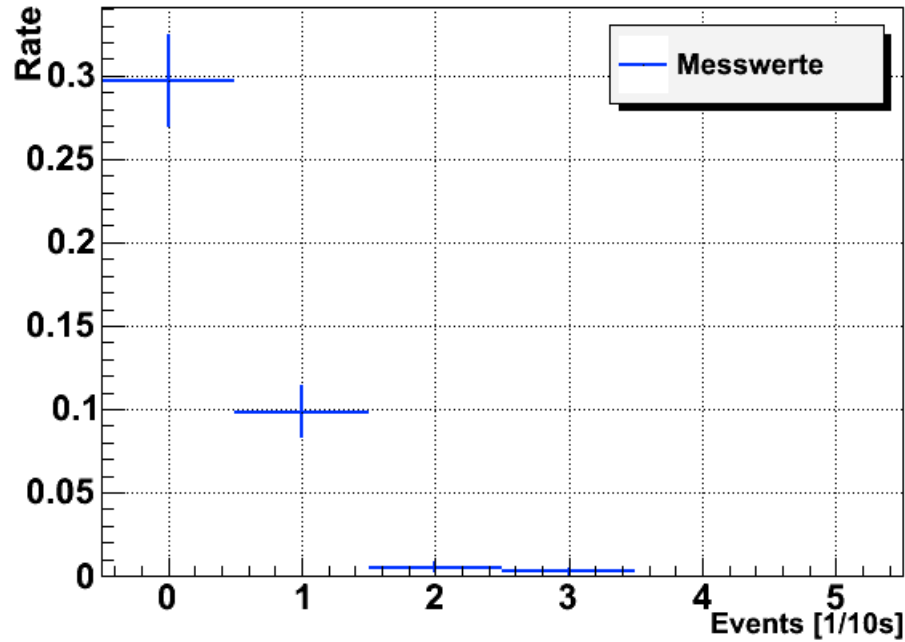


Abb. 4.1.: 60 min Messung ohne Wasser in der Kanne.
Mittelwert: $\bar{R}_u = (0.055 \pm 0.013) 1/s$

Nach dieser Untergrundmessung wird nun Wasser in die Kanne gefüllt und eine zweite Messung bei sonst gleichen Einstellungen der Schwellspannung gestartet. Die Verteilung sollte einer Poissonverteilung (Gl. 4.2.1) genügen, da diese das Auftreten statistisch unabhängiger Ereignisse repräsentiert. Die Rate hat sich dabei gegenüber der leeren Kanne deutlich erhöht (Abb. 4.2).

$$P(x) = \frac{m^x}{x!} e^{-m} \quad (4.2.1)$$

Gl 4.2.1: Wahrscheinlichkeit P , x Myonen in Zeitintervall zu detektieren, m Mittelwert.

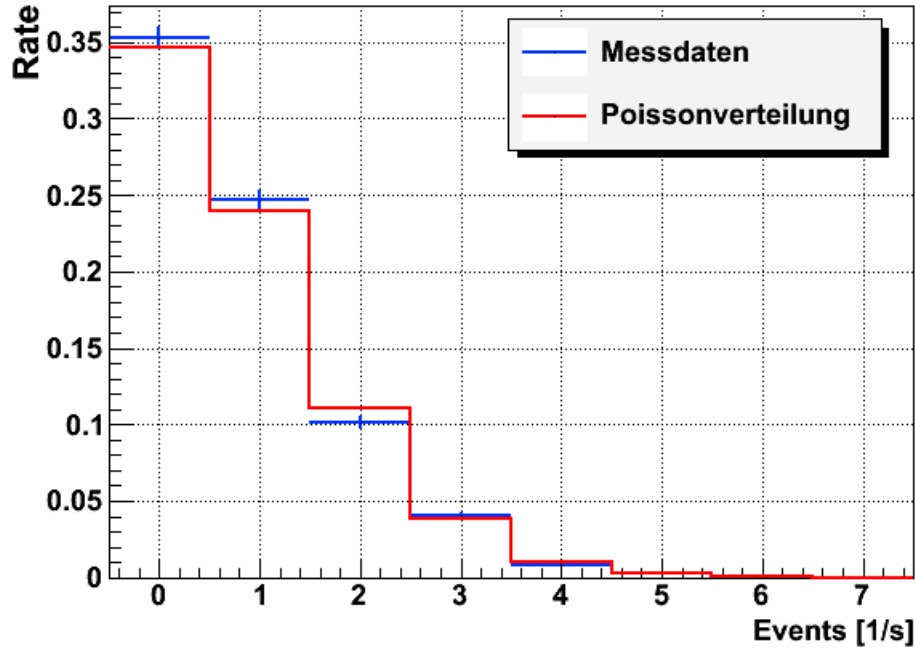


Abb. 4.2.: Ratenmessung mit einer Messzeit von ca. 100 min.

$$\text{Mittelwert: } \bar{R}_{\mu+u} = (1.375 \pm 0.012) \text{ 1/s}$$

Um auf die eigentliche Myonenrate zu schließen, müssen nun beide gemessenen Mittelwerte von einander abgezogen werden. Für dieses Experiment ergibt sich hier ein Ergebnis von:

$$\bar{R}_{\mu} = \bar{R}_{\mu+u} - \bar{R}_u = (1.320 \pm 0.017) \text{ 1/s} \quad (4.2.2)$$

Hierbei bezieht sich das ermittelte Ergebnis auf die Trefferfläche einer Kanne. Die Einfallsrichtung der Myonen ist dabei irrelevant.

4.2.2. Lebensdauer

Die kosmischen Myonen sind selbst nicht stabil und zerfallen über die schwache Wechselwirkung mit einer mittleren Lebensdauer $\tau = 2.197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ [8]. Dies lässt sich mit dem Photomultiplier registrieren, da die aus dem Zerfall entstehenden Elektronen bzw. Positronen selbst hochenergetisch sind und im Wasser ebenfalls Cherenkov-Licht aussenden können. Somit werden im Falle eines Zerfalls innerhalb der Kanne zwei Pulse beobachtet. Der erste kommt vom Myon, welches in der Kanne gestoppt wird, und der zweite vom entstehenden Elektron bzw. Positron (Abb. 3.13). Die Anzahl der gemessenen Ereignisse für eine bestimmte Zeitdifferenz Δt gehorcht dem

4. Ergebnisse

Zerfallsgesetz:

$$N(\Delta t) = N_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (4.2.3)$$

Auch hier ist die Schwellspannung passend einzustellen. Dabei muss die Schwelle näher an das Rauschen, also den Nullpegel, herangefahren werden, da die Pulse der Elektronen und Positronen deutlich geringer ausfallen (das Myon zerfällt in Ruhe (siehe Abb. 3.13)) als die Primären der Myonen. Weiterhin tritt dieses Ereignis des Zerfalls deutlich seltener auf als einzelne Pulse. Zudem ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass beide Pulse über der eingestellten Schwelle liegen deutlich geringer.

