

JOHANNES GUTENBERG–UNIVERSITÄT MAINZ

# Kosmische Myonen: Schulversuche zur Höhenstrahlung

Prüfungsarbeit im Rahmen des ersten Staatsexamens

vorgelegt dem Fachbereich Physik  
im Oktober 2000  
von

Martin Klein  
In der Meielache 42  
55122 Mainz

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Didaktische Aspekte der Hochenergiephysik</b>	<b>6</b>
2.1	Anforderungen des Lehrplans Physik an Gymnasien in Rheinland-Pfalz	6
2.2	Versuchsthema: Myonen in der Höhenstrahlung	7
2.3	Versuchsbeschreibungen	7
2.4	Didaktische Aspekte der Versuche	8
<b>3</b>	<b>Details zur kosmischen Strahlung</b>	<b>10</b>
3.1	Die Entdeckung der kosmischen Strahlung	10
3.2	Bestandteile der kosmischen Strahlung	11
3.3	Eigenschaften kosmischer Strahlung	12
3.3.1	Die primäre kosmische Strahlung	13
3.3.2	Die sekundäre kosmische Strahlung	13
3.4	Das Myon	14
3.4.1	Zur Entstehung der Myonen	15
3.4.2	Der Zerfall der Myonen	16
3.4.3	Energieverlust von Myonen beim Durchgang durch Materie	18
3.4.4	Eigenschaften der Myonen aus der Höhenstrahlung	20
3.4.5	Ein wenig Relativistik	21
3.4.6	Historisches vom Myon	22
<b>4</b>	<b>Der Versuchsaufbau</b>	<b>23</b>
4.1	Der Cherenkov-Effekt	24
4.2	Der Photomultiplier	27
4.3	Die elektronische Schaltung	29
4.4	Datenerfassung mit dem Computer	30
<b>5</b>	<b>Versuche zur kosmischen Strahlung</b>	<b>31</b>
5.1	Vorbereitungen für die Versuche	31
5.1.1	Die Einstellung der Messelektronik	31
5.1.2	Messung beendet - was nun?	33
5.1.3	Exkurs: Effizienzbestimmung der Kanne	34
5.2	Schulversuche	35
5.2.1	Ratenmessung	36
5.2.2	Winkelverteilung	40

---

5.2.3	Durchdringungsvermögen der Myonen . . . . .	41
5.2.4	Lebensdauerermessung . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Schlußbemerkung</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Die elektronische Schaltung</b>	<b>47</b>
A.1	Beschreibung der elektronischen Schaltung . . . . .	47
A.2	Der praktische Aufbau der Schaltung . . . . .	52
A.3	Schwierigkeiten beim Aufbau . . . . .	59
<b>B</b>	<b>Die Anbindung der Elektronik an den Computer</b>	<b>60</b>
<b>C</b>	<b>Das Mess- und Steuerprogramm</b>	<b>63</b>
<b>D</b>	<b>Das Programmlisting</b>	<b>68</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Naturwissenschaften des 20. Jahrhunderts wurden von der Teilchenphysik und der Relativitätstheorie geprägt. Die Hochenergiephysik spielt hierbei eine tragende Rolle in der Forschung. Trotz ihrer wissenschaftlichen Bedeutung werden diese Themengebiete im heutigen Schulunterricht kaum berücksichtigt. Ein Hauptgrund liegt darin, dass die experimentelle Teilchenphysik an den Teilchenbeschleunigern angesiedelt ist und Experimente in der Schule deshalb nicht vorstellbar sind. Geschichtlich gesehen hat die Hochenergiephysik jedoch mit dem Studium der kosmischen Strahlung und erst dann mit der Entwicklung der Teilchenbeschleuniger begonnen. Verglichen mit der Ausrüstung der Pioniere der Hochenergiephysik ist die Ausstattung mit technischen Experimentiergeräten an der Johannes-Gutenberg-Universität derart, dass Versuche in diesem Bereich realisiert werden können. Um dieses spannende Themengebiet anschaulich für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe aufzubereiten, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Aufbau einer Versuchsanordnung zur Untersuchung der kosmischen Höhenstrahlung im Rahmen der Möglichkeiten der Hochschule entwickelt. Im Anschluss wurde dieser Versuchsaufbau auf die eingeschränkten Möglichkeiten und Rahmenbedingungen des Schulunterrichts übertragen. Die Entwicklung dieser Versuchsanordnung zeichnet sich durch folgende Charakteristika aus:

- ◊ Die für den Versuch benötigten Teile bestehen aus Thermoskanne, Photosensor, Impulsumwandler und Computer. Während Thermoskanne und Computer als gegeben vorausgesetzt werden können, kann ein Photosensor käuflich erworben und der Impulswandler vom Bastelerproben und engagierten Physikpädagogen nachgebaut werden.
- ◊ Der Versuchsaufbau ist der erste bekannte Schulversuch, der quantitative Experimente im Bereich der Hochenergiephysik ermöglicht.
- ◊ Hier wird der sinnvolle Einsatz des Computers im Physikunterricht verdeutlicht.
- ◊ Im Rahmen des Versuches können sehr große Datenmengen erhoben werden abhängig vom Speicherplatz des eingesetzten Computers.

- ◊ Der Versuch kann über einen längeren Zeitraum erfolgen als es die durchschnittliche Unterrichtsstunde vorsieht und erlaubt deshalb eine optimale theoretische und praktische Konzeption, Umsetzung und Analyse zur Behandlung des Unterrichtsstoffes.
- ◊ Mit der Auswertung und Analyse dieser Daten erfahren die Schüler Elemente der heute häufig anzutreffenden Arbeitssituation in den Naturwissenschaften[14]. Wissenschaftliche Untersuchungen produzieren aufgrund neuer Methoden große Datenmengen, die erst mittels Computereinsatz bewältigt werden können. Hier bieten sich im Unterricht Möglichkeiten, computerunterstützte Analyseverfahren kennen zu lernen.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel und einen ausführlichen Anhang. Dieser Einleitung folgt ein Kapitel über die didaktischen Möglichkeiten des Versuchsaufbaus und die Einbindung der Versuchsthemen in den Lehrplan für die gymnasiale Oberstufe in Rheinland-Pfalz. Das darauf folgende Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Details der kosmischen Höhenstrahlung. Dabei wird vor allem auf die Eigenschaften eines Elementarteilchen eingegangen, das sogenannte Myon. Diese Myonen sind die Teilchen, die in unseren Versuchen registriert werden. Man kann sie sich als sehr schwere Elektronen vorstellen. Ein Einblick in die Entdeckungsgeschichte der kosmischen Strahlung und insbesondere des Myons runden dieses Kapitel ab. In Kap. 4 werden der Versuchsaufbau und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten erklärt. Der Beschreibung des Versuchsaufbaus folgt ein Überblick über die von mir durchgeführten Versuche, die weitgehend auch in der Schule durchführbar sind. Diese Ansammlung erhebt keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit, die erläuterten Versuche sollen vielmehr auch Anregungen zu weiteren Untersuchungen geben. Im Anhang dieser Arbeit findet sich eine genaue Beschreibung der entwickelten Schaltung. Neben Schaltplänen und ausführlichen Erläuterungen finden sich hier auch die Platinenlayouts und Bestückungspläne der Schaltung. Dem geübten Bastler soll damit die Gelegenheit zum Nachbau der Schaltung gegeben werden. Desweiteren findet sich im Anhang das Computerprogramm in den wesentlichen Teilen erläutert wieder. Das komplette Listing rundet diesen Teil der Beschreibung ab.

## Kapitel 2

# Didaktische Aspekte der Hochenergiephysik

### 2.1 Anforderungen des Lehrplans Physik an Gymnasien in Rheinland-Pfalz

Der Lehrplan für das Fach Physik an Gymnasien in Rheinland-Pfalz, der ab dem Schuljahr 1999/2000 Gültigkeit hat, ist nach einem Baukastenprinzip aufgebaut. Für die im Unterricht zu berücksichtigenden Themengebiete gibt es Vorgaben über Inhalt, Lernziele und den zeitlichen Rahmen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Versuche lassen sich den Gebieten Elementarteilchenphysik oder Relativität zuordnen. Für beide Themengebiete sind die Vorgaben des Lehrplans, die unter Abb. 2.1 und Abb. 2.2 dargestellt sind, im Grund- und Leistungsfach identisch.

Elementarteilchenphysik	10
<ul style="list-style-type: none"><li>– Fundamentarteilchen; fundamentale Wechselwirkungen und Austauschteilchen</li><li>– Standardmodell als Ordnungsschema</li><li>– experimentelle Befunde, offene Fragen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einen Einblick in die Ergebnisse der modernen Grundlagenforschung geben</li><li>• Zur Veranschaulichung elementarer Wechselwirkungen bieten sich Feynman-Diagramme an. Informationen und elementarisierte Darstellungen in geeigneten Medien nutzen.</li></ul>

Abbildung 2.1: *Elementarteilchenphysik im Lehrplan nach [13]*

Der Versuchsaufbau zur kosmischen Höhenstrahlung gibt dem Lehrer Gelegenheit, das Gebiet der Elementarteilchenphysik auch von der experimentellen Seite her anzugehen. Mit dem Zerfall der Myonen kann die Verwendung von Feynman-Diagrammen motiviert und eingeführt werden.

Im Themengebiet der Relativität besteht mit dem Versuchsaufbau die Möglichkeit relativistische Teilchen zu untersuchen (vgl. Kap. 3.4.5).

Relativität	10
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prinzipien der Relativität</li> <li>– Konsequenzen</li> <li>– experimentelle Belege</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkenntnisse aus der Relativitätstheorie als Fundament naturwissenschaftlicher Bildung darstellen.</li> <li>• Den Grad der formalen Darstellungen zugunsten eines Gesamtüberblicks beschränken. Die wissenschaftstheoretische und kulturhistorische Bedeutung von Physik als theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft verdeutlichen.</li> </ul>

Abbildung 2.2: *Relativität im Lehrplan nach [13]*

## 2.2 Versuchsthema: Myonen in der Höhenstrahlung

Folgende fachlichen Lernziele sollen mit den Versuchen erreicht werden:

- ◇ Es soll gezeigt werden, dass kosmische Höhenstrahlung allgegenwärtig existiert und nachgewiesen werden kann.
- ◇ Kosmische Höhenstrahlung setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen. Mit dem Versuchsaufbau können geladene Teilchen nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung der kosmischen Höhenstrahlung werden hier Myonen betrachtet, denn diese machen den Hauptanteil der geladenen Teilchen in der kosmischen Höhenstrahlung auf der Erdoberfläche aus. Elektronen, die auch vorhanden sind und registriert werden, entstehen aus dem Myonzerfall und werden im Versuch als Myon interpretiert. Die Möglichkeiten des Versuchsaufbaus, der an die gegebenen Rahmenbedingungen der Schule angepasst wurde, erlauben es dabei nicht, eine Differenzierung von Myon und Elektron vorzunehmen.
- ◇ Es sollen bestimmte Eigenschaften von Teilen der kosmischen Höhenstrahlung wie die Häufigkeit des Auftretens, das Durchdringungsvermögen, die Winkelabhängigkeit der Rate und der Zerfall untersucht werden.
- ◇ Es soll der Umgang mit statistischen Methoden gelernt werden. Lernziel ist es, die Zufälligkeit der Ereignisse kennen zu lernen und es dem Schüler zu ermöglichen, Aussagen über zufällige Ereignisse zu treffen. Hierbei sollen einfache statistische Berechnungen am Computer durchgeführt und mit dem theoretischen Modell verglichen werden.

## 2.3 Versuchsbeschreibungen

Es werden einige Versuchsanordnungen vorgestellt, die im Physikunterricht sowohl einzeln als auch alle bzw. in Kombination durchgeführt werden können.

Der hier präsentierte Versuchsaufbau besteht aus einer mit Wasser gefüllten, innen verspiegelten Thermoskanne, einem kommerziell erhältlichen Photosensor basierend auf dem Prinzip der Sekundärelektronenvervielfachung, welcher schwache

Lichtpulse in ein Spannungssignal wandelt und einem Signalwandler, der die schwachen Spannungspulse in Signale formt, die ein Computer verarbeiten kann. Die Thermoskanne ist der eigentliche Detektor. Ist sie mit Wasser gefüllt, so erzeugen schnell durchfliegende Myonen einen schwachen, kurzen Lichtimpuls. Durch die Verspiegelung der Thermoskanne wird sichergestellt, dass eine möglichst große Lichtmenge den Photosensor erreicht. Mit diesem Versuchsaufbau lassen sich eine Reihe von Experimenten zur Untersuchung der Höhenstrahlung durchführen. Die Versuche reichen vom Nachweis der Myonen bis zur Messung von deren Lebensdauer.

Will man nun einem Schüler Schritt für Schritt die Existenz der allgegenwärtigen Höhenstrahlung plausibel machen, so gibt der folgende Absatz einige Anregungen in Form einer Versuchsreihe wieder, wie man dies mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsaufbau bewerkstelligen kann.

In einem ersten Versuch soll die Existenz von etwas klargemacht werden, das im Wasser der Thermoskanne eine Reaktion hervorruft. Dazu kann eine vergleichende Messung dienen. Man misst die Impulsrate einmal mit und einmal ohne Wasser in der Kanne. Ist sie mit Wasser gefüllt, so registriert man Impulse, sonst nicht. Mit diesem Vergleich kann der Schüler erkennen, dass etwas im Wasser passiert oder dass sich im Wasser etwas befindet, das die Pulse auslöst. Erklärt man nun den Cherenkov-Effekt, so wird klar, dass eine Strahlung, die keine  $\gamma$ -Strahlung ist, für die Impulse verantwortlich ist. Um zu zeigen, dass es sich bei dem Phänomen nicht um eine Eigenschaft des Wassers an sich handelt, kann man das Wasser mit Geiger-Müller-Zählern untersuchen. Dabei stellt man fest, dass man eine von radioaktiven Quellen unabhängige Strahlung beobachtet hat. Verwendet man nun zwei Kannen in Koinzidenz und stellt sie einmal übereinander und einmal nebeneinander, so lässt sich aus den unterschiedlichen Raten schließen, dass die Strahlung im wesentlichen von oben kommt. Messungen der Rate auf dem Dachboden und im Keller lassen auf das hohe Durchdringungsvermögen schließen. Eine genaue Ratenmessung der Kanne lässt eine Extrapolation auf den menschlichen Körper zu. So kann man ungefähr ausrechnen, von wievielen Myonen man pro Zeiteinheit durchdrungen wird.

Investiert man noch ein wenig Zeit in die Theorie, kann man mit dem Versuchsaufbau sogar eine Lebensdauerermessung der Myonen durchführen.

Die Daten der Versuche werden vom Messcomputer in einem Textfile gespeichert. Damit ist sichergestellt, dass die Daten von jeder gängigen Tabellenkalkulation gelesen und ausgewertet werden können.

## 2.4 Didaktische Aspekte der Versuche

Mit der Versuchsthematik, wie sie oben beschrieben ist, können dem Schüler nicht nur Aspekte der Hochenergiephysik verständlich und nachvollziehbar vermittelt werden, die Versuche geben auch gute Einblicke in die Arbeitsweise der Naturwissenschaften. Es werden folgende didaktischen Aspekte verfolgt:

Die Versuche

- ◇ eröffnet den Umgang mit —für die Schule „exotischen“— Teilchen
- ◇ betrachten statistische Aspekte der Quantenphysik



- ◇ ermöglichen einen experimentellen Zugang zu Aspekten der Relativitätstheorie
- ◇ beschäftigen sich mit Themen der Physik, in denen auch aktuell noch geforscht wird
- ◇ lehren, dass Elementarteilchen keine abstrakten Gebilde, sondern Teil der Umwelt sind
- ◇ vermitteln dem Schüler Schritt für Schritt erfahrbar die Existenz der Höhenstrahlung
- ◇ trainieren den Umgang mit modernen Werkzeugen (Computer in Messsteuerung und Auswertung)
- ◇ bringen Anwendung für Statistik
- ◇ üben den Umgang mit modernen Nachweisgeräten ein

## Kapitel 3

# Details zur kosmischen Strahlung

Die äußere Atmosphäre der Erde ist einem ständigen Teilchenbeschuss aus dem Weltraum ausgesetzt. Bei den Geschossen handelt es sich um subatomare Teilchen, Atomkerne und Photonen. Die Photonen decken dabei das gesamte elektromagnetische Spektrum von Radiowellen über sichtbares Licht bis hin zu Gammastrahlen ab. Diese energiereiche Strahlung aus dem Weltraum wird kosmische Strahlung oder Höhenstrahlung genannt.

### 3.1 Die Entdeckung der kosmischen Strahlung

Schon bald nach der Entdeckung der Radioaktivität im Jahre 1896 durch Henry Becquerel stand diese im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Um radioaktive Strahlung nachzuweisen benutzte man Elektrometer. Diese entladen sich in Anwesenheit radioaktiver Strahlung, da die Strahlung die Luftmoleküle in positive Ionen und Elektronen aufspaltet und damit leitfähig macht. Von der Existenz der kosmischen Strahlung war bis zu diesem Zeitpunkt noch nichts bekannt. Schon bald wurde man allerdings auf ein rätselhaftes Phänomen aufmerksam: Die Elektrometer entluden sich sogar in Abwesenheit radioaktiver Quellen. Von nun an suchten die Physiker nach Anzeichen dieser geheimnisvollen Strahlung.

Diese Strahlung wurde im folgenden sowohl auf dem Meer, also weit entfernt von radioaktivem Gestein, als auch hinter Abschirmungen, die von radioaktiver Strahlung nicht durchdrungen werden konnten, registriert. Damit war klar, dass es eine Quelle extrem durchdringender, noch unbekannter Strahlung geben musste. Die ersten Hinweise darauf, wo diese Quelle zu finden war, fand im Jahre 1910 der Jesuitenpater Theodor Wulf. Er erhielt bei Strahlungsmessungen auf dem Eiffelturm höhere Werte als erwartet. Er vermutete deshalb, dass die Strahlung aus dem Weltraum komme und schlug vor, mit Heißluftballons in große Höhen aufzusteigen, um diese Vermutung zu überprüfen. Dieses riskante Vorhaben wurde allerdings nicht von ihm, sondern vor allem von dem Österreicher Viktor Franz Hess (1883–1964) durchgeführt. Hess unternahm in den Jahren 1911 und 1912 zehn Aufstiege in Heißluftballonen. Er stieg auf Höhen von über 5000 m auf und stellte bei seinen Experimenten eine

rasche Zunahme der Strahlungsintensität oberhalb einer Höhe von etwa 1000 m fest. In einer Höhe von 5000 m war die Strahlungsintensität etwa drei- bis fünfmal größer als auf Meereshöhe. Viktor Hess vermutete deshalb, dass eine starke Strahlung aus dem Weltraum in die Erdatmosphäre eindringe, die beim Durchqueren der Luft zwar abgeschwächt werde, aber dennoch den Erdboden erreiche.

Robert Millikan entwickelte in der Mitte der zwanziger Jahre mit seiner Forschergruppe ein Elektrometer, dessen Anzeige fortlaufend auf einem Film aufgenommen wurde. Dieses Elektrometer hatte, verglichen mit denen von Viktor Hess, den Vorteil, dass es nicht ständig überwacht werden musste, um die Messergebnisse zu notieren. Somit war es nun möglich, mit unbemannten Ballons in sehr große Höhen aufzusteigen, um die Strahlenintensität zu messen. Des Weiteren konnte man nun auch die Strahlenverhältnisse in großer Wassertiefe bestimmen. Obwohl Millikan der Vermutung von Hess über die Herkunft der Strahlung aus dem Weltraum keinen Glauben schenkte, führte er umfangreiche Untersuchungen durch. Millikan änderte schließlich seine Meinung und ging sogar so weit, die Entdeckung der kosmischen Strahlung für sich zu beanspruchen.

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung wird heute Viktor Hess zugeschrieben, der dafür 1936 den Nobelpreis erhielt.

Nachdem nun allgemein die Existenz einer kosmischen Strahlung anerkannt war, stellte sich weiterhin die Frage, mit welcher Art Strahlung man es zu tun hatte. Die kosmische Strahlung kann Materie mit Leichtigkeit durchdringen. Millikan und auch andere Physiker vermuteten deshalb, dass es sich bei der kosmischen Strahlung um energiereiche Gammastrahlung handle, da die bekannte Gammastrahlung verglichen mit anderen radioaktiven Strahlen das größte Durchdringungsvermögen aufwies. Die wahre Natur der Teilchen der kosmischen Strahlung herauszufinden, gestaltete sich aufgrund zweier Tatsachen recht schwierig: Zum einen ist die Intensität kosmischer Strahlung selbst in großen Höhen noch um ein Vielfaches geringer als die der Strahlen eines radioaktiven Präparates. Zum anderen haben die kosmischen Teilchen einen sehr kleinen Wirkungsquerschnitt, was bedeutet, dass sie nur selten in Wechselwirkung mit anderen Teilchen treten. Insbesondere ist die ionisierende Wirkung nur sehr gering. Sie ist viel geringer als die der niederenergetischen Strahlen radioaktiver Quellen. Kosmische Strahlen treten also nicht nur vereinzelt auf, sie sind auch äußerst schwer nachzuweisen. Heute weiß man, dass sich kosmische Strahlung hauptsächlich aus Protonen, Heliumkernen, schwereren Kernen, Elektronen und Photonen zusammensetzt.

## 3.2 Bestandteile der kosmischen Strahlung

Die kosmische Höhenstrahlung setzt sich aus vielen verschiedenen, in der Schule weitgehend unbekanntem, Teilchen zusammen. Deshalb soll an dieser Stelle ein kleiner Einblick in die Zusammensetzung einiger dieser Teilchen aus Elementarteilchen gegeben werden. Die Elementarteilchen bilden die Bausteine der Materie und besitzen keine weitere bekannte Substruktur. Tab. 3.1 stellt alle Elementarteilchen mit den in der Teilchenphysik verwendeten Abkürzungen dar.

Man erkennt in der Tabelle drei Teilchenfamilien, die jeweils nochmals in die

Familie	Leptonen		Quarks	
1	$e$	Elektron	$u$	Up
	$\nu_e$	Elektron-Neutrino	$d$	Down
2	$\mu$	Myon	$c$	Charm
	$\nu_\mu$	Myon-Neutrino	$s$	Strange
3	$\tau$	Tau	$t$	Top
	$\nu_\tau$	Tau-Neutrino	$b$	Bottom

Tabelle 3.1: Die Elementarteilchen

Leptonen (griech. *lepton* - klein, kleine Münze) und die Quarks unterteilt sind. Die Familien unterscheiden sich dadurch, dass die Teilchen mit größerer Familienzahl eine größere Massen besitzen. Außerdem zerfallen die Teilchen der zweiten und dritten Familie in relativ kurzer Zeit in die Teilchen der ersten Familie<sup>1</sup>. Bis auf die Neutrinos besitzt jedes Elementarteilchen eine elektrische Ladung. Zu jedem Elementarteilchen gibt es noch ein Antiteilchen, mit derselben Masse wie das dazugehörige Teilchen, aber entgegengesetzter Ladung. Im Gegensatz zu den Leptonen, die einzeln auftreten, können die Quarks nicht einzeln, sondern nur im Verbund miteinander auftreten. Alle bisher bekannten zusammengesetzten Teilchen kann man sich aus Quarks aufgebaut vorstellen. Hierbei gibt es Zusammenschlüsse von drei Quarks ( $qqq$ ), die man auch Baryonen nennt, beziehungsweise von drei Antiquarks ( $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ ), die man Antibaryonen nennt. Neben Dreierverbindungen von Quarks oder Antiquarks gibt es auch die Verbindung eines Quarks mit einem Antiquark. Die resultierende Teilchenart nennt man Meson. Die Teilchenarten Baryon, Antibaryon und Meson werden unter dem Begriff Hadronen (griech. *hadros* - stark) zusammengefasst. Tab.3.2 zeigt einige Beispiele für Hadronen.

Hadronen					
Baryonen $qqq$ & Antibaryonen $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$			Mesonen $q\bar{q}$		
Bezeichnung		Quarks	Bezeichnung		Quarks
p	Proton	$uud$	$\pi^+$	Pion	$u\bar{d}$
n	Neutron	$udd$	$\pi^-$	Pion	$\bar{u}d$
$\Sigma^-$	Sigma - Hyperon	$dds$	$K^+$	Kaon	$u\bar{s}$
$\Sigma^+$	Sigma - Hyperon	$uus$	$K^0$	Kaon	$d\bar{s}$

Tabelle 3.2: Beispiele für Hadronen

### 3.3 Eigenschaften kosmischer Strahlung

Bei kosmischer Strahlung unterscheidet man zwischen primärer und sekundärer kosmischer Strahlung.

<sup>1</sup>Lediglich die Neutrinos zerfallen nicht.

### 3.3.1 Die primäre kosmische Strahlung

Behandelt man kosmische Strahlung, die isotrop aus dem Weltall auf die äußere Erdatmosphäre trifft, so spricht man von primärer kosmischer Strahlung. Für die primäre kosmische Strahlung sind ganz unterschiedliche Quellen wie Sonnenwinde, Supernovae, Novae, Quasare und Blazare, Pulsare und Neutronensterne sowie Strahlungsausbrüche astronomischer Objekte verantwortlich (mehr darüber in [3]).

