

KOSMISCHE MYONEN IN SCHULVERSUCHEN

Wissenschaftliche Prüfungsarbeit im Rahmen der
Ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien

eingereicht von
Matthias Fuidl
im September 2003

Gutachter:
Prof. Dr. H.-G. Sander
Prof. Dr. L. Köpke

„So schätzbar aber auch ein jeder Versuch einzeln betrachtet sein mag, so erhält er doch nur seinen Wert durch Vereinigung und Verbindung mit anderen.[...] Die Vermannigfaltigung eines jeden einzelnen Versuches ist also die eigentliche Pflicht des Naturforschers.“

(aus: Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt, J. W. von Goethe)

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
KAPITEL 1 EINLEITUNG	4
KAPITEL 2 GESCHICHTE DER ENTDECKUNG DES MYONS UND DER ERFORSCHUNG DER HÖHENSTRAHLUNG	6
2.1 ERFORSCHUNG DER HÖHENSTRAHLUNG	6
2.2 IDENTIFIZIERUNG DER TEILCHEN	7
2.3 DIDAKTISCHER HINWEIS	9
KAPITEL 3 GRUNDINFORMATIONEN ÜBER DIE KOSMISCHE STRAHLUNG	10
3.1 DIE PRIMÄRE KOSMISCHE STRAHLUNG	10
3.2 DIE SEKUNDÄRE KOSMISCHE STRAHLUNG	12
KAPITEL 4 DER TEILCHENZOO	15
4.1 FUNDAMENTALE WECHSELWIRKUNGEN	15
4.2 ELEMENTARTEILCHEN	15
4.3 MATERIE UND ANTIMATERIE	18
4.4 ANZAHL DER ELEMENTARTEILCHEN	18
4.5 AUSBLICK	19
KAPITEL 5 DIE UNTERSUCHUNGSOBJEKTE: MYONEN	20
5.1 ENTSTEHUNG DES MYONS	20
5.2 ZERFALL DES MYONS	22
5.3 DAS MYON AUF MEERESHÖHE	24
5.4 EIGENSCHAFTEN DER MYONEN IN DER ÜBERSICHT	25
KAPITEL 6 SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE	26
KAPITEL 7 CHERENKOVEFFEKT	28
KAPITEL 8 VORVERSUCH: CHERENKOVEFFEKT IN DER WELLENWANNE	31
8.1 VERSUCHSAUFBAU	31
8.2 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	32
8.3 DIDAKTISCHER HINWEIS	36
KAPITEL 9 AUFBAU DER VERSUCHE ZU KOSMISCHEN MYONEN	37
9.1 PHOTOMULTIPLIER	38
9.2 ELEKTRONIK	40

9.3 ANBINDUNG AN DEN COMPUTER	49
KAPITEL 10 VERSUCHSVORBEREITUNGEN.....	57
10.1 DIE EINSTELLUNGEN DER MESSELEKTRONIK.....	57
10.2 ÜBERPRÜFUNG DER ZEITMESSUNG BEIM MESSVORGANG LEBENSDAUER	59
KAPITEL 11 SCHULVERSUCHE	61
11.1 RATENMESSUNGEN	62
11.2 DURCHDRINGUNGSVERMÖGEN	64
11.3 WINKELVERTEILUNG	66
11.4 BESTIMMUNG DER LEBENSDAUER	69
KAPITEL 12 LEHRPLANBEZUG	72
12.1 RHEINLAND-PFALZ	72
12.2 HESSEN.....	73
KAPITEL 13 SCHLUSSBEMERKUNGEN	75
ANHANG 1 NOBELPREISE.....	77
ANHANG 2 ANWENDUNGEN DER MYONEN UND DER KOSMISCHEN HÖHENSTRAHLUNG.....	79
ANHANG 3 SCHALTPLÄNE.....	82
ANHANG 4 BEZUGSQUELLEN	88
ANHANG 5 GROßEXPERIMENTE IM ÜBERBLICK	90
ANHANG 6 KURZBEDIENUNGSANLEITUNG ZUR MYONENKANNE.....	93
ANHANG 7 WAHRHEITSTABELLEN.....	96
ANHANG 8 DOKUMENTATION DES PC-PROGRAMMS.....	97
ANHANG 9 ABBILDUNGS-, FORMEL- UND TABELLENVERZEICHNIS	108
ANHANG 10 LITERATURVERZEICHNIS	110
DANKESCHÖN	112
ERKLÄRUNG.....	114
IMPRESSUM.....	115

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Staatsexamensarbeit beschäftigt sich mit *Myonen aus der kosmischen Höhenstrahlung* und soll neben der Präsentation der Ergebnisse auch als Handreichung für interessierte Lehrerinnen und Lehrer dienen.

Es wurde ein vorliegendes Experiment (von Martin Klein [KI00]) weiterentwickelt, so dass es in der Schule Anwendung finden kann. Hierfür musste die vorhandene Analogelektronik verbessert und der Digitalteil der Schaltung modifiziert werden. Abgerundet wird das Ganze durch ein neu entwickeltes LabVIEW-Computerprogramm für die Erfassung der Messwerte unter dem an Schulen üblichen Betriebssystem Windows. Mit Hilfe des Programms werden die Messwerte auch aufbereitet, so dass die Auswertung der Messungen mit Hilfe jedes Tabellenkalkulationsprogramms oder ähnlicher Software erfolgen kann.

Mit dem Versuchsaufbau sind mehrere Messungen rund um das Thema möglich: Raten-, Koinzidenz- und Lebensdauermessungen von Myonen. Diese Messungen werden im einzelnen vorgestellt. In der Schule erschließt sich so das Thema *Hochenergiephysik* experimentell mit relativ einfachen Mitteln. Eine Verbindung zur *Speziellen Relativitätstheorie* wird ebenfalls aufgezeigt und die Bezüge zu aktuell gültigen Lehrplänen erläutert.

Ein Vorversuch in einer Wellewanne, ebenfalls in der Schule nachvollziehbar, schließt die Lücke von der Theorie zum Experiment, da Myonen mit den menschlichen Sinnen nicht erfassbar sind.

Auf das Thema dieser Arbeit stieß ich im Rahmen eines Schülerlabors im Jahr 2002, in dessen Rahmen fünf Schülerinnen und Schülern anhand verschiedener Experimente die Möglichkeit gegeben wurde, die Themengebiete *Teilchenphysik*, *Spezielle Relativitätstheorie* und *Myonen* kennen zu lernen.

Gewählt habe ich dann das Thema, weil es in engem Bezug zur Schule steht und mir durch Professor Dr. Sander die Möglichkeit gegeben wurde, eine Arbeit mit fachdidaktischen Aspekten zu schreiben. Die Durchführung ähnlicher Versuche an anderen Universitäten in Rahmen von Schülerinnen- und Schülerlabors und die aktuelle Forschungsarbeit auf dem Gebiet der kosmischen Strahlung haben meine Wahl bekräftigt (vgl. Anhang 5).

Die Arbeit hat immer wieder spannende experimentelle und theoretische Fragen aufgeworfen und hat mich bis zur Fertigstellung nicht mehr losgelassen.

Mit Begeisterung wurden die Experimente schon während der Entwicklungsphase in einem Kurs für physikinteressierte Schülerinnen und Schüler in Kassel an der Albert-Schweitzer-

Schule unter der Betreuung von Klaus-Peter Haupt aufgenommen. Im Frühjahr 2003 fand am Institut für Physik eine Lehrerinnen- und Lehrerfortbildung zum Thema „Kosmische Myonen im Schulversuch“ statt. Zehn Lehrer hatten die Möglichkeit, die Versuche in Ansätzen durchzuführen. Durch diese beiden Einsätze gab es die Möglichkeit, sich mit Lehrerinnen und Lehrern direkt rückzukoppeln. Ideen und Wünsche der Lehrenden konnten somit in die vorliegenden Versuchsaufbauten eingearbeitet werden.

Des Weiteren wurde der Versuch im Rahmen von Posterausstellungen am „Institutstreff 2003“ des Instituts für Physik und auf einem Fachdidaktikseminar der WE-Heraeus-Stiftung zum Thema „Naturphänomene für den Physikunterricht aus fachdidaktischer und fachwissenschaftlicher Sicht“ vorgestellt.

Kapitel 2

Geschichte der Entdeckung des Myons und der Erforschung der Höhenstrahlung

Die *kosmische Strahlung*¹ gelangte in das Blickfeld der Forscherinnen und Forscher, als man Anfang des 20. Jahrhunderts begann, das Phänomen der Radioaktivität zu untersuchen. Hierbei stellte man, auch wenn keine radioaktiven Quellen in der Nähe waren, eine Reststrahlung (Untergrundstrahlung) fest. Vermutet wurde, dass es sich hierbei um eine natürliche Radioaktivität des Erdmantels handele.

2.1 Erforschung der Höhenstrahlung

1910 experimentierten der Jesuitenpater Wulf auf dem Eiffelturm und der Österreicher Viktor Franz Hess mit Ballonen und stellten fest, dass die Strahlung mit der Höhe zunimmt. Letzterer stellte außerdem durch Experimente am Tag und in der Nacht fest, dass die Strahlung unabhängig von der Sonneneinstrahlung immer im selben Maß vorhanden ist. Weitere Versuche deckten das starke *Durchdringungsvermögen* der Strahlung auf².

Während des 1. Weltkrieges bis ins Jahr 1922 wurde nicht oder nur eingeschränkt an der kosmischen Strahlung weiter geforscht. Ab 1926 herrschte dann das allgemeine Einverständnis, dass die kosmische Strahlung existiert [Mo49].

Um 1928 begann eine Zeit neuer Beobachtungen: Bothe und Kolhorster zeigten mit Hilfe von Geiger-Müller-Zählrohren in *Koinzidenzschaltungen*³, dass die Höhenstrahlung geladene Teilchen enthält. Mit ihrer Anordnung stützten sie ebenfalls die These einer Abhängigkeit der Intensität der kosmischen Strahlung (in niedriger Höhe) von der geomagnetischen Breite. Diese Ergebnisse demonstrierten die Anwesenheit von *geladenen* Teilchen in der Primärstrahlung (vgl. Kapitel 3.1.2) und dass zumindest einige der Bestandteile von *jenseits* der Atmosphäre stammen.

¹ Diese Bezeichnung geht nach [Hi92] auf Millikan zurück.

² Hess zitiert in [Si90]: „Die Ergebnisse der vorliegenden Beobachtungen scheinen am ehesten durch die Annahme erklärt werden zu können, dass eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben her in unsere Atmosphäre eindringt und auch noch in deren untersten Schichten einen Teil der in geschlossenen Gefäßen beobachteten Ionisation hervorruft. Die Intensität dieser Strahlung scheint zeitlichen Schwankungen unterworfen zu sein, welche bei einstündigen Ablesungsintervallen noch erkennbar sind. Da ich im Ballon weder bei Nacht noch bei einer Sonnenfinsternis eine Verringerung der Strahlung fand, so kann man wohl kaum die Sonne als Ursache dieser hypothetischen Strahlung ansehen, wenigstens solange man nur an eine direkte Gammastrahlung mit geradliniger Fortpflanzung denkt.“ (Physikal. Zeitschrift, XIII von 1912)

³ lat. coincidentia: das Zusammenfallen

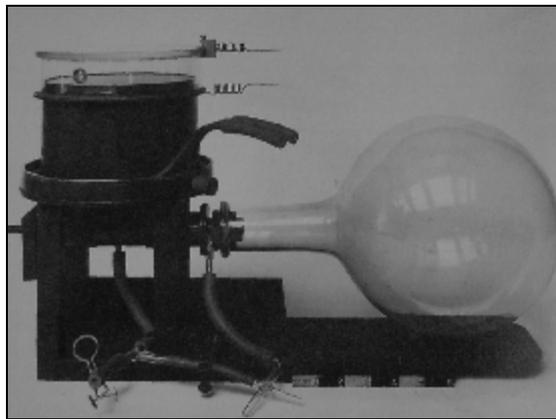


Abbildung 1: Wilsonsche Nebelkammer [C186].
Die eigentliche Kammer ist der links oben aufgesetzte Glaskolben.

Eine weitere bahnbrechende Erfindung dieser Zeit war die *Wilsonsche Nebelkammer* (siehe Abbildung 1): In einer Kammer expandiert, nach Öffnen eines Ventils, mit Wasserdampf gesättigte Luft. Diese kühlt sich dabei ab und der Wasserdampf kondensiert an Ionen, welche sich entlang einer Teilchenbahn gebildet haben.

Mit Hilfe der Nebelkammer beobachtete Skobelzyn Ende der 1920er Jahre zusammengehörige Teilchenspuren, welche simultan durch die Kammer flogen - so genannte Teilchenschauer. 1932 wurde die Nebelkammer von Blackett und Occhialini insofern verbessert, als dass die Expansion der Luft in der Kammer nicht mehr zufällig, sondern gesteuert erfolgt: Die Kammer expandiert direkt nach dem Durchflug eines Teilchens durch Zähler ober- bzw. unterhalb der Kammer. Mit dieser Weiterentwicklung stieg die Zahl der Fotos, auf denen tatsächlich Teilchenspuren zu finden waren, enorm an.

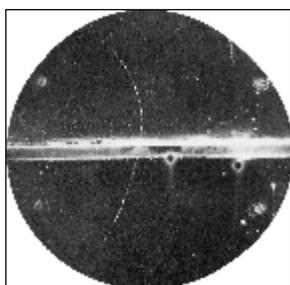


Abbildung 2: Positron-Nachweis in einer Nebelkammer [C186]

Das Teilchen muss vom unteren Bildrand in die Kammer eingedrungen sein, „da seine Bahn – nachdem es bei Durchgang durch die sechs Millimeter dicke Bleiplatte in der Bildmitte Energie verloren hatte – in der oberen Kammerhälfte stärker gekrümmt ist. Aus der Richtung der Krümmung konnte man dann schließen, dass das Teilchen positiv geladen war; für ein Proton oder ein Alphateilchen [beide deutlich schwerer als das Positron] war die Spur jedoch zu schwach [C186].“

2.2 Identifizierung der Teilchen

1932 entdeckte Anderson ebenfalls mit Hilfe einer Aufnahme aus der Wilsonschen Nebelkammer das *Positron* (vgl. Abbildung 2). Ab Mitte bis Ende der 1930er Jahre identifizierte

man in der kosmischen Strahlung zusätzlich *Photonen*, welche aus Paarzerstrahlung (auch Paarvernichtung) und Bremsstrahlung⁴ erzeugt werden.

1937 entdeckten Neddermeyer und Anderson sowie Street und Stevenson ein weiteres Teilchen, das so genannte *Mesotron*⁵. Seine Spur auf den Nebelkammeraufnahmen ließ den Schluss zu, dass es einfach positiv oder negativ geladen sein und seine Masse zwischen der des Elektrons und der des Protons liegen musste. Die Abschätzungen der Mesotronmasse lagen zwischen 130 und 240 Elektronenmassen.

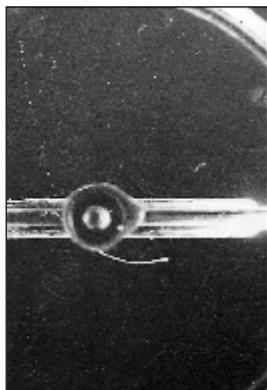


Abbildung 3: Aufnahme eines Myonzerfalls [Cl86].

Das eindringende positive Myon hinterlässt eine dünne Spur am linken oberen Bildrand. Nachdem es das Geiger-Müller-Zählrohr in der Bildmitte passiert und somit Energie verliert, ist die Bahn stärker gekrümmt und dicker. „Die Kammer war nicht empfindlich genug, um die Spur des Positrons aufzunehmen, das beim anschließenden Zerfall des Myons entstanden ist [Cl86].“

Ausgehend von der Reichweite der Kernkräfte und der Heisenberg'schen Unschärferelation stellte Yukawa 1935 in Japan eine neue *Theorie der Kernkräfte* auf [Hi92]. In seiner Theorie werden die Nukleonen durch ein Feld zusammen gehalten. Die Masse des Feldquants⁶, welches diese Kraft übertragen soll, liegt etwa bei 200 Elektronenmassen. Yukawas Vorstellung war, dass dieses Quant auch den β -Zerfall⁷ vermittelt. Hierfür muss es selbst instabil sein und in ein Elektron-Neutrino-Paar zerfallen. Zusätzlich muss es in drei Ladungszuständen (positiv, neutral und negativ) vorkommen, da die Kernkraft ladungsunabhängig ist und der Satz über die Erhaltung der Ladung gelten muss.

Um nun die beiden Teilchen miteinander identifizieren zu können, konzentrierte man sich ab 1940 auf *Lebensdauer*messungen an Mesotronen und entdeckte, dass die Lebensdauer des Mesotrons um das 20fache zu groß war, als dass es das Yukawa-Teilchen sein könnte.

Endgültige Klarheit herrschte ab 1947, als es Powell auf einem Berg in Frankreich⁸ gelang, einen, in heutiger Sprache formuliert, Pion-Myon-Zerfall aus den Teilchenspuren zu rekonstruieren⁹ [He53 und Cl86].

⁴ Nach [Ot98]: Strahlung, „die ein hochenergetisches Elektron beim Passieren des starken Coulombfeldes eines Atomkerns als kurzwellige Strahlung im Röntgenbereich emittiert.“

⁵ griech. Vorsilbe meso- (mittel-)

⁶ von Yukawa als *Meson* bezeichnet

⁷ Genauer: b^- -Zerfall: $n \rightarrow p + e^- + \bar{n}_e$ und b^+ -Zerfall: $p \rightarrow n + e^+ + n_e$

⁸ Pic du Midi de Bigorre in den Pyrenäen

1948/1949 wurde der β -Zerfall der Mesotrone untersucht und es stellte sich heraus, dass dieser ein Energiespektrum aufweist und somit mindestens ein 3-Teilchen-Zerfall sein muss [He53].

Somit stand fest, dass Yukawas Quant nicht das Mesotron ist, sondern ein weiteres Teilchen, welches man heute als *Pion* bezeichnet (vgl. Kapitel 4).

Das 1937 in der Höhenstrahlung entdeckte Mesotron ist kein Meson, sondern ein Lepton (vgl. ebenfalls Kapitel 4) und wird heute als *Myon* bezeichnet. Das Myon war das erste Beispiel für Elementarteilchen, welche für den Aufbau und/oder den Zerfall von Atomen und Kernen nicht notwendig sind [BS4.92]. Die Ladung des Myons wurde schon 1945 z.B. von Hazen durch vergleichende Messungen der Ionisation von Elektronen und Myonen in einer Wilsonschen Nebelkammer zu einer Elementarladung bestimmt.

Ende der 1930er Jahre wurde der erste Teilchenbeschleuniger in Bristol in Betrieb genommen. Bemerkenswert ist jedoch, dass alle grundlegenden Eigenschaften der Myonen, wie Ladung, Masse, Zerfallsschema, Spin und Lebensdauer, vor dieser Ära der immer größer werdenden Beschleuniger gefunden wurden [We69]. Mit Hilfe der Beschleuniger fand man dann einen ganzen *Teilchenzoo*, der bis 1950 noch im verborgenen lag (siehe Kapitel 4). Ab 1950 bis heute experimentiert man wieder in Ballonen und Flugzeugen, um die Zusammensetzung der primären kosmischen Strahlung zu erforschen.