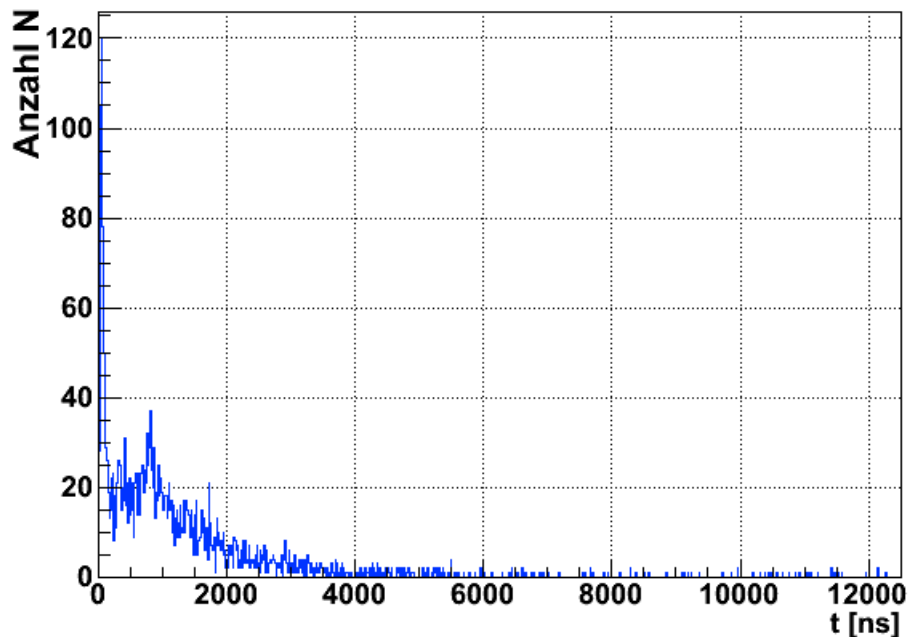


Abb. 4.3.: Lebensdauerermessung von ca. 12h, aufgetragen in den Bins ist die Anzahl der detektierten Ereignisse in Zeitintervallen mit einer Größe von 12.5 ns.

Zu erkennen ist zunächst ein Peak bei $\Delta t = 25$ ns (Einstreuung der Elektronik) und eine abfallende Exponentialfunktion beginnend bei ca. $\Delta t = 1300$ ns. Nach der Aufnahme der Messung sollten noch passende Schnitte gemacht werden um danach das Zerfallsgesetz an die Daten zu fitten (Abb. 4.4).

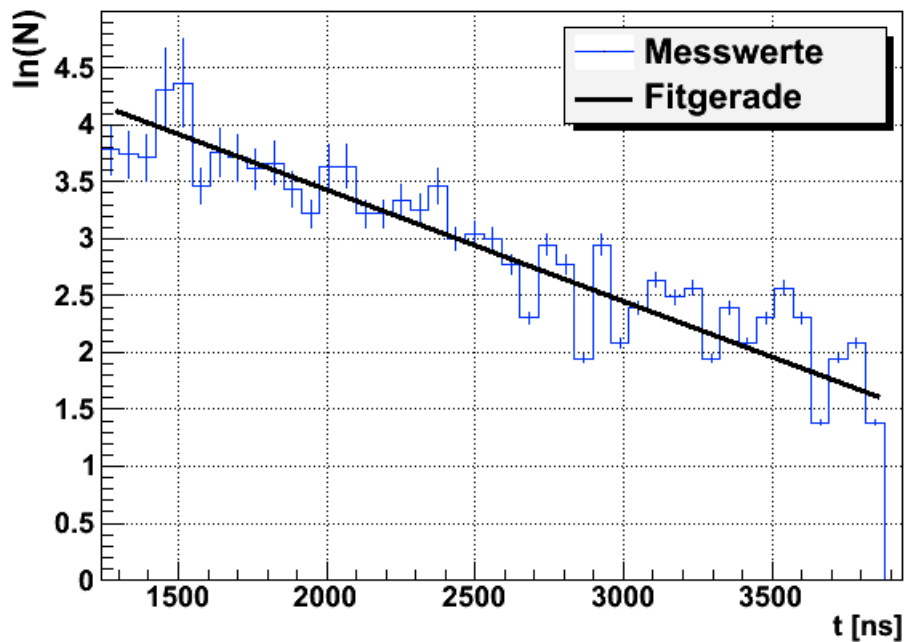


Abb. 4.4.: Geschnitten wurde hier bei 1300 ns und 4000 ns, da sich die vorderen Datenpunkte nur aus einem Streuen der Elektronik erklären lassen. Die Fitgerade hat als Parameter $f(\Delta t) = a - b\Delta t$ mit $a = 5.3 \pm 0.3$ und $b = (0.00114 \pm 0.00011) 1/\text{ns}$

Für die Lebensdauer ergibt sich nach diesen Daten ein Wert von $\tau_\mu = \frac{1}{b} = (0.877 \pm 0.096) \mu\text{s}$. Dieses Resultat wird in Kapitel 5.2.2 genauer Diskutiert.

4.2.3. Winkelverteilung

Mit der Hilfe von zwei Kannen lässt sich die Winkelverteilung der kosmischen Myonen genauer bestimmen. Dafür müssen die beiden Kannen beispielsweise übereinander gestellt werden. Berücksichtigt werden nur Ereignisse, die in beiden Kannen gleichzeitig auftreten. So werden beispielsweise hier nur Myonen detektiert, welche direkt vertikal einfallen und durch beide Kannen hindurch fliegen. Weiterhin wird die Schwellspannung in beiden Kanälen passend eingestellt. So lassen sich verschiedene Raten für verschiedene Winkelkonstellationen der Kannen ausmessen. Diese Ergebnisse geben daraufhin Rückschlüsse auf die Herkunftsrichtung der Myonen.