Bei einer Supernova, also einer Sternexplosion zum Beispiel, können im Plasma der Sternoberfläche kurzzeitig riesige elektrische Felder entstehen. In diesen Feldern können geladene Teilchen auf sehr hohe Energien beschleunigt werden und eventuell den Stern verlassen. Ob die Teilchen den Stern verlassen können, hängt neben der erhaltenen Energie hauptsächlich von der Masse der Teilchen ab. So verlieren leichtere Teilchen wie zum Beispiel Elektronen durch Bremsstrahlungsprozesse mit Kernen der Umgebung viel mehr Energie als schwerere Teilchen wie zum Beispiel Protonen. Die Energie, die durch Bremsstrahlung abgegeben wird, ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Masse des Teilchens. Dies ist der Grund dafür, dass in der Hauptsache nur Protonen und vollständig ionisierte Atomkerne den Stern verlassen können. Wie sich die Hauptkomponenten der primären Strahlung zusammensetzen, zeigt Tab. 3.3, wobei die Energien dieser Teilchen von einigen GeV bis hin zu  $10^{12}$  GeV reichen können. [1]

Protonen (H-Kerne)	$\approx 85\%$
He - Kerne	$\approx 12,5\%$
Kerne mit $Z \geq 3$	$\approx 2,5\%$
Elektronen	$\approx 1\%$
Photonen	$\approx 0,1\%$

Tabelle 3.3: *Zusammensetzung der primären Strahlung nach [1]*

### 3.3.2 Die sekundäre kosmische Strahlung

Die Strahlung, die durch die Wechselwirkung primärer kosmischer Strahlung mit der Erdatmosphäre entsteht, wird sekundäre kosmische Strahlung genannt. Diese Wechselwirkung ist ein komplexer Prozeß, der durch die Produktion sogenannter Teilchenschauer gekennzeichnet ist. Eine Vorstellung, wie solche Schauer aussehen, vermittelt Abb. 3.1, wobei es sich hier um eine schematische Darstellung und nicht um Teilchenspuren handelt. Je nachdem, welche Energie die Primärteilchen haben, finden bei der Wechselwirkung verschiedene Prozesse statt. Protonen mit Energien bis 10 GeV zum Beispiel schlagen aus den von ihnen getroffenen Sauerstoff- oder Stickstoffatomen in der Atmosphäre einzelne Nukleonen heraus. Bei höheren Energien ist die Bremsstrahlung der vorherrschende Prozeß. Sie besteht weitgehend aus Mesonen und nur zu einem geringen Teil aus Photonen. Der größte Teil der dabei entstehenden Mesonen sind Pionen. Ab Energien von ca. 100 GeV entstehen dann auch schwerere Mesonen, wie zum Beispiel Kaonen und Hyperonen.

Da die geladenen Pionen ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) einen großen Teil der sekundären kosmischen Höhenstrahlung ausmachen und nach einer mittleren Lebensdauer von  $2,5 \cdot 10^{-8}$  sek.

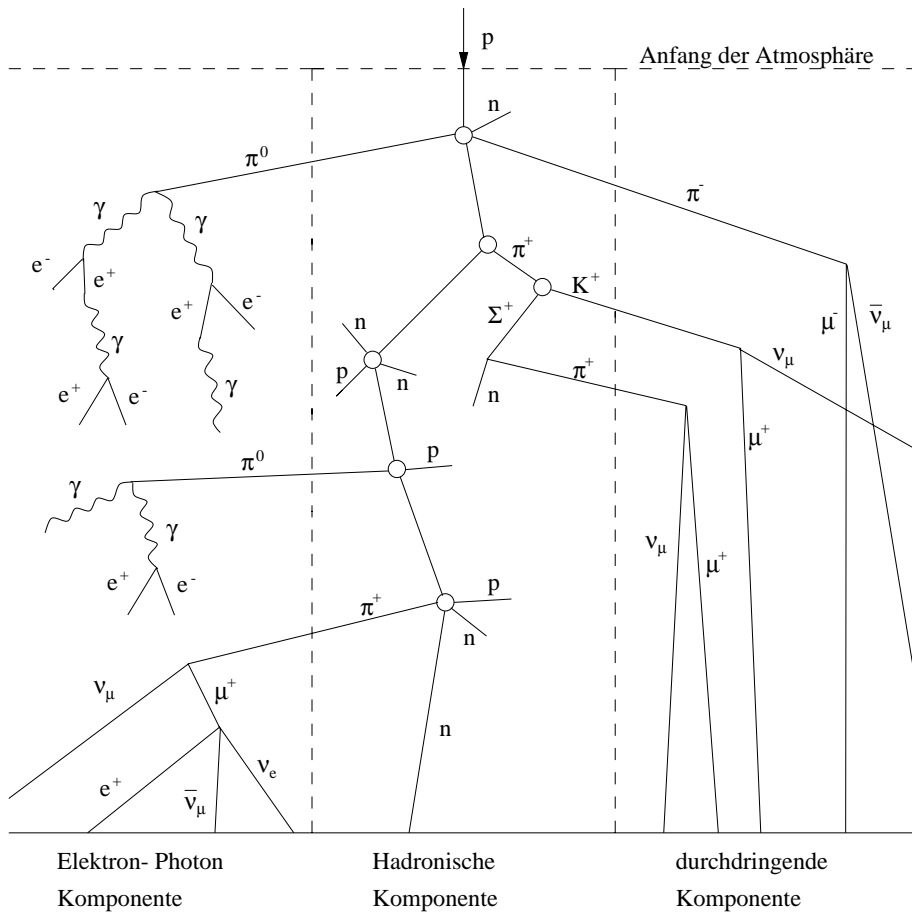


Abbildung 3.1: Illustration der Schauerbildung in der Erdatmosphäre nach [6]

in ein Myon und ein Myon-Neutrino zerfallen, interessieren wir uns hauptsächlich für sie und ihr weiteres Schicksal (siehe Kap. 3.4.1). Die durch den Pionzerfall entstandenen Myonen erreichen dann fast alle die Erdoberfläche. Hier machen sie ca. 80% der geladenen Teilchen aus der Höhenstrahlung aus. Weitere ca. 20% der die Erdoberfläche erreichenden geladenen Teilchen sind Elektronen, die hauptsächlich aus dem Myonzerfall stammen. Die schwereren Teilchen, die die Erdoberfläche erreichen, machen dort weniger als 1% aus [1].

### 3.4 Das Myon

Da wir uns in den Versuchen für Myonen interessieren, wird hier auf deren Entstehung und deren Eigenschaften eingegangen.

### 3.4.1 Zur Entstehung der Myonen

Da in den Teilchenschauern der Sekundärstrahlung so ziemlich alle Teilchen entstehen können, werden hier nur die wichtigsten Zerfallskanäle zur Myonenerzeugung beschrieben.

Einen Teil der hadronischen Komponente der Sekundärstrahlung, sprich der schwereren Teilchen, die entstehen, bilden die Pionen und die Kaonen, wobei die Pionen weitaus häufiger vorkommen. Kaonen sind „seltsame“ Teilchen. Sie können wegen der Erhaltung der Quantenzahl „Seltsamheit“ durch die Starke Kraft nur mit einem weiteren „seltsamen“ Teilchen erzeugt werden („assoziierte K-Produktion“). In der Regel ist dieses weitere Teilchen ein Hyperon. Typische Erzeugungsreaktionen für Kaonen sind in Tab. 3.4 dargestellt. Sind die Pionen, Kaonen oder Hyperonen

pp	$\rightarrow \Lambda K^+ p$ $\rightarrow \Sigma^+ K^+ n$	pn	$\rightarrow \Lambda K^+ n$ $\rightarrow \Sigma^- K^+ p$
$\pi^- p$	$\rightarrow \Lambda K^0$ $\rightarrow \Sigma^- K^+$	$\pi^+ p$	$\rightarrow \Sigma^+ K^+$
$\pi^- n$	$\rightarrow \Sigma^- K^0$	$\pi^+ n$	$\rightarrow \Sigma^+ K^0$ $\rightarrow \Lambda K^+$

Tabelle 3.4: Entstehungskanäle der Kaonen nach [1], dabei gilt:  $p$  = Proton,  $n$  = Neutron,  $K$  = Kaon,  $\Lambda$  = Lambda-Hyperon,  $\Sigma$  = Sigma-Hyperon

erzeugt, so zerfallen diese nach kurzer Zeit in weitere Teilchen. In Tab. 3.5 sind die Zerfallskanäle, bei denen Myonen entstehen können, beschrieben. Die Myonen ent-

Zerfallsreaktion	Lebensdauer in s	relat. Häufigkeit in %
$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \begin{cases} \nu_\mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{cases}$	$2,60 \cdot 10^{-8}$	100
$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \begin{cases} \nu_\mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{cases}$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	64
$\rightarrow \pi^\pm + \pi^0$		21
$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$	$0,08 \cdot 10^{-10}$	48
$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$	$1,48 \cdot 10^{-10}$	100
$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$	$2,63 \cdot 10^{-10}$	64

Tabelle 3.5: Häufige Zerfälle, bei denen Myonen entstehen können [1]

stehen hauptsächlich über den Zerfall der Pionen, weshalb dieser Zerfall ausführlicher erläutert wird:

Bei den Pionen handelt es sich um die leichtesten Hadronen. Die geladenen Pionen sind das  $\pi^+$ , bestehend aus dem Quark-Antiquark-Paar up ( $u$ ) und antidown ( $\bar{d}$ ), und das  $\pi^-$ , bestehend aus einem antiup-Quark ( $\bar{u}$ ) und einem down-Quark ( $d$ ). Die Pionen sind die leichtesten Hadronen, deshalb kommen beim Zerfall nur Leptonen als Zerfallsprodukte in Frage. Da Leptonen nicht einzeln erzeugt werden können, muss beim Pionzerfall entweder ein Myon mit einem Myonenneutrino oder ein Elektron mit einem Elektronenneutrino entstehen. Ein Tau oder Antitau kann nicht entstehen, da deren Ruheenergie größer als die des Pions ist. Abb. 3.2 zeigt das Feynman-Diagramm des Zerfalls eines positiven Pions mittels der schwachen Wechselwirkung.

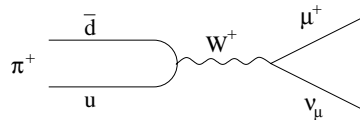


Abbildung 3.2: Feynmandiagramm vom Zerfall des positiven Pions

Beim Zerfall eines Pions sind wie Tab. 3.6 zeigt, vier Zerfallskanäle möglich:

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$

Tabelle 3.6: Zerfallskanäle des Pions

Dabei ist der Zerfall eines Pions in ein Myon etwa 10.000mal häufiger als der Zerfall in ein Elektron [2].

### 3.4.2 Der Zerfall der Myonen

Wie die meisten Teilchen, die bei einem Teilchenschauer erzeugt werden, so ist auch das Myon nicht stabil. Es zerfällt nach einer mittleren Lebensdauer von  $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$  sek. in seinen „kleineren Bruder“, das Elektron. Da der Zerfallsprozess bei positiven Myonen ( $\mu^+$ ) anders verläuft als bei negativen Myonen ( $\mu^-$ ), werden die beiden Zerfälle getrennt behandelt. Zu beachten ist, dass die Myonen, deren Lebensdauer wir mit unserem Versuchsaufbau messen wollen, gestoppt werden müssen.

**Der Zerfall des (freien)  $\mu^+$**  : Stoppt ein  $\mu^+$  im Wasser, kann es wie ein freies Myon zerfallen. Da beim Myonzerfall sowohl die Myon- als auch die Leptonenzahl erhalten bleiben muss, kann nur folgender Zerfall stattfinden:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Wie der Zerfall im Feynman-Diagramm aussieht, zeigt Abb. 3.3. Das  $W^+$  steht für das Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung, das W-Boson. Der Zerfall des



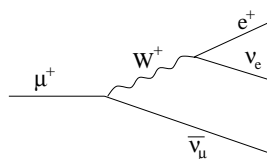


Abbildung 3.3: *Zerfall des positiven Myons, Feynman - Diagramm*

positiven Myons stellt einen Dreikörperzerfall dar. Das Impulsspektrum der dabei gebildeten Positronen ist daher kontinuierlich [2].

**Der Zerfall der  $\mu^-$  :** Stoppt ein  $\mu^-$  im Wasser, so gibt es zwei einander konkurrierende Prozesse. Zum einen der freie Zerfall des  $\mu^-$ . Er sieht wegen der Erhaltung von Myon und Leptonzahl folgendermaßen aus:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Zum anderen kann das  $\mu^-$  von einem Atomkern des Wassers eingefangen werden. Dazu stehen Wasserstoff und Sauerstoffkerne zur Verfügung. Wird ein  $\mu^-$  von einem Kern eingefangen, so reagiert es mit einem Proton des Kerns, wobei ein Neutron entsteht. Die neuen Kerne sind nicht stabil. Das einzelne Neutron, das aus einem Wasserstoffkern entstehen kann, zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 889 sek [9]. Der aus einem Sauerstoffkern entstehende, angeregte Kern  $N_{16}$  zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 7,13 sek. Dabei findet jeweils folgende Reaktion statt:

$$p \rightarrow e^- + \nu_e$$

Die Zerfallszeiten der angeregten Kerne sind so groß, dass eine Verfälschung der Lebensdauerermessung ausgeschlossen ist.

### 3.4.3 Energieverlust von Myonen beim Durchgang durch Materie

Durchdringen die Myonen ein Medium, so verlieren sie dabei an Energie. Der gesamte Energieverlust setzt sich aus Energieverlusten aufgrund verschiedener Prozesse zusammen. Die wichtigsten dieser Prozesse sind Ionisation und Anregung, Bremsstrahlung, Paarerzeugung und die photonukleare Wechselwirkung. Welcher Prozess beim Gesamtenergieverlust dominierend ist, ist abhängig von der Energie des betrachteten Teilchens. Bei den Myonen, die in unseren Versuchen hauptsächlich betrachtet werden, ist der Energieverlust durch Ionisation und Anregung dominierend. Diesen Energieverlust beschreibt die Bethe – Bloch – Formel<sup>2</sup> [12]:

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

Hierbei ist:

$dE$	der Energieverlust der Teilchen in der Dicke $dx$
$\frac{K}{A}$	$= \frac{4\pi N_A r_e^2 m_e c^2}{A} = 0,307075 \frac{MeV cm^2}{g}$
$N_A$	Avogadro – Konstante
$r_e$	klassischer Elektronenradius $= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2,81794 fm$
$m_e c^2$	= Ruheenergie des Elektrons $= 0,511 MeV$
$A$	Atommasse des durchdrungenen Mediums in $\frac{g}{mol}$
$Z$	Ordnungszahl des durchdrungenen Mediums
$z$	Ladung des Teilchens in Einheiten $e$ der Elementarladung
$\beta$	= Geschwindigkeit $= \frac{v}{c}$
$\gamma$	= Lorentzfaktor $= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$
$I$	mittleres Anregungspotential der Atome des bremsenden Mediums $I_{H_2O} = 75 eV$
$T_{max}$	maximale kinetische Energie, die bei der Kollision auf ein freies Elektron übertragen werden kann

<sup>2</sup>wobei weitere Terme eine genauere Beschreibung liefern

Dabei setzt sich  $T_{max}$  für ein Teilchen der Masse  $M$  und des Impulses  $M \cdot \beta \cdot \gamma \cdot c$  wie folgt zusammen [12]:

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{2\gamma m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}$$

Hierbei kann für ein „langsames“ Teilchen, für das gilt:  $\frac{2\gamma m_e}{M} \ll 1$ , folgende Approximation vorgenommen werden [12]:

$$T_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$$

Der Energieverlust durch Ionisation der Myonen in Wasser in Abhängigkeit zum Myonimpuls, ist in Abb. 3.4 dargestellt.

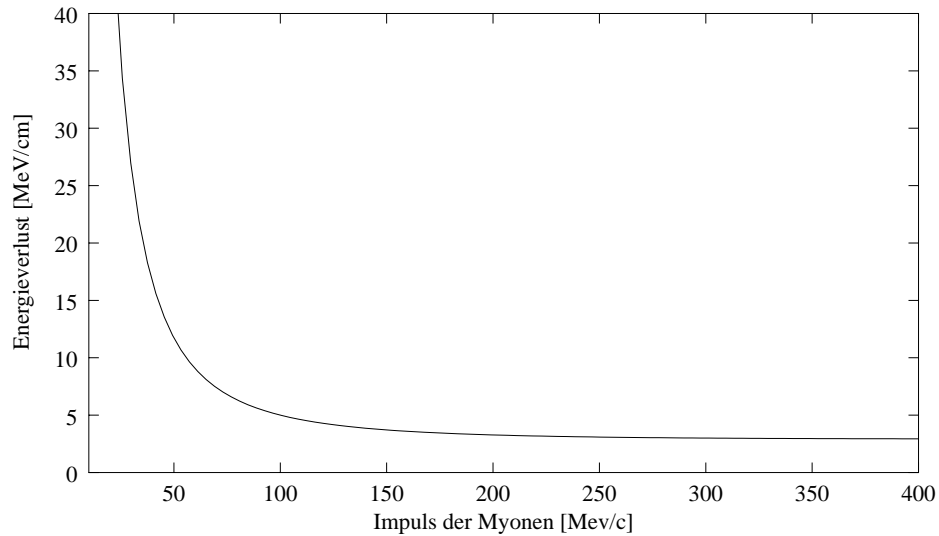


Abbildung 3.4: *Energieverlust durch Ionisation von Myonen in Wasser*

Die Impulsachse in der Abbildung deckt die Impulse der Myonen ab, die in der Kanne gestoppt werden können. Der steile Anstieg des Energieverlustes zu kleineren Teilchenimpulsen hin ermöglicht es uns erst, eine Lebensdauermessung durchzuführen, da sonst die Myonen in der Kanne nicht zur Ruhe kommen würden. Will man nun die Strecke bestimmen, die ein geladenes Teilchen in einem Medium zurücklegen kann, so erhält man diese durch Integration. Für die Reichweite  $R$  eines Teilchens mit Anfangsenergie  $E_0$  gilt:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(dE/dx)}$$

### 3.4.4 Eigenschaften der Myonen aus der Höhenstrahlung

Wenn die Myonen auf die Erde auftreffen, so haben sie, je nachdem in welchem Zenitwinkel sie eintreffen, eine unterschiedliche Dicke der Atmosphäre durchlaufen. Aufgrund dieser Tatsache variiert der totale Myonenfluß  $I_\mu$  mit dem Zenitwinkel  $\Theta$  etwa gemäß des  $\cos^2$ -Gesetzes (vgl. Abb. 3.5 [6]).

$$I_\mu(\Theta) = I_\mu(0) \cdot \cos^2 \Theta$$

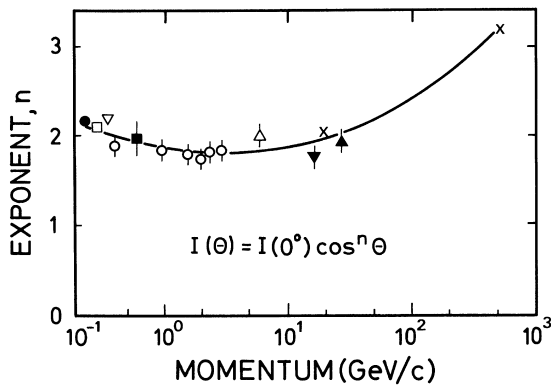


Abbildung 3.5: Exponent  $n$  der Winkelverteilung der Myonen in Meereshöhe in Abhängigkeit vom Impuls (nach [6])

Auf Meereshöhe gibt es mehr positive als negative Myonen. Für das Ladungsverhältniss Anzahl positiver Myonen  $N(\mu^+)$  zu Anzahl negativer Myonen  $N(\mu^-)$  (vgl. Abb. 3.6) gilt [6]:

$$\frac{N(\mu^+)}{N(\mu^-)} = 1,28$$

Dieser Überschuß spiegelt die Tatsache wieder, dass die primäre Strahlung positiv geladen ist.

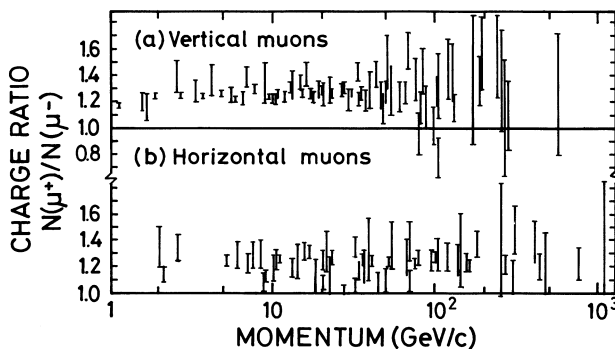


Abbildung 3.6: Das Ladungsverhältniss von Myonen auf Meereshöhe (nach [6])

Abb. 3.7 zeigt die Impulsverteilung des vertikalen Myonenflusses auf Meereshöhe [6]. Man sieht, dass auch auf Meereshöhe durchaus noch Myonen mit sehr großen Energien vorkommen.

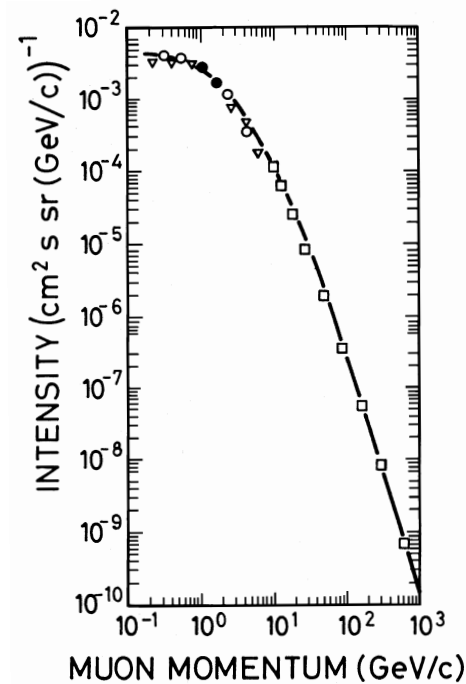


Abbildung 3.7: *Impulsverteilung des vertikalen Myonenflusses auf Meereshöhe (nach [6])*

### 3.4.5 Ein wenig Relativistik

Wie in Kap. 3.4.2 beschrieben, zerfällt ein „freies“ Myon mit einer mittleren Lebensdauer von  $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ . Im Vakuum könnte ein Myon somit, falls es sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, im Mittel eine Strecke von  $\tau \cdot c \approx 660 \text{ m}$  zurücklegen. Bei diesen hohen Geschwindigkeiten kommen allerdings relativistische Effekte mit ins Spiel. So erscheint die Lebensdauer im Beobachtungssystem (hier der Erde) aufgrund der Zeitdilatation um den Faktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

erhöht. Somit gilt:  $\tau_{\text{Erde}} = \gamma \cdot \tau$ . Des Weiteren gilt für die Energie eines relativistischen Teilchens:  $E = \gamma \cdot m_0 c^2$ , wobei Myonen eine Ruheenergie ( $\gamma = 1$ ) von etwa 105 MeV haben. Ein Myon, das bei seiner Entstehung eine Energie von z.B. 3 GeV besitzt, hat dann eine um

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} \approx \frac{3 \text{ GeV}}{105 \text{ MeV}} = 28,75$$

erhöhte Lebensdauer von ca.  $63 \mu\text{s}$ . Dieses Myon legt dann, bevor es zerfällt, eine mittlere Wegstrecke von fast 20 km zurück. Das wiederum ist in etwa die Höhe, in der die Myonen aus dem Pionzerfall entstehen. Die hochenergetischen Myonen mit Energien von teilweise mehr als 100 GeV können fast ungehindert den Erdboden erreichen und sogar tief in die Erde eindringen.

### 3.4.6 Historisches vom Myon

Um Missverständnisse zu vermeiden, sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Myon bei seiner Entdeckung Mesotron getauft wurde, da man es mit einem anderen Teilchen verwechselt hat. Bei der nun folgenden historischen Betrachtung wird weitgehend die Bezeichnung Mesotron für das Myon verwendet.

Carl Anderson und sein Mitarbeiter Seth Neddermeyer entdeckten in den frühen dreißiger Jahren erstmals Spuren von Myonen der kosmischen Höhenstrahlung in einer Nebelkammer. Damals glaubten sie noch, dass die beobachteten Spuren von energiereichen Elektronen stammen würden, die bis dahin unbekanntes physikalischen Gesetzen folgen sollten. Anderson und Neddermeyer zeigten im Jahre 1936 durch sorgfältige Auswertungen der Nebelkammeraufnahmen, dass es sich um die Spuren eines noch unbekanntes Teilchens handeln musste. Da nach den Auswertungen die Masse des neuen Teilchens zwischen der des Elektrons und der des Protons liegen musste, wurde es „Mesotron“ („mittelschweres Teilchen“) genannt. Wegen der Masse des Mesotrons wurde es Anfangs mit dem bis dahin ebenfalls unbekanntes Pion verwechselt.