2.3 Didaktischer Hinweis

Als Anregung für die Behandlung des historischen Aspekts im Schulunterricht und als interessante Zusammenstellung soll die Tabelle im Anhang 1 dienen, die alle *Nobelpreise* auflistet, die in der Physik für Leistungen im Rahmen der Forschungsanstrengungen auf den Gebieten der kosmischen Strahlung und der Elementarteilchenphysik vergeben wurden.

⁹ Diese Aufnahmen wurden nicht mehr mit einer Wilsonkammer gemacht, sondern mit Platten, welche mit Fotoemulsionen bestrichen wurden und auf denen sich die Teilchen sozusagen selbst fotografierten.

Kapitel 3

Grundinformationen über die kosmische Strahlung

Die Versuche des 20. Jahrhunderts und darüber hinaus zur kosmischen Strahlung haben das Phänomen genauer beleuchtet.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Entstehung und die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung gegeben: Man unterscheidet die *primäre kosmische Strahlung*, die auf die Erdatmosphäre einfällt und die *sekundäre Komponente*, welche erst durch Wechselwirkungen in der Atmosphäre erzeugt wird¹⁰.

3.1 Die primäre kosmische Strahlung

Die Strahlung, mit welcher die Erdatmosphäre beschossen wird, wird mit Hilfe von Flugzeugen, Ballonen, Satelliten und auf Raumstationen erforscht. Sie setzt sich nach Tabelle 1 zusammen aus [Gr85]:

Wasserstoffkerne (Protonen)	ca. 85%
Heliumkerne (α -Teilchen ¹¹)	ca. 12,5%
Kerne ¹² mit $Z > 3$	ca. 2,50%
Elektronen	ca. 1%

Tabelle 1: Zusammensetzung der Primärstrahlung.

In der Strahlung überwiegen die vollständig ionisierten Atomkerne¹³. Diese Fragmente haben eine lange Reise durch den interstellaren Raum mit seinen meist irregulären Magnetfeldern hinter sich. Mit großen Experimenten wird versucht, die Quellen dieser Strahlung zu erforschen (siehe Anhang 5).

3.1.1 Quellen der kosmischen Strahlung

„Sie [die kosmische Strahlung] kann nicht als irgendeine Reststrahlung des Urknalls gedeutet werden, da die Anwesenheit schwerer Kerne dagegen spricht. Sie kann auch nicht als Folge irgendwelcher energiereicher Explosionen veralteter Sterne gedeutet werden, da dann die Zahl der schweren Kerne größer sein müsste [Si90].“

¹⁰ Die an den kosmischen Quellen erzeugte Strahlung nennt man *primordiale Strahlung*. Sie wird auf ihrer Reise durchs All stark verändert und durch diverse Magnetfelder abgelenkt.

¹¹ ein Verband aus zwei Neutronen und zwei Protonen

¹² Kernladungszahl: Sie ist die Ladungszahl eines Atomkerns (also die Anzahl der Protonen im Kern) und identisch mit der Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente.

¹³ Atome, die alle Elektronen aus der Hülle abgegeben haben.

Mittlerweile kommen zum Beispiel Sonnenwinde, Novae, Supernovae und Pulsare in Frage [Gr00] (vgl. auch Abbildung 4).

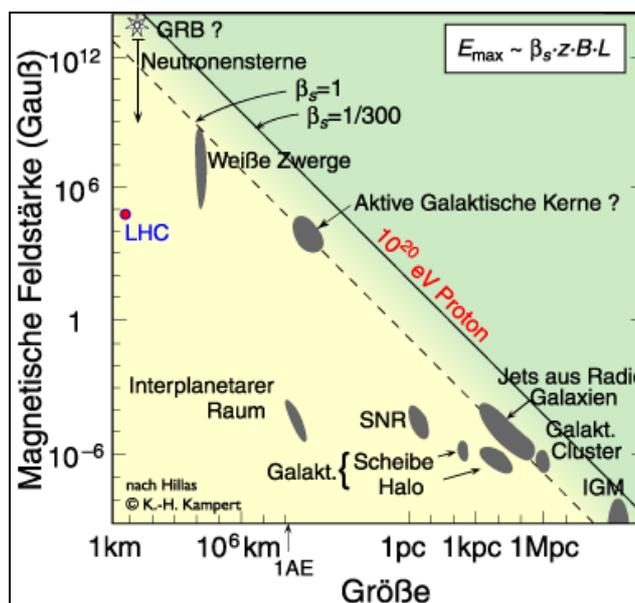


Abbildung 4: Kandidaten für die Quellen der höchstenergetischen Primärstrahlung [Ka03] (in doppellogarithmischer Darstellung!)¹⁴. Nach [Ka03] müssten solche Kandidaten oberhalb der gestrichelt eingezeichneten Diagonalen liegen, um ein Proton auf eine Energie von 10^{20} eV zu beschleunigen¹⁵.

3.1.2 Zusammensetzung der Primärstrahlung

Die Zusammensetzung der Primärstrahlung (vgl. Abbildung 5), aufgeschlüsselt nach Elementen, ist interessant, weil sich in ihr die universelle *Elementverteilung* in unserem Universum¹⁶ widerspiegelt.

Die Ausnahmen in der Häufigkeit bei Lithium ($Z=3$), Beryllium ($Z=4$) und Bor ($Z=5$) und Elementen unterhalb der Eisengruppe ($20 \leq Z \leq 26$) lassen sich dadurch erklären, dass diese Kerne Fragmente schwererer Elemente (Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff, bzw. Eisen) darstellen [Gr85, Gr00].

¹⁴ Im sog. *Hillas-Diagramm* wird die charakteristische Größe L eines Objektes gegen die dort herrschende oder vermutete Magnetfeldstärke B aufgetragen. Objekte unterhalb der gestrichelten Linie können keine Protonen ($z=1$) auf Energien oberhalb von 10^{20} eV beschleunigen [BI01]. Der Faktor $\beta_s = v_s/c$ berücksichtigt die Geschwindigkeit v_s der beschleunigenden Schockwellen relativ zur Lichtgeschwindigkeit c . Realistische Werte liegen bei $\beta_s = 1/300$ [BI00]. Bei Supernovae liegt β_s bei 0,05 [Ka03].

Es bedeuten: $1AE = 1,5 \cdot 10^{11}$ m, $1Parsec (pc) = 3,1 \cdot 10^{16}$ m bzw. 3,26 Lichtjahre, *SNR*: Super Nova Überrest, *IGM*: intergalaktisches Magnetisches Feld, *GRB*: Gamma Ray Burst (Röntgenstrahlungsexplosionen), *LHC*: Large Hadron Collider: Experiment am CERN (vgl. Anhang 5).

¹⁵ Primärteilchen dieser hohen Energie wurden 1962 in New Mexiko (10^{20} eV) und 1995 vom Fly's Eye Detektor ($3,2 \cdot 10^{20}$ eV) gesehen [Ka03]. Letzteres transportierte somit eine makroskopische Energie von 50 Joule! Dies entspricht etwa der Energie eines Tennisballs bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h [BI00]

¹⁶ Die Elemente im Universum entstehen durch Elementsynthese im frühen Universum (bis ${}^7\text{Li}$), Kernfusion in Sternen (bis etwa ${}^{26}\text{Fe}$) und alle weiteren durch Neutroneneinfang und Supernovae [Sch01].

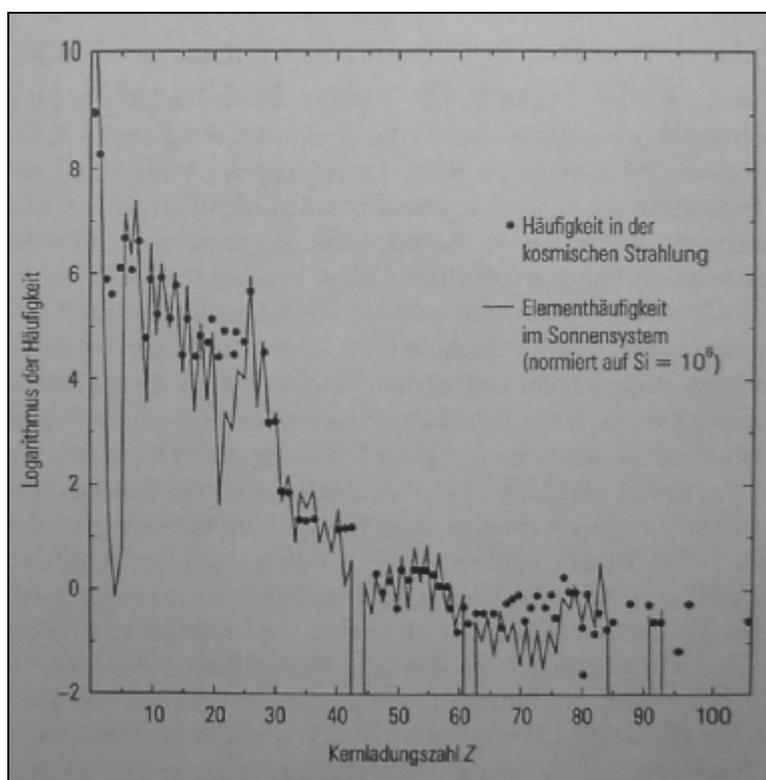


Abbildung 5: Elementhäufigkeiten in der Milchstraße im Vergleich zur Zusammensetzung der primären kosmischen Strahlung nach [Gr85].

3.2 Die sekundäre kosmische Strahlung

Treffen die oben genannten Primärteilchen auf die Atmosphäre, so lösen sie in einer Höhe von 15-20 km, je nach Energie und Teilchensorte, elektromagnetische und/oder hadronische Kaskaden, so genannte *ausgedehnte Luftschaer* aus.

3.2.1 Luftschaer

Diese Luftschaer sind ein komplexer Vorgang, den man sich am besten an Hand der Abbildung 6 vorstellen kann.

Alle primären kosmischen Teilchen, unabhängig von ihrer Natur, lösen diese Schauer aus, da die Lufthülle der Erde ein „Target“¹⁷ von 12 Kernwechselwirkungslängen oder 28 Strahlungslängen“ [Gr85] darstellt. Daher ändert sich die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung durch die Wechselwirkungen in der Atmosphäre völlig und von der ursprünglichen, primären kosmischen Strahlung, kommt praktisch nichts auf Meereshöhe an.

Die Atomkerne der primären kosmischen Strahlung werden bei Kollisionen in der obersten Atmosphärenschicht zertrümmert. Zu den Fragmenten, größtenteils Protonen, Neutronen und leichte Kerne, gehören auch die *Pionen*. „Die ungeladenen Pionen zerfallen rasch in

¹⁷ engl. Ziel

Gammaquanten, die auf ihrem Weg durch die Atmosphäre Schauer von Elektronen und Positronen erzeugen. Die geladenen Pionen, die nicht sofort von Atomkernen in der Atmosphäre absorbiert werden, zerfallen während ihres Fluges in Myonen. Diese Myonen durchqueren die Atmosphäre mit Leichtigkeit und können sogar tief in den Erdboden eindringen. Obwohl sie viel langlebiger sind als Pionen, zerfallen sie aber auch oft schon im Flug [Cl86]“ in ein Elektron, ein Neutrino und ein Antineutrino (vgl. Kapitel 5.2).

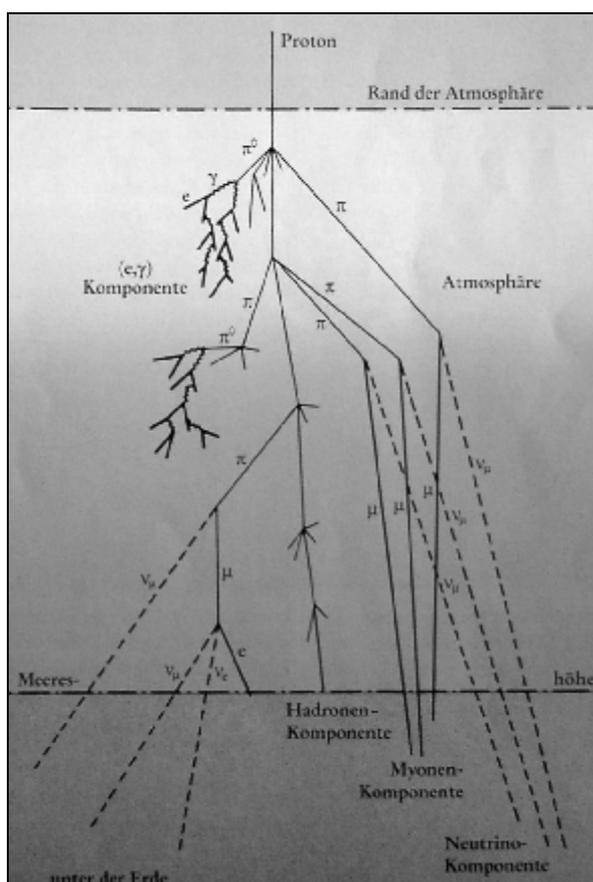


Abbildung 6: Darstellung der Schauer in der Erdatmosphäre [Gr85].
Hier ist ein Schema aufgezeigt, keine Teilchenspuren.

Die sekundäre kosmische Strahlung lässt sich in 3 Komponenten unterteilen: (1) die Elektron-Photon-Komponente, (2) die hadronische Komponente und (3) die durchdringende Komponente, zu denen neben Neutrinos auch die Myonen gehören.

Auf Meereshöhe registriert man bei den geladenen Teilchen ca. 80% Myonen, etwa 20% Elektronen und, je nach Energie, um 1% Hadronen.

Die Entstehung der Schauer ist durch vielfache Forschungsergebnisse mittlerweile geklärt. Als Beispiel wird in Kapitel 5 die Entstehung der Myonen aufgezeigt.

3.2.2 Kosmische Strahlung unter der Erde

In der Erdoberfläche wird die Elektronen-, Photonen- und Hadronenkomponente der sekundären kosmischen Strahlung schon in geringen Tiefen (ca. 10 m) vollständig absorbiert. Die Myonen geben ihre Energie in elektromagnetischen Wechselwirkungen langsam ab und können somit große Tiefen unter der Erdoberfläche erreichen. Noch 1.000 m unter der Erdoberfläche ist der Fluss atmosphärischer Myonen etwa 2 Teilchen pro Quadratmeter und Stunde [Gr85].¹⁸

3.2.3 Ausblick

Die weitere Erforschung der kosmischen Strahlung, ihrer Zusammensetzung, Herkunft und Energie bis in Bereiche, die hundertmillionenfach über den irdischen Beschleunigern liegen, bleibt ein spannendes und zukunftsweisendes Unternehmen. Das Verständnis von der Struktur der Materie und dem Wirken der fundamentalen Kräfte wird auf Grund der interdisziplinären Forschung in der Teilchenastrophysik, welche alle Wellenlängenbereiche und alle Teilchen des Kosmos ausnutzt, weiter anwachsen [BI00].

Die kosmische Strahlung mit ihren extrem hohen Energien (vgl. Abbildung 4) wird „noch für manche Überraschung, sei es in der Elementarteilchenphysik oder der Astrophysik, sorgen [Gr85].“

Für die Beantwortung mancher wichtiger Fragen auf diesen Gebieten sind Experimente in der Vorbereitungsphase oder laufen schon und nehmen Daten (vgl. Anhang 5).

¹⁸ Die Exkursion eines Lehrers mit einer Gruppe von Schülerinnen, Schülern, Lehrern, Höhlenkletterern und Bergsteigern in französische Höhlen bei Grenoble stand zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch aus. Die Ergebnisse finden sich nach der Auswertung evtl. auf der Homepage www.physik.uni-mainz.de/lehramt [25.08.2003].

Kapitel 4

Der Teilchenzoo

Um die in den vorangegangenen und in den folgenden Kapiteln erwähnten Teilchen besser einordnen zu können, wird eine knappe Übersicht über einige der heute bekannten *61 Elementarteilchen* (vgl. Kapitel 4.4) gegeben.

4.1 Fundamentale Wechselwirkungen

Das so genannte *Standardmodell* fasst den zurzeit gültigen Wissensstand über Elementarteilchen zusammen. Die Quantentheorie beinhaltet die Quantenchromdynamik (QCD) und die Zusammenfassung der schwachen und der elektromagnetischen Kraft zur elektroschwachen Wechselwirkung (Abbildung 7)¹⁹.

	schwache	elektromagnetische	stark
	elektroschwache		
wirkt auf:	schwache Ladung	elektrische Ladung	Farbladung
erfahrende Teilchen	Quarks, Leptonen	alle elektrisch geladenen Teilchen	Quarks, Gluonen
Austauschteilchen	W^+ , W^- , Z^0	Photon γ	Gluonen

Abbildung 7: Übersicht und Eigenschaften der fundamentalen Wechselwirkungen (WW) nach [PD02]

4.2 Elementarteilchen

Um die Teilchen einzuordnen, bedient man sich zweier charakteristischer Eigenschaften: Dem Spin²⁰ eines Teilchens und der Wechselwirkung, der es unterliegt.

4.2.1 Fermionen²¹ und Bosonen²²

Unterscheidet man nach dem Spin, so gibt es Teilchen mit halbzahligem Spin, die so genannten *Fermionen*, und Teilchen mit ganzzahligem Spin, die *Bosonen*.

¹⁹ Weitere Ausführungen zum Standardmodell findet man in jedem Teilchenphysik-Buch (z.B. [BS4.92], [Co96]). Über die elektroschwache Wechselwirkung kann man sich z.B. in S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 19 (1967) 1264 und A. Salam, in *Elementary Particle Theorie* informieren.

²⁰ Den Spin, intrinsischer Drehimpuls, kann man sich bildlich als Rotation des Teilchens um eine imaginäre Achse vorstellen. Er kann, anders als der Bahndrehimpuls, „ganze und halbganze Vielfache von $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ als Werte annehmen [Cou96].“ In der Quantenmechanik äußern sich ein halbzahligem Spin in einer antisymmetrischen und ein ganzzahligem Spin in einer symmetrischen Wellenfunktion.

²¹ Benannt nach dem italienischen Physiker E. Fermi.

²² Benannt nach dem indischen Physiker Sir J. C. Bose.

Fermionen sind die Teilchen aus denen sich Materie zusammensetzt. Bosonen hingegen sind die Austauscheteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen. So wie elektrisch geladene Teilchen interagieren indem sie Photonen austauschen, werden bei der starken Kraft zwischen Teilchen, die Farbladung²³ tragen, *Gluonen* ausgetauscht. Auf Grund der Quanten- und der Gruppentheorie gibt es acht Gluonen²⁴.

elektroschwache WW Spin 1			starke WW... Spin 1		
Name:	Masse GeV/c ²	elektrische Ladung	Name	Masse GeV/c ²	elektrische Ladung
Photon γ	0	0	Gluonen	0	0
W ⁺	80,4	-1			
W ⁻	80,4	+1			
Z ⁰	91,187	0			

Abbildung 8: Bosonen nach [PD02], „Träger der Kräfte“, Spin=0,1,2,...

Bei der schwachen Kraft hingegen sind die Austauscheteilchen W- und Z-Bosonen. Da Leptonen, Photonen, W- und Z-Bosonen keine starken Interaktionen zeigen, tragen sie auch keine Farbladung. Ihre Massen und Ladungen können Abbildung 8 entnommen werden.