4. Ergebnisse

Messergebnisse können hierfür in dieser Arbeit nicht dargestellt werden, da auf Grund des knapp bemessenen Zeitplans keine Winkelverteilungsmessungen durchgeführt werden konnten.

5. Diskussion

5.1. Elektronik

Im Folgenden werden alle Ergebnisse bezüglich der Ausleseelektronik erörtert.

5.1.1. Präzision und Genauigkeit

Um die Präzision der gesamten Ausleseelektronik zu ermitteln, wird anstatt eines Photomultipliers ein Funktionsgenerator an einen Kanaleingang angeschlossen. Nun werden Doppelpulse in verschiedenen Abständen auf den Eingang gegeben und ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tab. 5.1.: Doppelpulse generiert aus einem Funktionsgenerator gemessen von der Ausleseelektronik.

$\Delta t_{Doppelpulse}$ [ns]	$\Delta t_{gemessen}$ [ns]	$\Delta t_{Doppelpulse}$ [ns]	$\Delta t_{gemessen}$ [ns]
500	494 ± 6	660	656 ± 6
528	519 ± 6	712	706 ± 6
552	544 ± 6	776	769 ± 6
588	582 ± 6	1110	1103 ± 6
628	619 ± 6	2000	1987 ± 6

Dabei ergibt sich eine systematische Abweichung von ca. 6 ns sowie ein kleiner Drift der Messwerte nach unten. Jedoch befindet sich dieser noch im Fehlerbereich. So zeigt sich ein sehr genaues und präzises Verhalten der gesamten Elektronik. Kleinere Zeiten als 500 ns konnten nicht gemessen werden, da kein Funktionsgenerator mit einer höheren Frequenz und Pulszähler zur Verfügung stand.

5.1.2. Rauschen und Einstreuung

Das Untergrundrauschen konnte durch das neue Board deutlich reduziert werden und spielt bei einfachen Raten- und Winkelverteilungsmessungen nur eine untergeordnete Rolle. Problematischer gestaltet sich dahingehend jedoch die Abschirmung des gesamten Versuchs. Auch wenn der Analogteil auf ein Minimum reduziert wurde, sind äußere Einstreuungen immer noch als störender Einfluss messbar. Grund dafür ist jedoch nicht die Ausleseelektronik, sondern die Beschaffenheit des verwendeten Photomultipliers. Dieser wirkt wie eine große Antenne, nimmt hochfrequente Signale einfach auf und leitet diese an die Elektronik weiter.

Um diese Störung wenigstens teilweise zu kompensieren, muss dafür auf eine digitale Filterung der Signale zurückgegriffen werden. Als effektive Möglichkeit bietet es sich hier an, bei mehr als zwei Doppelpulsen pro Millisekunde die Messung für die nächsten 10 ms auszusetzen und danach weiter zu messen. Zwar gehen dabei Ereignisse verloren, jedoch können während einer Störung sowieso keine Messwerte aufgenommen werden.

Die Elektronik selbst ist gegenüber äußeren Einstreuungen jedoch längst nicht so anfällig, wie die Vorgängerversionen dieses Boards. Getestet wird dies mit einem Netzteil eines Lötkolbens, welches beim Ein- und Ausschalten hochfrequente Störsignale aussendet. Die neue und die alte Elektronik werden hierfür nebeneinander gestellt, eingeschaltet und das Signal hinter dem letzten analogen Verstärker abgegriffen. Jedoch bleibt die Hochspannung in beiden Fällen abgeschaltet. Die neue Elektronik reagiert auf die äußeren Einflüsse im Gegensatz zur Vorgängerversion deutlich weniger (siehe Abb. 5.1 und 5.2). Begründen lässt sich dies durch die Minimierung des Analogteils der gesamten Schaltung.

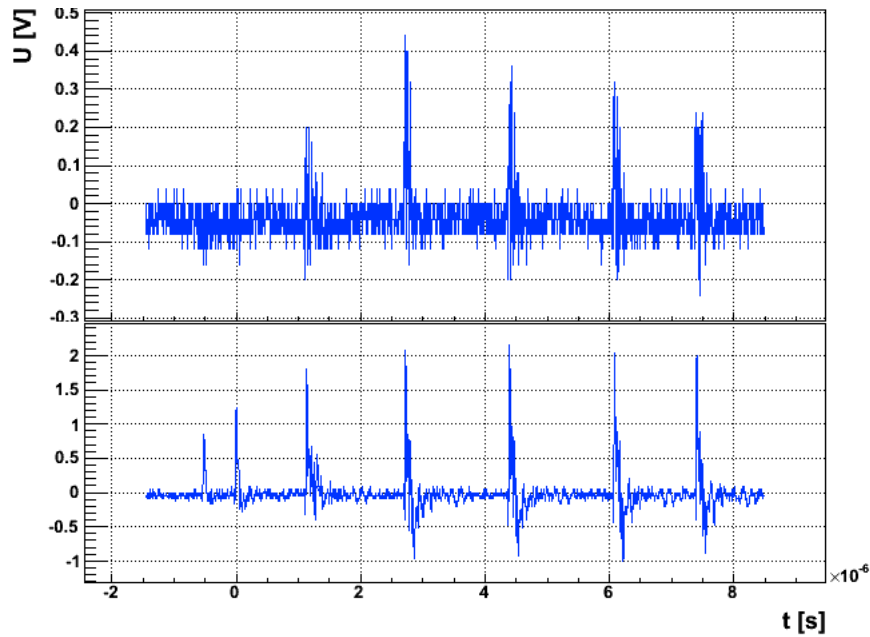


Abb. 5.1.: Die neue Elektronik (oben) reagiert etwa um den Faktor 5 weniger, als die Vorgängerversion (unten). Die Streuquelle befindet sich ca. 1 m vom Versuchsaufbau entfernt.