Kurze Zeit vor der Entdeckung des Mesotrons hatte nämlich der japanische Physiker Hideki Yukawa seine Theorie der Kernkraft aufgestellt. Sie postulierte ein Teilchen mit einer Masse, die etwa das 250-fache der Masse eines Elektrons betragen sollte. Als man das Mesotron mit einer Masse, die fast gleich der des vorhergesagten Teilchens war, fand, nahm man an, dass es sich hierbei um dieses Yukawa-Teilchen handeln müsse. Es gab allerdings auch Einwände dagegen. So sollte das von Yukawa eingeführte Teilchen die starke Anziehungskraft zwischen den Nukleonen vermitteln. Deshalb müsste es von Atomkernen relativ leicht eingefangen werden können. Charakteristisch für das Mesotron war aber, dass es fast ungehindert Materie durchdringen konnte. Dieses Rätsel wurde durch die drei italienische Physiker Marcello Conversi, Ettore Pancini und Oreste Piccioni in Rom während des zweiten Weltkrieges gelöst. Ihr Labor befand sich in einem Keller in der Nähe des Vatikan, wo sie sich gleichzeitig vor der deutschen Besatzungsmacht versteckten und ihre Experimente durchführten. Ihre Versuchsanordnung bestand im wesentlichen aus Geigerzählern, Material zum Abbremsen der kosmischen Teilchenstrahlen und aus einigen magnetischen Eisenstäben, die Teilchen derselben elektrischen Ladung auf einen bestimmten Punkt konzentrieren sollten<sup>3</sup>. Mit ihren Experimenten wollten die drei Physiker den Zerfall der Mesotrons untersuchen. Das erste Abbremsmaterial, das sie verwendeten, war Eisen. Die Mesotrons verhielten sich wie erwartet: Die positiven Teilchen zerfielen, die negativen nicht, vermutlich wurden sie im elektrischen Feld der positiv geladenen Eisenkerne eingefangen und über die starke Kraft von ihnen absorbiert, bevor sie zerfallen konnten. Als die drei jedoch ein leichteres Absorptionsmaterial verwendeten, nämlich Kohlenstoff, wurden die Vorhersagen nicht erfüllt: Die negativ geladenen Mesotrons wurden nicht mehr absorbiert, sondern zerfielen ebenfalls. Dieses Ergebnis schloss eine Identifikation des Mesotrons mit dem Yukawa-Teilchen aus. Dieses hätte vom Kohlenstoff noch während seiner Lebensdauer absorbiert werden müssen. Das Ergebnis der Italiener wurde 1947 mit der Entdeckung eines neuen Teilchens, dem Pion, welches mit der Theorie von Yukawa völlig im Einklang war, bestätigt. Kurze Zeit später wurde das Mesotron dann in Myon umbenannt.

<sup>3</sup>ähnlich wie eine Sammellinse, die Licht auf einen Punkt fokussiert

## Kapitel 4

# Der Versuchsaufbau

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Höhenstrahlung und einige ihrer Eigenschaften beschrieben worden sind, soll nun ein Versuchsaufbau vorgestellt werden, mit dem mit einfachen Mitteln Eigenschaften der kosmischen Myonen, wie zum Beispiel deren Rate, die Zenitwinkelabhängigkeit, das Durchdringungsvermögen oder sogar die Lebensdauer, untersucht beziehungsweise bestimmt werden können. Den Grundversuchsaufbau zeigt Abb. 4.1, dieser ist auch Dank des Computers zur Datenerfassung und Versuchssteuerung relativ einfach gehalten. Die grobe Funktionsweise soll nun zuerst kurz beschrieben werden, bevor eine ausführlichere Behandlung der einzelnen Komponenten folgt.

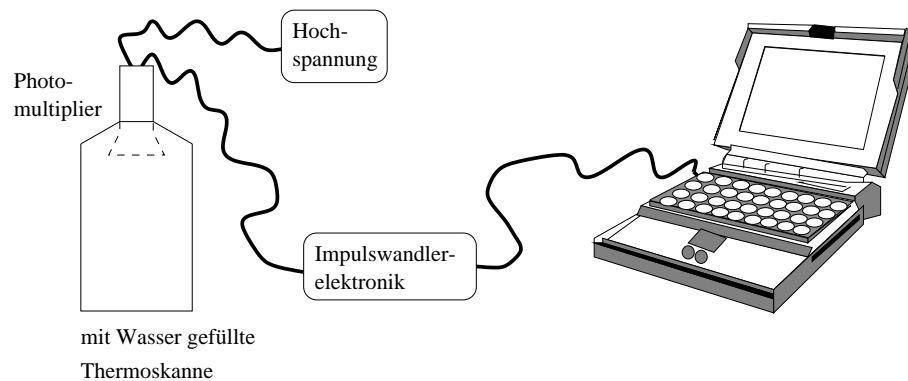


Abbildung 4.1: *Schematischer Versuchsaufbau*

Der physikalische Effekt, der bei diesem Versuchsaufbau ausgenutzt wird, um die Höhenstrahlung zu untersuchen, findet in einer verspiegelten, mit Wasser gefüllten Thermoskanne statt. Hier erzeugen schnelle geladene Teilchen durch den sogenannten Cherenkov-Effekt<sup>1</sup> schwache Lichtblitze. Diese werden von einem speziellen Photosensor, der auch Photomultiplier oder kurz PM genannt wird, welcher auf der Kanne sitzt, in kurze und sehr schwache Spannungspulse umgewandelt. Die Verspiegelung der Thermoskanne stellt sicher, dass eine größtmögliche Lichtmenge den

<sup>1</sup>benannt nach Pavel Alekseyevich Cherenkov, der den Effekt als erster erklären konnte (vgl. 4.1)

Photomultiplier erreicht und damit zum Spannungssignal beiträgt. Da diese Spannungspulse sehr klein und kurz sind, benötigt man noch eine Impulswandlerelektronik, um die Informationen der Signale des Photomultipliers an den Computer weitergeben zu können. Der Computer hat neben der Datenerfassung außerdem die Aufgabe, die Elektronik zu steuern.

## 4.1 Der Cherenkov-Effekt

Mit den in dieser Arbeit beschriebenen Experimenten sollen die Myonen aus der Höhenstrahlung nachgewiesen und untersucht werden. Wie im vergangenen Kapitel beschrieben, handelt es sich bei den Myonen um geladene Teilchen. Bewegt sich nun ein geladenes Teilchen mit einer Geschwindigkeit  $v$  im Vakuum, so emittiert es keine Strahlung. Fliegt es allerdings durch ein dielektrisches Medium mit einem Brechungsindex von  $n > 1$ , mit einer Geschwindigkeit, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem Medium<sup>2</sup>, so wird eine charakteristische elektromagnetische Strahlung emittiert.

Das Zustandekommen dieser sogenannten Cherenkov-Strahlung lässt sich so erklären, dass das geladene Teilchen die seiner Bahn benachbarten Atome kurzzeitig polarisiert. Dadurch werden diese zu elektrischen Dipolen, die durch die zeitliche Veränderung des Dipolfeldes elektromagnetische Strahlung emittieren. Man kann sich so jeden Punkt der Teilchenbahn als Erzeugende einer elementaren Kugelwelle vorstellen. Das Auftreten der Cherenkov-Strahlung kann man sich jetzt geometrisch durch die Überlagerung der elementaren Kugelwellen nach den Huygenschen Prinzip klar machen. In Abb. 4.2 ist der Flug eines geladenen Teilchens durch ein Medium mit der Geschwindigkeit  $v > \frac{c}{n}$  skizziert.

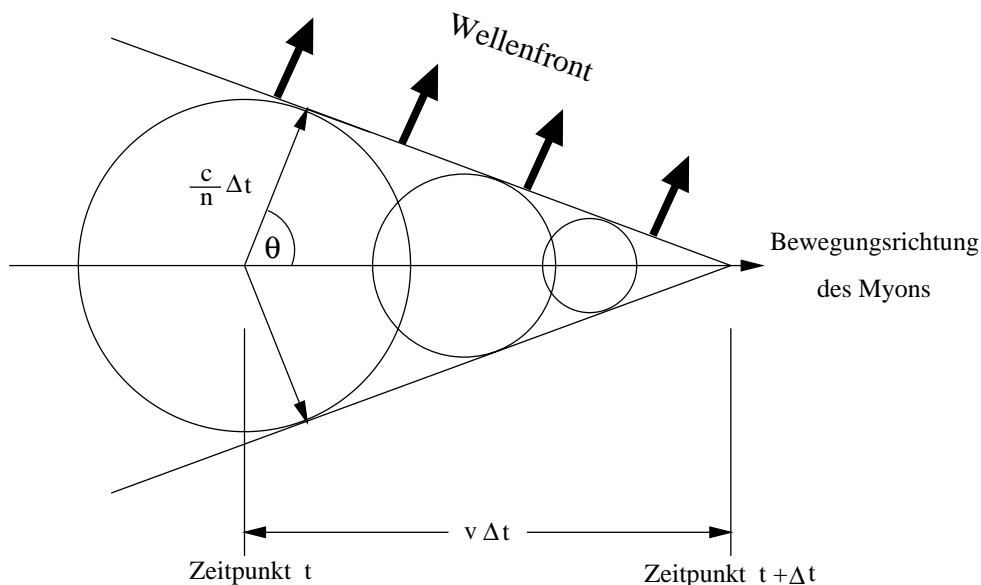


Abbildung 4.2: Verdeutlichung des Cherenkov-Effektes

<sup>2</sup>wodurch die sogenannte Cherenkov-Bedingung  $v > \frac{c}{n}$  erfüllt ist



Während der Zeit  $\Delta t$  legt das Teilchen einen Weg von  $v \cdot \Delta t$  zurück. Dabei werden die Elektronen, wie oben beschrieben, zu Schwingungen angeregt und strahlen Kugelwellen ab. Diese legen in der Zeit  $\Delta t$  einen Weg von  $\Delta t \cdot \frac{c}{n}$  zurück. Die Strahlung bildet dann eine kohärente Wellenfront mit charakteristischem Winkel  $\theta$ , für den gilt:

$$\cos \theta = \frac{\frac{c}{n} \cdot \Delta t}{v \cdot \Delta t} = \frac{c}{v \cdot n} = \frac{1}{\beta n}$$

In allen anderen Richtungen wird die Strahlung durch Interferenz ausgelöscht. Man sieht also, dass die Strahlung nur in einem bestimmten Winkel zur Teilchenbahn registriert werden kann. Die Anzahl der pro Wegstrecke emittierten Cherenkov-Photonen im Wellenlängenbereich zwischen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  errechnet sich nach [5] aus:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \frac{1}{\lambda^2} d\lambda$$

wobei  $z$  die Ladung des durchfliegenden Teilchens und  $\alpha$  die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante ist. Falls man die Dispersion vernachlässigt, also davon ausgeht, dass der Brechungsindex  $n$  im betrachteten Wellenlängenbereich konstant ist, ergibt sich mit  $\frac{1}{n\beta} = \cos \theta_c$ :

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \sin^2 \theta_c \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2}$$

Für den optischen Bereich ( $\lambda_1 = 400nm$ ,  $\lambda_2 = 700nm$ ) ergibt sich für die von uns betrachteten Myonen (einfach geladene Teilchen, also  $z = 1$ ):

$$\frac{dN}{dx} = 490 \cdot \sin^2 \theta_c \quad [cm^{-1}]$$

Aus der relativistischen Energie der Myonen  $E_\mu = \frac{m_\mu c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$  und der Cherenkov-Bedingung  $\beta n \geq 1$  erhält man dann als Schwellenenergie für Cherenkov-Licht:

$$E_{cer} \geq m_\mu c^2 \sqrt{\frac{n^2}{n^2 - 1}}$$

Mit den Brechungsindizes  $n_{H_2O} = 1,33$  und  $n_{Luft} = 1,00029$  ergibt sich für Myonen in Wasser eine Schwellenenergie von  $E_{cer,H_2O} = 160,33MeV$ , was einer Mindestgeschwindigkeit von  $\beta_{min,H_2O} = 0,7520$  entspricht. In Luft gilt für die Schwellenenergie  $E_{cer,Luft} = 4,31GeV$ , was einer Mindestgeschwindigkeit von  $\beta_{min,Luft} = 0,9997$  entspricht. Tab. 4.1 verdeutlicht die Photonproduktion in Abhängigkeit der Energie in Wasser. Tab. 4.2 zeigt die Photonproduktion eines Myons in Luft.

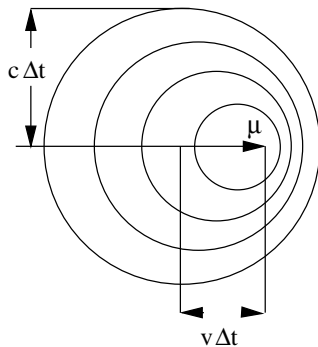
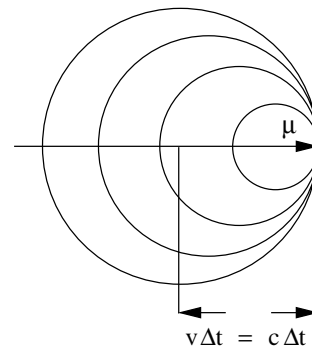
Dass für Teilchengeschwindigkeiten  $v$ , die kleiner oder gleich  $\frac{c}{n}$  sind, keine Strahlung registriert werden kann, verdeutlichen die Abbildungen 4.3 und 4.4. Auch hier soll wieder in jedem Punkt der Teilchenbahn eine elektromagnetische Kugelwelle

Myonenergie [MeV]	Myonimpuls [ $\frac{MeV}{c}$ ]	$\beta$	$\theta_c$ [°]	$\frac{N}{L}$ [ $cm^{-1}$ ]
161	121	0,755	5,08	3,85
171	134	0,787	17,07	42,23
181	147	0,812	22,22	70,05
191	159	0,833	25,53	91,04
201	171	0,851	27,91	107,38
300	281	0,936	36,55	173,82
500	489	0,977	39,72	200,06
1000	994	0,994	40,88	209,87
10.000	9.999	0,999	41,24	212,96

Tabelle 4.1: Cherenkov - Effekt in Wasser

Myonenergie [GeV]	Myonimpuls [ $\frac{GeV}{c}$ ]	$\beta$	$\theta_c$ [°]	$\frac{N}{L}$ [ $cm^{-1}$ ]
5	5	1	0,66	0,72
6	6	1	0,94	0,72
10	10	1	1,24	0,72
50	50	1	1,37	0,72
100	100	1	1,38	0,728

Tabelle 4.2: Cherenkov - Effekt in Luft

Abbildung 4.3: Der Fall  $v < c$ Abbildung 4.4: Der Fall  $v = c$ 

erzeugt werden. Man erkennt, dass es in diesen Fällen mit  $v < \frac{c}{n}$  und  $v = \frac{c}{n}$  nicht zu einer konstruktiven Überlagerung der Wellen kommt. Vergleichbar ist der Cherenkov-Effekt mit dem Überschallknall eines Flugzeuges. Auch das Flugzeug hört man bei Geschwindigkeiten kleiner als die Schallgeschwindigkeit. Analog dazu werden auch bei den Myonen elektromagnetische Wellen für Geschwindigkeiten  $v < \frac{c}{n}$  abgestrahlt. Doch für Wellengeschwindigkeiten, die kleiner sind als die Geschwindigkeit des Flugzeugs bzw. des Myons, wird die Intensität der jeweiligen Welle um ein Vielfaches verstärkt, was sich beim Flugzeug durch einen lauten Knall und beim Myon durch registrierbares Licht äußert.

## 4.2 Der Photomultiplier

Ein Photomultiplier (PM) ist eine lichtempfindliche Röhre. In Abb. 4.5 ist ein typischer Photomultiplier skizziert.

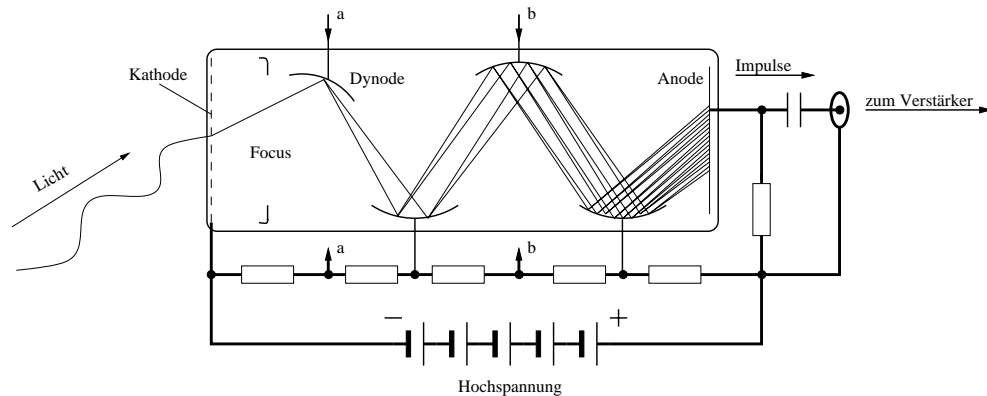


Abbildung 4.5: Skizze eines Photomultipliers

Er besteht aus einer Photokathode, fokussierenden Elektroden (Fokus), Elektroden zur Elektronenvervielfachung (Dynoden) und einer Anode. Sichtbares oder ultraviolettes Licht löst durch den Photoeffekt Elektronen aus der Photokathode, welche auf

negativem Hochspannungspotential liegt, aus. Ein wichtiger Parameter eines Photomultipliers ist die Quantenausbeute. Sie ist das Verhältnis der Zahl der emittierten Photoelektronen zu der Zahl der einfallenden Photonen. Bialkali-Kathoden zum Beispiel erreichen bei einer Wellenlänge von  $400\text{ nm}$  eine Quantenausbeute um 25%. Zu kleinen Wellenlängen hin nimmt die Quantenausbeute ab, da die Transparenz des Photomultiplierfensters für UV-Strahlen mit steigender Frequenz zurückgeht. Die erzeugten Photoelektronen werden durch ein elektrisches Feld, welches von den fokussierenden Elektroden erzeugt wird, auf die Elektronenvervielfacher-Anordnung beschleunigt und fokussiert. Diese Anordnung besteht aus bis zu 15 Elektroden, die auch Dynoden genannt werden. Diese müssen einen hohen Sekundärelektronenemissionskoeffizienten haben, um möglichst effektiv die Zahl der sich in Richtung Anode bewegendenden Elektronen zu erhöhen. Die am Photomultiplier angeschlossene Hochspannung wird durch einen Spannungsteiler auf die Dynoden aufgeteilt. So entsteht zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Dynoden eine Spannungsdifferenz von üblicherweise 100 bis 200 Volt<sup>3</sup>. Trifft nun ein Photoelektron aus der Kathode auf die erste Dynode, so werden hier mehrere Elektronen aus dem Dynodenmaterial emittiert und auf die zweite Dynode beschleunigt. Von jedem auftreffenden Elektron werden hier nun wieder etliche Elektronen emittiert und auf die nächste Dynode beschleunigt. Dieses Spiel setzt sich bis zur Anode fort. Bei den üblicherweise verwendeten Beschleunigungsspannungen zwischen zwei Dynoden von 100–200 Volt werden pro eintreffendem Elektron 3–5 Sekundärelektronen emittiert [7]. Erreichen die Elektronen nun die Anode, so sammelt sich hier die Ladung innerhalb kurzer Zeit, wodurch ein Anodenstrom erzeugt wird. Schließt man den Photomultiplier mit einem Widerstand ab, so erhält man dann ein Spannungssignal, welches über einen Kondensator<sup>4</sup> zu einem Verstärker geführt wird. Für einen Photomultiplier mit  $n$  Dynoden und einem Sekundäremissionskoeffizienten  $p$  wird eine Stromverstärkung von  $A = p^n$  erreicht. Für typische Werte von  $p = 4$  und  $n = 12$  erhält man  $A = 4^{12} = 1,68 \cdot 10^7$ . Die an der Anode ankommende Ladung  $Q = e \cdot A = -2,69 \cdot 10^{-12}\text{ C}$ , die entsteht, falls ein Photoelektron die erste Dynode erreicht, wird innerhalb von etwa  $5\text{ ns}$  gesammelt, was zu einem Anodenstrom von

$$I = \frac{dQ}{dt} = -0,05\text{ mA}$$

führt. Schließt man den Photomultiplier nun mit einem Widerstand von  $R = 50\ \Omega$  ab, so erhält man ein Spannungssignal von:

$$\Delta U = R \cdot \frac{dQ}{dt} = -2,69\text{ mV}.$$

Messungen mit Photomultipliern können durch äußere Einflüsse beeinträchtigt werden. Zwei der wichtigsten Störquellen sind der Anoden-Ruhestrom und die Beeinflussung durch Magnetfelder. Neben einem Grundrauschen wird der Dunkelstrom hauptsächlich durch thermische Elektronen verursacht. Da das Material, welches für Photokathode und Dynode verwendet wird, eine geringe Austrittsarbeit für Elektronen erfordert, werden sogar bei Raumtemperatur thermische Elektronen emittiert.

<sup>3</sup>und damit ein beschleunigendes elektrisches Feld

<sup>4</sup>Der Kondensator dient hier zur Entkopplung eventueller Gleichspannungsanteile

Der größte Teil des Ruhestroms ist auf diese Emission zurückzuführen. Durch die Dynodenkette wird dieser Effekt noch verstärkt. Für Messungen, die eines sehr niedrigen Dunkelstroms bedürfen, ist es daher empfehlenswert, den Photomultiplier zu kühlen. Für unsere Messungen ist dies allerdings nicht erforderlich. Des Weiteren werden Photomultiplier durch äußere Magnetfelder beeinflusst. Sie können bewegte Elektronen von ihrer Flugbahn ablenken und damit die Stromverstärkung negativ beeinflussen. Generell gilt, dass ein Photomultiplier umso empfindlicher auf Magnetfelder reagiert, je größer der Weg zwischen Kathode und Anode ist. Deshalb werden Photomultiplier meist durch einen  $\mu$ -Metall-Zylinder gegen magnetische Streufelder, zum Beispiel auch das Erdmagnetfeld, abgeschirmt.

### 4.3 Die elektronische Schaltung

Um die etwa 3-15 mV großen und ca. 50 ns breiten Signale eines Photomultipliers für einen Computer messbar zu machen, wurde eine elektronische Schaltung entwickelt. Mit dieser werden die kleinen PM-Pulse verstärkt und länger gemacht. Die Schaltung ist zweikanalig aufgebaut. Es besteht sowohl die Möglichkeit, mit einer Kanne zu messen, als auch zwei Thermoskannen in Koinzidenz zu betrachten. Will man eine Lebensdauer messung von Myonen vornehmen, so muss man die relativ kurze Zeit zwischen zwei Photomultipliersignalen messen (vgl. Kap.5.2.4). Dazu ist eine Uhr in die Schaltung integriert. Sie besteht aus einem Zähler (vgl. Abb. 4.6), der von dem ersten Puls gestartet und von dem zweiten Puls gestoppt wird.

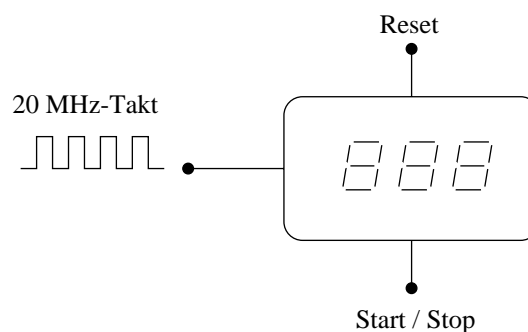


Abbildung 4.6: Vereinfachte Darstellung der Funktion der Zählerschaltung

Der Stand des Zählers wird bei jeder aufsteigenden Flanke eines 20 MHz-Signals, welches als Taktgeber dient, um eins erhöht. Multipliziert man den Zählerstand nach dem zweiten Puls mit 50 ns, so erhält man die Zeit zwischen den beiden Pulsen. Die gewandelten und schon vorverarbeiteten Informationen werden an einen Computer zur Erfassung weitergegeben. Die dazu notwendigen Steuermechanismen sind ebenfalls in der Schaltung integriert. Betrieben wird die Schaltung mit  $\pm 10V$ . Wegen der vorgesehenen Festspannungsregler ist die Spannungsversorgung aber unkompliziert. Ein genaue Beschreibung der elektronischen Schaltung befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

## 4.4 Datenerfassung mit dem Computer

Sowohl für die Datennahme als auch für die Steuerung einer Messung ist ein Computer vorgesehen. Er ist über die parallele Schnittstelle mit der elektronischen Schaltung verbunden. Eine nähere Beschreibung der Anbindung an den Rechner befindet sich im Anhang B dieser Arbeit.