LEPTONEN... Spin 1/2				Familie	QUARKS... Spin 1/2			
Teilchen		Masse GeV/c ²	elektr. Ladung		Teilchen		Masse GeV/c ²	elektr. Ladung
ν_e	Elektronneutrino	$<1 \cdot 10^{-8}$	0	1	u	up	0,003	2/3
e	Elektron	$511 \cdot 10^{-6}$	-1		d	down	0,006	-1/3
ν_μ	Myonneutrino	$<2 \cdot 10^{-6}$	0	2	c	charm	1,3	2/3
μ	Myon	$106 \cdot 10^{-3}$	-1		s	strange	0,1	-1/3
ν_τ	Tauneutrino	$<0,02$	0	3	t	top	175	2/3
τ	Tau	1,7771	-1		b	bottom	4,3	-1/3

Abbildung 9: Fermionen (Leptonen und Quarks) nach [PD02]²⁵, „Konstituenten der Materie“

²³ Die Farbladung eines Teilchens hat nichts mit den Farben des Lichts zu tun! Vielmehr stellt sie eine Quantenzahl, wie z.B. die Ladung, dar.

²⁴ Gluonen bestehen aus einer Farb- und einer Antifarbkomponente. Da es drei Farben gibt, könnte man auf Grund der drei Farbladungen auf neun Gluonen kommen. Dem ist aber nicht so! Wegen der Quantentheorie sind auch Mischzustände erlaubt und weil die starke Kraft eine Eichtheorie ist, liegt eine Symmetrie der Farben vor. Diese beiden Fakten ergeben dann neun Gluonen, von denen eins farblos ist und somit keine Rolle bei der Übertragung der starken Kraft spielt.

²⁵ Die Masse der Teilchen ist in GeV/c² (vg. „E=mc²“) gegeben, da die Energieeinheit in der Teilchenphysik das Elektronenvolt (eV) ist, also die Energie, die ein Elektron dazu gewinnt, wenn es eine Potenzialdifferenz von einem Volt durchläuft. 1 GeV=10⁹ eV=1,6·10⁻¹⁹ J

Die elektrische Ladung ist in Einheiten der Protonenladung gegeben, welche in SI Einheiten 1,6·10⁻¹⁹ C beträgt.

Des Weiteren können Fermionen auf Grund der Erhaltungssätze nur paarweise erzeugt bzw. vernichtet werden. Bosonen unterliegen keiner solchen Einschränkung. Es ist üblich, die Fermionen in drei *Familien* zu unterteilen. Die erste Familie bilden dann Elektron, Elektron-neutrino²⁶, Up-Quark und Down-Quark. Die beiden anderen Familien sind in Abbildung 9 ersichtlich.

4.2.2 Quarks

Quarks sind ebenfalls Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen. Sie treten immer gebunden und nur in Dubletts²⁷ (in Mesonen) oder in Triplets²⁸ (in Baryonen) auf. Diese Bindung resultiert aus dem Austausch von Gluonen zwischen den Farbladung tragenden Teilchen. Es gibt insgesamt sechs Quarks in je drei Farbladungen (vgl. Abbildung 9).

Ihre Größe liegt, bei der heutigen Auflösung der „Mikroskope“ (meint in dieser Beziehung Beschleuniger und Speicherringe), unterhalb von 10^{-17} m [Gr00].

Symbol	Name	Quark-Zusammensetzung	elektr. Ladung	Masse GeV/c ²	Spin
p	Proton	u u d	1	0,938	$\frac{1}{2}$
\bar{p}	Antiproton	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$	-1	0,938	$\frac{1}{2}$
n	Neutron	u d d	0	0,940	$\frac{1}{2}$
Λ	Lambda	u d s	0	1,116	$\frac{1}{2}$

Abbildung 10: Einige Baryonen und Antibaryonen nach [PD02].

4.2.3 Hadronen²⁹ (Mesonen³⁰ und Baryonen³¹) und Leptonen³²

Charakterisiert man die Teilchen nach der Art der Wechselwirkung, so prüft man, ob ein Teilchen der starken Kraft (Kernkraft) unterliegt. Ist dies der Fall, so liegt ein *Hadron* vor. Diese unterscheidet man ebenfalls noch einmal nach ihrem Spin. Hadronen mit ganzzahligem Spin sind *Mesonen*; besitzen sie einen halbzahligem Spin, so nennt man sie *Baryonen*. Baryonen bestehen aus drei Quarks oder drei Antiquarks, Mesonen aus je einem Quark und Antiquark (vgl. Abbildung 10 bzw. Abbildung 11).

²⁶ Neutrino ist die ital. Verkleinerungsform von Neutron.

²⁷ paarweise

²⁸ In 3er Gruppen

²⁹ griech. *hadros* (stark)

³⁰ griech. Vorsilbe *meso-* (mittel-)

³¹ griech. *barys* (schwer)

³² griech. Vorsilbe *lepto-* (dünn, klein, leicht,...). Lepton war die kleinste griech. Münze.

Leptonen hingegen sind Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen, die nicht der starken Kraft unterliegen. Zu ihnen gehören zum Beispiel das Elektron und sein schwerer Bruder, das Myon (siehe Abbildung 9).

Symbol	Name	Quark-Zusammensetzung	elektr. Ladung	Masse GeV/c ²	Spin
π^+	Pion	$u \bar{d}$	1	0,140	0
K^-	Kaon	$s \bar{u}$	-1	0,494	0
ρ^+	Rho	$u \bar{d}$	1	0,770	1
B^0	B-Null	$d \bar{b}$	0	5,279	0

Abbildung 11: Einige Mesonen nach [PD02].

4.3 Materie und Antimaterie

Für jeden Teilchentyp gibt es einen korrespondierenden Antiteilchentyp, üblicherweise gekennzeichnet durch einen Querbalken über dem Teilchensymbol. Teilchen und Antiteilchen haben gleiche Masse und Spin, aber entgegengesetzte Ladung. Manche neutralen Bosonen sind ihre eigenen Antiteilchen (zum Beispiel Z^0 und das Photon γ , nicht aber B^0).

4.4 Anzahl der Elementarteilchen³³

Eine kurze Rechnung, die auch in der Schule evtl. von Interesse und anwendbar ist, macht klar, wie viele Elementarteilchen bekannt sind:

In jeder der fermionischen Teilchenfamilie kommen 2 Leptonen und 2 Quarks vor. Die Quarks gibt es in je 3 Farben. Das macht zusammen 8 Teilchen pro Familie.

Da man 3 Familien unterscheidet, gibt es 24 Fermionen. Zu jedem dieser Teilchen gibt es ein Antiteilchen, dies ergibt also schon 48 Teilchen.

Die zwischen den Materieteilchen wirkenden Kräfte beruhen auf den Austauscheteilchen, den Bosonen aus Abbildung 8³⁴. Da es acht Gluonen gibt, zählt man 12 Bosonen. Außerdem soll es noch das Higgs-Teilchen geben, ein weiteres Boson, welches benötigt wird, um die Massen der W- und Z-Bosonen zu erklären³⁵.

Somit gibt es nach dieser Zählweise insgesamt 61 Elementarteilchen!³⁶

³³ Entliehen aus <http://www.kworkquark.net> [17.08.2003]

³⁴ Wenn man das Austauscheteilchen der Schwerkraft, das Graviton nicht mitzählt (es wird in der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie der Wellenfelder postuliert).

³⁵ Der Higgs-Mechanismus ist beschrieben in: P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 12 (1964) 132 und Phys. Rev. 145 (1966) 1156.

³⁶ Hierbei wurde berücksichtigt, dass Baryonen und Mesonen aus Quarks zusammengesetzt sind und in dieser Beziehung also nicht elementar sind.

4.5 Ausblick

Das bisher noch nicht experimentell nachgewiesene Higgs-Boson macht deutlich, dass das Standardmodell noch keine abschließende Antwort auf die Frage der Zusammensetzung der Materie sein kann. „Aber die ersten Hinweise zu seiner Erweiterung kommen nicht aus Beschleuniger-Experimenten sondern aus Untersuchungen der kosmischen Strahlung [Gr00].“ Dies ist immer wieder Anreiz weiter zu forschen, um das Modell zu bestätigen, und/oder neue Teilchen zu entdecken. Beiträge hierzu könnten einige der in Anhang 5 kurz vorgestellten Experimente liefern. Außerdem stellt sich die Frage, ob ein Modell mit 61 Teilchen als *Standardmodell* gelten kann, oder ob es nicht ein fundamentaleres System gibt. Mit den Ideen zur *Großen vereinheitlichen Theorie* sind Grundsteine für eine gemeinsame theoretische Beschreibung der elektromagnetischen, der starken und der schwachen Kraft gelegt³⁷.

³⁷ Engl. Grand unifying Theorie (GUT). Vgl. z.B. die beiden populärwissenschaftlichen Bücher von Stephen Hawking *Eine kurze Geschichte der Zeit* und *Das Universum in der Nussschale*.

Kapitel 5

Die Untersuchungsobjekte: Myonen

„Who ordered that?“³⁸ soll Isidore Rabi gefragt haben, als Neddermeyer und Anderson das Myon entdeckt hatten (vgl. Kapitel 2). Die Tatsache, dass es neben Elektron und Positron noch ein weiteres elektronartiges Teilchen gab, veranlasste ihn zu dieser Frage. „Es scheint ganz unnötig, dass die Natur mehr als eine Spielart desselben Teilchens hervorgebracht hat [Cl86].“ Rabis Frage ist bis heute unbeantwortet geblieben. Sie ist 1975 sogar noch verschärft worden, als Perl ein weiteres schweres Lepton, das Tau-Teilchen, entdeckte [Gr00]. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Eigenschaften der Myonen zusammengetragen werden.

5.1 Entstehung des Myons

Die Myonen entstehen durch den *schwachen Zerfall von Pionen und Kaonen* der sekundären kosmischen Strahlung in der Atmosphäre.

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

Tabelle 2: Reaktionen, welche Kaonen, Lambda-Hyperonen (Λ) und Sigma-Hyperonen (Σ) hervorbringen. Protonen (p), Neutronen (n) und Pionen (π) sind die Ausgangsteilchen dieser Reaktionen³⁹.

Pionen bilden den Hauptanteil der hadronischen Teilchenschauer. Kaonen sind „seltsame“ Teilchen. Wegen der Erhaltung der Quantenzahl „Seltsamkeit“, können sie nur mit einem weiteren seltsamen Teilchen (meist ein Hyperon⁴⁰) erzeugt werden („assoziierte K-Produktion“). Tabelle 2 zeigt die typischen Erzeugungswege auf [Hi92].

³⁸ engl. „Wer hat das bestellt?“

³⁹ Geladene und neutrale Pionen entstehen neben Kernbruchstücken durch die Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit der Luft in der Atmosphäre (vgl. Abschnitt 3.2.1).

⁴⁰ Ein Hyperon ist ein „seltsames“ Baryon. „Seltsamkeit“ ist eine Quantenzahl.

Sind die Teilchen erst einmal erzeugt, so zerfallen sie auch schon wieder; die Lebensdauer der geladenen Pionen liegt bei 26 ns. Die wichtigsten Wege der Myonenerzeugung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Zerfallsreaktion	Lebensdauer in s	relat. Häufigkeit in % ⁴¹
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	$2,60 \cdot 10^{-8}$	≈ 100
$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	$2,60 \cdot 10^{-8}$	≈ 100
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	≈ 64
$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	≈ 21
$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	≈ 64
$K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	≈ 21
$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$	$0,80 \cdot 10^{-10}$	≈ 48
$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$	$1,48 \cdot 10^{-10}$	≈ 100
$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$	$2,63 \cdot 10^{-10}$	≈ 64

Tabelle 3: Zerfallskanäle zur Myonenerzeugung nach [Hi92].

Da die Myonen hauptsächlich aus dem Zerfall der geladenen Pionen entstehen, wird dieser hier näher erläutert.

5.1.1 Der Zerfall geladener Pionen

Pionen sind Mesonen und bestehen somit aus einem Quark-Antiquark-Paar. Die geladenen Pionen π^+ , bzw. π^- setzen sich aus Up- und Antidown- bzw. aus Down- und Antiup-Quark zusammen⁴². Als Zerfallsprodukt der Pionen kommen nur Leptonen in Frage, da Pionen die leichtesten Hadronen sind. Des Weiteren können Leptonen nur paarweise erzeugt werden (vgl. Kapitel 4.2.1). Daher entstehen bei einem Pionzerfall⁴³ ein Myon und ein Myonneutrino

⁴¹ Relative Häufigkeit dieser Zerfallsreaktion gegenüber allen andere denkbaren Reaktionen mit denselben Startteilchen.

⁴² Das π^0 besteht aus einer Mischung von einem Up-Antiup- und einem Down-Antidown-Quarkpaar. Es zerstrahlt nach einer Lebensdauer von $0,8 \cdot 10^{-16}$ s in zwei Photonen. Dies ist eine elektromagnetische Wechselwirkung im Gegensatz zum Zerfall geladener Pionen (vgl. Fußnote 43).

⁴³ Ein Vorgang welcher der schwachen Wechselwirkung unterliegt.

oder ein Elektron und ein Elektronneutrino⁴⁴. Somit sind vier Zerfallskanäle möglich [Ge91] (vgl. Tabelle 4).

p^+	\rightarrow	$e^+ + n_e$	bzw.	p^-	\rightarrow	$e^- + \bar{n}_e$
p^+	\rightarrow	$m^+ + n_m$	bzw.	p^-	\rightarrow	$m^- + \bar{n}_m$

Tabelle 4: Zerfallskanäle der geladenen Pionen.

Jedoch ist der Zerfall in Elektronen, bzw. Positronen unterdrückt und somit der Zerfall in Myonen etwa 10.000mal wahrscheinlicher [Gr00]. Eine schematische Darstellung dieses Zerfalls gibt Abbildung 12 wieder.

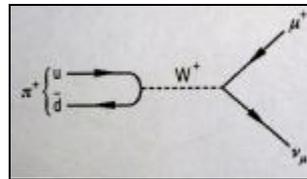


Abbildung 12: Feynmandiagramm des Zerfalls des (positiven) Pions [Gr00].

5.2 Zerfall des Myons

Das Myon ist nicht stabil und zerfällt nach einer mittleren Lebensdauer von 2,2 μs in seinen „kleinen Bruder“ das Elektron. Jedoch verhalten sich positive und negative Myonen in Materie unterschiedlich [Ge91]. Um die Lebensdauer der Myonen zu bestimmen, sollen sie bei diesem Versuch in Wasser gestoppt werden (siehe Kapitel 10).

5.2.1 Zerfall des (freien) positiven Myons (μ⁺)

	m^+	\rightarrow	\bar{n}_m	+	e^+	+	n_e
L_μ	-1		-1		0		0
L_e	0		0		-1		1

Tabelle 5: Erhaltung der Leptonenzahl beim Zerfall des (freien) μ⁺.

Stoppt ein μ⁺ im Wasser, so kann es wie ein freies Myon zerfallen. Hierbei findet folgender Prozess statt, da die Leptonenzahlen⁴⁵ der beiden Familien erhalten bleiben müssen (vgl. Tabelle 5).

⁴⁴ Ein Tau-Teilchen kann nicht entstehen, da seine Ruhemasse größer als die des Pions ist.

Der Zerfall ist ein Dreikörperzerfall, daher ist das Impulsspektrum der dabei gebildeten Positronen kontinuierlich.

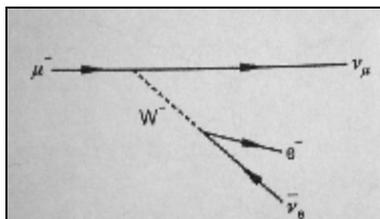
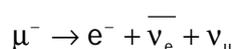


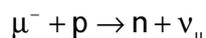
Abbildung 13: Feynmandiagramm des Zerfalls des (negativen) Myons.

5.2.2 Zerfall des negativen Myons (μ^-)

Stoppt ein μ^- im Wasser, so gibt es zwei konkurrierende Prozesse, die ablaufen können [KI00]. Zum einen der freie Zerfall, analog zu dem in Kapitel 5.2.1 beschriebenen und in Abbildung 13 dargestellten:



Auf der anderen Seite könnte aber ein Myon auch von einem Atomkern des Wassers eingefangen werden, hierfür stehen ja Sauerstoff- und Wasserstoffatome zur Verfügung. Wird ein negatives Myon eingefangen, so reagiert es mit einem Proton des entsprechenden Kerns und es entsteht ein Neutron [Ge91]:



Die entstandenen Kerne sind ebenfalls nicht stabil! Das einzelne Neutron, das aus einem Wasserstoffkern entstehen kann, zerfällt mit einer mittleren Lebensdauer von ca. 886 Sekunden [Ha02]. Der aus einem Sauerstoffkern entstandene angeregte Kern N_{16} zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 7 Sekunden [ND00]. Somit sind die Zerfallszeiten der angeregten Kerne so groß, dass sie die Lebensdauerermessung nicht verfälschen.

5.2.3 Didaktischer Hinweis

Hier meint *Teilchenzerfall* eine Umwandlung von einem Elementarteilchen in andere Elementarteilchen. Diese Art von *Zerfall* ist im alltäglichen Sprachgebrauch merkwürdig, da die Endprodukte keine Bruchstücke der Ausgangsteilchen sind, sondern neue Teilchen⁴⁶. Sie können gar keine Bruchstücke sein, da die Elementarteilchen selbst keine Konstituenten haben. Ge-

⁴⁵ Leptonen erhalten in ihrer Familie die Leptonenzahl 1, Antileptonen die Leptonenzahl -1 [Gr00].

⁴⁶ Frei übersetzt von http://pdg.ift.unesp.br/particleadventure/frameless/decay_intro.html [17.08.2003].

nauer bedeutet Teilchenzerfall, dass sich das Ausgangsteilchen in ein leichteres Teilchen und ein Kraft tragendes Teilchen (hier ein W-Boson) umwandelt. Das Kräfte tragende Teilchen wiederum kann als andere Teilchen in Erscheinung treten. Also verwandelt sich ein Elementarteilchen nicht nur in ein anderes, sondern es gibt noch einen Vermittler des Teilchenzerfalls⁴⁷.

Am einfachsten kann man den Zerfall eines Teilchens vielleicht mit der Energie-Masse-Äquivalenz⁴⁸ verstehen: Die Masse des Ausgangsteilchens wird in Energie umgewandelt, die dann wieder in Masse umgewandelt werden kann. Ganz so einfach ist es allerdings nicht: es müssen selbstverständlich die Erhaltungssätze (z.B. die Erhaltung der Ladung und der Energie) erfüllt werden. Der Grund für einen Teilchenzerfall ist immer, dass sich damit ein niedrigerer Energiezustand erreichen lässt.

5.3 Das Myon auf Meereshöhe

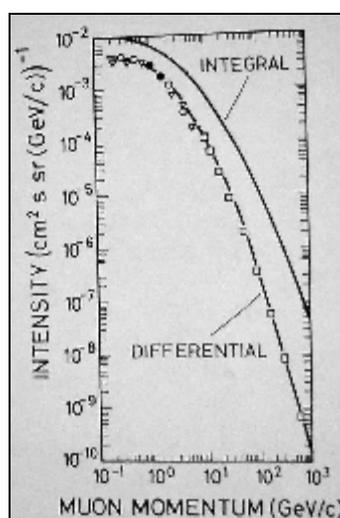


Abbildung 14: Intensität der Myonen in Abhängigkeit ihres Impulses [Al84].