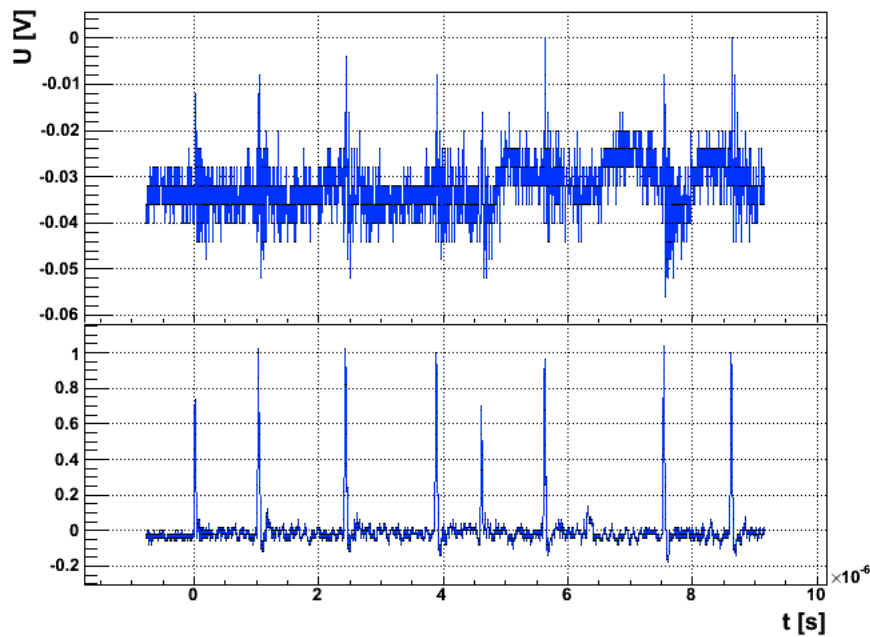


Abb. 5.2.: Die Einstreuung hat fast keinen Einfluss auf die neue Elektronik (oben) im Gegensatz zur Vorgängerversion (unten). Die Streuquelle befindet sich in einem Abstand ca. 3 m entfernt vom Versuchsaufbau.

5.2. Bewertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Messungen mit der neuen Elektronik ausgewertet.

5.2.1. Ratenmessung

Die Ergebnisse aus der Ratenmessung stimmen mit den theoretisch vorausgesagten Resultaten einer Poissonverteilung, sowie den Aufzeichnungen vorangegangener Elektroniken, gut überein.

Die Messung wird dabei vom Untergrundrauschen aus Photomultiplier und Elektronik nicht wesentlich beeinflusst. Lediglich äußere Einstreuungen können das Ergebnis verfälschen.

Während bei der Vorgängerplatine auf eine Rate ohne Wasser von ca. 2 Ereignissen pro 10 Sekunden geeicht wurde, konnte dies hier nicht getan werden, da die Schwelle ansonsten bis auf das Nullsignal heruntergefahren werden müsste, was einer Messung des Nullrauschens gleich käme. Begründen lässt sich dies durch das stark unterdrückte Untergrundrauschen, was in der neuen Elektronik das Messergebnis nicht mehr so stark beeinflusst.

5.2.2. Lebensdauermessung

Bei der Lebensdauer ergibt sich ein anderes Bild als bei der Ratenmessung. Hier weicht das Messergebnis von denen, welche mit Vorgängerboards gemacht wurden deutlich ab. Zum einen ist die gemessene Ereignisdichte deutlich erhöht gegenüber vorherigen Messungen. Weiterhin sieht auch das gesamte Bild der Messung völlig anders aus, als es zuvor der Fall war (Abb. 5.3). Hier war lediglich ein Einziger exponentieller Abfall im Bereich von 1300 ns-4000 ns zu erkennen. Im Bereich kleiner als 1300 ns gibt es zwar auch eine Struktur, welche aber nicht eindeutig identifiziert werden kann. Weiterhin gibt es einen Peak bei $\Delta t \approx 25$ ns, der innerhalb des Primärpulses des Myons liegt, und wahrscheinlich aus der Form dieses Pulses resultiert. In Vorgängerexperimenten gab es zudem eine zweite sehr steil abfallende Exponentialfunktion bei etwa 350 ns, welche hier jetzt nicht beobachtet werden konnte. Weiterhin liegt der ermittelte Wert von $\tau_\mu = 0.877 \mu\text{s}$ nur bei 40 % des Literaturwertes, was ebenfalls noch einer Klärung bedarf. Interessanterweise wurde ein Fehler in dieser Größenordnung schon während des Bachelor-F-Praktikums in Göttingen (Versuch E4) mit einer Vorgängerelektronik bei vielen Durchführungen ermittelt.

Insgesamt muss dieses Resultat noch durch weitere Messreihen untersucht werden um wirkliche Schlüsse ziehen und diese Abweichung vom Literaturwert verstehen zu können.

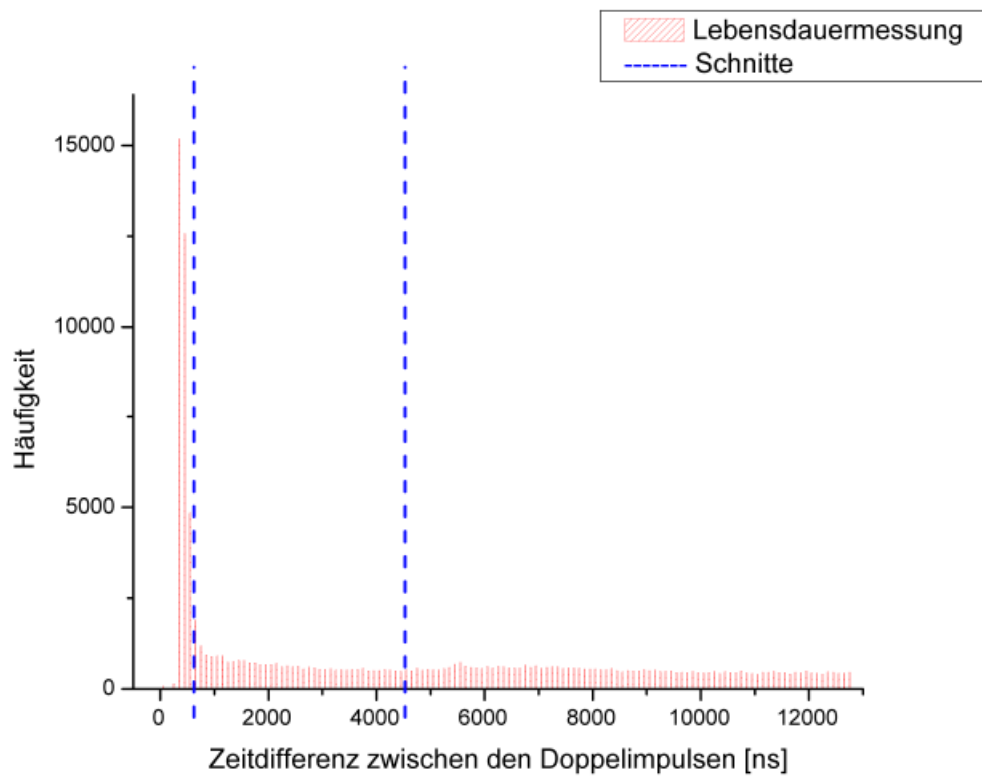


Abb. 5.3.: Plot aus einer typischen Messung des F-Praktikumsversuch E4.[34]