Das Messprogramm, welches in Pascal 7 geschrieben ist, unterscheidet zwischen zwei Messmethoden. Zum einen die Einzel/Koinzidenzmessung, zum anderen die Lebensdauermessung. Bei der Einzel/Koinzidenzmessung wird bei jedem registrierten Impuls ein Zeitstempel in eine Datei geschrieben. Eine Prozedur kann nach der Messung zu jedem Ereignis den zeitlichen Abstand zum ersten registrierten Impuls in 100stel Sekunden berechnen. Auch diese Informationen werden in einer Datei gespeichert und stehen zur weiteren Auswertung bereit. Die Lebensdauermessung registriert die Zeiten zwischen zwei sehr schnell aufeinanderfolgenden Pulsen. Diese Zeiten werden dann zur weiteren Verarbeitung in eine Datei geschrieben. Nach abgeschlossener Datenerfassung werden die Daten in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert. Dort werden die notwendigen Berechnungen durchgeführt.

## Kapitel 5

# Versuche zur kosmischen Strahlung

Im Folgenden sollen nun einige Versuche dargestellt werden, die mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsaufbau in der Schule durchführbar sind. Da für die Messungen einige Vorbereitungen zu treffen sind, werden diese zuerst beschrieben. Dieser Beschreibung folgen dann die von mir durchgeführten Versuche.

### 5.1 Vorbereitungen für die Versuche

Vor dem Start einer Messung muss man sich hinsichtlich der Einstellungen von Schwellenspannung und Hochspannung einige Gedanken machen. Diese werden im folgenden Abschnitt behandelt. Es folgt eine Beschreibung, zur Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung. Anschließend soll ein kleiner Exkurs zur Effizienz der Versuchsanordnung deren Güte verdeutlichen.

#### 5.1.1 Die Einstellung der Messelektronik

Bevor man mit dem hier vorgestellten Versuchsaufbau mit den Untersuchungen der Höhenstrahlung beginnen kann, muss man sich mit der Frage auseinandersetzen, wann ein Impuls aus der Kanne wirklich das Vorhandensein eines Myons beschreibt. Als erstes ist zu bedenken, dass jedes geladene Teilchen mit genügend großer Geschwindigkeit im Wasser Photonen erzeugt. Als geladene Teilchen kommen allerdings nur Elektronen und Myonen in Frage. Da die vorkommenden Elektronen aus einem Myonzerfall entstanden sind, interpretieren wir einen Impuls, der von einem Elektron erzeugt wurde, auch als Myonimpuls und machen uns keine größeren Gedanken darüber. Ein viel größeres Problem bilden thermische Elektronen im Photomultiplier selbst, auch diese können einen Impuls erzeugen und uns glauben machen, dass ein Myon durch die Kanne geflogen ist. Im allgemeinen wird dieses Problem gelöst, indem man das Wasser mit zwei Photomultipliern beobachtet und nur dann von einem Myondurchgang spricht, wenn beide PMs gleichzeitig ein Signal liefern. Mit einer kleinen Kanne, auf der nur ein PM Platz findet, ist das natürlich nicht möglich. Wir müssen daher versuchen, mit der Einstellung der Hochspannung des

Photomultiplier die „schlechten Ereignisse“ zu minimieren. Im Versuch heißt dies, dass die Hochspannung möglichst so klein gewählt wird, dass ein von einem oder von zwei thermischen Elektronen an einer –vielleicht weiter hinten liegenden– Dynode erzeugter Impuls zu klein ist, um registriert zu werden. Klar ist allerdings auch, dass durch die Wahl einer kleineren Hochspannung schwache Signale, die durch ein Myon erzeugt wurden, ebenfalls ignoriert werden. Um nun die Hochspannung zu optimieren, nehmen wir Ratenmessungen mit verschiedenen Hochspannungen vor, wobei die Kanne zu einer bestimmten Hochspannung einmal mit Wasser gefüllt wird und einmal nicht. Ist die Kanne leer, so können keine Impulse von geladenen Teilchen in der Kanne erzeugt werden. Hat man diese Ratenmessungen vorgenommen, so muss man sich für eine Spannung entscheiden, bei der die leere Kanne eine möglichst kleine, aber die volle Kanne eine möglichst große Rate liefert. Ein von mir verwendeter Photomultiplier arbeitete bei einer Hochspannung von 1350 V optimal. Bei einer Rauschrate von etwa 2,5 Impulsen/min zählte er mit Wasser gefüllt im Mittel etwa 100 Ereignisse pro Minute (siehe Kap. 5.2.1).

Des Weiteren will auch die Einstellung der Schwellenspannung der Elektronik wohlüberlegt sein. Da wir die Pulse aus dem Photomultiplier aufgrund der geringen Breite mit einem in der Schule üblichen Oszilloskop nicht sehen können, kann die Schwellenspannung nach folgender Überlegung eingestellt werden. Die Photomultiplier weisen ein gewisses Rauschen auf, dessen Größenordnung unter 1 mV liegt. Ist die Schwellenspannung im Bereich dieses Rauschens eingestellt, so werden bei einer Ratenmessung permanent Ereignisse registriert, was man an der Trigger-LED beobachten kann. Dreht man nun die Schwelle etwas darüber, so dass die Pulse unregelmäßiger werden, hat man schon eine geeignete Schwelle gefunden.

Hat man eine geeignete Einstellung für Hochspannung und Schwelle gefunden, so stellt sich die Frage, wie stabil diese Einstellungen sind und welche Auswirkungen etwaige Instabilitäten auf eine Messung haben. Bezüglich der Auswirkung kleiner Änderungen der Hochspannung auf die Rate wurde diese für drei Hochspannungseinstellungen gemessen. Misst man die Anzahl Ereignisse  $N$  in einer Zeit  $T$  [sek], so erhält man das Mittel  $\bar{n}$  von 10 Sekunden-Intervalle mit  $\bar{n} = 10 \cdot \frac{N}{T}$ . Für den statistische Fehler  $\Delta N$  von  $N$  ergibt sich, da die Werte Poisson verteilt sind,  $\Delta N = \sqrt{N}$ . Für den Fehler  $\Delta \bar{n}$  des Mittelwertes der 10 Sekunden-Intervalle gilt dann nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:  $\Delta \bar{n} = \frac{10}{T} \cdot \Delta N = \frac{10}{T} \cdot \sqrt{N}$ . Bei meiner Messung ergaben sich die in Tab. 5.1 aufgeführten Werte, die in Abb. 5.1 graphisch abgetragen sind.

HV [V]	Zeit [sek]	Ereignisse	Mittelwert	$\frac{\text{Ereignisse}}{10 \text{ sek}}$
1340	11.188,65	14.596 ± 121	13,05 ± 0,11	
1350	9.213,32	16.234 ± 128	17,62 ± 0,14	
1360	10.761,11	20.223 ± 143	18,79 ± 0,13	

Tabelle 5.1: *Impulsrate in Abhängigkeit der Hochspannung am PM*

Am Verhalten der Impulsrate in Abhängigkeit der Hochspannung erkennt man, dass die Hochspannung recht kritisch ist. Eine Änderung um 5 V, das entspricht ca. 0.5% der Spannung, kann schon Ratenänderungen von etwa ± 1 Ereignis/10 sek



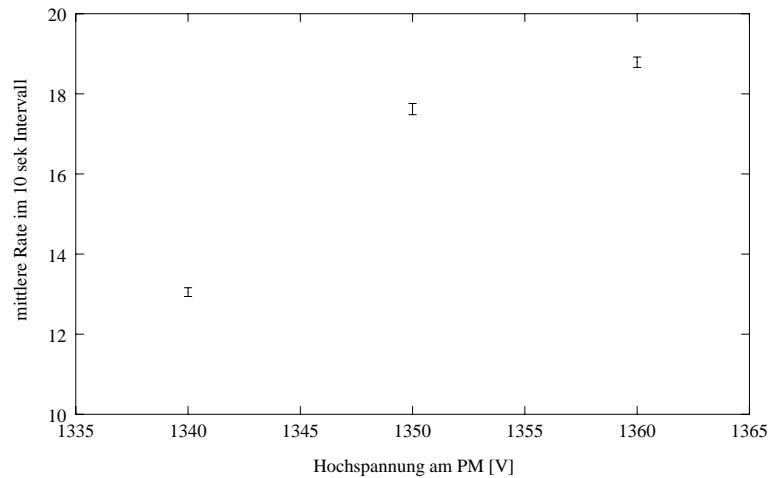


Abbildung 5.1: *Impulsrate in Abhängigkeit der Hochspannung am PM*

hervorrufen.

Die Schwellenspannung wird mit Hilfe eines Potentiometers eingestellt. An den Enden des Potentiometers liegt die Versorgungsspannung von  $\pm 5,2V$  an. Die Toleranz der Spannungsregler liegt bei 1%, was einer maximale Spannungsänderung von ca. 100 mV entspricht. Als Schwellenspannung werden, wegen einer Offsetspannung des Eingangsverstärkers, Spannungen um 50 mV eingestellt. Der Anteil der möglichen Spannungsänderung, bedingt durch die Toleranz, an diesen 50 mV beträgt dann etwa 0,5 mV. Welche Auswirkungen allerdings eine solche Spannungsänderung auf eine Messung haben kann, ist ungewiss, da die Schwellenspannung von außen nicht gemessen werden kann und es damit nicht möglich ist, eine vergleichende Messung durchzuführen.

An dieser kurzen Fehlerdiskussion sieht man, dass unser Versuchsaufbau sehr empfindlich auf Veränderungen reagiert. Aus diesem Grunde sollte ein Fehler von  $\pm 1$  Ereignis/10 sek immer berücksichtigt werden.

### 5.1.2 Messung beendet - was nun ?

Hat man eine Messung erfolgreich durchgeführt, stellt sich die Frage, wie man die erhaltenen Daten verarbeiten muss, um eine physikalische Aussage machen zu können. Die Vorgehensweise, die sich in den hier vorgestellten Versuchen empfiehlt, wird nun im Folgenden erläutert.

Die Daten nach einer Messung können in zwei verschiedenen Arten vorliegen, je nachdem, ob wir eine Ratenmessung oder eine Lebensdauermessung durchgeführt haben.

Bei einer Ratenmessung ist der Datensatz eine Liste von Zeitstempeln. Der erste markiert den Beginn, der letzte das Ende einer Messung. Die Zeitstempel dazwischen markieren die Zeiten zu denen ein Myon durch die Kanne geflogen ist. Da wir uns für die Myonenrate, also Ereignisse pro Zeitintervall interessieren, steht im Messprogramm eine Prozedur zur Verfügung, die uns die Zeitdifferenz in hundertstel

Sekunden zwischen Beginn der Messung und den einzelnen Ereignissen ausrechnet. Nun will man die Ereignisse in vorgegebene Zeitintervalle zusammenfassen. Dies ist prinzipiell mit einer Tabellenkalkulation möglich. Aufgrund der Menge an Daten wurde auch hier dem Messprogramm eine kleine Prozedur zugefügt. Mit ihr kann man, nach Angabe einer Intervallgröße in hundertstel Sekunden, die Zeitstempel, die in ein solches Intervall fallen, als Anzahl Ereignisse im Intervall zusammenfassen. Der nun vorhandene Datensatz ist eine Liste von Raten. Die Größe des neuen Datensatzes ist in einer Größenordnung, die jede Tabellenkalkulation verarbeiten kann. Somit bietet sich dieses Werkzeug zur Weiterverarbeitung an. In der Tabellenkalkulation kann man nun maximale und minimale sowie die mittlere Rate einer Messung bestimmen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, eine Raten-Häufigkeitsverteilung vorzunehmen und graphisch darzustellen.

Hat man eine Lebensdauermessung vorgenommen, so liegt die Verteilung der gemessenen Lebensdauern schon in der Text-Datei vor. Man muss nun lediglich die Daten in eine Tabellenkalkulation importieren und kann sie dort weiterverarbeiten (siehe Kap. 5.2.4). Um die Anzahl der zufälligen Doppelpulse zu berechnen, benötigen wir die mittlere Impulsrate der gesamten Messzeit. Dazu wird je ein Zeitstempel am Anfang und am Ende der Messung in ein File geschrieben. Die Messzeit in hundertstel Sekunden kann man dann mit der Prozedur „Zeitdifferenzen ausrechnen“ berechnen. Um die Rate zu bestimmen, werden während der Messung neben den Zerfällen auch die Anzahl der „normalen“ Impulse bestimmt.

### 5.1.3 Exkurs: Effizienzbestimmung der Kanne

Die nun folgende Beschreibung einer Effizienzmessung mit der Kanne soll dazu dienen, die Güte der Messapparatur unter Beweis zu stellen, was auch gelungen ist. Der Effizienzmessungsversuch ist allerdings aufgrund fehlender Szintillationszähler in der Schule nicht durchführbar. Szintillationszähler sind vom Prinzip her ähnliche Teilchendetektoren wie die Thermoskanne, auch sie geben bei einem Myondurchgang eine kleine Spannung ab.

Die Effizienz unseres Myonendetektors ist definiert als das Verhältnis der Anzahl der vom Detektor gesehenen Myonen zu der Anzahl der wirklich dagewesenen Myonen. Um die Effizienz zu bestimmen, verwenden wir zwei Szintillationszähler und stellen die Kanne dazwischen. Einen schematischen Versuchsaufbau zeigt Abb. 5.2, wobei auf die Darstellung von Signalwandlerelementen verzichtet wurde.

Sprechen nun beide Szintillationszähler gleichzeitig an, so gehen wir davon aus, dass ein Myon durch beide und damit auch durch die Kanne geflogen ist. Die Effizienz ergibt sich dann aus dem Verhältnis der Anzahl der Dreifachkoinzidenzen (beide Szintillatoren und die Kanne haben gleichzeitig angesprochen) zur Anzahl der Zweifachkoinzidenzen (nur die beiden Szintillatoren haben gleichzeitig angesprochen). Die Effizienz der Kanne wurde für zwei Durchflugrichtungen bestimmt. Zum einen für den senkrechten Durchflug durch die Szintillatoren S1 und S2, zum anderen für den Durchflug in einem Winkel durch die Szintillatoren S1' und S2'. Aufgrund der zylindrischen Form der Kanne ist der mittlere Weg eines Myons durch Wasser beim senkrechten Durchflug größer als beim schrägen Durchflug, weshalb beim senkrechten Durchflug eine höhere Effizienz erwartet wird. Wir bezeichnen die Anzahl der

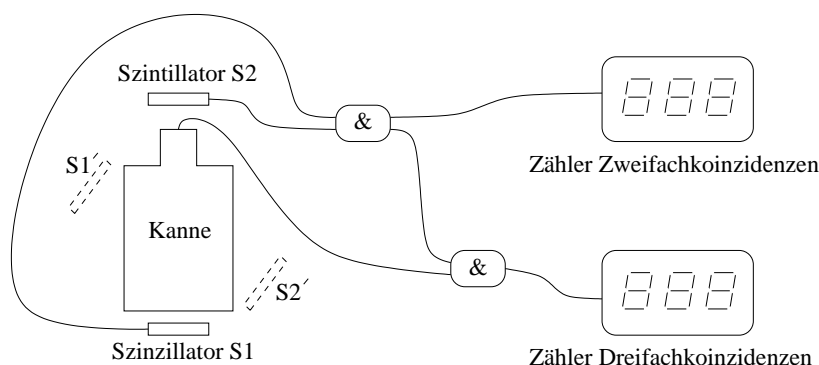


Abbildung 5.2: Schematischer Versuchsaufbau der Effizienzmessung

Zweierkoinzidenzen mit  $n_0$ , die Anzahl der Dreierkoinzidenten mit  $n$  und die Effizienz mit  $\epsilon$ . Es gilt dann  $\epsilon = \frac{n}{n_0}$ . Für den Fehler<sup>1</sup> der Effizienz  $\Delta\epsilon$  ergibt sich:  $\Delta\epsilon = \sqrt{\frac{n}{n_0} \cdot \frac{n_0 - n}{n_0^2}}$ . Bei der Effizienzmessung wurde die Kanne mit einer Hochspannung von 1350 V betrieben. Eine Ratenmessung ohne Wasser in der Kanne bei dieser Spannung ergab einen mittleren Wert von weniger als 2 Ereignisse pro Minute, die Ratenmessung mit Wasser etwa 120 Ereignisse pro Minute. Die Effizienzmessungen ergaben beim senkrechten Durchflug eine Effizienz  $\epsilon = (90,6 \pm 2,3)\%$  und beim schrägen Durchflug  $\epsilon = (81,6 \pm 1,6)\%$ . Die Anzahl der zufälligen Koinzidenzen ist aufgrund der geringen Raten und der kleinen Impulsbreite vernachlässigbar.

## 5.2 Schulversuche

Im folgenden werden vier Versuche vorgestellt, die in ihrer Gesamtheit nicht nur Eigenschaften der Höhenstrahlung betrachten, sondern, in der Schule angewendet, auch den Umgang mit komplexen Fragestellungen und deren Bearbeitung vermitteln. Der Einsatz des Rechners zur Datennahme und Datenverarbeitung bildet hier die große Neuerung zu schon vorhandenen Schulexperimenten.

Thema des ersten Versuchs ist die Ratenmessung. Hier soll im wesentlichen der Umgang mit zufälligen Ereignissen eingeübt werden. Darüberhinaus wird ein Eindruck über die Größenordnung der Häufigkeit der Myonen auf der Erdoberfläche vermittelt. Die zwei folgenden Versuche beschäftigen sich mit der Winkelabhängigkeit der Myonrate und des Durchdringungsvermögen der Myonen. Der nächste Versuch behandelt die Bestimmung der Lebensdauer von Myonen. Dieser Versuch ist momentan allerdings noch kritisch zu betrachten, da die mit der vorhandenen Apparatur erzielten Ergebnisse nicht mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmen und es auch noch keine plausible Erklärung der Ergebnisse gibt.

<sup>1</sup>Dieser Fehler ist auf die Binomialverteilung zurückzuführen.

### 5.2.1 Ratenmessung

Viele physikalische Erscheinungen der Elementarteilchen und Atomphysik beruhen auf ganz zufällig auftretenden Ereignissen vieler Einzelteilchen. Dabei ist nicht in allen Fällen die Wirkung der Einzelteilchen direkt beobachtbar. Meist ist einer Messung nur das Verhalten der Gesamtheit zugänglich. Diese erfaßt dann die Summe der einzelnen zufälligen Ereignisse „statistisch“. Mit dem hier vorgestellten Versuchsaufbau kann jedoch auch die Wirkung der einzelnen Myonen beobachtet werden. Da die Myonereignisse eine dauernde Quelle rein zufälliger Ereignisse bilden, kann der Versuchsaufbau dazu dienen, die statistische Methode der Messung von mehr oder weniger vielen Einzelereignissen in ihrer Grundlage zu verstehen. Den Versuchsaufbau einer Ratenmessung zeigt Abb. 5.3.

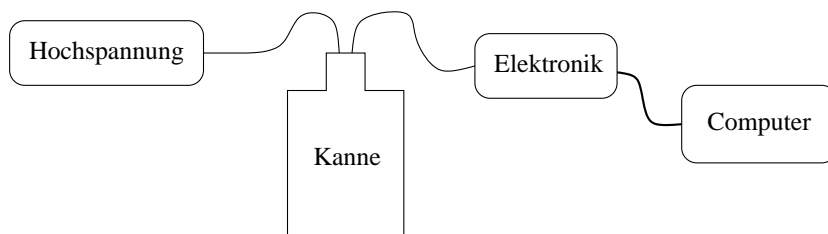
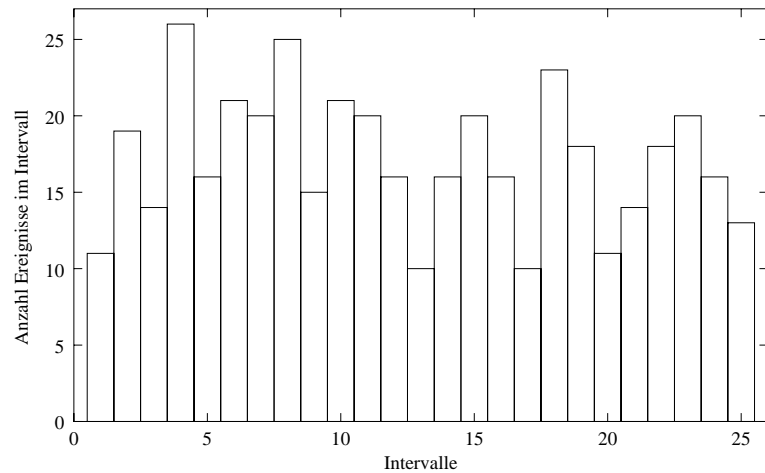
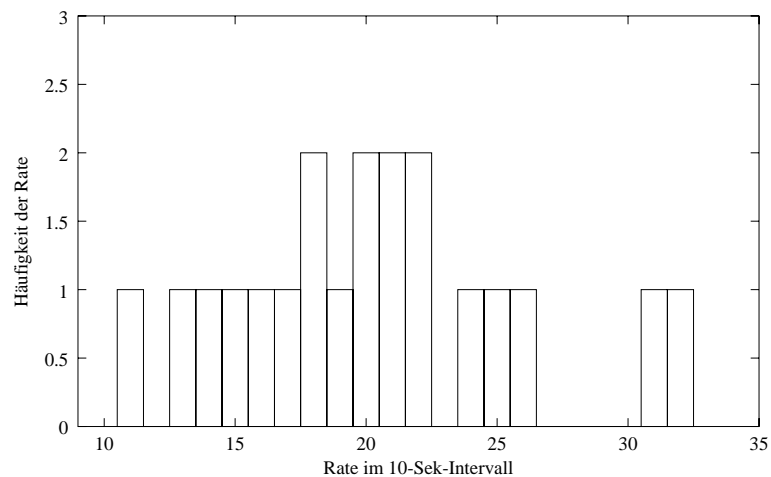


Abbildung 5.3: Schematischer Versuchsaufbau der Ratenmessung

Im Hauptmenü des Messprogramms wird der Punkt „Einzelmessung“ gewählt und eine neue Messung gestartet. Der Computer kann leicht die Daten einer Messung von einem Tag aufnehmen, womit, bei guter Einstellung der Hochspannung und der Schwelle, genügend Ereignisse zum Auswerten zur Verfügung stehen. Ist die Messung beendet, so müssen die Daten vor dem Einlesen in eine Tabellenkalkulation vorbehandelt werden. Im „Einzel-Koinzidenzmessungsmenue“ wählt man zuerst den Punkt „Zeitdifferenzen ausrechnen“ aus, um die Ereigniszeitpunkte relativ zum Versuchsbeginn zu berechnen. Danach wählt man den Punkt „Messung auswerten“, um mit den neu bestimmten Zeiten die Ereignisse in zeitliche Intervalle zusammenzufassen. Die Größe der Intervalle kann vom Benutzer eingegeben werden. Man hat nun eine Liste von Einzelmessungen der Rate in der vorgegebenen Intervallgröße, die zur weiteren Betrachtung in eine Tabellenkalkulation importiert werden. Hier kann man sich als erstes die Zufälligkeit der Ereignisse klarmachen, indem man einige Raten in einem Histogramm abträgt. Abb. 5.4 zeigt die Myonraten der ersten 25 Intervalle, von 10 sek. Länge, der Ratenmessung, die hier im folgenden näher untersucht wird. Die zufällige Myonrate macht uns die Zufälligkeit der Myonereignisse plausibel. Nun stellt sich die Frage, ob Messungen zufälliger Ereignisse zu einfachen Ergebnissen führen können. Dazu betrachten wir die Ratenverteilung der ersten 20 Intervalle, sie ist in Abb. 5.5 dargestellt. Die Raten liegen in unserem Fall, dem Zufall entsprechend, zwischen 11 Ereignissen / 10 sek und 32 Ereignissen / 10sek. Man erkennt zwar, dass Werte um 20 Ereignisse / 10 sek häufiger vorkommen und kann auch einen Mittelwert  $\mu = 21,53$  Ereignisse / 10 sek bilden, aber eine Gesetzmäßigkeit ist aus diesen  $N = 20$  Einzelmessungen mit insgesamt 405 Ereignissen nicht zu

Abbildung 5.4: *Myonraten in 10 Sekunden Intervallen*

entnehmen.

Abbildung 5.5: *Ratenverteilung von 20 Intervallen*

Vergrößert man die Anzahl der Einzelmessungen auf  $N = 50$ , so wird zwar eine Tendenz für häufigere Raten sichtbar (vgl. Abb. 5.6), doch auch hier erscheinen Schlüsse auf eventuelle Gesetzmäßigkeiten nicht sinnvoll. Zu beachten ist auch, dass sich der Mittelwert der Einzelmessungen im Vergleich zur ersten Betrachtung auf  $\mu = 17,86$  geändert hat. Will man einen gesetzmäßigen Verlauf der Ratenverteilung erkennen, so muss man die Anzahl der Einzelmessungen weiter erhöhen. In Abb. 5.7 ist die Ratenverteilung einer Messung über einen Zeitraum von ca. 20 Stunden abgetragen, wobei die Anzahl der Einzelmessungen von 16.525 auf 1 normiert wurde.