Der gesamte Myonenfluss auf Meereshöhe beträgt ca. 200 Myonen/m²s [Gr85] (vgl. auch Abbildung 14). Aufgrund unterschiedlicher Atmosphärendicken bei schrägen Eintreffwinkeln, variiert der totale Myonenfluss I mit dem Zenitwinkel θ in etwa wie ein \cos^2 -Gesetz (siehe Abbildung 15): $I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta$.

⁴⁷ Frei übersetzt von <http://pdg.ift.unesp.br/particleadventure/frameless/mediator.html> [17.08.2003].

⁴⁸ $E = m \cdot c^2$

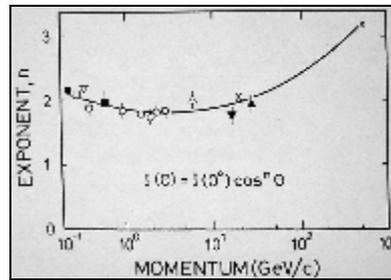


Abbildung 15: Winkelverteilung der Myonen in Meereshöhe in Abhängigkeit vom Impuls nach [Al84].

Des Weiteren wurde das Ladungsverhältnis der Myonen auf Meereshöhe untersucht (siehe Abbildung 16). Es beträgt [Hi92]:

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

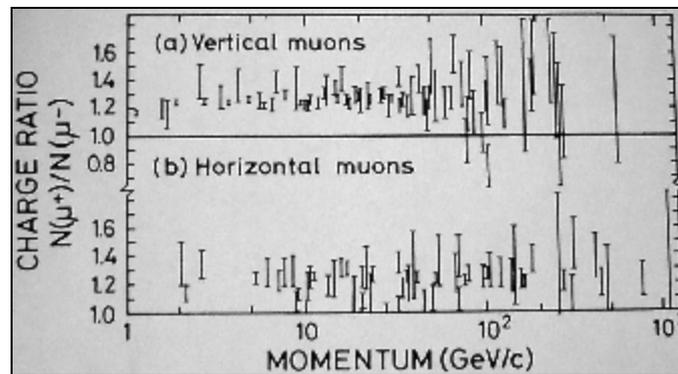


Abbildung 16: Ladungsverhältnis horizontaler und vertikaler Myonen auf Meereshöhe als Funktion ihres Impulses [Al84].

Der Überschuss an positiven Myonen legt den Rückschluss nahe, dass die primäre kosmische Strahlung positiv geladen ist (vgl. Kapitel 3.1).

5.4 Eigenschaften der Myonen in der Übersicht

Zusammenfassend hier einen Überblick über die Myon-Eigenschaften entnommen aus dem Particle Data Book [Ha02]:

Spin	Ladung	Masse	Lebensdauer
$\frac{1}{2}$	$\pm 1 e$	105,66 MeV/c ²	2,197 μ s

Kapitel 6

Spezielle Relativitätstheorie

Ein interessantes Beispiel für die Phänomene Zeitdilatation⁴⁹ und Längenkontraktion⁵⁰ der *Speziellen Relativitätstheorie*⁵¹ liefern ebenfalls die Myonen aus der Höhenstrahlung [Ti03]: Myonen zerfallen gemäß des statistischen Zerfallsgesetzes der Radioaktivität:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

N_0 ist die ursprüngliche Anzahl der Myonen zum Zeitpunkt $t=0$ s.

$N(t)$ ist die Anzahl der zum Zeitpunkt t noch vorhandenen Myonen.

τ ist die mittlere Lebensdauer.

Nun beträgt die mittlere Lebensdauer $\tau \approx 2 \mu\text{s}$ und ein typisches Myon bewegt sich mit $v = 0,998 \cdot c$. Es käme also nur etwa 600 m weit⁵² und erreichte den Erdboden nicht, da es in ca. 10 km Höhe in den oberen Schichten der Atmosphäre entsteht. Seine Lebensdauer muss aber aus dem Bezugssystem der Erde heraus gesehen werden und verlängert sich durch die *Zeitdilatation* um den Lorentz-Faktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

welcher bei dieser Geschwindigkeit etwa 15 beträgt. Die mittlere Lebensdauer im Bezugssystem der Erde beträgt somit circa $30 \mu\text{s}$. Der in dieser Zeit zurückgelegte Weg ist dann etwa 9.000 m lang⁵³ (vgl. Abbildung 17).

⁴⁹ Dilatation= Dehnen

⁵⁰ Kontraktion= Zusammenziehen

⁵¹ Aus heutiger Sicht wäre hier eigentlich Relativitäts*praxis* (frei nach Friedrich Kayser, Universität Mainz) besser.

⁵² $s = v \cdot t$, wobei $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit ist.

⁵³ Aus dem Ruhesystem des Myons betrachtet, lässt sich umgekehrt die Kontraktion der Flugstrecke um den

Faktor $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ berechnen: Die Strecke, auf der sich die Erde dem Myon nähert, ist ca. 600m lang.

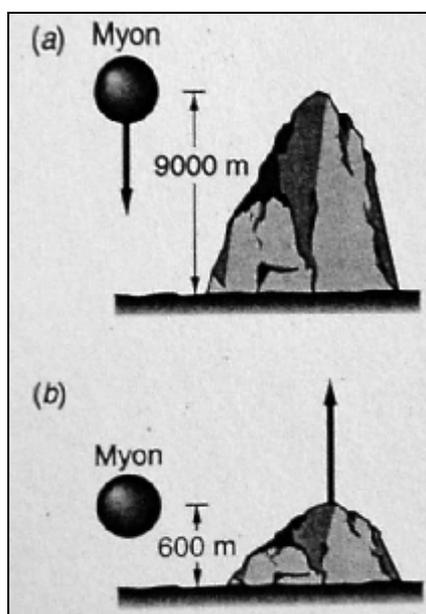


Abbildung 17: Zurückgelegte Strecken der Myonen [Ti03]:
 (a) im Bezugssystem der Erde, (b) im Bezugssystem der Myonen.

Diese Unterschiede zwischen klassischer und relativistischer Rechnung lassen sich experimentell belegen:

Angenommen, man registrierte mit einem Detektor in einer bestimmten Zeit 10^8 Myonen in einer Höhe von 9000 m. Wie viele Myonen erwartet man dann im gleichen Zeitintervall auf der Höhe des Meeresspiegels?

Nicht relativistisch gerechnet benötigen die Myonen für die Strecke ungefähr $30 \mu\text{s}$, dies entspricht etwa der 15fachen Lebensdauer. Setzt man die Werte $N_0=10^8$ und $t=15\tau$ in die Zerfallsgleichung ein, so erhält man $N=30,6$. Von den ursprünglich vorhandenen 100 Millionen kämen also nur rund 31 Myonen auf der Erdoberfläche an. Betrachtet man die relativistische Vorhersage, muss die Erde nur die *kontrahierte* Entfernung von 600 m im Bezugssystem des Myons zurücklegen. Dies dauert $2 \mu\text{s}=1\tau$. Daher erwartet man $N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}}$ Myonen auf Niveau des Meeresspiegels.

Da mit den vorliegenden Schulexperimenten und den Versuchen an Großforschungseinrichtungen tatsächlich Myonen registriert werden können, wird gezeigt, dass die sekundären kosmischen Teilchen tatsächlich auf der Erdoberfläche ankommen.

Kapitel 7

Cherenkoeffekt

Mit dem Versuchsaufbau sollen Myonen aus der Höhenstrahlung nachgewiesen werden. Wie weiter vorne gezeigt, sind Myonen einfach geladene Teilchen.

Bewegt sich ein geladenes Teilchen durch ein dielektrisches Medium mit der Geschwindigkeit v , die größer als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium $\frac{c}{n}$ ⁵⁴ ist, so entsteht die so genannte *Cherenkov-Strahlung*⁵⁵.

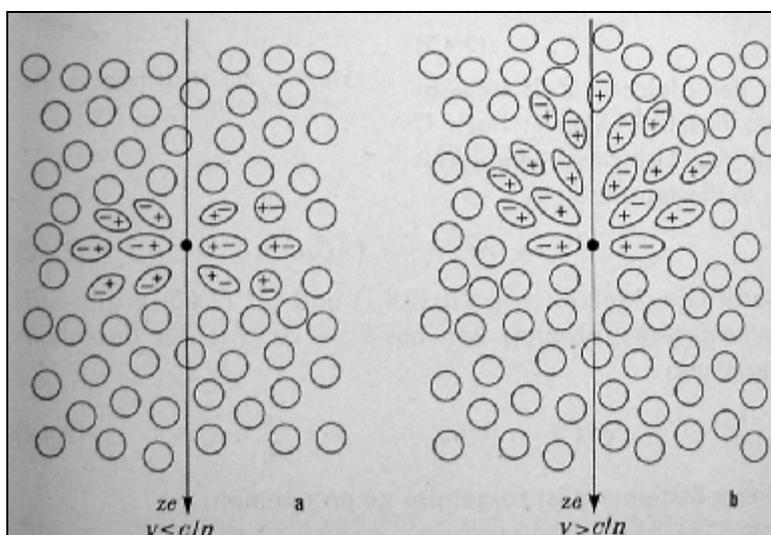


Abbildung 18: Veranschaulichung des Cherenkov-Effekts nach [Al71]:

Ist die Geschwindigkeit $v < \frac{c}{n}$ sind die Dipole regelmäßig angeordnet, so dass das integrierte Dipolfeld den Wert Null ergibt. Ist die Geschwindigkeit hingegen $v > \frac{c}{n}$, so ist die Symmetrie in Fortbewegungsrichtung aufgehoben und es bleibt ein resultierendes Dipolfeld zurück.

Ein schnelles geladenes Teilchen polarisiert längs seiner Bahn die benachbarten Atome, diese werden zu elektromagnetischen Dipolen und emittieren wegen der zeitlichen Veränderung des Dipolfeldes eine elektromagnetische Schockwelle, welche sich von jedem Punkt der Bahn in alle Richtungen mit der Geschwindigkeit $\frac{c}{n}$ ausbreitet (Abbildung 18). Gemäß dem Huy-

⁵⁴ n ist der Brechungsindex des durchflogenen Mediums.

⁵⁵ Diese Art von Strahlung wurde historisch zuerst für eine Art Lumineszenz gehalten [Ch58].

gensschen Prinzip bildet sich durch Interferenz⁵⁶ der Elementarwellen eine Wellenfront. Sie bildet mit der Ausbreitungsrichtung den Winkel θ (vgl. Abbildung 19b)⁵⁷:

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

Formel 1: Cherenkov-Formel.

wobei $\beta = \frac{v}{c}$ die auf die Lichtgeschwindigkeit normierte Teilchengeschwindigkeit ist.

Aus Formel 1 folgt auch eine Schwellenwertgeschwindigkeit [AI71], definiert durch $\theta=0^\circ$:

$$\beta_{\min} = \frac{1}{n}$$

In den vorgestellten Versuchen wird als Detektor Wasser (Brechungsindex $n=1,331$ [Ku95]) verwendet. Dies hat eine Minimalgeschwindigkeit der Myonen von $\beta \approx 0,75$ zur Folge.

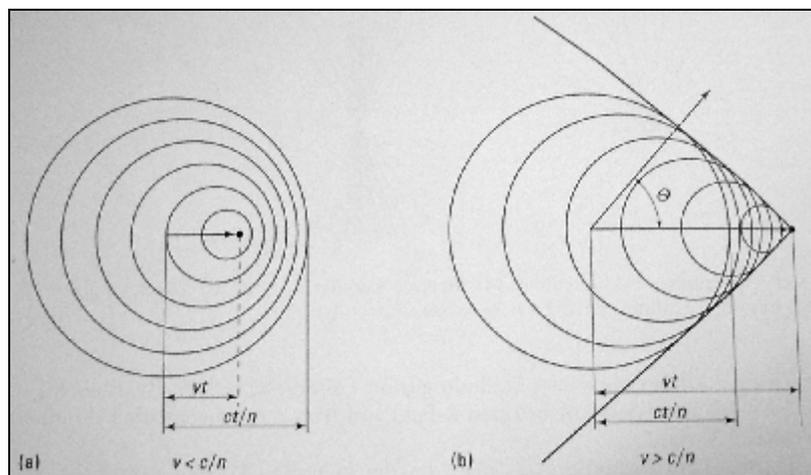


Abbildung 19: geometrische Beziehungen beim Cherenkoeffekt nach [BS2.99].
Die Einhüllende der Elementarwellen bilden in b) einen Kegel.

Die Anzahl der im Wellenlängenintervall zwischen λ_1 und λ_2 erzeugten Photonen beträgt [BS4.92 und Gr00]:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi \cdot \alpha \cdot Z^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2},$$

Formel 2: Anzahl der beim Cherenkoeffekt erzeugten Photonen.

⁵⁶ Überlagerung

⁵⁷ Der Radius des linken Kreises, die Ankathete zum Winkel θ im eingezeichneten Dreieck, beträgt $\frac{c}{n} \cdot t$, die Hypotenuse entspricht dem zurückgelegten Weg des Projektils in derselben Zeit t , also: $v \cdot t$.

wobei $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c^2} \approx \frac{1}{137}$ die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante, z die Ladung des erzeugenden Teilchens und dx die Länge der Teilchenbahn im Medium ist.⁵⁸

Im vorgestellten Experiment fliegen die Myonen mit $\beta \approx 1$ durch eine mit Wasser⁵⁹ gefüllte innen verspiegelte Thermoskanne, die eine Länge der Teilchenbahn von etwa 0,15 m zulässt. Die Anzahl der Photonen im sichtbaren Bereich (400 nm bis 700 nm) beträgt somit etwa 3200 pro eingefangenen Myon.

Das Phänomen ist ebenfalls als *Machscher Kegel* bei Überschallflugzeugen oder als *Bugwelle* bei Schiffen, welche sich mit einer größeren Geschwindigkeit als die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwasserwellen bewegen, zu beobachten.

⁵⁸ Lesenswert ist sicher die „Nobel Lecture“ von Cherenkov selbst: [Ch58]

⁵⁹ was einen Cherenkovwinkel von $\theta = \arccos\left(\frac{1}{1,33 \cdot 1}\right) \approx 41^\circ$ zur Folge hat.

Kapitel 8

Vorversuch: Cherenkoeffekt in der Wellenwanne

Leider sind die Lichtblitze zu schwach, als dass man sie mit bloßem Auge sehen könnte. Um Schülerinnen und Schülern das Phänomen des Cherenkoeffekts doch näher bringen zu können, wird in diesem Kapitel das mechanische Analogon der Bugwelle ausgenutzt. Hierzu wurden einige Versuche in einer Wellenwanne aufgebaut, auf Video aufgezeichnet und mit dem an der Universität Mainz entwickelten Programm „ViMPS“⁶⁰ ausgewertet.

Da die Versuche in der Schule ebenfalls einfach zu realisieren sind und den Effekt gut zeigen können, werden sie an dieser Stelle vorgestellt.

8.1 Versuchsaufbau

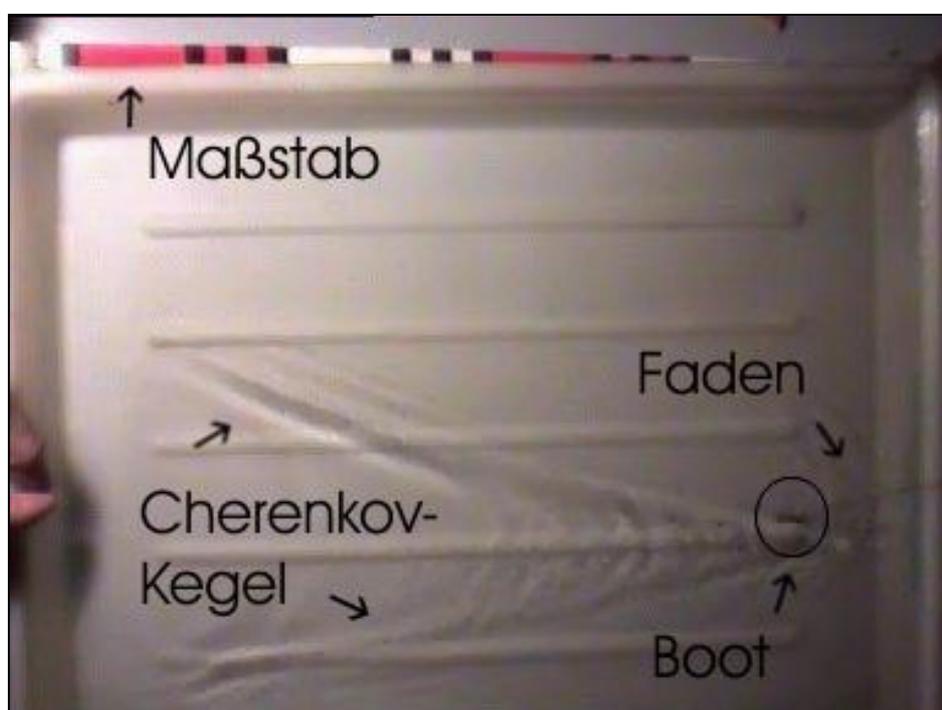


Abbildung 20: Versuchsaufbau in der Wellenwanne.

Auf einer Wellenwanne werden dünne Korkplättchen schwimmen gelassen. Der Antrieb erfolgt mit Nähgarn über eine Rolle am rechten Rand der Wellenwanne. Vier bis sieben Büro-

⁶⁰ ViMPS: Video Mess und Präsentationssystem: ViMPS wurde in zwei Staatsexamensarbeiten entwickelt, bzw. angewandt. Auf nähere Ausführungen werden an dieser Stelle verzichtet und auf die beiden Arbeiten verwiesen: [Be99] und [Ma01].

klammern am Ende des Garns sorgen für die nötige Beschleunigung. Die „Korkboote“ werden gut beschleunigt und erreichen dann eine annähernd gleich bleibende Geschwindigkeit.

8.2 Versuchsdurchführung

Zu verifizieren ist Formel 1. Dazu benötigt man die Geschwindigkeit des Bootes, die Geschwindigkeit der Oberflächenwasserwellen und den Winkel θ . Die Versuche werden wie oben beschrieben aufgebaut und mit einer Video-Kamera⁶¹ auf dem PC aufgezeichnet.

8.2.1 Bootsgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des Bootes wird mittels VIMPS gemessen, in dem die Koordinaten per Mausclick aufgezeichnet werden. Die Zeitinformation wird durch den Abstand der Einzelbilder des Videos (1/25 s) geliefert. Die Ortskoordinaten stehen nach einer Kalibrierung zur Verfügung⁶².