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollte eine neue Ausleseelektronik für den F-Praktikums-Versuch E4 an der Universität Göttingen entworfen und realisiert werden. Weiterhin soll damit ein neues Produkt für die Firma PHYWE, welche selbst viele Experimente für Schulen und Universitäten entwickelt und vertreibt, erstellt werden.

In dieser Arbeit konnte eine funktionstüchtige Platine entwickelt werden, welche viele neue Vorteile und Erweiterungen gegenüber den Vorgängerversionen bringt. Zum einen wurde der Analogteil, sowie auch der Digitalteil zur Messung der kosmischen Myonen auf ein Minimum beschränkt. Dadurch vergünstigt sich die Produktion der Platine, und die Einstreuanfälligkeit wird deutlich reduziert (siehe Abb. 5.2). Zudem kann nun ein Photomultiplier direkt über eine BNC-Buchsen an die Ausleseelektronik angeschlossen werden, was eine individuellere Nutzung mit verschiedenen Photomultipliern erlaubt und ebenfalls Einstreuungen und Untergrundrauschen vermindert.

Weiterhin konnte die Auflösung der Aufzeichnung um den Faktor 8 auf 12.5 ns reduziert werden. Für die Speicherung der Daten wird ein moderner USB-Anschluss und ein SD-Karten-Interface zur Verfügung gestellt. So ist nun auch ein Betrieb des Versuchsaufbaus ohne nebenstehenden PC möglich. Weiterhin wird für den USB-Anschluss keine zusätzliche Treibersoftware benötigt, da sich die Elektronik als HID am Computer anmeldet, was von allen handelsüblichen Betriebssystemen standardmäßig unterstützt wird. Weiterhin kann die Elektronik direkt über ein Display und Bedienknöpfe eingestellt und Messungen gestartet werden. Dies ermöglicht eine komfortable Versuchsdurchführung ohne nebenstehenden PC und anschließende Auswertung der Daten von der SD-Karte.

Auch das Rausch- zu Signalverhalten konnte deutlich verbessert werden, so dass nun auch Ereignisse, welche vorher noch im Untergrund untergegangen sind, detektiert werden können. Dies impliziert zudem eine deutlich verkürzte Messzeit für Lebensdauermessungen und ergibt ein störungsfreieres Messergebnis.

6. Zusammenfassung

Für den erfolgreichen Betrieb dieses Experimentes fehlt lediglich eine passende PC-Software für die komfortable Nutzung der USB-Schnittstelle an der Platine. Die Daten auf der SD-Karte können jedoch so ohne weitere Probleme verarbeitet werden, da sie in einem leicht verständlichen Format abgespeichert werden (siehe Tab. A.1).

Die bis jetzt durchgeführten Ratenmessungen liefern ähnliche Ergebnisse, wie die Vorgängerelektroniken. Jedoch die Lebensdauerermessung zeigte ein anderes Resultat. Zwar ist das Endergebnis mit $\tau_\mu = 0.877 \mu\text{s}$ vergleichbar mit den vorherigen, aber das gesamte Messbild sieht völlig anders aus.