Der Mittelwert der Messung ist durch die gepunktete Linie angezeigt, er beträgt  $\mu = 17,07$  Ereignisse / 10sek. Die Ratenverteilung stellt eine unsymmetrische Figur da, ihr Mittelwert liegt nicht bei der am häufigsten aufgetretenen Rate, sondern

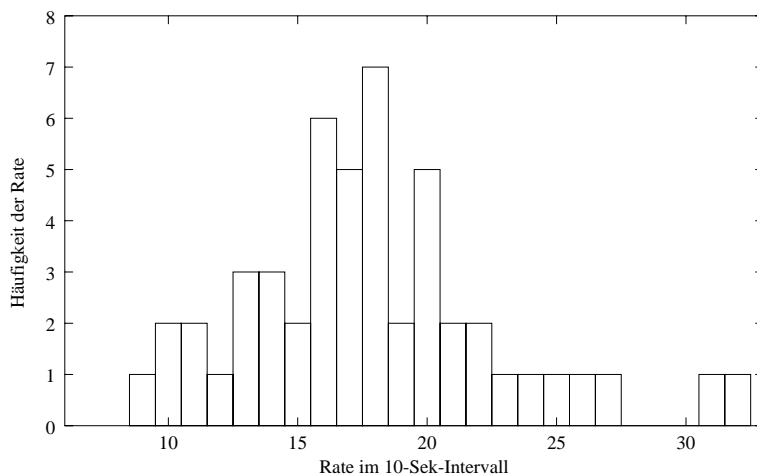


Abbildung 5.6: *Ratenverteilung von 50 Intervallen*

etwas darüber. Des Weiteren stellt man fest, dass einige Raten doppelt so groß wie der Mittelwert sind, wohingegen die Verteilung der kleinen Raten durch die Null begrenzt ist. Man erkennt sehr deutlich, dass die Häufigkeit einer bestimmten Rate,

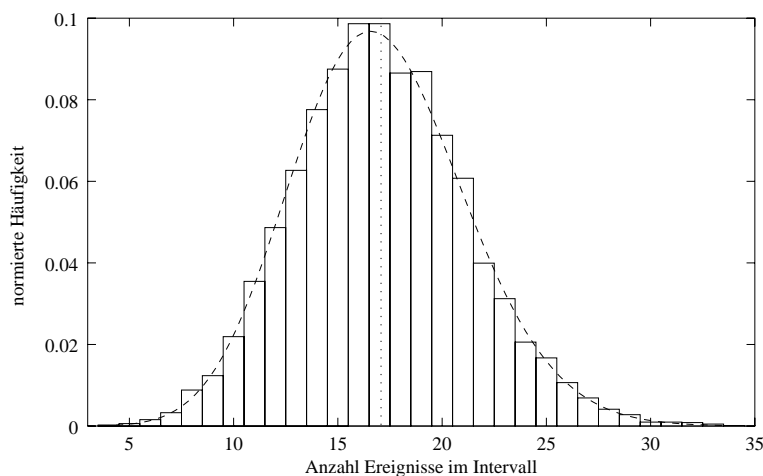


Abbildung 5.7: *Ratenverteilung einer gesamten Messung mit 10 Sekunden Intervallen*

so sehr diese selbst dem Zufall unterliegt, doch nach einer Regel verteilt ist, die die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen der Rate angibt. Damit kann man zwar das Ergebnis der nächsten Einzelmessung nicht voraussagen, man kann aber die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Rate für die nächste Einzelmessung bestimmen. Aufgrund der kleinen Zählintervalle ist die Myonrate Poisson verteilt. Die Poissonverteilung hat nur einen Parameter, den Mittelwert der Messung. In Abb. 5.7 ist die zum Mittelwert der Messung gehörige Poissonverteilung als gestrichelte Kurve mit abgetragen. Obwohl die Poissonverteilung diskret ist, wurde in der Abbildung auf

ein kontinuierliches Analogon<sup>2</sup> zurückgegriffen. Die Poisson - Verteilung hat folgende Funktionsdarstellung:

$$P(k, \mu) = \frac{\mu^k}{k!} \cdot \exp(-\mu)$$

Dabei stellt  $\mu$  den Mittelwert der Messung und  $k$  die Rate dar.  $P(k, \mu)$  ist dann die Wahrscheinlichkeit bei gegebenem Mittelwert in der nächsten Messung eine Rate von  $k$  Ereignissen / 10sek zu messen.

Nähere Informationen zu statistischen Auswertungen und insbesondere über die Poisson - Verteilung finden sich z.B. in Gränichers „Messung beendet - was nun? [8]“

Will man nun eine Aussage über die absolute Rate machen, so muss man neben der Effizienz der Kanne auch die in Kap. 5.1.1 beschriebenen „schlechten Ereignisse“ berücksichtigen. Dazu führt man eine Ratenmessung ohne Wasser in der Kanne durch. Das Ergebnis einer solchen Messung zeigt Abb. 5.8. Die mittlere Rate beträgt

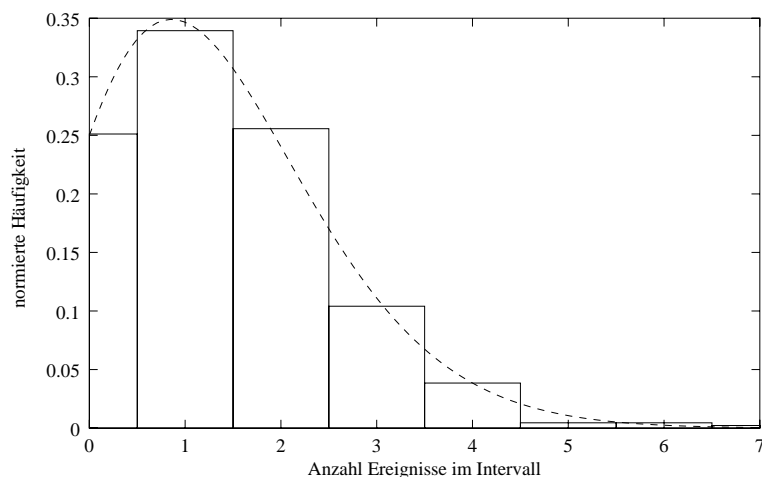


Abbildung 5.8: *Ratenverteilung einer Nullmessung mit 1 Minuten Intervallen*

hier 1,39 Ereignisse / min, was auf ein Intervall von 10 Sekunden Länge etwa 0,23 Ereignissen entspricht. Diese geringe Anzahl „schlechter Ereignisse“ ist im Vergleich zum Messwert vernachlässigbar. Damit ergibt sich bei einer Effizienz zwischen 80% und 90% eine absolute Rate von etwa 20 Ereignissen / 10 sek durch die Kanne.

<sup>2</sup>Statt der Fakultät wurde die Gamma - Funktion verwendet.

### 5.2.2 Winkelverteilung

Will man verdeutlichen, dass die von uns nachgewiesene „Höhenstrahlung“ ihren Namen zurecht trägt, dass sie also in der Hauptsache von oben kommt, so kann man dies mit einer Koinzidenzmessung bewerkstelligen. Dazu werden zwei Kannen mit zugehöriger Hochspannungsquelle benötigt, wobei wegen der Koinzidenzbedingung beider Kannen die Hochspannung ein wenig größer gewählt werden darf<sup>3</sup>. Die Messelektronik muss bei diesem Versuch auf „Koinzidenz“ eingestellt werden, im Messprogramm wird eine Ratenmessung ausgewählt. Die Idee, der in Abb. 5.9 schematisch dargestellten Versuchsanordnung ist es, durch die Stellung der Kannen zueinander mit der Koinzidenzbedingung nur gewisse Winkelbereiche der durchfliegenden Myonen zu betrachten. Zuerst stellt man die Kannen übereinander<sup>4</sup> und misst die Koinzidenzen, für eine oder zwei weitere Messungen wird dann die untere Kanne horizontal verschoben. Vergleicht man dann die Raten der Messungen, so stellt man

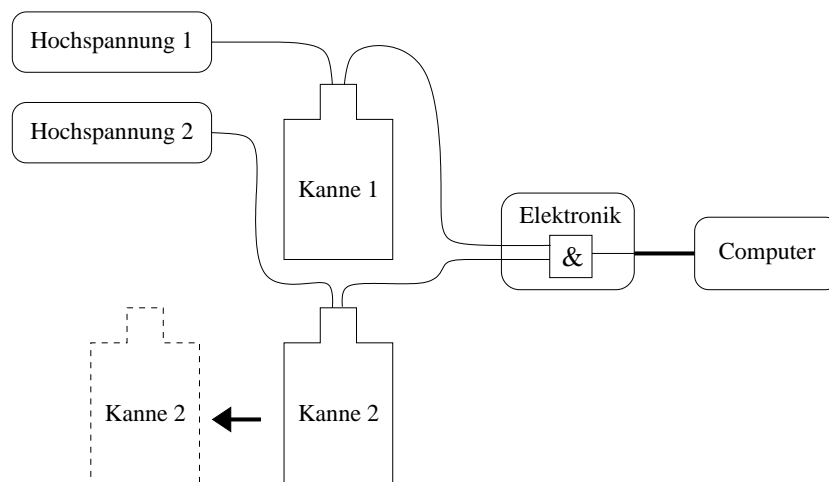


Abbildung 5.9: Schematischer Versuchsaufbau zur Winkelverteilung

fest, dass die Rate beim senkrechten Flug größer ist als die Rate bei versetzten Kannen. Wegen der Ausmaße der Kannen ist es leider nicht möglich, die in Kap. 3.4.4 beschriebene  $\cos^n$ -Verteilung zu rekonstruieren. Eine von mir durchgeführte Messung mit zwei Kannenpositionen ergab für den senkrechten Fall eine mittlere Koinzidenzrate von  $2,26 \pm 0,05$  Ereignissen / min. Für den Fall eines Winkels zwischen der Geraden durch die Mittelpunkte der beiden Kannen und der waagerechten von ca.  $50^\circ$  ergab sich eine mittlere Koinzidenzrate von  $0,65 \pm 0,03$  Ereignisse / min. Die Messung lief in beiden Fällen über einen Zeitraum von etwa 12 Stunden. An diesem Ergebnis erkennt man, dass die „Höhenstrahlung“ ihren Namen zurecht besitzt.

<sup>3</sup>Ein gleichzeitiges Rauschsignal in beiden Kannen ist sehr unwahrscheinlich.

<sup>4</sup>Z.B. indem man eine Kanne unter und eine auf einen Tisch stellt.



### 5.2.3 Durchdringungsvermögen der Myonen

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung der kosmischen Myonen ist deren Durchdringungsvermögen. Die Myonen können sogar noch in großen Tiefen<sup>5</sup> nachgewiesen werden. In der Schule hat man zwar nicht die Möglichkeit Untersuchungen in großen Tiefen anzustellen, doch auch der Vergleich der Myonrate auf dem Dachboden zur Rate im Keller kann Aussagen über das Durchdringungsvermögen der Myonen aus der Höhenstrahlung machen. Von mir durchgeführte Vergleichsmessungen benutzen die Standorte 4.Stock und Keller des Physikgebäudes. Die Ergebnisse sind in Tab.5.2 dargestellt. Die Messung wurde zweimal durchgeführt, wobei der PM bei

	Rate Keller	$\frac{\text{Ereignisse}}{10 \text{ sek}}$	Rate 4.Stock	$\frac{\text{Ereignisse}}{10 \text{ sek}}$
1. Messung	$14,91 \pm 0,05$		$15,60 \pm 0,05$	
2. Messung	$34,92 \pm 0,14$		$39,35 \pm 0,16$	

Tabelle 5.2: *Impulsrate in Abhängigkeit des Ortes*

den ersten Messung mit 1350 V und bei der zweiten Messung mit 1480 V betrieben wurde. Die Einstellung der Schwellenspannung war bei beiden Messungen identisch. Es wurde jeweils über einen Zeitraum von etwa 20 bzw. 12 Stunden gemessen und die mittlere Rate von 10 sek - Intervall berechnet. Der Fehler ergibt sich wie in Kap. 5.1.1.

Während bei die erste Messung ein Unterschied der Rate im Keller zur Rate im 4. Stock von  $0,69 \pm 0,07 \frac{\text{Ereignisse}}{10 \text{ sek}}$  zu beobachten ist, beträgt dieser Unterschied bei der zweiten Messung  $4,43 \pm 0,21 \frac{\text{Ereignisse}}{10 \text{ sek}}$ . Dieser Unterschied lässt sich qualitativ dadurch erklären, dass bei einer größeren Hochspannung am Photomultiplier mehr Myonen mit kleineren Energien registriert werden. Diese jedoch werden mit einer größeren Wahrscheinlichkeit auf dem Weg durch das Gebäude aufgehalten, als die Myonen mit größeren Energien. Bei beiden Messungen wird deutlich, dass die Myonen aus der Höhenstrahlung ein hohes Durchdringungsvermögen besitzen.

---

<sup>5</sup>über 1000m Tiefe

### 5.2.4 Lebensdauermessung

Wie in Kap. 3.4.2 beschrieben, zerfallen Myonen mit einer mittleren Lebensdauer von  $2,2\mu s$ . Ein Zerfall macht sich in der Kanne durch eine schnelle Aufeinanderfolge zweier Impulse bemerkbar. Der erste Impuls stammt dabei vom Myon, der zweite von einem Elektron oder Positron, welches beim Zerfall entsteht (vgl. Kap. 3.4.2). Um diese zwei Pulse sehen zu können, muss das Myon nach dem ersten Puls zum Stillstand kommen, bevor es zerfällt. Der Myonzerfall ist dabei ein statistischer Prozeß und gehorcht einem exponentiellen Zerfallsgesetz. Bei einer mittleren Lebensdauer von  $\tau = 2,2\mu s$ , was einer Halbwertszeit von  $\frac{\tau}{\ln 2} = 3,17\mu s$  entspricht, sind nach  $12,8\mu s$  bereits 94% aller Myonen zerfallen. Wir gehen daher von einem Myonzerfall aus, falls zwei Pulse mit einem zeitlichen Abstand, kleiner als  $12,8\mu s$ <sup>6</sup> registriert wurden. Für die Messung einer Lebensdauer kommen nur Myonen mit bestimmten Energien in Frage. Zum einen muss die Energie beim Eintritt in die Kanne größer als die Cherenkov-Schwellenenergie in Wasser sein, damit überhaupt der erste Impuls zustande kommt. Zum anderen darf die Myonenenergie nicht zu groß sein, da das Myon sonst in der Kanne nicht zum Stillstand kommt. Hierbei spielt der Energieverlust des Myons durch Ionisation die Hauptrolle (vgl. Kap. 3.4). In Abb. 5.10 ist die Reichweite der Myonen in der Kanne in Abhängigkeit des Myonimpulses aufgetragen.

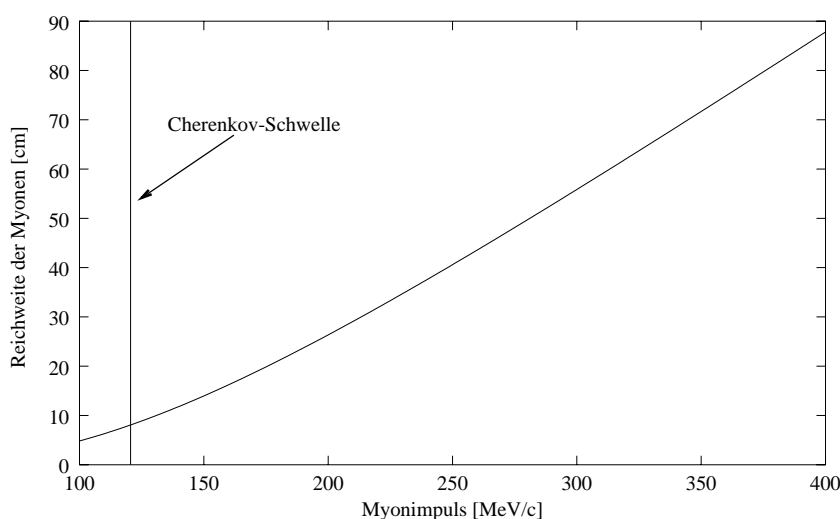


Abbildung 5.10: „Bremsweg“ der Myonen in Wasser in Abhängigkeit des Impulses

Um einen ersten Lichtblitz in der Kanne zu erzeugen, benötigt ein Myon eine Mindestenergie von  $160,33 MeV$  (vgl. 4.1), was einem Myonenimpuls von  $120,55 \frac{MeV}{c}$  entspricht. Da der Weg, den ein Myon in der Kanne zurücklegt bei handelsüblichen Thermoskannen nur selten größer als ca. 20 cm ist, erwarten wir eine sehr geringe Rate, der für uns nachweisbaren Zerfälle. Aus diesem Grund betrachten wir nun erst einmal die zufälligen Doppelpulse. Dazu betrachten wir die Zeitspanne  $T_\omega$ , die wir auch Wartezeit nennen, zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen. Diese Wartezeit

<sup>6</sup>Die Zeit  $12,8\mu s$  erklärt sich durch die verwendeten Hardware-Bauteile.

ist eine kontinuierliche, exponentialverteilte Zufallsvariable. Wir betrachten also eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung  $p(T_\omega)$ , für die bei gegebener Impulsrate  $R$  gilt:

$$p(T_\omega) = R \cdot \exp(-R \cdot T_\omega)$$

Für die Wahrscheinlichkeit  $P(I)$ , dass zwei Pulse zufällig im Intervall  $I = [t_1, t_2]$  registriert werden, gilt dann:

$$P(I) = \int_{t_1}^{t_2} R \cdot \exp(-R \cdot T_\omega) dT_\omega = \exp(-R \cdot t_1) - \exp(-R \cdot t_2)$$

Für die mittlere Anzahl zufälliger Doppelpulse  $D_{Zufall}(I)$  in einem Intervall  $I$  einer Messung mit einer Gesamtimpulszahl  $N$  ergibt sich:

$$D_{Zufall}(I) = N \cdot P(I)$$

Da zwei aufeinanderfolgende Pulse nur dann als Doppelpuls interpretiert werden, wenn ihr zeitlicher Abstand kleiner oder gleich  $12,8\mu s$  ist, wird zur Ermittlung aller zufälligen Doppelpulse einer Messung das Intervall  $I = [0; 12,8\mu s]$  gewählt. Für  $P(I)$  ergibt sich dann:

$$P(I) = 1 - \exp(-R \cdot 12,8\mu s)$$

Bezeichnet man nun die Anzahl der gemessenen Doppelpulse mit  $D$ , so erhält man die Zahl der erwarteten Doppelpulse  $D_{erwartet}$  mit:

$$D_{erwartet} = D - D_{Zufall} \quad (5.1)$$

Hat man eine Lebensdauerermessung durchgeführt, so liegt die Verteilung der Lebensdauern in einem Text-Datei zur Weiterverarbeitung bereit. Die Auflösung der Messwerte beträgt 50 ns, die Lebensdauerdaten sind deswegen in Intervalle der Länge 50 ns, den sogenannte „Bins“, zusammengefasst. Das heißt nichts anderes, als das die erste Zahl in unserer Text-Datei die Anzahl der Zerfälle mit einer Lebensdauer von 0 sek bis 50 ns bedeutet. Die zweite Zahl gibt die Anzahl der Zerfälle mit Lebensdauern zwischen 50 ns und 100 ns wieder...

Die theoretische Verteilung der Zerfallszeiten ist kontinuierlich und hat einen exponentiellen Verlauf. Mit der theoretischen mittleren Zerfallszeit  $\tau = 2,2\mu s$  ergibt sich für die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Zerfallszeiten  $\overline{p(t)}$  für den Zeitpunkt  $t$ :

$$\overline{p(t)} = \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $\overline{P(I)}$  für einen Zerfall mit einer Lebensdauer aus einem Intervall  $I = [t_1, t_2]$  ergibt sich durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichte über dieses Intervall:

$$\overline{P(I)} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt = \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau}\right)$$

Die Anzahl  $Z$ , der theoretischen Zerfälle im Intervall  $I$  ergibt sich mit der Gesamtzahl  $D_{erwartet}$  der erwarteten Doppelpulse zu

$$Z(I) = D_{erwartet} \cdot \overline{P(I)} \quad (5.2)$$

Trägt man die Verteilung der erwarteten Doppelpulse in einem Histogramm auf, und fügt die Verteilung der theoretischen Zerfallswerte hinzu, so kann man die Güte der Messung abschätzen. Falls die Messwerte in etwa mit den theoretischen Werten übereinstimmen, so kann man bei gegebener Verteilung mit der „Maximum-Likelihood“-Methode den wahrscheinlichsten Wert von  $\tau$  berechnen.

Eine von mir durchgeführte Lebensdauermessung, die über einen Zeitraum von etwa 66 Stunden lief, registrierte  $D = 3.449 \pm 59$  Doppelpulse. Die Gesamtzahl der Ereignisse betrug  $N = 7.383.449 \pm 2.718$ . Mit einer Impulsrate von  $R = 31,16 \pm 0,01 \frac{\text{Ereignisse}}{\text{sek}}$  ergibt sich die Anzahl der zufälligen Doppelpulse zu  $D_{Zufall} = 2944$  Ereigniss. In Abb. 5.11 ist die gemessene Verteilung der mit 5.1 berechneten, erwarteten Doppelpulse als Balken, und die mit 5.2 errechnete, theoretische Anzahl der Zerfälle im jeweiligen Intervall, als Kreuze abgetragen.

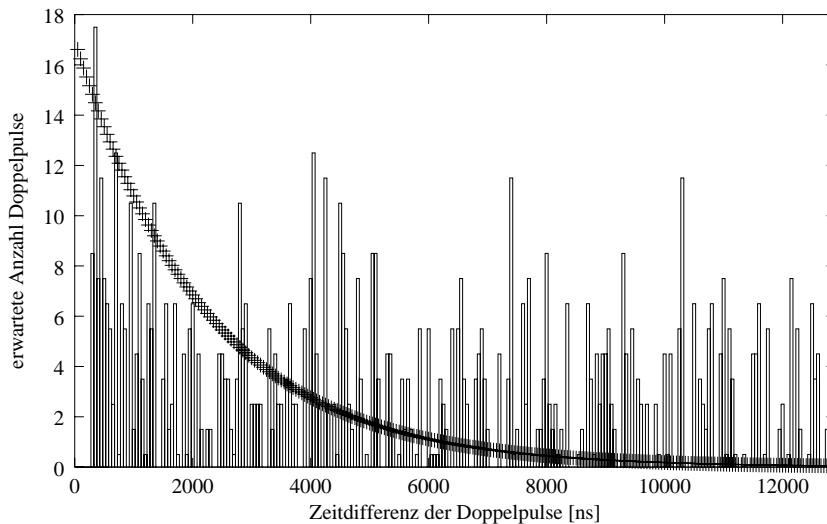


Abbildung 5.11: *Lebensdauerverteilung mit 50 ns Binbreite*

Man erkennt zwar eine leicht größere Anzahl an Doppelpulsen mit kürzeren Zeitdifferenzen, eine Übereinstimmung mit den vorhergesagten Werten ist jedoch nicht zu beobachten. In Abb. 5.12 ist das Versuchsergebnis nochmals dargestellt, wobei hier je zwei Bins zu einem neuen zusammengefasst worden sind.

Doch auch diese Darstellung bringt keine weiteren Erkenntnisse. Für die Verteilung der Doppelpulse hat sich bis zum Abschluss dieser Arbeit keine plausible Erklärung gefunden, so dass man von noch unbekanntem apparativen Effekten ausgehen kann.

Neue Erkenntnisse könnte man eventuell durch Verwendung eines anderen Photomultipliers oder durch Wiederholung der Messung mit anderen Einstellungen an Hochspannung und Schwellenpannung erhalten.

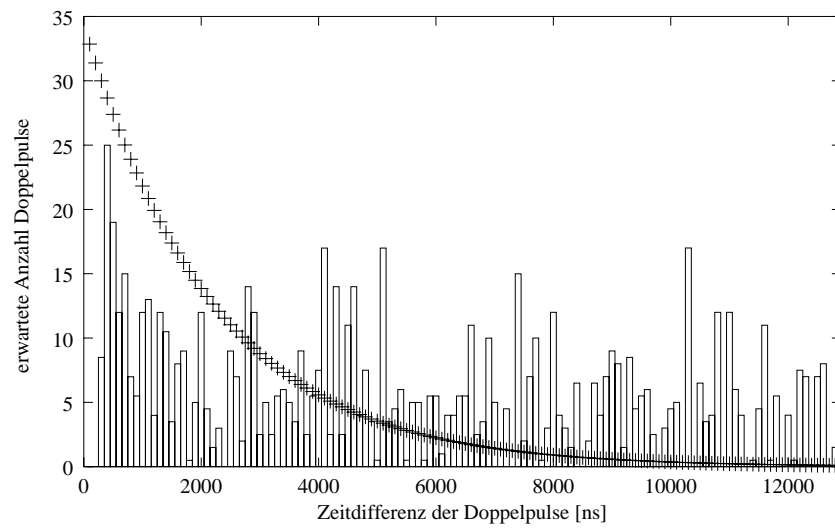


Abbildung 5.12: Lebensdauervertelung mit 100 ns Binbreite

## Kapitel 6

# Schlußbemerkung

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte und beschriebene Versuchsaufbau ermöglicht es erstmals, Experimente zu Themen der Hochenergiephysik auch in der Schule durchzuführen. Die didaktischen Möglichkeiten sind dabei sehr weitreichend (siehe Kap. 2.4). So wird neben den physikalischen Aspekten vor allem der Umgang mit großen Datenmengen geübt. Dies eröffnet einen praktischen Einstieg in statistische Methoden der Versuchsauswertung.