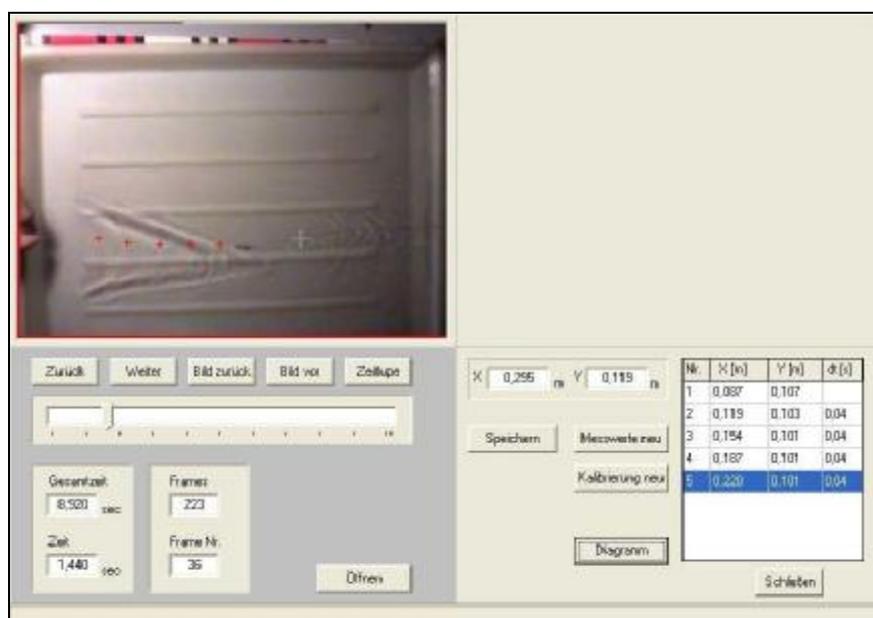


Abbildung 21: Bestimmung der Projektilgeschwindigkeit.

Tabelle 6 zeigt die Geschwindigkeit eines Bootes⁶³. Die Werte wurden alle nacheinander aufgenommen und geben den Momentangeschwindigkeitsverlauf vom Beginn bis zum Ende der Boots-bewegung wieder. Es zeigt sich eine annähernd gleichförmige Bewegung. Das rechtfer-

⁶¹ Hierfür eignet sich auch eine bessere web-cam.

⁶² Zu diesem Zweck ist in allen Videos ein Maßstab mit aufgenommen. Die Länge eines Farbbalkens beträgt 10 cm.

⁶³ aus dem Film Kegel-13

tigt ein Mitteln, indem die Durchschnittsgeschwindigkeit aus den Koordinatenpaaren der Frames 32 und 40 berechnet wird. Diese Geschwindigkeit beträgt: $v = (0,848 \pm 0,005) \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Frame Nr. ⁶⁴	32	33	34	35	36	37	38	39	40
v in m/s ⁶⁵	0,806	0,876	0,825	0,825	0,781	0,950	0,825	0,900	0,850
Δv in m/s ⁶⁶	$\pm 0,047$	$\pm 0,048$	$\pm 0,047$	$\pm 0,047$	$\pm 0,047$	$\pm 0,049$	$\pm 0,047$	$\pm 0,048$	$\pm 0,048$

Tabelle 6: Geschwindigkeit eines Bootes.

8.2.2 Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

Um die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwasserwellen zu messen, kann man Büroklammern oder besser noch kleine Teile der Klammern, o.ä. ins Wasser werfen und den Bewegungsablauf mit ViMPS analysieren. Hierzu bedient man sich am besten des Koordinatensystems von ViMPS selbst, da man ja einen gradlinigen Verlauf der Ausbreitungsrichtung zu Grunde legen muss⁶⁷.

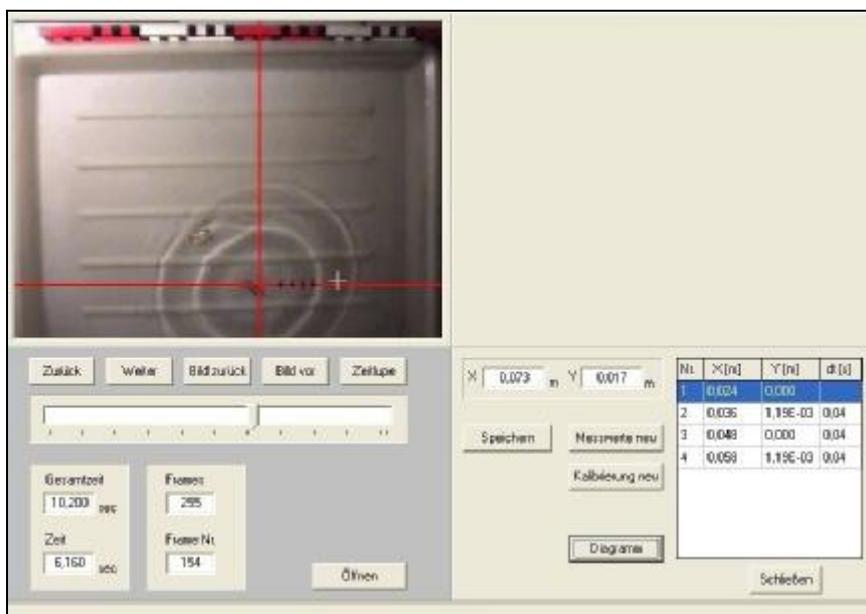


Abbildung 22: Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wasserwellen.

⁶⁴ Ein *Frame* (engl. Rahmen) ist ein Einzelbild eines Filmes.

⁶⁵ Die Geschwindigkeit des Bootes ergibt sich nach dem Satz des Pythagoras und dem Weg-Zeit-Gesetz als $v = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t}$, wenn mit Δx , Δy die zurückgelegten Wege und mit Δt die Zeitdifferenz zwischen zwei Frames (hier konstant 0,04 s) bezeichnet ist. Berechnet wurden die Werte mit EXCEL.

⁶⁶ Der Messfehler ergibt sich nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung. Für den Fehler in den Koordinaten wird ein Pixel angenommen. Dann entspricht der Fehler dem Zahlenwert, den ViMPS als Kalibrierung mit angibt (ca. 1 mm). Die verwendete Kamera nimmt 25 Bilder in der Sekunde auf. Der Fehler in der Zeit wird daher mit 1 ms angenommen.

⁶⁷ Hierzu ist es nötig, nach jedem aufgenommenen Messpunkt und dem Weiterblättern in den Frames auf den Button „Diagramm“ zu drücken, da nach dem Anzeigen eines neuen Frames das Koordinatensystem verschwindet.

Tabelle 7 zeigt die Bestimmung der Geschwindigkeit für mehrere Versuche⁶⁸.

Klammerstück	Frames	Richtung	v in m/s	Δv in m/s ⁶⁹
1	94-105	nach rechts	0,198	$\pm 0,004$
	90-94	nach oben	0,194	$\pm 0,011$
	94-101	nach links	0,203	$\pm 0,005$
	93-100	nach unten	0,229	$\pm 0,006$
2	150-162	nach rechts	0,260	$\pm 0,006$
	150-157	nach oben	0,253	$\pm 0,011$
	150-165	nach links	0,261	$\pm 0,005$

Tabelle 7: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen ist, wie oben aufgezeigt, etwas diffiziler zu bestimmen. Daher schwankt auch der ermittelte Wert. Hier wurde er zu

$$c = (0,225 \pm 0,002) \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ ermittelt}^{70}.$$

8.2.3 Vermessen des Cherenkovkegels

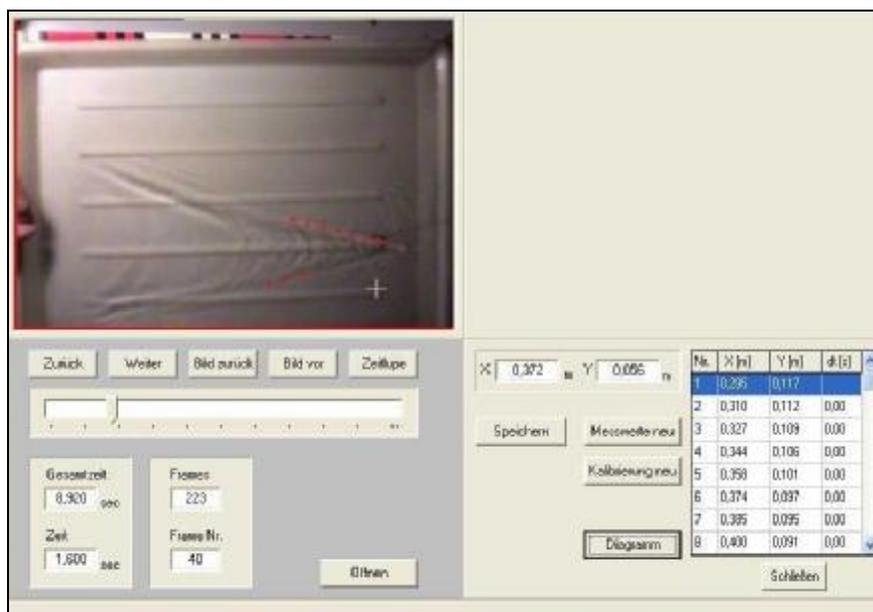


Abbildung 23: Vermessung des Kegels in ViMPS.

⁶⁸ Aus dem Film Ausbreitung 01

⁶⁹ Der Messfehler ergibt sich nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung.

⁷⁰ Da die Messfehler hier unterschiedlich sind, muss man den gewichteten Mittelwert berechnen.

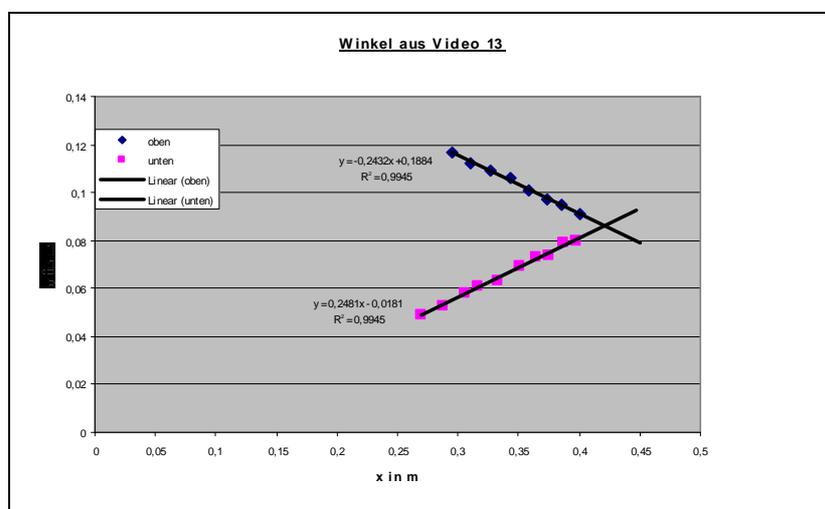


Abbildung 24: Auswertung der Messwerte in EXCEL.

Der Cherenkovkegel wird in einem einzelnen Standbild vermessen, indem man jeweils einige der Punkte der beiden Geraden aufnimmt (Abbildung 23) und mit EXCEL auswertet (Abbildung 24)⁷¹. Der Winkel γ zwischen zwei Geraden ist gegeben durch:

$$\tan(\gamma) = \frac{m_1 - m_2}{1 + m_1 \cdot m_2},$$

wenn m_1 und m_2 die Steigungen der beiden Geraden beschreiben. Der Winkel γ ist immer der spitzere der beiden Winkel zwischen den Geraden. Um nun noch auf den Winkel zwischen der Emissionsrichtung der Strahlung und der Bewegungsrichtung des Teilchens zu kommen, liest man aus dem Dreieck in Abbildung 19 folgendes⁷² ab: $\frac{\gamma}{2} + \theta + 90^\circ = 180^\circ$.

Daraus ergibt sich dann: $\theta = 90^\circ - \frac{\gamma}{2}$ ⁷³. Im Fall für das hier ausgewertete Video erhält man einen Cherenkovwinkel von $\theta_{\text{graf}} = (76,198 \pm 0,005)^\circ$

⁷¹ Die Fehler der Geradensteigungen erhält man mit der Matrix-Formel *RGP*.

⁷² Mit γ sei der Innenwinkel des Dreiecks, welches die beiden Schenkel des Kegels bilden, bezeichnet.

⁷³ Alternativ könnte auch ein Standbild ausgedruckt und der Winkel grafisch mit dem Geodreieck bestimmt werden. Oder aber man misst in der EXCEL-Grafik, dann ist allerdings darauf zu achten, dass die Maßstäbe der beiden Achsen nicht verzerrt werden. Einfacher geht das in Derive mit der Funktion „Verzerrungsverhältnis einstellen“.

8.2.4 Auswertung

Aus den mit ViMPS bestimmten Geschwindigkeiten (Kapitel 8.2.1 und 8.2.2) lässt sich nach Formel 1⁷⁴ der Cherenkovwinkel berechnen. Er beträgt $\theta_{\text{rech}} = (74,61 \pm 0,05)^\circ$.

Nun kann man dieses Verfahren an mehreren Beispielen nachvollziehen und dann den vermessenen und den aus den Geschwindigkeiten gewonnen Cherenkovwinkel gegenüberstellen. Tabelle 8 zeigt die oben beschriebene Auswertung für sechs Videofilme.

Video	Winkel θ_{graf} in $^\circ$	Winkel θ_{rech} in $^\circ$
01	$65,65 \pm 0,01$	$62,7 \pm 0,1$
02	$70,04 \pm 0,01$	$69,7 \pm 0,1$
03	$76,20 \pm 0,01$	$74,61 \pm 0,05$
04	$69,17 \pm 0,01$	$67,3 \pm 0,1$
08	$73,34 \pm 0,01$	$74,7 \pm 0,1$
13	$76,198 \pm 0,005$	$74,61 \pm 0,05$

Tabelle 8: Verifizierung der Formel 1.

Die geringen Abweichungen von in diesem Fall maximal ca. 3° bestätigen, dass es möglich ist, die oben genannte Formel 1 für den Winkel des Cherenkovkegels mit einfachen Mitteln, auch in der Schule, zu verifizieren.

8.3 Didaktischer Hinweis

Die Bestimmung der einzelnen Variablen ist relativ elementar und gut in der Schule durchführbar. Unterstützung können hier Tabellenkalkulationsprogramme aber auch Mathematikprogramme wie zum Beispiel Derive⁷⁵ leisten.

Das Programm ViMPS ist vielseitig einsetzbar. So können damit z.B. die Bewegungsabläufe bei diversen Sportarten oder praktisch alle Experimente in der Mechanik analysiert werden. Außerdem ist ein Präsentationsmodul integriert, mit welchem Schülerinnen und Schüler bei ihren eigenständigen Auswertungen an die Hand genommen werden können (Beispiele und

⁷⁴ Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es sich nicht um einen optischen, sondern um einen rein mechanischen Vorgang handelt. Daher kommt in der Formel kein Brechungsindex vor: $\cos(\theta) = \frac{c}{v}$.

⁷⁵ „Derive ist ein Computerprogramm, das Formeln so schnell und sicher verarbeitet, wie ein Taschenrechner Zahlen. Dabei ist es genauso einfach zu bedienen.“ (<http://www.derive.de> [17.08.2003]) Es ist mittlerweile an vielen Schulen verfügbar.

die *aufgezeichneten Cherenkovvideos incl. Auswertungsanregungen* finden sich unter <http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/Vimps> [25.08.2003]).

Kapitel 9

Aufbau der Versuche zu kosmischen Myonen

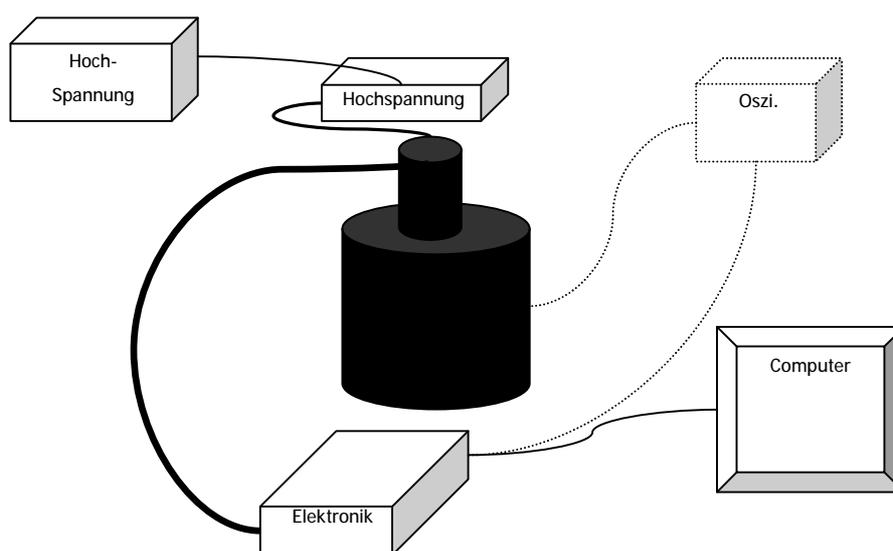


Abbildung 25: Schematischer Versuchsaufbau.

Durchdringen geladene Teilchen ein Gas, eine Flüssigkeit, einen Festkörper, so geben sie ihre Energie nach und nach an das Material ab. Teilchennachweis bedeutet dann, diese abgegebene Energie aufzuspüren [Cl86]. In Rahmen dieser Arbeit werden mit Wasser gefüllte Thermoskannen als Detektoren eingesetzt. Für die durchgeführten Lebensdauermessungen ist Wasser genauso effizient wie mit Plastik- oder Flüssigkeitsszintillatoren gefüllte Detektoren [Wa85]. Die geringen Kosten und die Verfügbarkeit für Schulen machen Wasser zum optimalen Detektormaterial.

Die reflektierenden Innenwände werden eingesetzt, damit möglichst viel des erzeugten Cherenkov-Lichtes in die Photomultiplier gelangt. Es schließt sich eine Verstärker- und eine Digitalelektronik an.

Im Folgenden sollen alle verwendeten Bauteile und Mechanismen vorgestellt werden. Hierbei wird die Verarbeitung des Signals von der Entstehung des Cherenkov-Blitzes in der Kanne bis hin zum Anschluss an einen Computer nachvollzogen.

Abbildung 26 stellt zum besseren Verständnis einen senkrechten Schnitt durch den Versuchsaufbau dar. Deutlich erkennbar sind: die Verstärkerplatine (1), die Versorgungseinheit des Photomultipliers (2), die Dynoden des Photomultipliers (3) und der Bauch der Kanne (4),

welcher als Detektor mit Wasser gefüllt wird. Der Photomultiplier ist das gesamte birnenförmige Glasobjekt in der Bildmitte⁷⁶.



Abbildung 26: Senkrechter Schnitt durch den Versuchsaufbau.

9.1 Photomultiplier

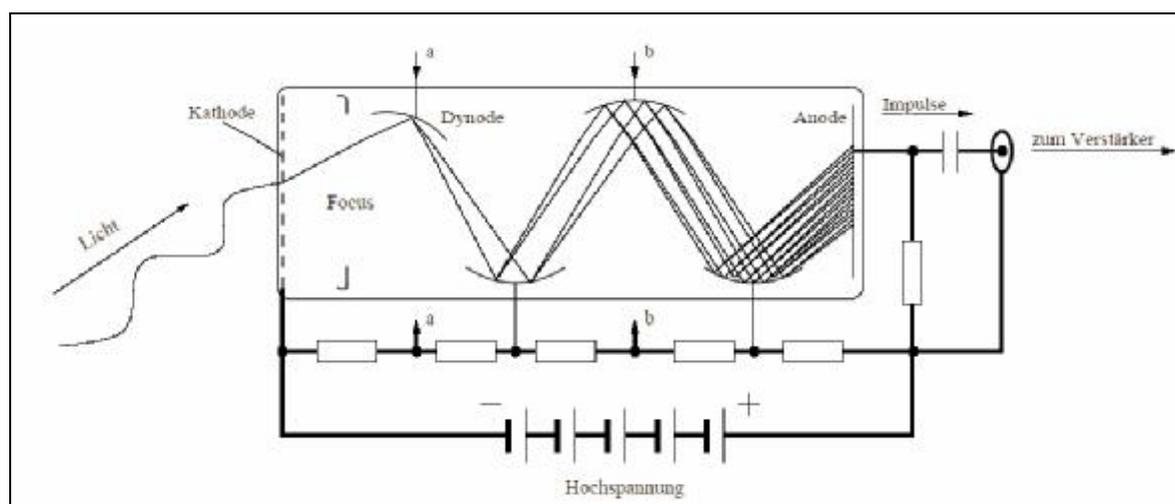


Abbildung 27: Aufbau eines Photomultipliers [KI00].