A. Anhang

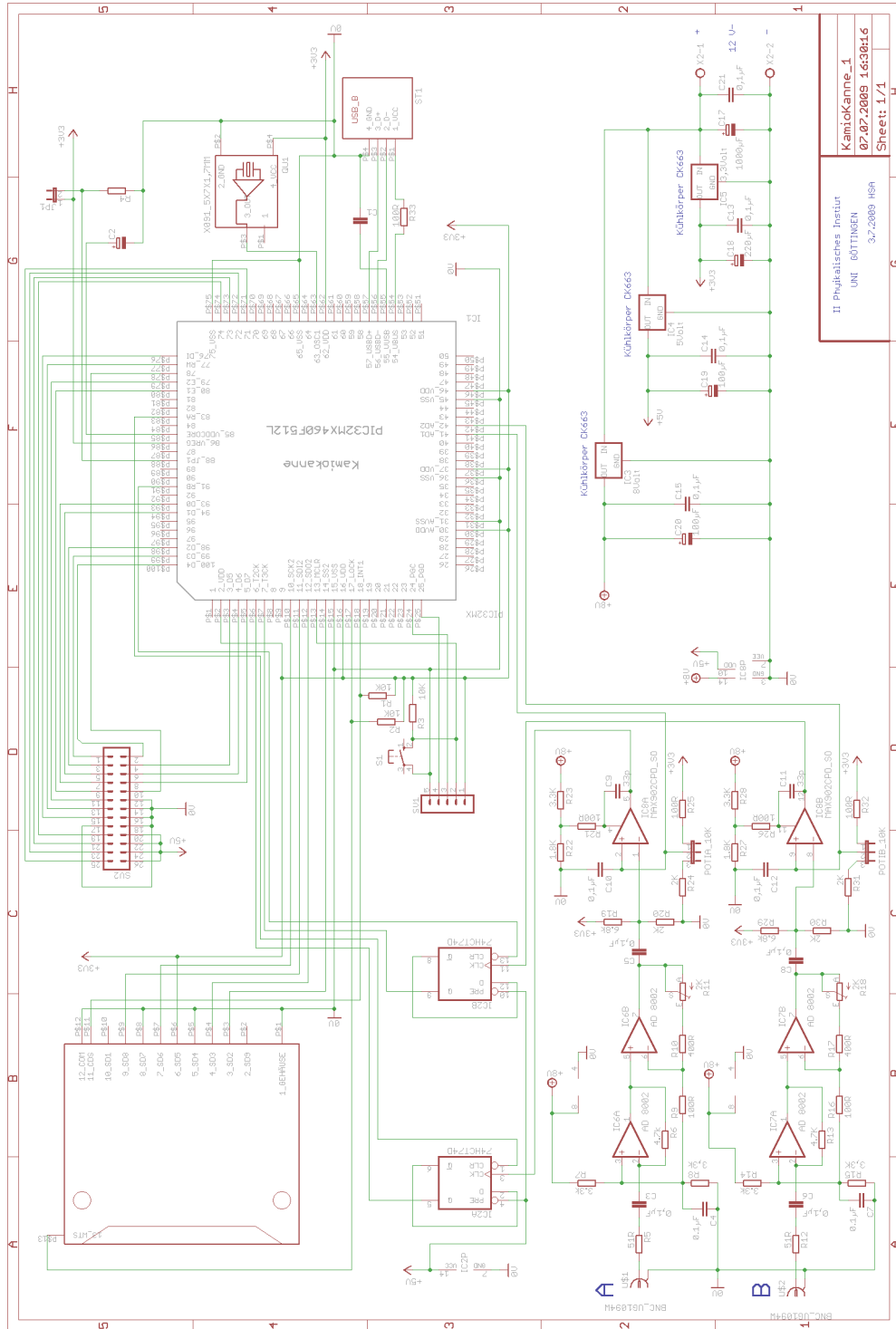


Abb. A.1.: Der Schaltplan der Hauptplatine.

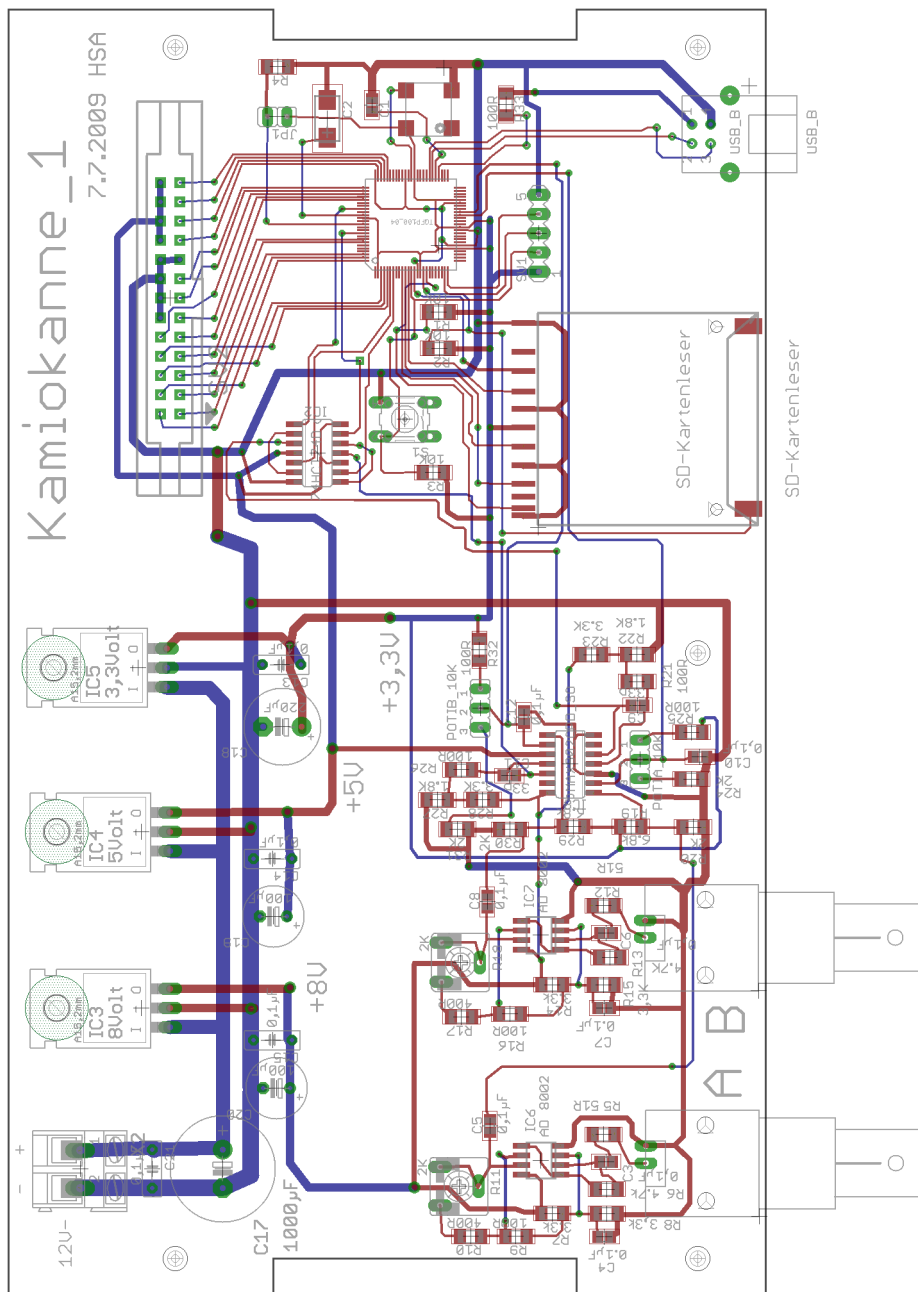


Abb. A.3.: Das Layout der Hauptplatine mit allen Peripheriegeräten.