Der Versuchsaufbau nimmt allerdings nicht für sich in Anspruch perfekt zu sein. So gilt es insbesondere bei der Lebensdauerermessung zu untersuchen, warum diese keine befriedigenden Ergebnisse liefert. Dazu wird es auch nötig sein, einige Tests mit anderen Photomultipliern zu machen oder die elektrische Schaltung eventuell zu modifizieren.

Die in Kap. 5.2 behandelten Versuche erschöpfen die Möglichkeiten des Aufbaus bei weitem nicht. So kann man zum Beispiel mit mehreren der Versuchsaufbauten eine Untersuchung von Myonschauern realisieren. Dazu stellt man mehrere Thermoskannen in einem Raum<sup>1</sup> verteilt auf und betrachtet die Anzahl der Koinzidenzen, um damit Rückschlüsse auf die Häufigkeit und die Ausmaße solcher Schauer schließen zu können.

Abschließend ist zu bemerken, dass die Idee, Myonen durch das von ihnen erzeugte Cherenkov-Licht in einer mit Wasser gefüllten Thermoskanne nachzuweisen, mit relativ einfachen Mitteln praktikabel realisiert worden ist. Ich bin mir sicher, dass diese Arbeit dazu beitragen kann, Aspekte der Höhenstrahlung und deren Untersuchungsmethoden in der Schule anschaulich zu vermitteln.

---

<sup>1</sup>Man kann auch mehrere Schulen in einer Stadt an einem solchen Experiment beteiligen.

# Anhang A

## Die elektronische Schaltung

### A.1 Beschreibung der elektronischen Schaltung

Zweck der Schaltung ist es, die etwa 3-15 mV großen und etwa 50 ns breiten Impulse mit negativer Polarität des Photomultipliers in Informationen umzuwandeln, die vom Computer gelesen und verarbeitet werden können. Die Schaltung lässt sich in einen Analogteil und einen Digitalteil aufteilen, wobei der Analogteil zweikanalig vorliegt, um Koinzidenzmessungen vorzunehmen. Um die Information „Puls am PM“ mit dem Digitalteil der Schaltung bearbeiten zu können, hat der Analogteil die Aufgabe, aus dem PM-Impuls ein Signal zu formen, welches die Digitalbausteine verstehen können. Die am weitesten verbreitete und auch von der Computerschnittstelle verstandene Digitalform ist das TTL-Signal<sup>1</sup>. Beim TTL-Pegel werden Spannungen, die kleiner als 0,8 Volt sind, als logisch Null (oder Low-Pegel) und Spannungen, die größer als 2 Volt sind, als logisch Eins (oder High-Pegel) interpretiert. Für diese Impulswandlung benötigt man ein Bauteil, das den PM-Ausgang mit einer einstellbaren Schwellenspannung vergleicht. Kommt vom PM ein Impuls mit einer Spannung, die die Schwellenspannung überschreitet, muss dieses Bauteil einen TTL-Puls am Ausgang produzieren. Diese Anforderungen werden von einem Komparator<sup>2</sup> erfüllt. Ein Komparator ändert seinen Ausgangszustand in Abhängigkeit seiner Eingangs-Differenzspannung. Er hat zwei feste Ausgangszustände, einen High- und einen Low-Pegel. Ist  $U_+$  (die Spannung am Plus-Eingang) größer als  $U_-$  (die Spannung am Minus-Eingang), so liegt der Ausgang auf dem High-Pegel und der invertierte Ausgang auf dem Low-Pegel. Ist  $U_+$  kleiner als  $U_-$ , so liegt der Ausgang auf dem jeweiligen Low-Pegel und der invertierte Ausgang auf dem High-Pegel. Wegen der besonders hohen Spannungsverstärkung zwischen Ein- und Ausgang besitzt ein Komparator eine Schaltcharakteristik: Zum schnellen und sicheren Schalten ist ein Überschreiten einer minimalen Spannungsdifferenz ( $\sim 10 mV$ ) zwischen beiden Eingängen erforderlich.

Die geringe Amplitude und kurze Dauer des PM-Signals erfordert daher für die Weiterverarbeitung eine zusätzliche ca. 10-fache Verstärkung und nachfolgend einen Komparator mit genügend großer Bandbreite. Deshalb wurde ein gängiger

---

<sup>1</sup>TTL = Transistor Transistor Logik

<sup>2</sup>engl.: to compare = vergleichen

Komparator - Typ (AM 685) mit ECL-Ausgang gewählt<sup>3</sup>. Beim ECL - Pegel werden Spannungen, die kleiner als  $-1,65\text{ V}$  sind, als logisch Null und Spannungen, die größer als  $-0,81\text{ V}$  sind, als logisch Eins interpretiert. Da der nachfolgende Komparator das ECL - Signal aufgrund der hohen Bandbreite nicht in ein TTL - Signal wandeln kann, muss das Signal noch verbreitert werden. Diese Aufgabe könnte ein schnelles Monoflop übernehmen. Da der AM 685 über eine Latch - Funktion verfügt, entfällt dieses. Die Latch - Funktion erlaubt es, die Eingänge des AM 685 für die Ausgänge „unsichtbar“ zu machen und damit das aktuelle Signal zu verlängern. Liegt am LATCH - Pin (Pin 6) ein ECL - High an, so arbeitet er als Komparator. Liegt hier allerdings ein ECL - Low an, so „sieht“ der Ausgang die Eingänge nicht mehr, und der Ausgang reagiert in dieser Zeit nicht auf eine Änderung der Differenzeingangsspannung. Erreicht wird dies, indem man den Ausgang des AM 685 über einen Kondensator mit dem LATCH - Pin verbindet. Nun haben wir einen breiteren Impuls erhalten, zu dessen Weiterverarbeitung auch gängige Komparatoren existieren, die ein TTL - Ausgangssignal produzieren. Diese Arbeit erledigt in der vorliegenden Schaltung der AD 790.

Der Analogteil ist zweikanalig aufgebaut. Die praktische Realisierung eines Kanals zeigt Abb. A.1. Man erkennt eine dreistufige Verstärkereinheit bestehend aus

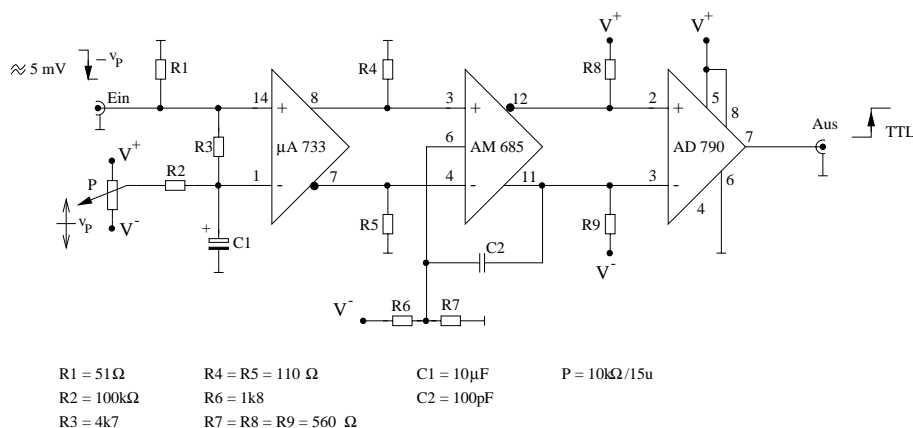


Abbildung A.1: *Schaltbild des Impulswandlers*

einem Vorverstärker dem  $\mu\text{A 733}$  und zwei Komparatoren, dem AM 685, der mit ECL - Ausgang arbeitet und den AD 790, der mit TTL - Ausgang arbeitet.

Betrachten wir nun genauer, was in den Fällen „kein Puls vom Photomultiplier“ beziehungsweise „Puls vom Photomultiplier“ passiert. Mit dem Potentiometer wird die Schwellenspannung am Minus-Eingang des  $\mu\text{A 733}$  eingestellt. Sie liegt zwischen Null Volt und dem zu erwartenden Pegel des Photomultiplier - Pulses, der in einer Größenordnung von  $-3$  bis  $-15\text{ mV}$  liegt. Für die Zeit, in der am Eingang kein Puls kommt, liegt der Plus - Eingang des  $\mu\text{A 733}$  auf Nullpotential. Mit einem Verstärkungsfaktor von 10 ergibt sich, je nach Schwellenspannung, am Ausgang (Pin 8) ein positives Potential von der Größenordnung  $20\text{ mV}$ . Am invertierten Ausgang

<sup>3</sup>ECL = Emitter Coupled Logik



(Pin 7) ergibt sich das zugehörige negative Potential. Für die Eingänge des AM 685 gilt nun  $U_+ > U_-$ ; daraus folgt, der Ausgang (Pin 11) liegt auf ECL-High-Pegel und der invertierte Ausgang (Pin 12) liegt auf ECL-Low-Pegel, wodurch der Latch nicht beeinflusst wird. Für die Eingänge des AD 790 gilt deshalb  $U_+ < U_-$ , woraus folgt, dass am Ausgang des AD 790 ein TTL-Low-Pegel liegt. Es ergibt sich also für die Zeit, in der kein Impuls am Eingang anliegt, der kleiner als die Schwellenspannung ist, dass der Ausgang auf TTL-Low-Pegel liegt. Kommt nun ein Puls, welcher die Schwelle überschreitet, so ist die Spannung am Plus-Eingang kleiner als die Schwellenspannung am Minus-Eingang. Das hat zur Folge, dass sich am Ausgang, unabhängig davon, um wieviel die Eingangsspannung kleiner als die Schwellenspannung ist, die Vorzeichen umdrehen. Nun gilt für die Eingänge des AM 685:  $U_+ < U_-$ , weshalb sich am Ausgang ein ECL-Low-Pegel und am invertierten Ausgang ein ECL-High-Pegel einstellt. Der Low-Pegel am Ausgang verursacht am Latch in einer von C2, R6 und R7 bestimmten Zeit einen Low-Pegel, wodurch eine Änderung des Ausgangs selbst bei einer Eingangsspannungsänderung nicht möglich ist. Hat sich der Kondensator entladen, so kann der Komparator normal weiterarbeiten. Der Kondensator wird experimentell so bestimmt, dass das Signal eine Mindestlänge von 100 ns bekommt, so dass der Komparator AD 790 damit arbeiten kann. Für die Zeit von etwa 100 ns liegt nun an den Eingängen des AD 790 die Beziehung  $U_+ > U_-$  vor. In dieser Zeit liegt der Ausgang auf einem TTL-High-Pegel und repräsentiert damit den Puls des Photomultipliers in für die Digitalelektronik verarbeitbarer Form. Die Latch-Funktion des AD 790 wird nicht benötigt, der Pin dafür (Pin 5) wurde auf  $V_+$  gelegt und die Funktion damit ausgeschaltet.

Nachdem nun der Analogteil aus einem Photomultiplierpuls ein TTL-Signal geformt hat, stellt sich die Frage, was der Digitalteil leisten muss, damit man die gewünschten Messungen durchführen kann.

Primär sollen mit dem Versuchsaufbau Photomultiplierpulse gezählt werden, wobei auch Koinzidenzmessungen mit zwei Thermoskannen berücksichtigt werden sollen. Desweiteren wurde die Schaltung so konzipiert, dass auch die Messung der Lebensdauer der Myonen möglich ist. Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde erstens eine Koinzidenzschaltung vor den eigentlichen Zähler gesetzt und zweitens der Zähler auf die Lebensdauerermessung ausgelegt. Mit den Informationen, die man durch diese Lösung erhält, ist auch eine Ratenmessung realisierbar. Die Koinzidenzschaltung ist in Abb. A.2 dargestellt.

Mit dem Schalter kann entschieden werden, ob man mit einem Photomultiplier messen will, oder ob man zwei Photomultiplier in Koinzidenz betrachten möchte.

Bevor wir nun die auf eine Lebensdauerermessung ausgelegte Schaltung betrachten, wollen wir zuerst klären, was bei einer solchen Messung überhaupt gemessen wird. Dazu betrachten wir den Fall, dass ein positives Myon in der Thermoskanne zum Stillstand kommt und in ein Positron, ein Elektron-Neutrino und ein Anti-Myon-Neutrino zerfällt. Falls das Myon beim Eintritt in die Kanne schnell genug ist (vgl. Kap. 4.1), bekommen wir einen Impuls am PM. Das Myon wird nun gestoppt und zerfällt. Das dabei entstehende Positron besitzt die notwendige Schwellenenergie für Cherenkov-Strahlung, so dass der PM einen weiteren Impuls liefert. Die Zeit zwischen den Impulsen soll nun gemessen und an den Computer weitergegeben werden. Um eine Lebensdauerermessung durchzuführen, muss also eine relativ kurze

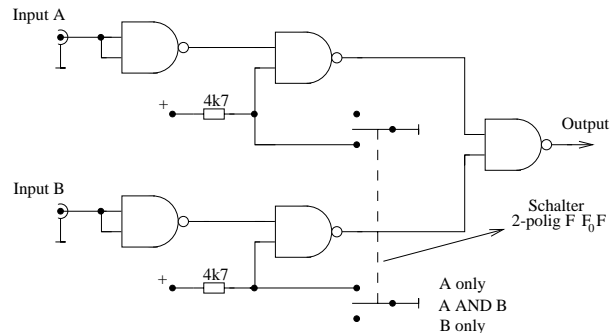


Abbildung A.2: Koinzidenzschaltung am Eingang des Digitalteils

Zeit zwischen zwei Pulsen gemessen werden. Die mittlere Zerfallszeit von Myonen ist  $2,2\mu\text{s}$  (vgl. Kap. 3.4.2). Aus praktischen Überlegungen gehen wir davon aus, dass ein Zerfall vorliegt, wenn ein zweiter Impuls einem ersten innerhalb von maximal ca.  $13\mu\text{s}$  gefolgt ist (vgl. Kap. 5.2.4). Ansonsten soll kein Zerfall, sondern ein Durchflug stattgefunden haben. Betrachten wir nun Abb. A.3, das Blockschaltbild des Digitalteils. Herzstück dieses Teils ist der Baustein 74 LS 590. Es handelt sich hierbei um einen 8-Bit-Zähler mit Ausgangsregister. Es folgt nun eine Auflistung der Ein- und Ausgänge dieses Bausteins mit einigen Erläuterungen.

**CCK:** (*counter clock*) Bei Freigabe des 8-Bit-Zählers (vgl.  $\overline{\text{CCKEN}}$ ) wird bei jeder positiven Flanke an CCK der Zählerstand um eins hochgesetzt.

**$\overline{\text{CCKEN}}$ :** (*counter clock enable*) Liegt hier ein ein Low-Pegel an, so ist der Zähler freigegeben, bei einem High-Pegel zählt er nicht weiter.

**RCK:** (*register clock*) Eine positive Flanke an diesem Eingang bewirkt, dass der aktuelle Zählerstand in das Ausleseregister geschoben wird.

**$\overline{\text{CCLR}}$ :** (*counter clear*) Mit einer negativen Flanke an diesem Eingang wird der Zähler initialisiert.

**$\overline{\text{RCO}}$ :** (*ripple carry out*) Für die Zeit, in der der Zähler den Stand 255 (oder Hexadezimal FF) hat, liegt hier ein Low-Pegel, die darauf folgende positive Flanke gibt einen Überlauf des Zählers an.

Des Weiteren gibt es acht Datenausgänge, die den aktuellen Inhalt des Ausleseregisters wiedergeben. Am CCK-Eingang liegt ein mit 20 MHz freischwingernder Quarzoszillator, es wird also, falls der Zähler freigegeben ist, alle 50 ns der Zählerstand um eins erhöht. Wir betrachten nun, was passiert, wenn ein Puls auf den Eingang der initialisierten Schaltung trifft. Initialisiert bedeutet hierbei, dass die Q-Ausgänge auf Low-Pegel und die  $\overline{Q}$ -Ausgänge auf High-Pegel liegen. Kommt nun ein Puls auf das nicht retriggerbare Monoflop Mono1 (vgl. Abb. A.3), so entsteht an seinem Ausgang ein 150 ns langer Puls. Dieser wird durch Mono2 und eine LED sichtbar gemacht. Der Puls von Mono1 schaltet Flip1 um. Das heißt, falls ein Puls kommt, wird der Zähler freigegeben. Kommt nun innerhalb von etwa  $13\mu\text{s}$  (Zeitkonstante



## A.2 Der praktische Aufbau der Schaltung

Analog und Digitalteil sind getrennt auf jeweils einer Platine untergebracht. Die beiden Platinen finden in einem kleinen Gehäuse Platz. Auf der Frontseite des Gehäuses sind BNC-Anschlüsse für die beiden Kanäle (A und B) angebracht. Durch zwei kleine Löcher sind die Trimmer zum Einstellen der Schwellenspannung zugänglich. Ebenfalls auf der Vorderseite befindet sich ein Schalter, mit dem der Betriebsmodus ausgewählt werden kann. Kanal A oder Kanal B können einzeln verwandt werden und es besteht die Möglichkeit Kanal A in Koinkidenz mit Kanal B zu betrachten. Mit einem Reset-Taster kann die Schaltung von außen initialisiert werden. Eine Reihe von LEDs, die den momentanen Betriebszustand des Geräts anzeigen, rundet das Bild der Frontplatte ab. Auf der Rückseite des Gehäuses befinden sich neben den Spannungsversorgungsbuchsen und einem Ein/Aus-Schalter der Ausgang zur parallelen Schnittstelle und ein BNC-Ausgang, der die Information „Puls am PM“ für einen externen Zähler bereitstellt. In Abb. A.4 ist das vollständige Schaltbild eines Kanals des Impulswandlers inklusive der Abblockkondensatoren dargestellt.

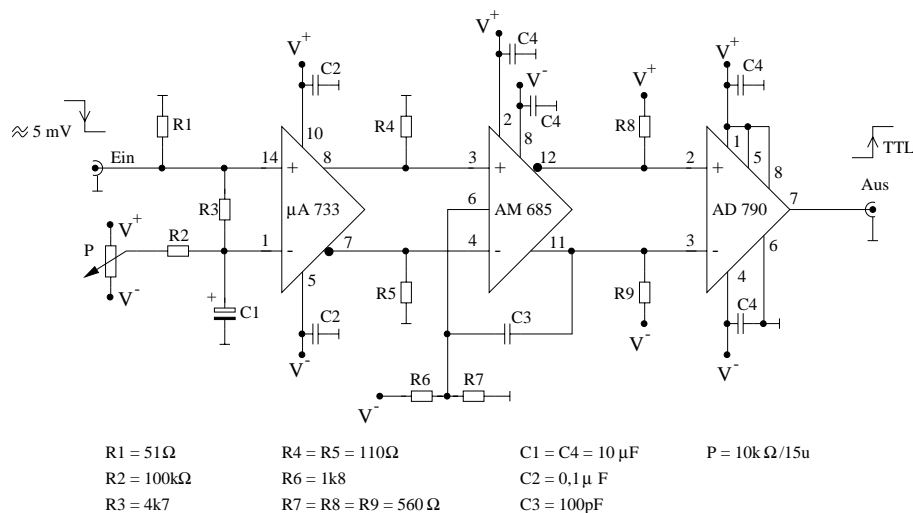


Abbildung A.4: Schaltbild eines der Komparatoren

Das Schaltbild der Spannungsreglung zeigt Abb. A.5.

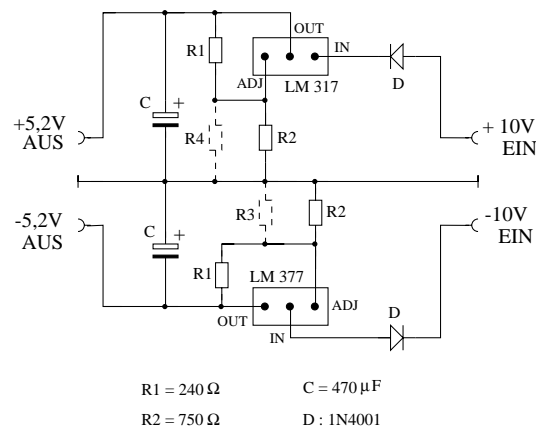


Abbildung A.5: Schaltbild der Spannungsreglung

Für die Spannungsreglung werden die regelbaren (adjustable) Spannungsregler LM 317 (positive Spannung) und LM 337 (negative Spannung) verwendet. Deren Ausgangsspannung errechnet sich mit  $R1$ ,  $R2$  und  $R3$  bzw. mit  $R1$ ,  $R2$  und  $R4$  nach den Formeln:

$$U_{OUT} = 1,25 \text{ V} \cdot \left( 1 + \frac{R2 \parallel R3}{R1} \right) \quad \text{bzw.} \quad U_{OUT} = 1,25 \text{ V} \cdot \left( 1 + \frac{R2 \parallel R4}{R1} \right)$$

Die Widerstände  $R3$  und  $R4$  müssen nur dann eingesetzt werden, wenn die Ausgangsspannung zu stark vom gewünschten Wert abweicht. Der Widerstandswert bestimmt sich dann durch Größe und Richtung der Abweichung.

Das Layout der Platine des Analogteils sowie deren Bestückungsplan zeigt Abb. A.6 und Abb. A.7. Ein Schaltbild des Digitalteils, das wie der praktische Aufbau angeordnet ist, zeigt Abb. A.8. Layout und Bestückungsplan des Digitalteils sind in den Abbildungen A.9 und A.10 dargestellt.