Ein *Photomultiplier*⁷⁷ ist ein Instrument, das optische Signale in elektrische umwandelt. Abbildung 27 zeigt den typischen Aufbau eines Photomultipliers. Im Versuch wandelte der

⁷⁶ Der Schnitt durch den Aufbau in Abbildung 26 dient als Ausstellungsstück bei Präsentationen des Versuchs. Daher sind blinkende LEDs eingebaut. Eine blaue LED im Bauch der Kanne stellt das Cherenkovlicht dar und eine rote LED an der Verstärkerplatine die Elektronik. Daher gehören die Kabel im Bild links und unten, sowie die LEDs *nicht* zum eigentlichen Versuchsaufbau.

Photomultiplier den Cherenkovlicht-Blitz in ein Spannungssignal um, welches weiter verarbeitet wird.

Die vorliegenden Photomultiplier (Typ: S.R.C. Laboratories inc. Nr.: S75B01) bestehen aus einem Glasgehäuse mit einem Fenster am unteren Ende. Hier sitzt die Photokathode, aus der ankommendes Licht (Photonen) mittels Photoeffekt Elektronen auslöst. Diese Primärelektronen werden fokussiert und gelangen dann zur ersten von zehn Dynoden. Der Zusammenschluss der Dynoden funktioniert als *Sekundärelektronenvervielfältiger (SEV)*: An der ersten Dynode erzeugt das Primärelektron mehrere Sekundärelektronen. Durch eine Widerstandskette (ein so genannter Spannungsteiler) liegen die Dynoden von vorne nach hinten auf immer kleinerem negativem Potenzial gegenüber der Anode, welche auf Masse liegt. Dadurch wird erreicht, dass die Elektronen zur nächsten Dynode hin beschleunigt werden, sie durchlaufen eine „Potenzialleiter“. Dort auftreffend emittiert die Dynodenoberfläche wieder Elektronen. Dieser Vorgang pflanzt sich durch die Dynodenanordnung fort, bis die Elektronenlawine auf die Anode trifft. Die hier aufgefangene Ladungsmenge pro Zeit⁷⁸ wird über einen Widerstand abgegriffen. Insgesamt wird also der optische Lichtblitz am Fenster in ein Spannungssignal am Ausgang des Photomultipliers umgewandelt.

Die wichtigsten Kenndaten von Photomultipliern sind die Quantenausbeute der Photokathode, das heißt die Anzahl der ausgeschlagenen Elektronen pro 100 einfallende Photonen, und der Verstärkungsfaktor der einzelnen Dynoden, welche meist bei 3-5 Sekundärelektronen pro einfallendem Elektron emittieren. Mit einer 14stufigen Dynodenanordnung erreicht man so eine Elektronenvervielfachung von 10^8 . Typische Quantenausbeuten liegen zwischen 20% und 25% [KI92].

Bei ca. 3200 erzeugten Cherenkov-Photonen (siehe Kapitel 7) treffen vielleicht 400 die Photokathode. Die resultierende Ladungsmenge (bei angenommen 20% Quantenausbeute und einer Verstärkung von 10^5)⁷⁹ beträgt etwa 1 pC. Diese Ladung trifft innerhalb von 5 ns auf die Anode und wird über einen 50 Ω Widerstand abgegriffen. Der resultierende Spannungspuls ist somit ca. 10 mV groß. Dies entspricht auch den Beobachtungen.

Die Verbindung der Photomultiplier mit einer geeigneten Hochspannungsquelle erfolgt über spezielle Hochspannungsstecker, welche in der Schule nicht verfügbar sind. Daher wurde ein Adapterkästchen entworfen, was sicherstellt, dass Schulen den Versuchsaufbau mit einem schulüblichen Gerät betreiben können. Als Sicherheitsmaßnahme vor dem Verpolen der An-

⁷⁷ Lichtverstärker

⁷⁸ also, nach $\frac{dQ}{dt} = I$, der Strom

⁷⁹ Leider liegen keine Datenblätter der verwendeten Photomultiplier mehr vor. Aus dem Foto des Schnitts (Abbildung 26) geht hervor, dass in den verwendeten Photomultipliern nur 9 Dynoden-Stufen eingebaut sind.

schlüsse ist in das Kästchen eine Hochspannungsdiode eingebaut. Falls das Kästchen verpolt wird ist die Schaltung über die Diode kurzgeschlossen, somit wird an jedem Schulgerät die Spannung abgeschaltet.

9.2 Elektronik

Die Lichtblitze des Cherenkoeffekts sind sehr gering, so dass auch die resultierende Ladung im Photomultiplier recht klein ist. Ein Lichtblitz führt wie gezeigt zu etwa 5 bis 30 mV großen, negativ gepolten Pulsen, deren Breite bei etwa 30 ns liegt (siehe Abbildung 28).

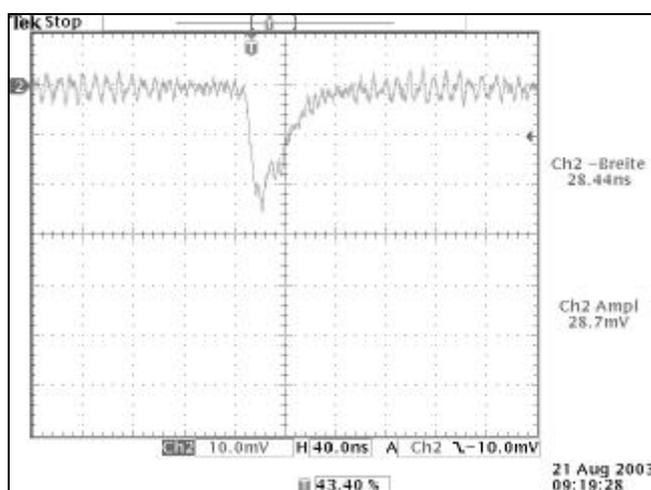


Abbildung 28: Originalpuls aus dem Photomultiplier (bei 1,6kV).

Die Aufgabe der gesamten Elektronik ist es nun, diese Pulse für die Datenerfassung mit Hilfe eines Standardcomputers aufzubereiten. Die Spannungen, mit denen ein Computer arbeitet, liegen zwischen 0 V und 5 V (was logisch 0 bzw. 1 entspricht). Es gilt also, die Pulse ca. 500-1.000fach zu verstärken. Zusätzlich muss das Signal auch ein wenig verbreitert werden, um die Verarbeitung durch herkömmliche Logikgatter zu gewährleisten.

Hierfür wurden zwei Stufen entwickelt. Die erste Stufe sitzt direkt auf dem Betriebskopf des Photomultipliers, die andere in einem kleinen Kästchen, welches Digitalelektronik und die Anbindung an den PC beinhaltet.

9.2.1 Analoger Verstärker

Dieser sitzt, um störende Einflüsse wie Magnetfelder oder sonstige induzierte Spannungen in Kabeln zu minimieren, direkt auf dem Betriebskopf des Photomultipliers. Daher war es nötig, hier auf die moderne SMD-Technik⁸⁰ zurückzugreifen, die sehr Platz sparend ist:

⁸⁰ SMD = Surface Mount Device (Bauteile werden auf der Oberfläche der Platine verlötet)

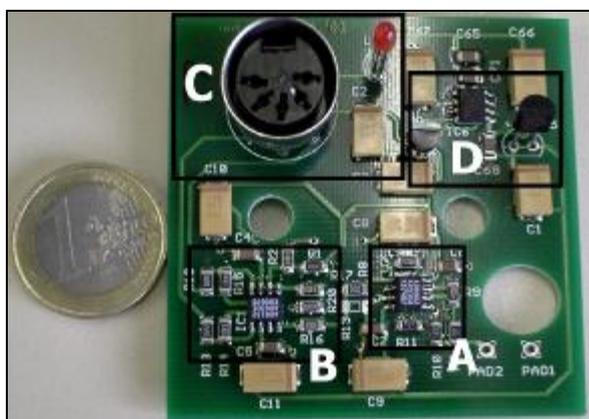


Abbildung 29: Die bestückte Verstärkerplatine⁸¹.

Wie in Abbildung 29 erkennbar, unterteilt sich diese Platine im Wesentlichen in 4 Bereiche:

- Verstärker
- Sender
- Anschlusseinheit mit Leuchtdiode
- Spannungsversorgung

Die Schaltpläne befinden sich in Anhang A3.1.

Verstärker

Um die schmalen und nicht sehr großen Pulse aus dem Photomultiplier zu verstärken, bedarf es eines *Operationsverstärkers* mit einer hohen Bandbreite⁸². Die externe Beschaltung des Operationsverstärkers mit Widerständen ermöglicht einen individuellen Verstärkungsfaktor. Für diese Aufgabe wurde der AD8002 eingesetzt. Er hat eine geringe Leistungsaufnahme und eine große Bandbreite von 600 MHz. Außerdem sind in ihm zwei Stufen untergebracht, was der Absicht entgegenkommt, eine Verstärkung um den Faktor 500-1.000 zu realisieren. Er wurde so beschaltet, dass beide Stufen mit einem theoretischen Verstärkungsfaktor von $1 + \frac{470\Omega}{56\Omega} \approx 9,5$ arbeiten. Da beide hintereinander geschaltet sind, wird somit an dieser Stelle schon eine theoretische Verstärkung um den Faktor 90 erreicht. Die tatsächliche Verstärkung ist etwas geringer und liegt bei ca. 63 (siehe Abbildung 30)

⁸¹ Da das Layout noch einmal verbessert wurde, entspricht diese Abbildung evtl. nicht der an Schulen und andere Universitäten ausgelieferten Version. Die Schaltpläne hingegen sind aktuell.

⁸² Als *Bandbreite* wird „die höchste übertragene Frequenz bezeichnet, bei der die Verstärkung nur 3dB unterhalb der nominellen Verstärkung liegt. Meist wird in den Datenblättern das Bandbreiten-Verstärkungs-Produkt angegeben. D.h. ein mit 300 MHz spezifizierter Verstärker hat bei einer Verstärkung von 10 noch etwa 30 MHz Bandbreite [Ze03].“

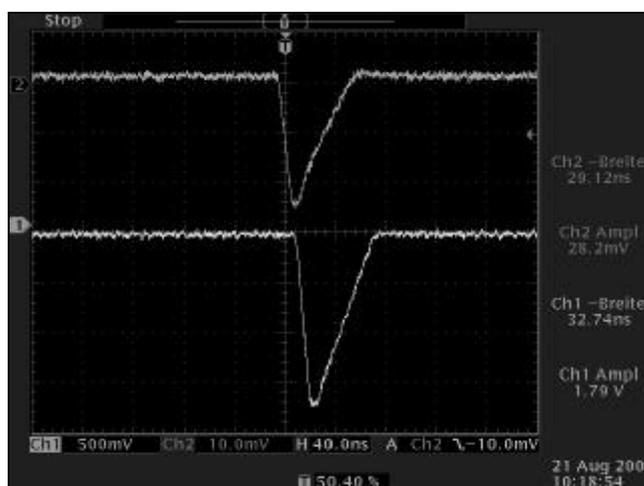


Abbildung 30: Gesamtverstärkung AD8002:
 Kanal 2 (oben): generierter Puls⁸³.
 Kanal 1 (unten): durch AD8002 verstärkter Puls.

Beim Entwurf der Platine musste darauf geachtet werden, dass alle Wege zwischen den Bauteilen recht kurz gehalten werden, da sonst störende Einflüsse sehr schnell zu Schwingungen des Operationsverstärkers führen könnten. Das so verstärkte Signal gelangt dann zur Sendeeinheit.

Sender

Für die Sendeeinheit wurde der differenzielle Verstärker AD8132 gewählt. Mit ihm ist es möglich, das Signal *differenziell*, das heißt auf zwei Leitungen mit umgekehrten Vorzeichen, zu übertragen⁸⁴. Da auf der Digitalplatine nur positive Spannungen zur Verfügung stehen, musste hier eine Offset⁸⁵-Spannung angelegt werden. Sonst wäre der Puls auf der negativen Leitung verloren gegangen.

Wieder durch eine externe Beschaltung mit Widerständen wurde auch hier eine Verstärkung eingebaut. Theoretisch beträgt sie $1 + \frac{680\Omega}{330\Omega} \approx 3$. Zusammen mit dem Faktor 63 des Verstärkers und dem Faktor 2 der differenziellen Übertragung liegt die theoretische Verstärkung schon bei $63 \cdot 3 \cdot 2 = 540$. Tatsächlich wird weniger erreicht. Der Puls reicht aber aus, um von der Empfangs- und Digitalelektronik verarbeitet werden zu können.

⁸³ Philips Puls Generator PM5786B

⁸⁴ „Signale werden ohne Bezug auf die Masse auf zwei Leitungen übertragen. Eine Leitung hat die positive und die andere die negative Amplitude. An der Empfängerseite wird die Differenz der Signale genommen [das ergibt einen] Faktor 2 Verstärkung und alle synchron aufgesammelten Störungen fallen raus. Hieraus ergibt sich die sehr gute Unempfindlichkeit auf Störungen und Masseprobleme werden vermieden. Anwendung auch in der Netzwerktechnik [...] [Ze03].“

⁸⁵ Offset (engl.)= Absatz

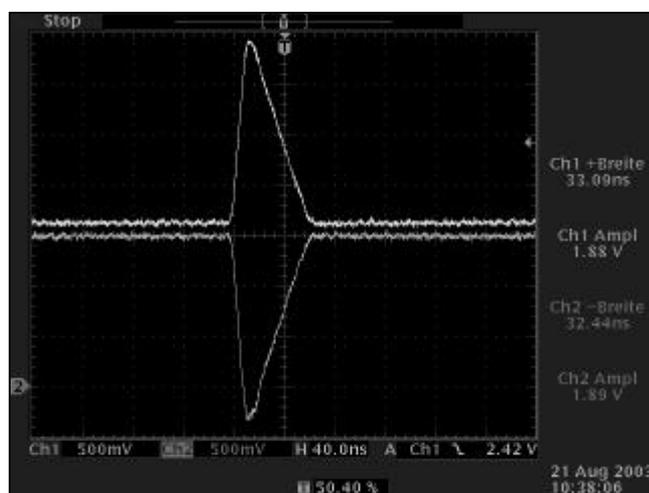


Abbildung 31: Beide Kanäle der differentiellen Übertragung am Ausgang des Senders AD8132 bei einem generierten Puls wie in Abbildung 30.

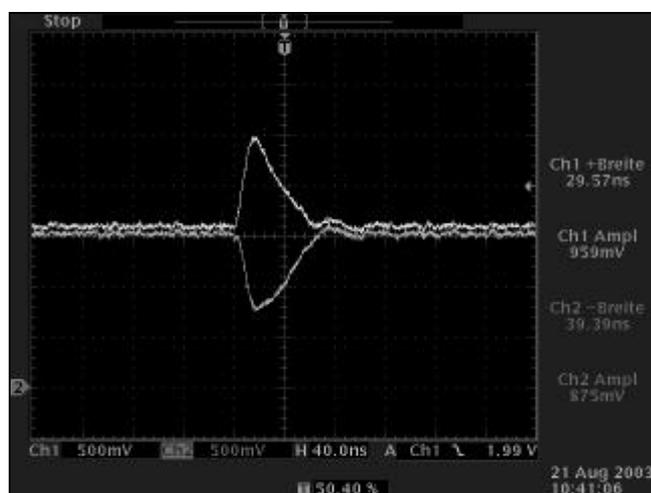


Abbildung 32: Differenzielles Signal, welches abgeschwächt auf der Digitalplatine ankommt.

Die differenzielle Übertragung stellt geringe Anforderungen an das Übertragungsmedium. Deshalb konnte hierfür ein Standardkabel, das so genannte 5polige DIN-Kabel verwendet werden.

Anschlusseinheit und Leuchtdiode

Die Anschlussbuchse hat 5 Pole. Zwei davon werden genutzt, um das Signal differentiell zu übertragen. Zwei weitere stellen die Spannungsversorgung der gesamten Verstärkerplatine sicher (Masse und +8 V). Die fünfte Leitung wird benötigt, um eine kleine Leuchtdiode (LED) von der Digitalplatine aus zu steuern. Sie zeigt an, dass diese Kanne gerade in einem Messvorgang ist.

Das Photomultipliersignal wird an den Pads 1 und 2 angeschlossen (Abbildung 29 unten rechts).

Spannungsversorgung

Die verwendeten Bauteile arbeiten mit den für Operationsverstärker üblichen Spannungen von ± 5 V. Daher musste aus den $+8$ V Versorgungsspannung, die von der Digitalplatine durch das Kabel an die Verstärkerplatine geliefert werden, sowohl $+5$ V, als auch -5 V gewonnen werden. Diese Aufgabe übernehmen mehrere Bauteile. Ein üblicher Spannungsregler (78L05) limitiert die $+8$ V auf $+5$ V. Etwas mehr Anstrengung ist für das Umpolen der Spannung nötig. Hierzu gibt es aber auch ein Bauteil, eine sog. *Ladungspumpe*. Auf der Platine wird der Baustein ICL7660 verwendet, welcher nur zwei Kondensatoren zusätzlich benötigt, um aus den ursprünglichen $+8$ V -8 V zu transformieren. Ein nachgeschalteter Regler für negative Spannungen (79L05) liefert dann die nötigen -5 V.

9.2.2 Digitalplatine

Die Aufgabe diese Elektronik lässt sich am besten mit *Empfangen und Verarbeiten* umschreiben. Das Signal des analogen Verstärkers muss wieder empfangen, digitalisiert und verarbeitet werden.

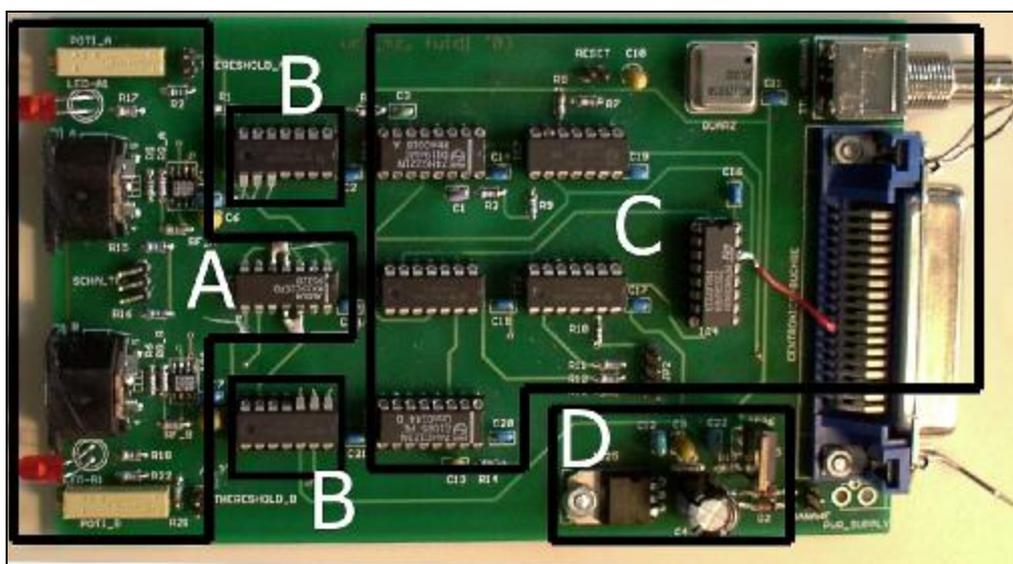


Abbildung 33: Fertig bestückte Digitalplatine⁸⁶.