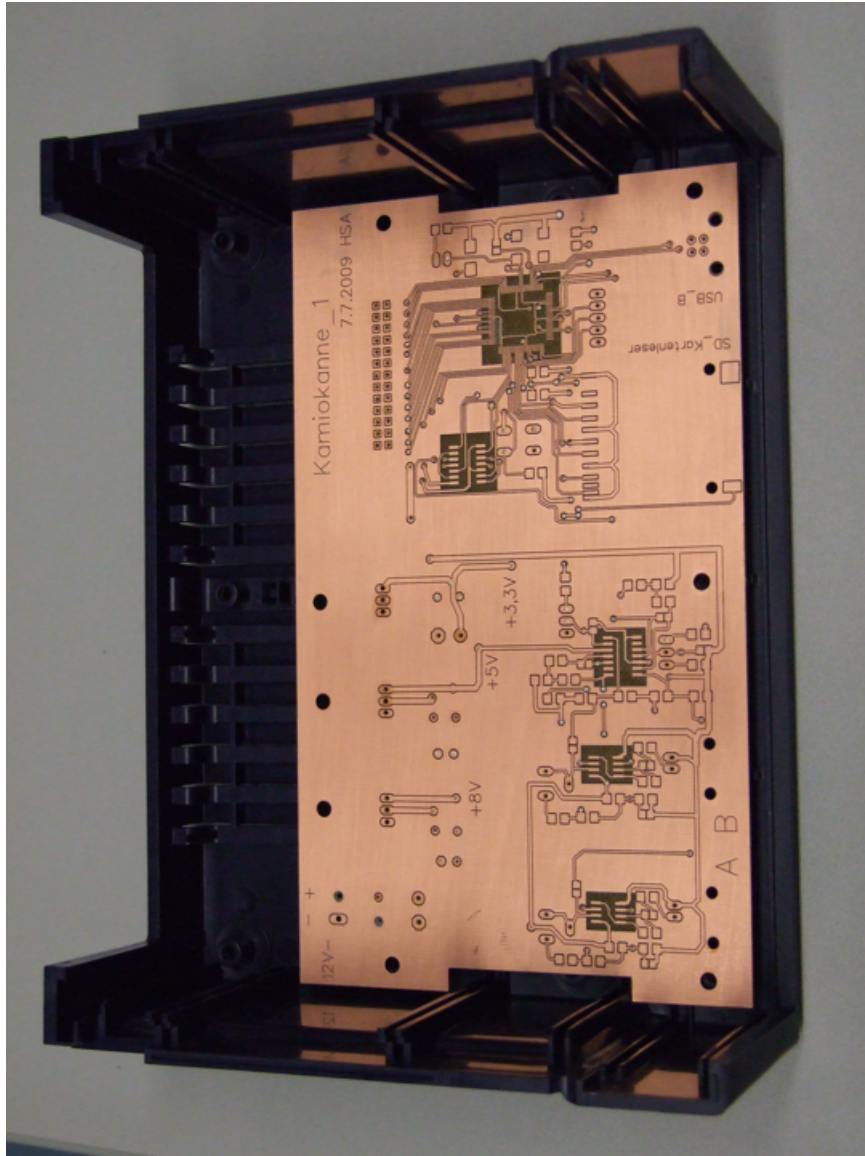


Abb. A.4.: unbestückter gefräster Prototyp der Hauptplatine in einem Gehäuse der Firma PHYWE.

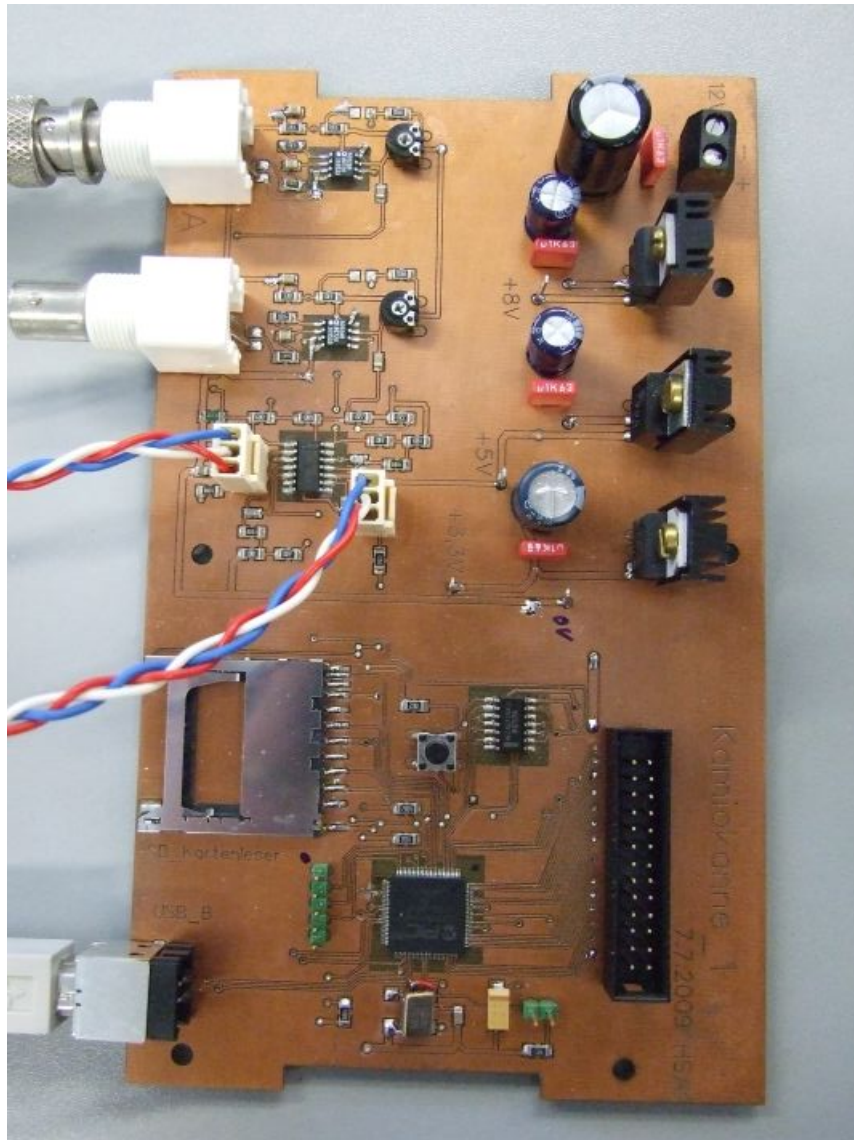


Abb. A.5.: Bestückter gefräster Prototyp der Hauptplatine.

Tab. A.1.: Begin einer Messdatei auf einer SD-Karte.

//Kanne	delta_t	_stamp	Va	Vb
b	0	1468	1.29	0.00
b	0	6681	1.29	0.00
b	0	8986	1.29	0.00
b	0	13455	1.29	0.00
b	0	23894	1.29	0.00
b	0	32568	1.29	0.00
b	0	34371	1.29	0.00
b	0	37266	1.29	0.00
b	0	40065	1.29	0.00
b	0	40118	1.29	0.00
b	0	40357	1.29	0.00
b	0	42674	1.29	0.00
b	0	44393	1.29	0.00
b	0	45388	1.29	0.00
b	0	55987	1.29	0.00
b	0	61782	1.29	0.00
b	0	81956	1.29	0.00
b	0	82366	1.29	0.00
b	0	84853	1.29	0.00
b	0	89331	1.29	0.00
b	0	91620	1.29	0.00
b	0	96639	1.29	0.00
.
.
.