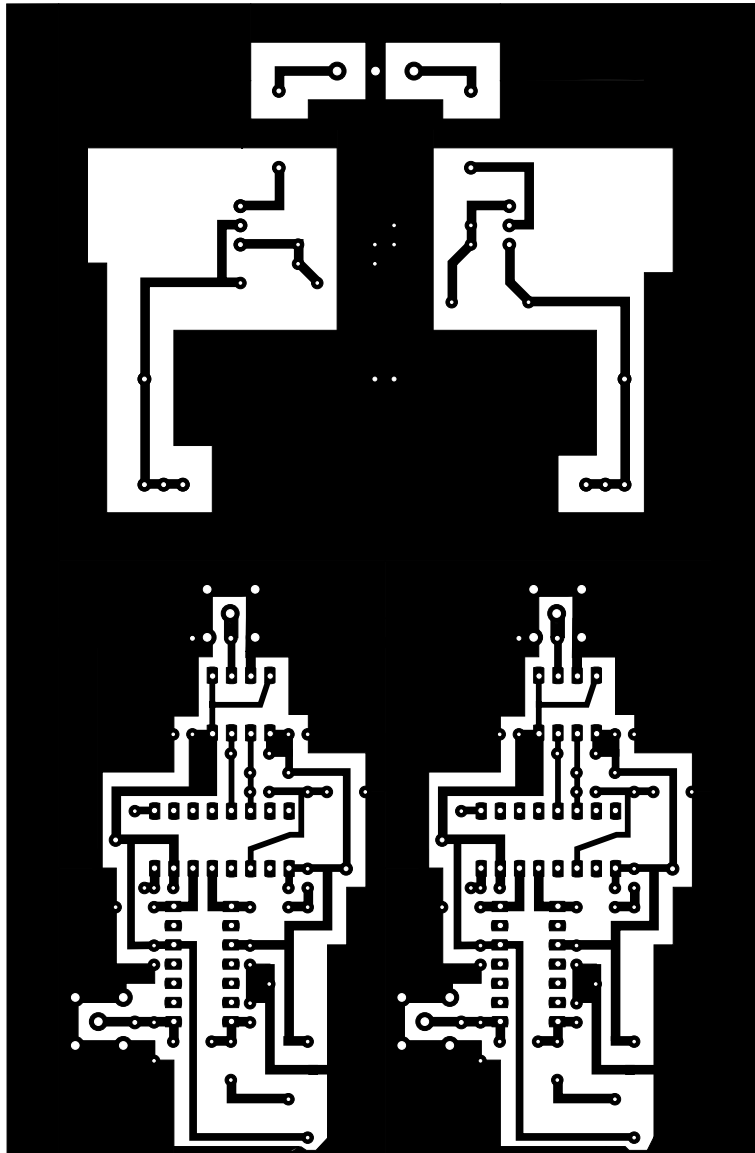


Abbildung A.6: *Layout der Platine des Analogteils mit Spannungsreglung*



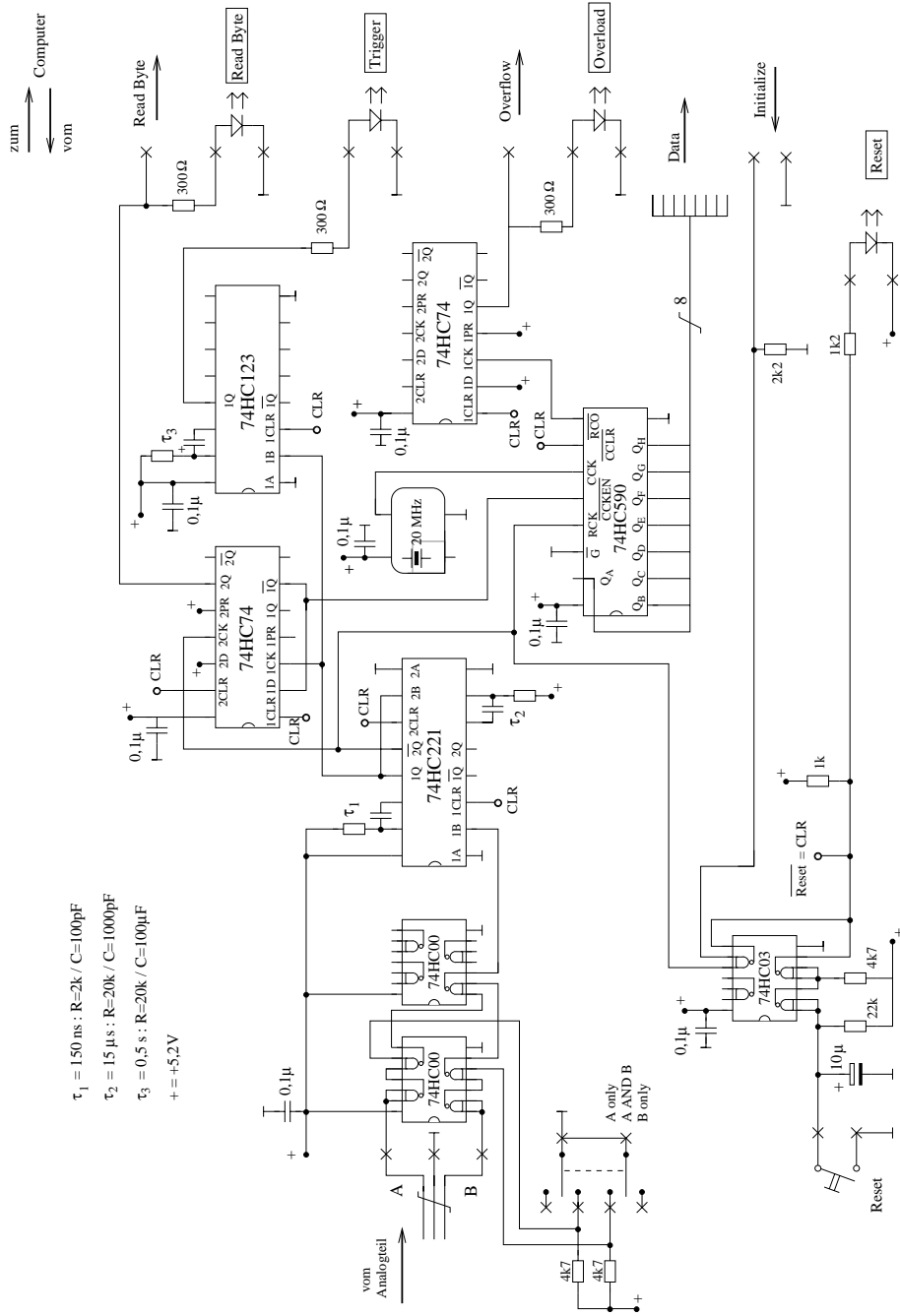


Abbildung A.8: Aufbausaltbild der Logikschaltung



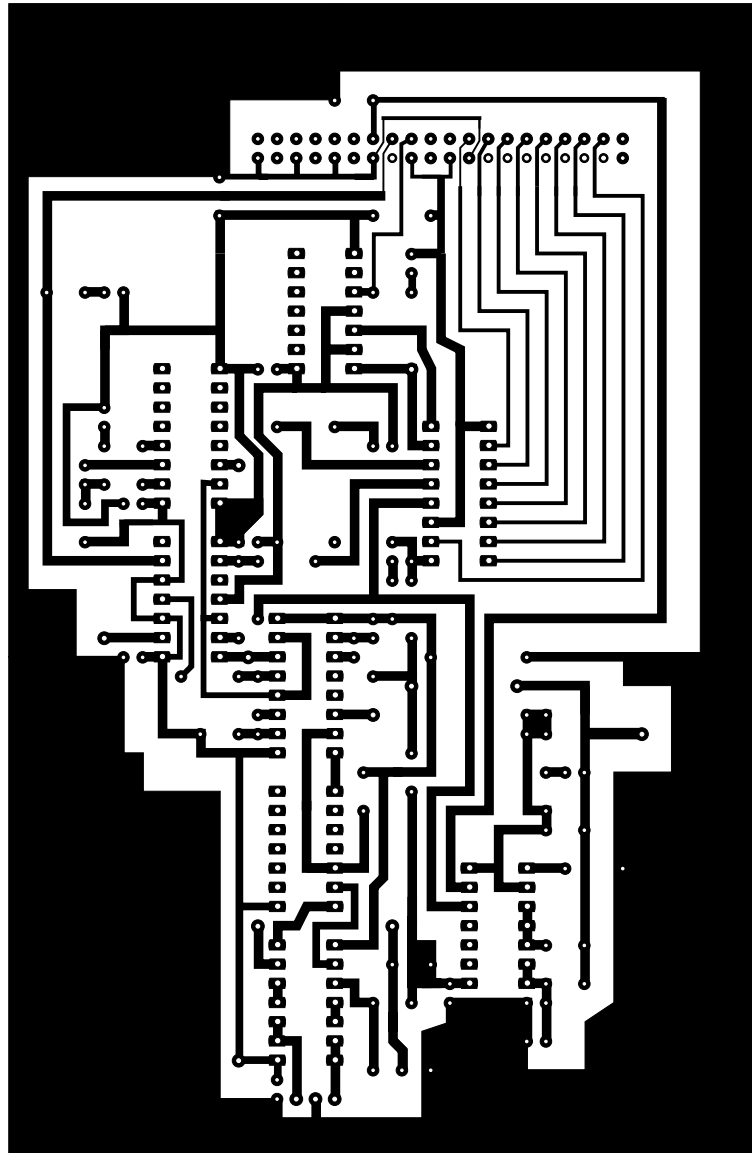


Abbildung A.9: *Layout der Platine des Logikteils*



### A.3 Schwierigkeiten beim Aufbau

Der Aufbau des Digitalteils der Schaltung ist problemlos durchführbar. Will man hingegen den Analogteil funktionstüchtig konstruieren, so muss man bei der Realisierung einige Arbeit mit der Abschottung der Schaltung gegen die Umwelt investieren. Betrachtet man sich die Aufgabe des Analogteils der Elektronik, nämlich 3 - 15 mV große 50 nS breite Signale in Signale definierter Länge mit TTL-Pegel zu wandeln, so stellt man fest, dass der Eingang der Schaltung sehr empfindlich ausgelegt werden muss. Diese Empfindlichkeit bringt nun mit sich, dass selbst kleine Einstreuungen wie Pulse aus dem PM behandelt werden. Solche störenden Einstreuungen können zum Beispiel entstehen, wenn andere elektrische Geräte ein- und ausgeschaltet werden. Die dabei erzeugten elektromagnetischen Wellen können dann in Teilen der Versuchsanordnung Spannungen induzieren, die die Größe und eine ähnliche Form wie die Pulse des PM haben. Damit werden sie auch als solche registriert. Diese Einstreuungen können sowohl an der Basis des Photomultipliers, im Verbindungskabel zur Elektronik als auch im Eingangsbereich der Analogschaltung stattfinden. Als Abwehrmaßnahmen wurde die Basis des PM in eine Stahlröhre gesetzt und die Kabelverbindung möglichst kurz gehalten. Des Weiteren wurde der Eingangsbereich der Schaltung mit einer Blechabdeckung versehen, diese stellt auch sicher, dass der Digitalteil keinen Einfluß auf das Verhalten des Analogteils hat.

Auch die Breitbandigkeit der Signalwandlerelektronik erfordert ein wenig Aufmerksamkeit. Hier muss man, um Schwingungen zu vermeiden, auf möglichst kurze Signalwege achten, und den Aufbau auf der Platine dahingehend optimieren. Des Weiteren ist die Massefläche möglichst groß zu gestalten, was dazu führt, dass die Oberseite der Platine metallisch belegt bleibt und an mehreren Stellen mit der Masse der Unterseite verbunden wird.

## Anhang B

# Die Anbindung der Elektronik an den Computer

Für die Datenerfassung der hier beschriebenen Versuche wurde der Computer ausgewählt. Mit ihm hat man auch die Möglichkeit, die Messung zu steuern. In unserem Fall heißt das konkret, dass der Computer für die Dauer der Datennahme die laufende Messung unterbricht. Die Anforderungen an Hard- und Software sind relativ gering. Bei meinem Versuchsaufbau wurde ein Laptop mit 386 Prozessor verwendet. Die Messsoftware wurde in Turbo Pascal 7 für Dos geschrieben. Als Schnittstelle wurde die Druckerschnittstelle verwendet.

Die Druckerschnittstelle besitzt drei Adressen, wobei jede Adresse in acht Bits unterteilt ist. Hier ist darauf zu achten, dass es Computer gibt, die dem Druckerport eine andere Adresse geben. Die drei Adressen der Druckerschnittstelle, die man auch Register nennt, sind: ein Statusregister, ein Steuerregister und ein Datenregister. Sie unterscheiden sich in ihren Zugriffsmöglichkeiten. Das Statusregister kann vom Computer aus nur gelesen werden, während das Steuerregister gelesen und beschrieben werden kann. Das Datenregister ist im allgemeinen nur zum Schreiben ausgelegt, was bei einer Druckerschnittstelle ja verständlich ist. Doch nutzt uns das wenig, da wir mit dem Datenregister die Daten, die unsere Schaltung uns bereitstellt, lesen wollen. Dafür kann man die unidirektionale Verwendung der Schnittstelle (nur schreiben) auf eine bidirektionale Verwendung (lesen und schreiben) umschalten. Um die Druckerschnittstelle auf bidirektional zu schalten, muss man Bit 7 der Adresse 102h von 0 auf 1 setzen. Dies ist allerdings nur möglich, wenn Bit 7 der Adresse 94h auf 0 gesetzt ist<sup>1</sup>. Tab. B.1 zeigt die schematische Belegung der Schnittstellenregister. Zu beachten ist, dass die Bits 3, 6 und 7 des Statusregisters sowie das Bit 2 des Steuerregisters in invertierter Form vorliegen. Bei der beschriebenen Realisierung werden diese Bits allerdings nicht verwendet. Die bei uns benötigten Bits sind nochmals in Tabelle B.2 dargestellt. Tabelle B.3 zeigt die zu den Registern gehörenden Adressen, wobei die bei einigen anderen Computermodellen verwendete Alternativadressen in Klammern geschrieben sind. Abb. B.1 stellt die Pinbelegung der Druckerschnittstelle dar. In der vorliegenden Realisierung wurde das Paper – Empty – Bit (PE – Bit) dazu verwendet, um zu erfahren, ob bei einem Zählvorgang ein Überlauf „Overflow“ stattgefunden

---

<sup>1</sup>Dies wird am Anfang des Programms durchgeführt.

Bit Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0
Daten Register	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Status Register	<i>BUSY</i>	<i>PCK</i>	PE	SLCT	<i>ERROR</i>			
Steuer Register					SLCT IN	<i>INIT</i>	AUTO	

Tabelle B.1: Schematische Belegung der Register des Druckerports nach [10]

Bit Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0
Daten Register	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Status Register			PE	SLCT				
Steuer Register							AUTO	

Tabelle B.2: Schematische Belegung der verwendeten Register des Druckerports

hat, das SLCT-Bit hat die Aufgabe dem Computer mitzuteilen, dass ein Ereignis stattgefunden hat („READ-BYTE“). Das AUTO-Bit wird zur Initialisierung der Schaltung verwendet. Der Zählerstand des Ausleseregisters des 74LS590 liegt am Datenregister. Multipliziert man den Zählerstand mit 50 ns, so erhält man die Zeit zwischen zwei Pulsen eines Doppelpulses. Falls allerdings ein Overflow stattgefunden hat, so wird der Zählerstand nicht weiter verwendet.

Register	Adresse
Daten	\$3bc (\$378)
Status	\$3bd (\$379)
Steuer	\$3be (\$37a)

Tabelle B.3: Zuordnung Register - Adresse nach [11]

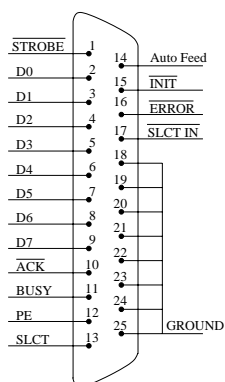


Abbildung B.1: Pinbelegung der Drucker-schnittstelle nach [10]

## Anhang C

# Das Mess- und Steuerprogramm

Das Computerprogramm, das die Messung steuert und die Daten speichert, wurde in Turbo Pascal 7 geschrieben. Diese Sprache ist in den meisten Schulen vorhanden, sehr sparsam im Umgang mit Ressourcen und auch relativ leicht zu lernen oder zumindest zu verstehen. Im folgenden wird einzeln auf die wesentlichen Programmteile eingegangen. Den Erklärungen folgt der jeweilige Teil des Quell-Codes.

Die erste Funktion, die wir uns anschauen, hat die Aufgabe, an der Drucker-schnittstelle nachzuschauen, ob das Signal „*Read-Byte*“ anliegt. Falls das Signal vorhanden ist, ist das ein Zeichen, dass der PM einen Puls von sich gegeben hat. Die Information dazu liegt in Bit 4 des Statusregisters. Möchte man sie separieren, wird der Inhalt des Statusregisters zuerst in eine Variable „*Status*“ geschrieben. Deren Zahlenwert gibt binär geschrieben das Statusregister wieder. Um nur Bit 4 anzuschauen, nutzt man das logische UND. Will man das  $n$ -te Bit separieren, so bildet man  $\text{Status} \text{ UND } 2^n$ . Ist nun  $\text{Status} = 2^n$  so ist Bit  $n$  des Registers gleich logisch eins, sonst ist es Null.

```
{** Die Funktion lese_bit schaut am Port nach, ob die **}  
{** Schaltung neue Daten bereitgestellt hat.          **}
```

```
Function lese_bit : boolean;
```

```
const   Lpt_Status = $3bd;
```

```
Var     Status      : byte;
```

```
Begin
```

```
    Status := port[Lpt_Status];           {* Portdaten holen   *}
```

```
    Status := Status AND 16;             {* lesebit separieren *}
```

```
    If Status = 16 then lese_bit := true {* lesebit auswerten *}
```

```
        else lese_bit := false;
```

```
end;
```

Die nun folgende Funktion „Ueberlauf“ arbeitet analog der vorangegangenen Funktion. Sie hat die Aufgabe nachzusehen, ob im Zähler der Schaltung ein Überlauf stattgefunden hat. Angezeigt wird dies durch eine logisch eins in Bit 5 des Status Registers. Hat ein Überlauf stattgefunden, so gehen wir davon aus, dass kein Zerfall stattgefunden hat.

```
{** Die Funktion Ueberlauf schaut am Port nach, ob im Zaehler **}
{** der Schaltung ein Ueberlauf stattgefunden hat. **}
```

```
Function Ueberlauf : boolean;
```

```
const LPT_Status = $3bd;
Var Status      : integer;
```

```
Begin
```

```
  Status := port[Lpt_Status];           { * Portdaten holen * }
  Status := Status AND 32;              { * Ueberlaufbit separieren * }
  If Status = 32 then Ueberlauf := true { * Ueberlaufbit auswerten * }
  else Ueberlauf := false;
```

```
end;
```

Die folgende Prozedur „Initialisieren“ ist für die Initialisierung der Schaltung zuständig. Legen wir an Bit 2 des Steuerregisters eine logisch Eins, so wird die Schaltung initialisiert, liegt hier eine logisch Null, so ist die Schaltung zum Messen freigegeben. Die Initialisierung können wir erreichen, indem wir port[Lpt\_Steuern] OR 2 bilden. Bilden wir statt dessen port[Lpt\_Steuern] AND 253, so wird Bit 2 des Steuerregisters auf logisch null gesetzt und es kann gemessen werden.

```
{** Mit der Prozedur Initialisieren kann die Schaltung **}
{** initialisiert werden. Waehrend der Datenuebernahme ist **}
{** die Schaltung generell zu initialisieren. **}
```

```
Procedure Initialisieren (Reset : boolean);
```

```
const Lpt_Steuern = $3be;
```

```
Begin
```

```
  If NOT Reset then
    port [LPT_Steuern] := port [Lpt_Steuern] OR 2 { * initialisiert * }
  else
    port [Lpt_Steuern] := port [LPT_Steuern] AND 253; { * Freigabe * }
```

```
end;
```

Die Prozedur „Einzel\_Koinzidenzmessung“ erledigt sowohl die Steuerung als auch die Datenerfassung von Einzel- und Koinzidenzmessungen. Es werden Zeitstempel an Anfang und Ende der Messung sowie zu jedem Ereigniss in eine Text-Datei geschrieben und am Bildschirm ausgegeben. Der Zeitstempel besteht aus Datum und Uhrzeit der Uhr des Computers. Am Ende der Messung wird nochmals die Gesamtzahl der Ereignisse ausgegeben.

```
{** Die Prozedur Einzel_Koinzidenzmessung regelt die Datenerfassung **}
{** sowohl fuer die Einzel- als auch fuer die Koinzidenzmessungen **}
```

```
Procedure Einzel_Koinzidenzmessung ;
```

```
type Date = Array[1..4] of word;
```

```
Var
```

```
  Datum, Uhrzeit : date;
```



```

warten : char;
Lesebefehl, Ende : Boolean;
Ereignisse, i : integer;
filenamezeit : string;
Zeiten : text;

```

**Begin**

```

leeren ;
writeln ( ' in welches file sollen die Zeiten gespeichert werden? ');
readln ( filenamezeit );
assign ( Zeiten, filenamezeit );
rewrite ( Zeiten );
writeln ( ' drücke eine Taste um die Messung zu starten ');
start := readkey;
leeren ;
writeln ( ' drücke eine Taste um die Messung zu beenden ');
Ereignisse := 0;
Initialisieren ( true );
getdate ( Datum[1], Datum[2], Datum[3], Datum[4] );
gettime ( Uhrzeit [1], Uhrzeit [2], Uhrzeit [3], Uhrzeit [4] );
For i:= 1 To 3 do write ( Zeiten, Datum[i], ' ');
For i:= 1 To 4 do write ( Zeiten, Uhrzeit [i], ' ');
writeln ( Zeiten );
repeat
  Lesebefehl := false;
  Ende := false;
  Initialisieren ( false );
  repeat
    Lesebefehl := lese_bit ;
    if keypressed then Ende := true;
  until Lesebefehl OR Ende;
  Initialisieren ( true );
  if Lesebefehl then Begin
    getdate ( Datum[1], Datum[2], Datum[3], Datum[4] );
    gettime ( Uhrzeit [1], Uhrzeit [2], Uhrzeit [3], Uhrzeit [4] );
    Ereignisse := Ereignisse + 1;
    write ( ' Ereignisse : ', Ereignisse, ' letztes um: ');
    for i := 1 to 3 do write ( Datum[i], ' ');
    for i := 1 to 4 do write ( Uhrzeit [i], ' ');
    writeln ;
    for i:=1 to 3 do write ( Zeiten, Datum[i], ' ');
    for i:= 1 to 4 do write ( Zeiten, Uhrzeit [i], ' ');
    writeln ( Zeiten );
  end;
until Ende;
getdate ( Datum[1], Datum[2], Datum[3], Datum[4] );
gettime ( Uhrzeit [1], Uhrzeit [2], Uhrzeit [3], Uhrzeit [4] );
for i:=1 to 3 do write ( Zeiten, Datum[i], ' ');
for i:= 1 to 4 do write ( Zeiten, Uhrzeit [i], ' ');
writeln ( ' Gesamtzahl der Ereignisse : ', Ereignisse );
close ( Zeiten );
writeln ( ' mit Tastendruck zurück zum Einzel-Koinzidenzmessungs Menue ');
warten := readkey;
warten := readkey;
end;

```

Die Funktionsweise der Prozedur „Zeitberechnung“ wird hier nicht explizit beschrieben. Sie bearbeitet Text-Dateien mit Zeitstempel wie sie die Prozedur „Einzel\_Koinzidenzmessung“ produziert. Die Aufgabe der Prozedur ist, die Zeit zwischen dem ersten Zeitstempel und den folgenden in Centisekunden auszurechnen. Die maximale Messzeit, also die maximale Zeitdifferenz zwischen dem ersten und dem letzten Zeitstempel, ist wegen der Beschränktheit des Typs *longint* auf etwa 248 Tage beschränkt. Bei der Implementierung der Prozedur „Zeitberechnung“ sind die Ausnahmen Schaltjahr und unterschiedliche Tagesanzahl der Monate berücksichtigt.

Die Prozedur „Auswertung“, die auch nicht explizit beschrieben wird, kümmert sich um eine Reduzierung der Datenmengen. Betrachtet man nämlich die Anzahl der Zeitstempel, die bei einer Messdauer von 24 Stunden und einer angenommenen Rate von 1 Hz anfallen, so kommt man auf 86.400 Ereignisse. Diese Anzahl Daten ist mit einer Tabellenkalkulation nur sehr schwerfällig zu verarbeiten. Deshalb werden die Daten schon an dieser Stelle ein wenig zusammengefasst. Die Prozedur „Auswertung“ fragt nach einer Intervallgröße und berechnet dann die Anzahl der Ereignisse in aufeinanderfolgenden Intervallen der Messzeit. Diese Daten werden in einer Datei gespeichert.

Die nun folgenden Prozeduren sind für die Steuerung und die Datenerfassung einer Lebensdauerermessung zuständig. Der Teil des Programms für die Lebensdauerermessung ist in der globalen Prozedur „Lebensdauerermessung“ untergebracht. In dieser globalen Lebensdauer-Prozedur existiert ein globaler Array, in dem die aktuelle Verteilung der Lebensdauerdaten gespeichert ist. Es kann sowohl ein schon existierendes Array aus einer Datei eingelesen als auch das aktuelle Array in eine Datei gespeichert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den aktuellen Date-Array zu initialisieren, um eine neue Messung zu starten.