Diese Platine lässt sich zum besseren Verständnis in vier Bereiche unterteilen:

- Empfänger und Analog-Digital-Wandler
- Schalterlogik
- Verarbeitung

⁸⁶ Da das Layout noch einmal verbessert wurde, entspricht diese Abbildung evtl. nicht der an Schulen und andere Universitäten ausgelieferten Version. Die Schaltpläne hingegen sind aktuell.

- Versorgung

Die Schaltpläne befinden sich in Anhang A3.2.

Empfänger und Analog-Digital-Wandler

Hier ist die Schnittstelle zur digitalen Welt. Das differenzielle analoge Signal wird im AD8130 wieder empfangen und noch einmal um den Faktor $1 + \frac{510\Omega}{510\Omega} = 2$ verstärkt.

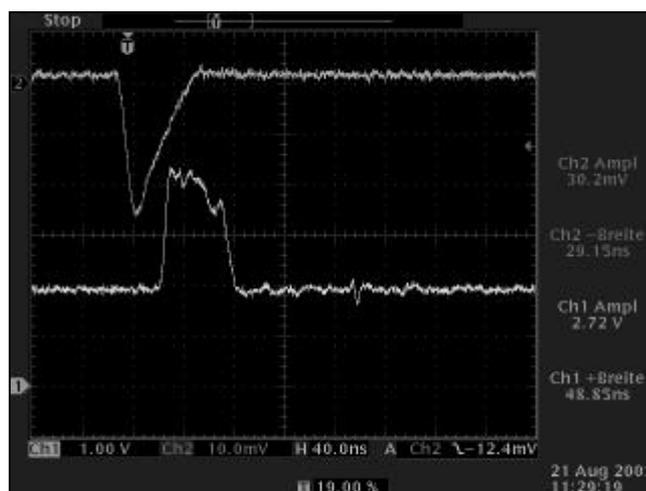


Abbildung 34: Ausgangssignal des Empfängers.

Kanal 1: Ausgang des Empfängers AD8130.

Kanal 2: generierter Puls, der am Eingang des Verstärkers anliegt.

Um nun das Signal weiter verarbeiten zu können, muss es an dieser Stelle digitalisiert werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Komparators⁸⁷.

Hier ist es der Baustein MAX902. Er hat den Vorteil, dass er sehr schmale Pulse erkennen kann. Seine Aufgabe ist es, das Signal und eine über ein Potentiometer⁸⁸ einstellbare Spannung miteinander zu vergleichen. Überschreitet das Signal die eingestellte Threshold-Spannung⁸⁹, so schaltet der Baustein an seinem Ausgangspin. Die nachfolgende Elektronik (Schalterlogik) arbeitet nicht mit den schnellen Pulsen des Photomultipliers. Daher wird an diesem Punkt das Signal künstlich verbreitert, indem die sog. Latch-Funktion⁹⁰ des Komparators ausgenutzt wird. Hierzu wird der Ausgang des Komparators über ein Kondensator-Widerstandsglied (sog. RC-Glied) am Latch-Eingang angeschlossen. Die Zeitkonstante beträgt hierbei $\tau=R \cdot C$, wobei R der Widerstand und C die Kapazität des verwendeten Kondensators ist. In der vorliegenden Schaltung wurden die Werte $C=33 \text{ pF}$ und $R=(120+1800) \Omega$

⁸⁷ comparare (lat.) = vergleichen

⁸⁸ Ein einstellbarer elektrischer Widerstand.

⁸⁹ Threshold (engl.)=Schwelle

⁹⁰ to latch (engl.)=sperren

verwendet. Dies ergibt eine theoretische Pulslänge von ca. 65 ns, welche für die nachfolgenden Bauteile hinreichend lang ist, um zu reagieren. Tatsächlich werden ca. 130 ns erreicht (vgl. Abbildung 35).

Des Weiteren ist der Ausgang des Komparators TTL-kompatibel⁹¹, das bedeutet, seine Ausgangsspannung ist entweder 0 V oder 5 V, was „logisch 0“, bzw. „logisch 1“ entspricht. Ab diesem Punkt in der Schaltung wird also mit digitalen Pulsen weitergearbeitet.

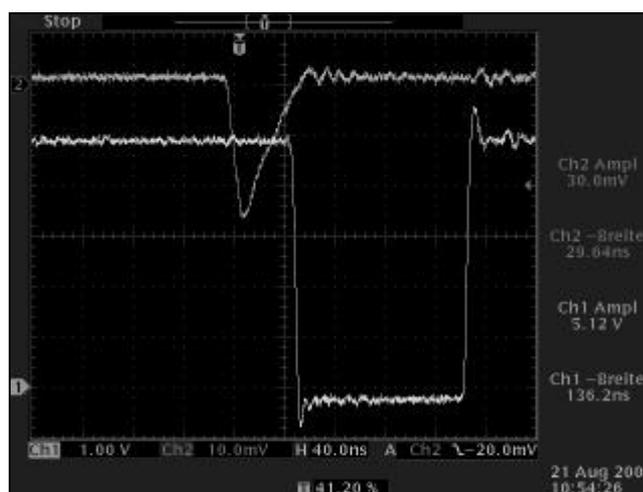


Abbildung 35: Ausgangssignal des Komparators.
 Kanal1: TTL-Signal des Komparators.
 Kanal2: (generiertes) Eingangssignal an der Verstärkerplatine.

Schalterlogik

Der sich anschließende Teil erfüllt folgende Aufgabe: Für eine Ratenmessung in Abhängigkeit des Zenitwinkels (vgl. Kapitel 5.3) ist es nötig, zwei Kannen in *Koinzidenz* zu betreiben. Das bedeutet, dass ein zu registrierendes Ereignis nur dann vorliegt, wenn in beiden Kannen gleichzeitig ein Puls detektiert wurde. Mit Hilfe des Schalters lassen sich drei Möglichkeiten auswählen: *nur Kanne A*, oder *nur Kanne B* oder *Kanne A und Kanne B* in Koinzidenz. Die Verarbeitung ist mit einigen NAND-Bausteinen⁹² realisiert. Anhang 7 verdeutlicht die Logik eines NAND-Bausteines. Für die Koinzidenzschaltung werden mehrere NANDs benötigt (Näheres: siehe Schaltung in Kapitel A3.2).

Verarbeitung

Nach dem Teil der Schalterlogik geht es mit der Verarbeitung des digitalen Signals in mehreren Bausteinen weiter: zuerst wird das Signal noch mal in der Zeit gedehnt, dies ist für einen störungsfreien Ablauf nötig. Die Dehnung wird durch die beiden Stufen des Bausteins HC221

⁹¹ TTL= Transistor-Transistor-Logic.

⁹² N-AND=nicht-und

(IC2 im Schaltplan) übernommen. Es reagiert auf die Flanke des ankommenden Pulses und verlängert das Signal in der ersten Stufe (IC2A), wegen der angeschlossenen Zeitkonstante, auf $100 \text{ pF} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 200 \text{ ns}$. Tatsächlich ist der Puls ca. 300 ns lang (vgl. Abbildung 36):

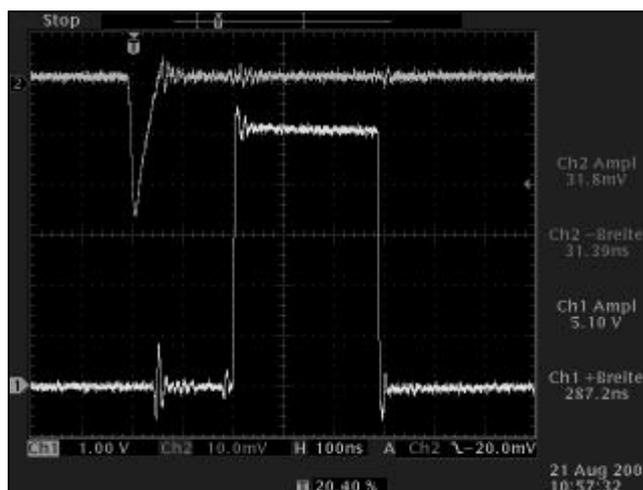


Abbildung 36: Verlängerung des Signals auf ca. 300ns.
 Kanal 1: Ausgang des ICs 2A.
 Kanal 2: (generiertes) Eingangssignal an der Verstärkerplatine.

9.2.3 Unterscheide 2 Messvorgänge: Rate und Lebensdauer

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Elektronik bei Raten- bzw. Lebensdauerermessungen wird im Folgenden getrennt auf die beiden eingegangen.

Messvorgang *Rate*

Im Versuchsaufbau durchdringen Myonen die Thermoskanne und lösen wegen des Cherenkoeffekts einen Lichtblitz aus, der durch die Schaltung detektiert werden soll.

Bei einer Ratenmessung muss nur überprüft werden, ob ein Ereignis statt gefunden hat (vgl. Kapitel 11.1) oder nicht. Hierfür wird der Puls in der zweiten Stufe des Bausteins HC221 (IC2B) auf $1 \text{ nF} \cdot 20 \text{ k}\Omega = 20 \mu\text{s}$ (tatsächlich: ca. $13 \mu\text{s}$, vgl. Abbildung 37) verbreitert und dann dem Flipflop HC74 (IC5B) zugeführt. Sein Ausgang liegt am Pin 13 des Druckerports. Hier wird dem PC-Programm signalisiert, dass Daten anliegen. Hat ein Ereignis stattgefunden, so muss nach der Registrierung des Ereignisses durch das Programm die Schaltung wieder per Software initialisiert werden.

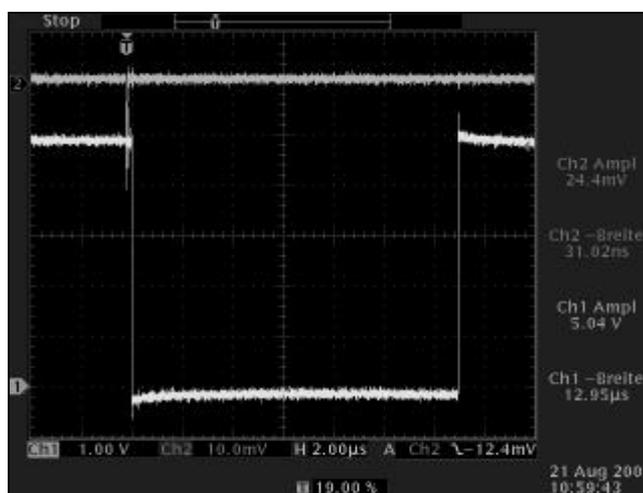


Abbildung 37: Torzeit für die Lebensdauermessung.

Messvorgang *Lebensdauer*

Bei einer Lebensdauermessung (vgl. Kapitel 11.4) soll der zeitliche Abstand zweier Pulse gemessen werden. Der erste stammt von einem in die Kanne eindringenden Myon. Wird das Myon gestoppt, zerfällt es meistens innerhalb seiner Lebensdauer in ein Elektron (siehe Kapitel 5.2). Dieses erzeugt wegen des Cherenkoeffekts auch wieder einen Lichtblitz, der auch verstärkt wird.

Das Herzstück des Digitalteils bildet für diesen Messvorgang ein aktiver 20 MHz Quarz. Dieser Takt steuert den binären Zähler im Baustein HC590 (IC4). Sobald ein erster Puls vom Baustein HC221 (IC2A) kommt, schaltet das Flipflop HC74 (IC5A) den Zähler frei. Bei jeder Flanke des Quarzsignals zählt der Zähler um eins nach oben. Die Freigabe gilt solange, bis von der zweiten Stufe des Bausteins HC221 (IC2B) ein weiterer Puls kommt. Dann wird der Zähler angehalten. Kommt in der Torzeit von ca. 13 μs (vgl. Abbildung 37), welche über die Zeitkonstante des Bausteins HC221 (IC2B) definiert wird, kein weiterer Puls, so wird dies an einem weiteren Flipflop HC74 (IC6A) an der Druckerschnittstelle angezeigt. In diesem Fall muss der Zähler durch die Software deaktiviert und zurück auf Null gesetzt werden. Kommt innerhalb der Torzeit ein weiterer Puls, wird der Zähler gestoppt und die vergangene Zeit liegt binär an den Ausgängen des Zählers und somit an der Druckerschnittstelle an⁹³.

In beiden Messarten wird ein registrierter Puls vom Baustein HC221 (IC2B) auch an einen weiteren Baustein HC123 (IC8B) gegeben, der den Puls noch einmal auf ca. $10\mu\text{F} \cdot 20\text{k}\Omega = 0,2\text{s}$ verlängert. Die Ausgangsspannung wird über eine Leuchtdiode sichtbar gemacht. Diese und

⁹³ Über Pin 14 des Bausteins kann man die Ausgänge ein- und ausschalten. Dies ist durch eine NAND-Schaltung, welche über Pin 31 des Druckerports ausgelöst wird, vorgesehen.

die anderen wichtigen Status-Anzeigen (Daten liegen an, Überlauf und Clear) sind über Pins auf der Platine abgreifbar⁹⁴. Eine weitere Anschlussmöglichkeit bietet die BNC-Buchse auf der Platine: Hier liegt der invertierte Ausgang der ersten Stufe des Bausteins HC221 an (Abbildung 38).

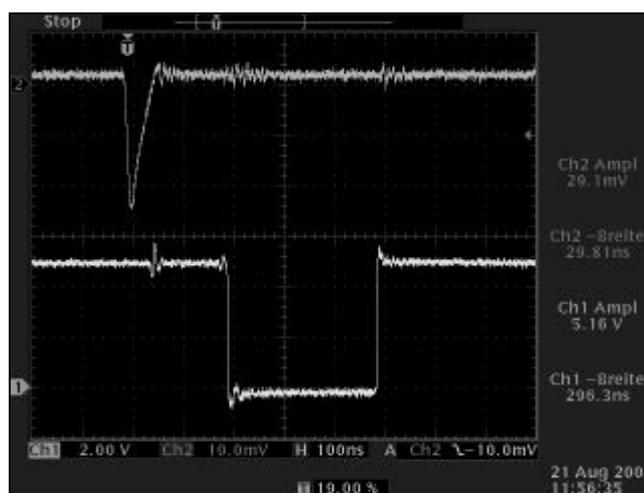


Abbildung 38: Puls, welcher an der BNC-Buchse anliegt (Kanal 2).

Versorgung

Die Versorgungsspannung ist zweigeteilt. Es gibt einen Anschluss für die Versorgung der analogen Bauteile und einen für die Digitalelektronik. Beide Spannungen werden mit Hilfe von Reglern auf +5V eingestellt. Die Versorgungsspannung für den analogen Verstärker wird ebenfalls auf der Digitalplatine eingespeist und dann über den 5poligen Stecker an ihn geliefert.

9.3 Anbindung an den Computer

Um Messungen über mehrere Tage laufen zu lassen, ist es nötig, die Daten mit einem PC zu erfassen und zu speichern. Als Schnittstelle zwischen Digitalelektronik und PC dient die Parallele Schnittstelle. Die interne Basis-Adresse des Druckerports am PC liegt standardmäßig bei 378hex⁹⁵. Das Datenregister ist an dieser Adresse zugänglich, das Statusregister an der Basisadresse+1, das Steuerregister an der Basisadresse+2.

⁹⁴ Auf der Platine sind Widerstände vorgesehen, die ein Weiterleiten an Leuchtdioden vereinfachen sollen.

⁹⁵ Andere Adressen sind denkbar, z.B.: 268, 278, 26C, 27C, 3BC

9.3.1 Die parallele Schnittstelle

Die Anbindung der Digitalelektronik an den PC erfolgt am Parallelport des Computers. Diese Anbindung ermöglicht es, bei einer Lebensdauermessung den Zählerstand direkt auszulesen. Der darstellbare Zählerstand liegt bei 0 bis 255, dies entspricht 2^8 Zuständen. Die 8 Ausgänge des Zählers liegen direkt an den 8 Datenleitungen der Schnittstelle. Möchte man den Zählerstand dezimal interpretieren muss man die binär⁹⁶ vorliegende Zahl umwandeln.

Die einzelnen Bits⁹⁷ des Parallelports sind wie in Tabelle 9 definiert:

Bit Nummer	7	6	5	4	3	2	1	0
Datenregister	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Statusregister	<i>BUSY</i>	ACK	<i>PE</i>	SLCT	ERROR			
Steuerregister					<i>SLCT IN</i>	INIT	<i>AUTO</i>	

Tabelle 9: Standardbelegung der Bits im Parallelport, die *kursiv* gedruckten Signale liegen invertiert vor.

Bei der Anbindung an den PC wurden außer den acht Datenleitungen für den Zählerstand auch weitere Leitungen benötigt. So musste bei der Lebensdauermessung sowohl kontrolliert werden, ob ein Ereignis stattgefunden hat und, falls ja, auch überprüft werden, ob der Zähler übergelaufen war. Des Weiteren musste bei der Ratenmessung ebenfalls überprüft werden, ob ein Myon registriert wurde. Außerdem musste bei beiden Messungen die Möglichkeit gegeben sein, die vorhandenen Logikbauteile (Flipflops, Zähler,...) auch wieder initialisieren zu können, um so die gesamte Elektronik für das nächste Ereignis bereit zu machen.

Eine Darstellung der verwendeten Leitungen und Pins liefert Tabelle 10

⁹⁶ Binär = im Zweiersystem (0,1) darstellen

⁹⁷ engl. binary digits (binäre Stellen)

Sub-D-Stecker (Pin am PC)	Centronics (Pin am Endgerät)	Signalbezeichnung	Funktion
1	1	Strobe	nicht angeschlossen
2	2	D0	Zählerausgang 1: Datenbit 0
⋮	⋮	⋮	⋮
9	9	D7	Zählerausgang 8: Datenbit 7
10	10	Ack	nicht angeschlossen
11	11	<i>Busy</i>	Zählerausgänge eingeschaltet?
12	12	<i>PE</i>	Zähler übergelaufen?
13	13	<i>Slct</i>	Daten liegen an!
14	14	<i>Autofeed</i>	Initialisieren
15	32	Error	Ground
16	31	Init	Zähler schalten
17	36	Slct In	Ground
18-25	19-30,33	GND	teilweise nicht angeschlossen, oder an
	15-18,34,35	not connected	Ground ⁹⁸

Tabelle 10: Pin-Belegung der Schaltung.