Literaturverzeichnis

- [1] Y. Ashie et al. Measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by super-kamiokande i. *Phys. Rev. D*, 71(11):112005, Jun 2005.
- [2] S. M. Bilenky, A. Bottino, C. Giunti, and C. W. Kim. Neutrino oscillations with three-generation mixings and mass hierarchy, May 22 1998.
- [3] S. Weinberg. The decay of the proton. *Scientific American*, 244(6):52–63, June 1981.
- [4] T. Althaus. Physik-Nobelpreis 2002 ging an drei Astronomen [Raymond Davis, Masatoshi Koshiba, Riccardo Giacconi]. *Sterne und Weltraum*, 41(11):110000–+, December 2002.
- [5] M. Fuidl. Kosmische Myonen in Schulversuchen. *Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Physik*, 115(1), 2003.
- [6] W.-M. Yao et al. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G*, 33:1+, 2006.
- [7] Ch. Berger. Elementarteilchenphysik. *Verlag Springer Berlin Heidelberg New York*, 496, 2006.
- [8] C. Amsler et al. Particle physics booklet. *Phys. Lett. B667*, 294, 2008.
- [9] A. Einstein. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. (German) [On the electrodynamics of moving bodies]. *Annalen der Physik (1900) (series 4)*, 17:891–921, 1905.
- [10] P. A. Čerenkov. Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light. *Phys. Rev.*, 52(4):378–379, Aug 1937.
- [11] O. C. Allkofer. Teilchendetektoren. *Verlag Karl Thiemig KG, München*, 1971.

- [12] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. (German) [On the production and conversion of light from a heuristic viewpoint]. *Annalen der Physik (1900) (series 4)*, 17:132–148, 1905.
- [13] USB 2.0 Technical Working Groups. *Universal Serial Bus Revision 2.0 specification*, April 2009. <http://www.usb.org/>.
- [14] J. Saylor. New usb technology featured at world's largest technology show. 2009. <http://www.usb.org/press/>.
- [15] D. Kahng and S. Sze. A floating gate and its application to memory devices. *Bell Syst. Tech. J.*, 1967.
- [16] J. C. Fisher and I. Giaever. Tunneling through thin insulating layers. *Journal of Applied Physics*, 32(2):172–177, 1961.
- [17] S. Scharf. Object oriented analysis and design of a serial peripheral interface monitor. Master's thesis, Florida Atlantic University, 1998.
- [18] O. M. Salati. ELECTRICAL CONNECTOR. 1951. Patent number: 2540012.
- [19] Analog Devices. Dual 600 MHz, 50 mW Current Feedback Amplifier. 2001. www.analog.com.
- [20] R. L. McConnell and K. Meehan. Digital Electronics. *West Virginia University*, 2003.
- [21] MAXIM. High-Speed, Low-Power Voltage Comparators. 2005. 19-2887.
- [22] SGS-THOMSON Microelectronics. DUAL D TYPE FLIP FLOP WITH PRE-SET AND CLEAR. 1994.
- [23] Microchip. PIC32MX Family Reference Manual. *Microchip Technology Inc.*, 1138, 2008. <http://www.microchip.com/>.
- [24] IEEE Computer Society. IEEE standard test access port and boundary-scan architecture. 132, 2001.
- [25] J. P. Carr and B. M. Frank. A 27 ghz phase-lock loop phase detector. In *CCECE*, pages 1506–1509, 2006.

- [26] Tektronix. Digital Storage Oscilloscopes. <http://www.tek.com/>, 2006.
- [27] Voltcraft. Digitalmultimeter. <http://www.voltcraft.de/>, 2005.
- [28] Firmware Specification. Device class definition for human interface devices (hid). 2001. <http://www.usb.org/>.
- [29] SD Group and SD Card Association. Physical Layer Simplified Specification Version 2.00. 2006.
- [30] SAMSUNG electronics. 64CH SEGMENT DRIVER FOR DOT MATRIX LCD. *KS0108B*, 1997. <http://www.lcd-module.de/>.
- [31] D. Ritchie. The development of the C language. In *HOPL Preprints*, pages 201–208, 1993.
- [32] G. Schmitt. PIC-Microcontroller: Programmierung in Assembler und C - Schaltungen und Anwendungsbeispiele für die Familien PIC18, PIC16, PIC12, PIC10. *Oldenbourg*, 426, 2008. ISBN-13: 978-3486585971.
- [33] National Semiconductor Coroperation. LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. <http://www.national.com/>, 2004.
- [34] M. Schulte-Borchers and S. Dreyer. Kosmische Strahlung und Myonlebensdauer. *F-Praktikum Physik Göttingen Versuchsnummer E4*, 2008.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein erster Dank gilt Prof. Dr. Arnulf Quadt für die Bereitstellung dieser Bachelorarbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei der gesamten Elektronikwerkstatt des II. Physikalischen Instituts für die fachliche und tatkräftige Hilfe bei der Realisierung der Elektronik bedanken. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Herwig Schulz für die vielen investierten Stunden bei der Umsetzung des Schaltplans und des Designs des Layouts der Platinen.

Zudem möchte ich meinem Betreuer Fabian Kohn danken, der zwar fast permanent 650 km entfernt am LHC arbeitete, jedoch über Videokonferenzen mir bei Fragen und Problemen immer zur Seite stand.

Für das für die Arbeit zur Verfügung gestellte Labor bedanke ich mich bei Dr. Jörn Große-Knetter und für eine Korrekturlesung bei Dr. Kevin Kröniger.

Ich bedanke mich bei meinen Eltern für ein bis zu dieser Stelle weitestgehend sorgenfreies Studium.

Erklärung nach §13(8) der Prüfungsordnung für den Bachelor-Studiengang Physik und den Master-Studiengang Physik an der Universität Göttingen:

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Darüberhinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, im Rahmen einer nichtbestanden Prüfung an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Göttingen, den 11. Januar 2010

(Tristan Koppe)