Die Datenerfassung wird mit der Prozedur „lies\_Daten“ geregelt. Sie liest die Zeit, die im Datenregister der parallelen Schnittstelle steht und erhöht den entsprechenden Eintrag im Daten-Array.

```
{** Die Prozedur lies_Daten liest das Daten- **}  
{** register des Ports und schreibt die      **}  
{** Information zum Daten-Array dazu.      **}
```

```
Procedure lies_daten;
```

```
const Lpt_daten = $3bc;
```

```
Var Dauer : integer;  
    Stunde, Minute, Sekunde, Sek100 : word;
```

```
Begin
```

```
  If Not Ueberlauf then Begin
```

```
    Initialisieren (true);  
    dauer := port [Lpt_daten];  
    Anzahl_Ereignisse := Anzahl_Ereignisse + 1;  
    Daten [Dauer] := Daten [Dauer] + 1;  
    gettime (Stunde, Minute, Sekunde, Sek100);  
    Write ('Anzahl_Ereignisse :', Anzahl_Ereignisse);  
    write ('  letztes Ereigniss bei ', dauer * 50, ' ns und war :');  
    writeln (Stunde, ' ', Minute, ' ', Sekunde, ' ', Sek100);
```

```

    end
  else Initialisieren ( true );
end;

```

Die Prozedur „Messung\_fortsetzen“ steuert die Lebensdauermessung. Sie schaut, ob an der parallelen Schnittstelle ein Lesebefehl anliegt. Falls nun ein Lesebefehl vorhanden ist und im Zähler der Schaltung kein Überlauf stattgefunden hat, so wird die Prozedur „lies\_Daten“ aufgerufen, die die gemessene Lebensdauer einliest.

```

{*** Die Prozedur Messung_fortsetzen steuert den ***}
{*** eigentlichen Messvorgang der Lebensdauermessung ***}

```

```

Procedure Messung_fortsetzen ;

```

```

Var Lesebefehl, Ende : boolean;
    warten : char;

```

```

Begin

```

```

    leeren ;
    writeln ( ' druecke _Taste _um _Messung _zu _unterbrechen ' );
    Initialisieren ( true );
    repeat
        Ende := false ;
        Initialisieren ( true );
        Initialisieren ( false );
        repeat
            Lesebefehl := lese_bit ;
            if keypressed then Ende := true ;
        until Lesebefehl OR Ende ;
        if Lesebefehl AND NOT Ende then Begin
            lies_Daten
        end ;
    until Ende ;
    warten := readkey ;
end ;

```

# Anhang D

## Das Programmlisting

```
program Kamiokanne;

uses dos, crt;

const  vorraus = $94;
       uni_bi  = $102;

var    Auswahl : char;

{*** Die Prozedur leeren löscht den Bildschirminhalt. ***}

Procedure leeren;

var i: integer;

begin
    for i := 1 to 25 do
        writeln('L')
    end;

{*** Die Funktion lese_bit schaut am Port nach, ob die ***}
{*** Schaltung neue Daten bereitgestellt hat.          ***}

Function lese_bit : boolean;

const  Lpt_Status = $3bd;
Var    Status     : byte;

Begin
    Status := port[Lpt_Status];           {* Portdaten holen *}
    Status := Status AND 16;              {* lesebit separieren *}
    If Status = 16 then lese_bit := true  {* lesebit auswerten *}
    else lese_bit := false;

end;
```

---

```

{*** Die Funktion Ueberlauf schaut am Port nach, ob im äZähler ***}
{*** der Schaltung ein Ueberlauf stattgefunden hat. ***}

Function Ueberlauf : boolean;

const LPT_Status = $3bd;
Var Status      : integer;

Begin
    Status := port[Lpt_Status];           { * Portdaten holen * }
    Status := Status AND 32;             { * Ueberlaufbit separieren * }
    If Status = 32 then Ueberlauf := true { * Ueberlaufbit auswerten * }
        else Ueberlauf := false;
end;

{*** Mit der Prozedur Initialisieren kann die Schaltung ***}
{*** initialisiert werden. Waehrend der Dateneubernahme ist ***}
{*** die Schaltung generell zu initialisieren. ***}

Procedure Initialisieren (Reset : boolean);

const Lpt_Steuern = $3be;

Begin
    If NOT Reset then
        port [LPT_Steuern] := port[Lpt_Steuern] OR 2 { * initialisiert * }
    else
        port[Lpt_Steuern] := port[LPT_Steuern] AND 253; { * gibt zum Messen frei * }
    end;

{*** Die Prozedur Einzel_Koinzidenzmessung regelt die Datenerfassung ***}
{*** sowohl fuer die Einzel- als auch fuer die Koinzidenzmessungen ***}

Procedure Einzel_Koinzidenzmessung ;

type Date = Array[1..4] of word;

Var
    Datum, Uhrzeit : date;
    start : char;
    Lesebefehl, Ende : Boolean;
    Ereignisse, i : integer;
    filenamezeit : string;
    Zeiten : text;

Begin
    leeren ;
    writeln ( ' in _welches _file _sollen _die _Zeiten _gespeichert _werden _? _' );
    readln ( filenamezeit );
    assign ( Zeiten, filenamezeit );
    rewrite( Zeiten );
    writeln ( ' üdrcke _eine _Taste _um _die _Messung _zu _starten ' );

```

```

start := readkey;
leeren;
writeln ( 'üdrcke eine Taste um die Messung zu beenden' );
Ereignisse := 0;
Initialisieren ( true );
getdate ( Datum[1], Datum[2], Datum[3], Datum[4] );
gettime ( Uhrzeit [1], Uhrzeit [2], Uhrzeit [3], Uhrzeit [4] );
For i:= 1 To 3 do write ( Zeiten , Datum[i], ' ');
For i:= 1 To 4 do write ( Zeiten , Uhrzeit [i], ' ');
writeln( Zeiten );
repeat
  Lesebefehl := false;
  Ende := false;
  Initialisieren ( false );
  repeat
    Lesebefehl := lese_bit;
    if keypressed then Ende := true;
  until Lesebefehl OR Ende;
  Initialisieren ( true );
  if Lesebefehl then Begin
    getdate ( Datum[1], Datum[2], Datum[3], Datum[4] );
    gettime ( Uhrzeit [1], Uhrzeit [2], Uhrzeit [3], Uhrzeit [4] );
    Ereignisse := Ereignisse + 1;
    write ( ' Ereignisse : ', Ereignisse , ' letztes um: ');
    for i := 1 to 3 do write ( Datum[i], ' ');
    for i := 1 to 4 do write ( Uhrzeit [i], ' ');
    writeln;
    for i:=1 to 3 do write( Zeiten , Datum[i], ' ');
    for i:= 1 to 4 do write ( Zeiten , Uhrzeit [i], ' ');
    writeln( Zeiten );
  end;
until Ende;
getdate ( Datum[1], Datum[2], Datum[3], Datum[4] );
gettime ( Uhrzeit [1], Uhrzeit [2], Uhrzeit [3], Uhrzeit [4] );
for i:=1 to 3 do write( Zeiten , Datum[i], ' ');
for i:= 1 to 4 do write ( Zeiten , Uhrzeit [i], ' ');
writeln ( ' Gesamtzahl der Ereignisse : ', Ereignisse );
close ( Zeiten );
writeln ( ' mit Tastendruck zurück zum Einzel-Koinzidenzmessungs Menü' );
start := readkey;
start := readkey;
end;

{*** Diese Funktion berechnet, ob das ueberfuehrte Jahr ***}
{*** ein Schaltjahr ist ***}

function schaltjahr ( Jahr : integer ): boolean;
var hilf : boolean;

Begin
  hilf := (((jahr mod 4)=0) ANDNOT ((jahr mod 100)=0));
  schaltjahr := hilf OR ((jahr mod 400)=0);
end;

```

```

{Diese Prozedur berechnet die Zeit in 100 dertstel Sekunden      }
{zwischen zwei Zeiten, die aus Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute }
{Sekunde und 100 dertstel Sekunden bestehen, und gibt sie      }
{als longint in ein File aus                                     }

procedure Zeitberechnung;
type Zeiten = array [1..7] of longint;
        monatsmenge = set of byte;

Var lesefile , schreibfile : string;
        Zeit , Zeit1 , Zeit2 : Zeiten;
        monate : monatsmenge;
        lesen , schreiben : text;
        rechenbedingung : boolean;
        zeitdiff : longint;
        i : integer;

Begin
leeren;
writeln ( ' aus welchem File sollen die Zeiten gelesen werden?' );
readln ( lesefile );
writeln ( ' in welches File sollen die Zeiten gespeichert werden?' );
readln ( schreibfile );
assign ( lesen , lesefile );
assign ( schreiben , schreibfile );

reset ( lesen );
rewrite ( schreiben );
For i := 1 to 6 do
        read ( lesen , Zeit1 [ i ] );
        readln ( lesen , Zeit1 [ 7 ] );
        { writeln ( schreiben , '0' ); }
while NOT eof ( lesen ) do Begin
        for i := 1 to 6 do
                read ( lesen , zeit2 [ i ] );
                readln ( lesen , zeit2 [ 7 ] );
                for i := 1 to 7 do zeit [ i ] := 0;
                rechenbedingung := false;
                monate := [];
                zeitdiff := 0;

        { berechnung der Anzahl Tage falls unterschiedliche Jahre }
        { und ganze Monate }

        if Zeit2 [ 1 ] > Zeit1 [ 1 ] then
                begin
                        rechenbedingung := true;
                        case Zeit1 [ 2 ] of
                                1: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 334;
                                2: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 306;
                                3: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 275;
                                4: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 245;
                                5: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 214;
                                6: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 184;
                                7: Zeit [ 3 ] := Zeit [ 3 ] + 153;
                        end
                end

```

```

8: Zeit [3] := Zeit [3] + 122;
9: Zeit [3] := Zeit [3] + 92;
10: Zeit [3] := Zeit [3] + 61;
11: Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
end;
if schaltjahr (Zeit1 [1]) AND (Zeit1 [2]<3) then
  Zeit [3] := Zeit [3] + 1;
case Zeit2 [2] of
2: Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
3: Zeit [3] := Zeit [3] + 59;
4: Zeit [3] := Zeit [3] + 90;
5: Zeit [3] := Zeit [3] + 120;
6: Zeit [3] := Zeit [3] + 151;
7: Zeit [3] := Zeit [3] + 182;
8: Zeit [3] := Zeit [3] + 213;
9: Zeit [3] := Zeit [3] + 243;
10: Zeit [3] := Zeit [3] + 274;
11: Zeit [3] := Zeit [3] + 304;
12: Zeit [3] := Zeit [3] + 334;
end;
if schaltjahr (Zeit2 [1]) AND (Zeit2 [2]>1) then
  Zeit [3] := Zeit [3] + 1;
end;
{berechnung der tage, falls im gleichen Jahr und ganze Monate}

if (Zeit1 [1] = Zeit2 [1]) AND (Zeit2 [2]>(Zeit1 [2]+1)) then
begin
  rechenbedingung := true;
  for i := Zeit1 [2]+1 to Zeit2 [2]-1 do monate := monate + [ i];
  if (2 IN monate) AND schaltjahr (Zeit1 [1]) then
    Zeit [3] := Zeit [3] + 29;
  if (2 IN monate) AND (NOT(schaltjahr (Zeit1 [1]))) then
    Zeit [3] := Zeit [3] + 28;
  if 3 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
  if 4 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 30;
  if 5 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
  if 6 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 30;
  if 7 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
  if 8 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
  if 9 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 30;
  if 10 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 31;
  if 11 IN monate then Zeit [3] := Zeit [3] + 30;
end;
{berechnung der Tage von angebrochenen Monaten}

if (Zeit1 [1]<Zeit2 [1]) OR (Zeit1 [2]<Zeit2 [2]) then
begin
  rechenbedingung := true;
  if Zeit1 [2] IN [1,3,5,7,8,10,12] then
    Zeit [3] := Zeit [3] + 31 - Zeit1 [3];
  if Zeit1 [2] IN [4,6,9,11] then
    Zeit [3] := Zeit [3] + 30 - Zeit1 [3];
  if (Zeit1 [2] = 2) AND (schaltjahr (Zeit1 [1])) then
    Zeit [3] := Zeit [3] + 29 - Zeit1 [3];

```



---

```

    if (Zeit1 [2] = 2) AND (NOT(schaltjahr (Zeit1 [1]))) then
        Zeit [3] := Zeit [3] + 28 - Zeit1 [3];
        Zeit [3] := Zeit [3] + Zeit2 [3] - 1;
    end;

    {gleiche jahre, gleicher Monat aber ganze Tage}

    if (Zeit1 [1]=Zeit2 [1]) AND (Zeit1 [2]=Zeit2 [2]) AND (Zeit1 [3]+1<Zeit2 [3])
    then
        begin
            rechenbedingung := true;
            Zeit [3] := Zeit2 [3] - Zeit1 [3] - 1 ;
        end;

    {berechnung der Stunden von angebrochenen Tagen}

    if rechenbedingung OR (Zeit1 [3]<Zeit2 [3]) then
        begin
            rechenbedingung := true;
            Zeit [4] := 24 - Zeit1 [4] - 1;
            Zeit [4] := Zeit [4] + Zeit2 [4] ;
        end;

    {berechnung der ganzen Stunden, falls derselbe Tag}

    if (NOT rechenbedingung) AND (Zeit2 [4]>(Zeit1 [4]+1)) then
        begin
            rechenbedingung := true;
            Zeit [4] := Zeit2 [4] - Zeit1 [4] - 1;
        end;

    {berechnung der Minuten von angebrochenen Stunden}

    if rechenbedingung OR (Zeit2 [4] > Zeit1 [4]) then
        begin
            rechenbedingung := true;
            Zeit [5] := 60 - Zeit1 [5] - 1;
            Zeit [5] := Zeit [5] + Zeit2 [5] ;
        end;

    {berechnung der Minuten, falls dieselbe Stunde}

    if NOT rechenbedingung AND (Zeit2 [5] > (Zeit1 [5] + 1)) then
        begin
            rechenbedingung := true;
            Zeit [5] := Zeit2 [5] - Zeit1 [5] - 1;
        end;

    {berechnung der ganzen Sekunden, von angebrochenen Minuten}

    if rechenbedingung OR (Zeit2 [5] > Zeit1 [5]) then
        begin
            rechenbedingung := true;
            Zeit [6] := 60 - Zeit1 [6] - 1;
            Zeit [6] := Zeit [6] + Zeit2 [6] ;
        end;

```

```

{ berechnung der ganzen Sekunden }

    if NOT rechenbedingung AND ( Zeit2 [6] > ( Zeit1 [6]+1) ) then
    begin
        rechenbedingung := true;
        Zeit [6] := Zeit2 [6] - Zeit1 [6] - 1;
    end;

{ berechnung der sek100 von angebrochenen Sekunden }

    if rechenbedingung OR ( Zeit2 [6] > Zeit1 [6] ) then
    begin
        rechenbedingung := true;
        Zeit [7] := 100 - Zeit1 [7];
        Zeit [7] := Zeit [7] + Zeit2 [7];
    end;

{ berechnung der ganzen sek100 }

    if NOT rechenbedingung AND ( Zeit2 [7] > Zeit1 [7] ) then
        Zeit [7] := Zeit2 [7] - Zeit1 [7];
    zeitdiff := ((( (Zeit [3]*24) + Zeit [4])*60 + Zeit [5])*60 + Zeit [6])*100 + Zeit [7];
    writeln ( schreiben , zeitdiff );
end; { while not end of
      file }
close ( schreiben );
close ( lesen );
end;

procedure Auswertung;

Var anzahl, intervallgroesse : integer;
    lieswerte , schreibwerte : text;
    liesfile , schreibfile : string;
    zahl, zvergleich : longint;
Begin
leeren;
writeln ( ' In welche Zeitintervalle sollen die Messwerte eingeteilt werden?' );
writeln ( ' Gib deren ößGre in 100 dertstel Sekunden an: ' );
readln ( intervallgroesse );
writeln ( ' Aus welchem File sollen die Messwerte gelesen werden?: ' );
readln( liesfile );
assign( lieswerte , liesfile );
reset( lieswerte );
writeln ( ' In welches File sollen die Ergebnisse geschrieben werden?: ' );
readln( schreibfile );
assign( schreibwerte , schreibfile );
rewrite( schreibwerte );
zvergleich := 0;
anzahl := 0;

while not eof( lieswerte ) do Begin
    readln( lieswerte , Zahl );
    zahl := Zahl div intervallgroesse ;
    if zahl > zvergleich then Begin

```

```

        writeln (schreibwerte, Anzahl);
        Anzahl := 1;
        zvergleich := zvergleich + 1;
    end
    else Anzahl := Anzahl + 1;
end;
close (lieswerte);
close (schreibwerte);

end;

procedure Einzel_Koinzidenz_Steuerung ;

Var entscheidung : char;
begin
    repeat
        leeren ;
        writeln ( ' Einzel-Koinzidenzmessungs_Menue' );
        writeln ;
        writeln ;
        writeln ( ' Neue_Messung_starten , dann_üdrck_s ' );
        writeln ( ' Messung_Auswerten , dann_üdrck_a ' );
        writeln ( ' Zeitdifferenzen_ausrechnen . dann_üdrck_r ' );
        writeln ( ' zurück_zum_Anfangsmenue . dann_üdrck_q ' );
        entscheidung := readkey ;
        case entscheidung of
            's', 'S' : Einzel_Koinzidenzmessung ;
            'a', 'A' : Auswertung ;
            'r', 'R' : Zeitberechnung ;
        end;
    until ( entscheidung = 'q' ) OR ( entscheidung = 'Q' );
end;

{*** Die Prozedur Lebensdauerermessung regelt die ***}
{*** Datenerfassung fuer die Datenerfassung ***}
{*** einer Lebensdauerermessung ***}

Procedure Lebensdauerermessung ;

Var entscheidung : char;
    Daten : Array [1..256] of integer;
    Ereignisse : longint;
    Anzahl_Ereignisse : integer;

{*** Die Prozedur Messung_laden laedt eine schon ***}
{*** gespeicherte Messung in den Daten-Array ***}

Procedure Messung_laden ;

Var name : string;
    Datensatz : text;
    i : integer;

```

```

Begin
  leeren ;
  writeln ( ' gib  Namen des Files an, der geladen werde soll ' );
  readln ( name );
  assign ( Datensatz , name );
  reset ( Datensatz );
  i := 1;
  while NOT eof ( Datensatz ) Do Begin
    readln ( Datensatz , Daten [ i ] );
    i := i + 1;
  end;
  close ( Datensatz );
  if i <> 256 then
    write ( ' Der Datensatz hat nicht die geforderte Länge, ' );
    writeln ( ' er hat die Länge: ' , i );
end;

```

```

{*** Die Prozedur Messung_speichern speichert den ***}
{*** Daten-Array in ein Text-File ***}

```

```

Procedure Messung_speichern ;

```

```

Var Name      : string ;
      Datensatz : text ;
      i         : integer ;

```

```

Begin
  leeren ;
  write ( ' gib  Namen des Files an, in den die Aktuelle Messung ' );
  writeln ( ' gespeichert werden soll ' );
  readln ( Name );
  assign ( Datensatz , Name );
  rewrite ( Datensatz );
  For i := 1 to 256 do Begin
    writeln ( Datensatz , Daten [ i ] );
  end;
  close ( Datensatz );
end;

```

```

{*** Die Prozedur Messung ausgeben gibt ***}
{*** den Daten-Array auf den Bildschirm ***}

```

```

Procedure Datensatz_ausgeben ;

```

```

Var i : integer ;
      pause : char ;

```

```

Begin
  For i := 1 to 256 do write ( Daten [ i ], ' ' ) ;
  pause := readkey ;
end;

```

```

{*** Die Prozedur lies_Daten liest das Daten- ***}
{*** register des Ports und schreibt die ***}
{*** Information zum Daten-Array dazu. ***}

```

```

Procedure lies_datan ;

```

```

const Lpt_datan = $3bc;

```

```

Var Dauer : integer;
    Stunde, Minute, Sekunde, Sek100 : word;

```

```

Begin

```

```

If Not Ueberlauf then Begin

```

```

    Initialisieren ( true );
    dauer := port [ Lpt_datan ];
    Anzahl_Ereignisse := Anzahl_Ereignisse + 1;
    Daten [ Dauer ] := Daten [ Dauer ] + 1;
    gettime ( Stunde, Minute, Sekunde, Sek100 );
    Write ( 'Anzahl_Zerfaelle _:', Anzahl_Ereignisse );
    write ( ' _ _ _ letztes _Ereigniss _bei _', dauer * 50, ' ns _und _war _:' );
    writeln ( Stunde, ' _', Minute, ' _', Sekunde, ' _', Sek100 );
end

```

```

else Initialisieren ( true );

```

```

end;

```

```

{*** Die Prozedur Messung_fortsetzen steuert den ***}
{*** eigentlichen Messvorgang der Lebensdauermessung ***}

```

```

Procedure Messung_fortsetzen ;

```

```

Var Lesebefehl, Ende : boolean;
    warten : char;
    name : string;
    Messzeit : text;
    Jahr, Monat, Tag, wotag, Stunde, Minute, Sekunde, Sek100 : word;

```

```

Begin

```

```

    leeren ;
    write ( ' In _welches _File _soll _die _Anfangs _ _und _Endzeit _der _Messung ' );
    writeln ( ' geschrieben _werden? _:' );
    readln ( name );
    assign ( Messzeit, name );
    rewrite ( Messzeit );
    getdate ( Jahr, Monat, Tag, wotag );
    gettime ( Stunde, Minute, Sekunde, Sek100 );
    write ( Messzeit, Jahr, ' _', Monat, ' _', Tag, ' _' );
    writeln ( Messzeit, ' _', Stunde, ' _', Minute, ' _', Sekunde, ' _', Sek100 );
    writeln ( ' _üdrcke _Taste _um _Messung _zu _unterbrechen ' );
    Initialisieren ( true );
    Ereignisse := 0;
    repeat
        Ende := false;
        Initialisieren ( true );

```

```

    Initialisieren ( false );
  repeat
    Lesebefehl := lese_bit ;
    if keypressed then Ende := true ;
  until Lesebefehl OR Ende ;
  if Lesebefehl AND NOT Ende then Begin
    Ereignisse := Ereignisse + 1 ;
    lies_Daten
  end ;
until Ende ;
getdate ( Jahr , Monat , Tag , wotag ) ;
gettime ( Stunde , Minute , Sekunde , Sek100 ) ;
write ( Messzeit , Jahr , ' ' , Monat , ' ' , Tag , ' ' ) ;
writeln ( Messzeit , Stunde , ' ' , Minute , ' ' , Sekunde , ' ' , Sek100 ) ;
close ( Messzeit ) ;
warten := readkey ;
writeln ( ' Anzahl_Ereignisse : ' , Ereignisse ) ;
warten := readkey ;
end ;

```

```

{*** Die Prozedur Neue_Messung initialisiert den ***}
{*** Daten-Array und startet die Messung durch ***}
{*** die Prozedur Messung_fortsetzen ***}

```

```

Procedure Neue_Messung ;

```

```

Var i : integer ;

```

```

  Begin

```

```

    Anzahl_Ereignisse := 0 ;
    For i := 1 to 256 do Daten [ i ] := 0 ;
    Messung_fortsetzen ;

```

```

  end ;

```

```

begin                                     { * prozedur Lebensdauermessung * }

```

```

  repeat

```

```

    leeren ;
    writeln ( ' üLebensdauermen ' ) ;
    writeln ;
    writeln ;
    writeln ( ' Neue_Messung_starten , dann_üdrck_s ' ) ;
    writeln ( ' Alte_Messung_laden , dann_üdrck_l ' ) ;
    writeln ( ' Aktuelle_Messung_abspeichern , dann_üdrck_a ' ) ;
    writeln ( ' Aktuelle_Messung_fortsetzen , dann_üdrck_f ' ) ;
    writeln ( ' Aktuelle_Datensatz_ausgeben , dann_üdrck_d ' ) ;
    writeln ( ' üzurck_zum_üAnfangsmen , dann_üdrck_q ' ) ;
    entscheidung := readkey ;
    case entscheidung of
      's' , 'S' : Neue_Messung ;
      'l' , 'L' : Messung_laden ;
      'a' , 'A' : Messung_speichern ;
      'f' , 'F' : Messung_fortsetzen ;

```

```
        'd', 'D' : Datensatz_ausgeben ;
    end;
    until ( entscheidung = 'q' ) OR ( entscheidung = 'Q' );
end;

{*** Hauptprogramm ***}

Begin
    port [ vorraus ] := port [ vorraus ] AND 127;    { * setzt vorraussetzung * }
    port [ uni_bi ] := port [ uni_bi ] OR 128;      { * setzt port auf bidirektional * }
    repeat
        leeren ;
        writeln ( ' Hallo _und_Willkommen_zum_Kamiokanne_BMeprogramm ' );
        writeln ;
        writeln ;
        writeln ( ' üdrck_e_üfr_Einzelmessung ' );
        writeln ( ' üdrck_k_üfr_Koinzidenzmessung ' );
        writeln ( ' üdrck_l_üfr_Lebensdauermessung ' );
        writeln ( ' üdrck_q_üfr_beenden_des_Programms ' );
        Auswahl := readkey ;
        case Auswahl of
            'E', 'e' : Einzel_Koinzidenz_Steuerung ;
            'k', 'K' : Einzel_Koinzidenz_Steuerung ;
            'L', 'l' : Lebensdauermessung ;
        end;
    until ( Auswahl = 'q' ) OR ( Auswahl = 'Q' );
end.
```

# Literaturverzeichnis

- [1] HILSCHER, H.: Kosmische Myonen – Ein Hochenergieexperiment für die Schule. Praxis der Naturwissenschaften – Physik 3/41 (1992), 24–31
- [2] GEISBUSCH, J.: Lebensdauer und magnetisches Moment von Myonen aus der Höhenstrahlung. Staatsexamensarbeit, Mainz, 1991.
- [3] MAIER, D.: Zeitkorrelation im erweiterten ALEPH-Experiment. Diplomarbeit, Siegen, 1996
- [4] CLOSE, F., MARTEN, M., SUTTON, C.: Spurensuche im Teilchenzoo. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, 1989.
- [5] GRUPEN, C.: Teilchendetektoren. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1993.
- [6] ALLKOFER, O. C., GRIEDER P. K. F.: Physics Data, Cosmic Rays on Earth. Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik GmbH Karlsruhe, 1984.
- [7] KLEINKNECHT, K. Detektoren für Teilchenstrahlung. Teubner Studienbücher – Physik, Stuttgart, 3. Auflage, 1992.
- [8] GRÄNICHER, H.: Messung beendet – Was nun? vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH Zürich; Teubner Stuttgart, 1996, 2. Auflage
- [9] HALLIDAY, D., RESNICK, R.: Physik 2. Walter de Gruyter & Co, Berlin, 1994.
- [10] WINKLER, E., KOHLHOFF, K., RISSER, S.: Zur Funktionsweise eines Interfaces, Physik der Naturwissenschaften – Physik 6/48, 1999, 23–25
- [11] ERNST, M., STILLER A.: PC-Bausteine, Details über die Centronics-Parallele-Schnittstelle, c't Heft 6, 1988, Heinz Heise Verlag
- [12] GROOM, D. E.: Passage of Particles through matter. The European Physical Journal, Vol. 3, Number 1 – 4 1988, Review of Particle Physics, Springer Verlag.
- [13] Lehrplan Physik in der gymnasialen Oberstufe in Rheinland-Pfalz , 1999
- [14] KLEIN, B.: Zukunft der Arbeit, Fraunhofer IAO-interne Studie. Nichtveröffentlichtes Arbeitspapier. Mai 2000



# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und Ergebnisse anderer Autoren als solche kenntlich gemacht habe.

Mainz, Oktober 2000

(Martin Klein)