9.3.2 Steuerung und Auslesen der Messapparatur:

Das LabVIEW-Programm

Das von Klein entwickelte Messprogramm [KI00] war in Turbo Pascal geschrieben, was in DOS-Zeiten völlig ausreichend war. Das neue Programm wurde für Windows in der Programmiersprache LabVIEW von National Instruments geschrieben, welche schnell erlernbar ist⁹⁹. Die Oberfläche ist Maus gesteuert und einfach aufgebaut. Die einzelnen Unterprogramme sind eingängig und gegen einige Benutzerfehler abgesichert. So können zum Beispiel Messprotokolle nicht überschrieben werden. Bei der Lebensdauermessung wird die statistische Verteilung auf dem Bildschirm angezeigt. Die Auswertung muss, wie bei [KI00], außerhalb des Messprogramms mit anderer Software erfolgen, da so keine Einschränkungen gegeben sind. Wichtige Optionen werden abgespeichert und stehen nach jedem Programmstart zur Verfügung.

⁹⁸ siehe Schaltpläne im Anhang 3.

⁹⁹ Eine Lizenz der Programmiersprache gab es im Fachbereich schon, und das fertige Programm kann kostenlos zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiterer Vorzug von LabVIEW ist, dass der normalerweise von Windows¹⁰⁰ verbotene direkte Portzugriff ermöglicht wird¹⁰¹. Generell gilt, wie für viele andere Programmiersprachen auch, dass sich ein Programm auf mehreren Ebenen abspielt. Bei LabVIEW sind dies das Anwendungsfenster und das Diagramm im Hintergrund. Im Anwendungsfenster tritt der Computer mit dem Menschen durch Knöpfe, Anzeigen, Einstellmöglichkeiten und so weiter in Kontakt. Das Diagramm ist während der Laufzeit des Programms für den Benutzer nicht sichtbar. Hier ist festgelegt, was passiert wenn dieses oder jenes Ereignis eintritt.

Es wurden mehrere Programmmodule erstellt, die an dieser Stelle kurz einzeln an Hand ihrer Anwendungsfenster vorgestellt werden sollen. Die Diagramme und eine komplette Dokumentation finden sich in Anhang 8. Das gesamte Programm gliedert sich in:

- Hauptmenü
- Rate
- Rate auswerten
- Lebensdauer
- Optionen
- Infos



Abbildung 39: Das Hauptmenü.

Hauptmenü

Hier wählt die/der BenutzerIn aus den in Abbildung 39 erkennbaren Möglichkeiten aus.

¹⁰⁰ in den Versionen 2000, NT und XP.

¹⁰¹ Allerdings mit einem zusätzlichen Programmpaket (AccessHW), das über die Homepage von LabVIEW zur Verfügung gestellt wird (siehe Anhang 4).

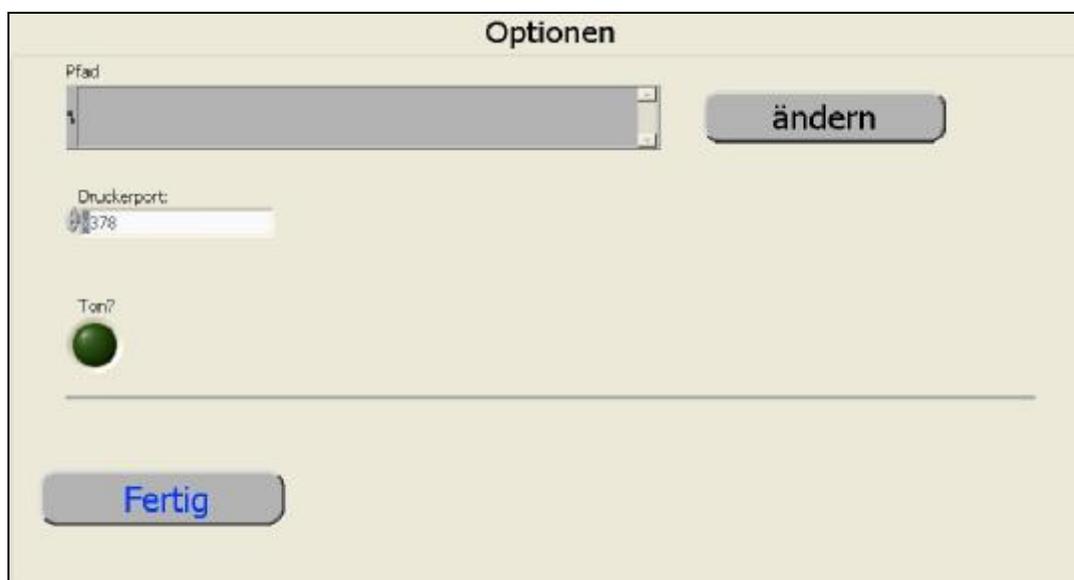


Abbildung 40: Optionen Bildschirm.

Optionen

In diesem Menü (Abbildung 40) werden Einstellungen für den Programmablauf vorgenommen. Die getroffenen Optionen werden standardmäßig in der Datei *Optionen.ini* im Verzeichnis *c:\kamiokanne*¹⁰² gespeichert.

Die wichtigste Einstellung ist die Adresse des Druckerports. Die Voreinstellung ist 378 (im Hex-Code). Die Adresse kann allerdings von Computer zu Computer abweichen und ihre Einstellung sollte daher überprüft werden. Die korrekte Adresse erreicht man unter Windows am schnellsten über einen Rechtsklick auf das Arbeitsplatzsymbol auf dem Desktop, dann weiter zur Registerkarte Hardware und von dort zum Gerätemanager. Hier findet man den Druckerport unter Anschlüsse. Mit einem Doppelklick auf den Druckeranschluss erhält man auf der Registerkarte Ressourcen schließlich den Adressbereich der Schnittstelle im Hexsystem.

Eine andere Einstellung ist der Pfad, unter welchem man die Messprotokolle und die Auswertungen standardmäßig speichern möchte. Mit einem Klick auf „ändern“ wird ein Windows-typisches Dateiauswahlfenster geöffnet. Man wechselt einfach in das gewünschte Verzeichnis und drückt dann „Verzeichnis auswählen“.

Der grüne Knopf am unteren Bildrand legt die Standardeinstellung für das Tonsignal für ein Ereignis während der Ratenmessung fest: Ton an oder Ton aus.

¹⁰² Das Verzeichnis wird bei der Installation angelegt.



Abbildung 41: Bildschirm der Ratenmessung.

Rate

Wählt man diesen Punkt, öffnet sich automatisch ein Dateifenster, in welchem man der Protokolldatei für diese Messung einen Namen gibt (*[Name des Messprotokolls].kan*). Anschließend startet die Messung.

Während der Messung werden die Zeit des zuletzt registrierten Ereignisses und die Gesamtzahl der Ereignisse angezeigt (Abbildung 41). Außerdem gibt es auch hier einen Knopf, der den Ton für ein registriertes Ereignis ein- und ausschaltet (die Einstellung des Knopfes wird allerdings nicht in die Optionendatei geschrieben). Damit man seine gemessenen Zeiten auch wieder findet, wird der Pfad zur Protokolldatei ebenfalls angezeigt.



Abbildung 42: Das Modul zum Auswerten von Ratenmessungen.

Auswerten

In diesem Programmteil (Abbildung 42) wird eine unter dem Punkt Ratenmessung erstellte Protokolldatei verarbeitet und aufbereitet. Nachdem der Benutzer eine Intervallgröße in Millisekunden angegeben und auf den „Auswerten“ Knopf gedrückt hat, muss er nur noch die

Datei, welche ausgewertet werden soll, mit Hilfe eines Auswahlfensters wählen. Das Programm erstellt dann, falls gewünscht¹⁰³, zwei Dateien. Die erste (*Abstaende-zu_[Name des Messprotokolls].kan*) zeigt die vergangenen Millisekunden eines Ereignisses seit dem ersten Ereignis dieser Messung. Die andere (*[gewählte Millisekunden]ms-Auswertung_zu_[Dateiname des Messprotokolls].kan*) zeigt die errechnete Tabelle, wie häufig eine Rate pro gewähltes Intervall vorkam. Beide Dateien werden im Verzeichnis der Protokolldatei abgelegt.

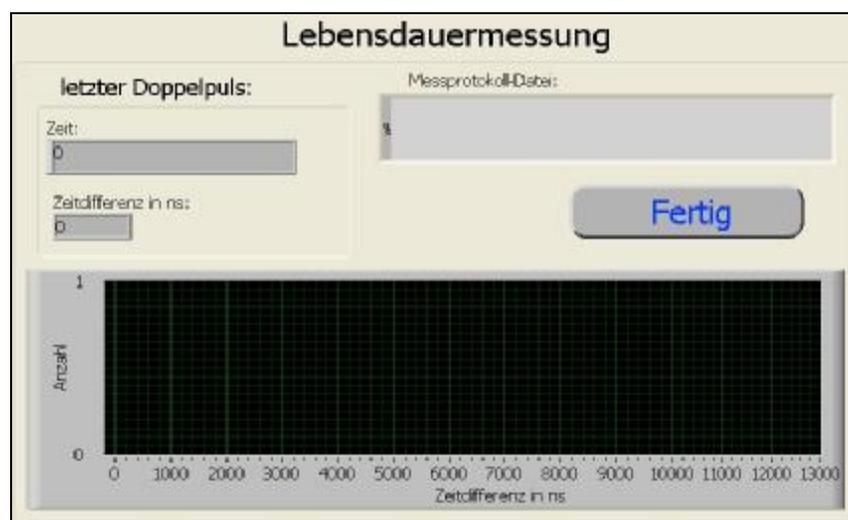


Abbildung 43: Bildschirm für die Lebensdauerermessung.

Lebensdauer

Hier öffnet sich ebenfalls ein Datei-Dialog für den Speicherort und den Dateinamen der Protokolldatei einer Lebensdauerermessung. Dieser wird auch auf dem Benutzerfenster (Abbildung 43) während der Messung angezeigt. Ebenso werden der Zeitpunkt des letzten Doppelpulses und die Differenz dieser beiden Pulse in Nanosekunden angezeigt. Das Histogramm im unteren Teil des Fensters zeigt die aktuelle Verteilung der gemessenen Zeitdifferenzen; genauer: die Häufigkeiten werden über den möglichen Zeitdifferenzen aufgetragen. Dasselbe wird auch in Form einer Tabelle in eine Datei gespeichert¹⁰⁴.

¹⁰³ Die Erzeugung der Abstädatedatei hängt vom Zustand des Kästchens im Auswerte-Fenster ab.

¹⁰⁴ Um gegen einen Ausfall des PCs gewappnet zu sein, wird jedes Mal, wenn ein neuer Doppelpuls registriert wurde, abgespeichert



Abbildung 44: Informationsfenster.

Infos

Hier öffnet sich ein kleines Dialogfenster (Abbildung 44), in welchem der Internetlink zu den Lehramtsseiten, die aktuelle Versionsnummer und der Name des Autors angezeigt werden.

Kapitel 10

Versuchsvorbereitungen

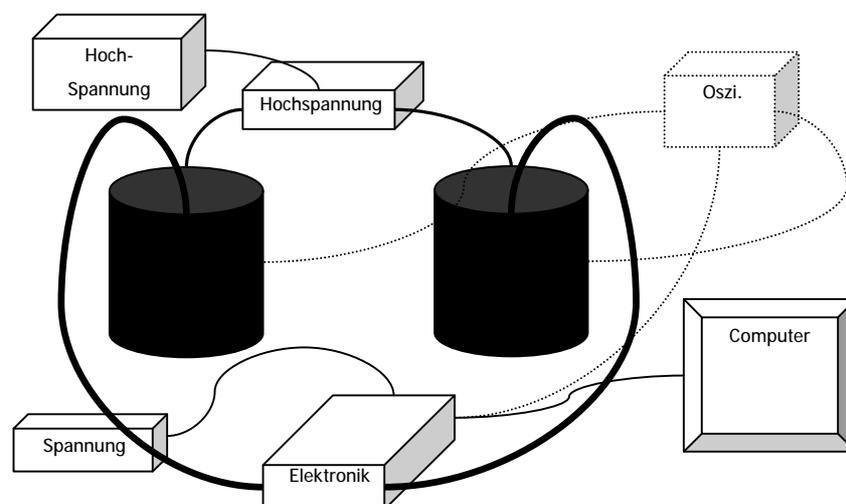


Abbildung 45: Schematischer Versuchsaufbau in der Übersicht.

Die vorgestellten Versuche können alle ohne Probleme in der Schule durchgeführt werden. Die Versuche sind, einen umsichtigen Umgang mit der Hochspannungsversorgung vorausgesetzt, sicherlich auch Experimente, welche Schülerinnen und Schüler durchführen können.

Es bedarf einiger vorbereitender Überlegungen, welche einen optimalen Ablauf der Messungen garantieren. Bei den angesprochenen Versuchen handelt es sich um einige Standards, wie Ratenmessung und Lebensdauermessung. Im Folgenden wird auch auf Koinzidenzmessungen eingegangen.

Zur Inbetriebnahme und zum Erzielen ausreichender Messdaten sind einige Dinge zu beachten.

10.1 Die Einstellungen der Messelektronik

Bei den folgenden Versuchen gibt es immer zwei Parameter, die unabhängig von einander eingestellt werden können und die Ergebnisse der Messung beeinflussen. Zum einen die Hochspannung, welcher am Photomultiplier angelegt wird und zum anderen die Einstellung der Triggerschwelle¹⁰⁵ am Digitalteil.

¹⁰⁵ Trigger, engl. *Auslöser*

10.1.1 Die Hochspannungsversorgung

Bei der verwendeten Messanordnung muss man sich die Frage stellen, wann ein registrierter Puls tatsächlich von einem Myon in der Kanne stammt, da auch andere schnelle geladene Teilchen den Cherenkoeffekt in der Kanne auslösen könnten. Als geladene Teilchen kommen allerdings nur Elektronen und Myonen in Frage [KI00]. Die Elektronen in der Atmosphäre stammen aber aus dem Myonzerfall und werden daher als Myonimpuls interpretiert.

Einen weiteren Einfluss stellen thermische Elektronen im Photomultiplier selbst dar. In anderen Versuchsaufbauten wird dieses Problem dadurch gelöst, dass das Detektormaterial mit zwei Photomultipliern in Koinzidenzschaltung beobachtet wird. Es wird nur dann gezählt, wenn beide Photomultiplier gleichzeitig ein Signal liefern. Da aber die geringen Ausmaße dieses Vorgehen oder eine Kühlung des Photomultipliers ausschließen, müssen *schlechte Ereignisse* durch die Einstellung der Hochspannung minimiert werden: Die Hochspannung muss so *klein* eingestellt werden, dass ein von thermischen Elektronen erzeugter Impuls zu klein ist, um registriert zu werden. Mit einer geringen Hochspannung werden allerdings auch schwache Pulse, erzeugt von einem langsamen Myon, ignoriert. Um eine optimale Einstellung zu finden, wird die Rate bei verschiedenen Hochspannungen aber gleicher Triggerschwelle (siehe Kapitel 10.1.2) gemessen. Man betreibt die Kanne einmal mit und einmal ohne Wasser. Hat man diese Messung durchgeführt, so muss man sich für eine Spannung entscheiden, bei der die leere Kanne eine möglichst kleine, die große Kanne eine möglichst große Rate liefert [KI00].

Eine Messreihe brachte folgende Werte (Tabelle 11), welche in Abbildung 46 dargestellt sind:

Hochspannung kV	Zählrate $\frac{\text{Ereignisse}}{10\text{Sekunden}}$	Messzeit (Zählrate)	Nullrate $\frac{\text{Ereignisse}}{10\text{Sekunden}}$	Messzeit (Nullrate)
1,35	2,45±0,05	≈ 3 Stunden	0,028±0,002	≈ 17 Stunden
1,40	13,37±0,11	≈ 3 Stunden		
1,45	19,71±0,05	≈ 18,5 Stunden	2,81±0,06	≈ 2 Stunden
1,50	29,97±0,12	≈ 5 Stunden	8,7±0,2	≈ 1 Stunde
1,55	56,26±0,10	≈ 16,5 Stunden		

Tabelle 11: Einstellung der Hochspannung.

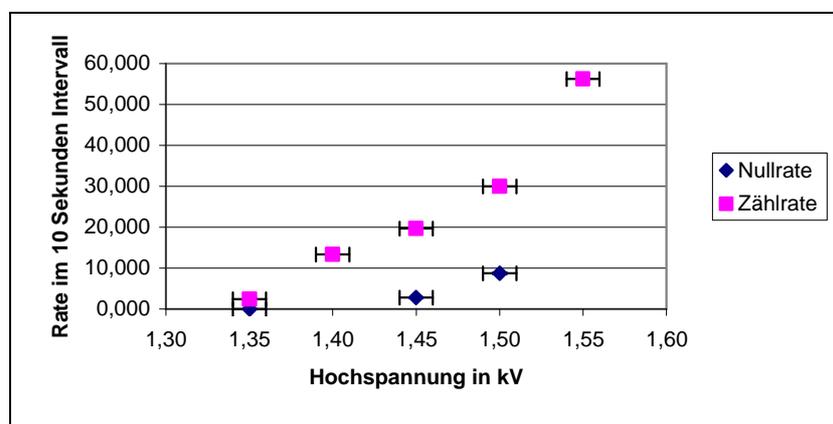


Abbildung 46: Einstellung der Hochspannung.

Eine recht hohe Rate (bei geringer Nullrate) hat man also bei einer Hochspannung von ca. 1,45 kV.

10.1.2 Einstellung der Triggerschwelle

Die Einstellung der Triggerschwelle ist einfacher: Bei einer festen Hochspannung am Photomultiplier ist seine Rauschrate konstant. Dreht man die Schwellenspannung so weit herunter, dass permanent Ereignisse angezeigt werden, liegt man in diesem Rauschen. Dreht man die Schwelle dann ein wenig höher, bis die Pulse einer mit Wasser gefüllten Kanne unregelmäßig werden, so hat man eine geeignete Schwelle gefunden.

Sind diese beiden Einstellungen getätigt, kann mit einer Messung begonnen werden.

10.2 Überprüfung der Zeitmessung beim Messvorgang Lebensdauer

An dieser Stelle wird kurz demonstriert, dass das *Einsortieren* der Doppelpulszeiten bei einer Lebensdauerermessung korrekt ist.

Die Messwerte sind auf Grund der Elektronik in Intervalle, sog. *Bins* der Länge 50 ns zusammengefasst. Mit einem Pulsgenerator¹⁰⁶ wird die Güte der Einteilung der Doppelpulse in diese Bins demonstriert. Hierzu werden zwei Pulse in einem fest definierten zeitlichen Abstand erzeugt. Die generierten Pulse entsprechen in etwa den Originalpulsen aus dem Photomultiplier (vgl. hierzu Abbildung 28 und Abbildung 30 (oben)) und ihr zeitlicher Abstand wird mit einem Oszillographen bestimmt. Es wurden für fünf verschiedene Zeitabstände Messungen durchgeführt. Die Peaks der registrierten Pulse sind sehr schmal. Die Einträge streuen über maximal vier Bins. Das bedeutet, dass der Fehler, welcher bei der Einsortierung ge-

¹⁰⁶ vgl. Fußnote 83

macht wird bei ± 100 ns liegt. Dies soll für ein Beispiel Abbildung 47 mit einem eingezeichneten Gauß-Fit belegen. Der mit dem Oszillograph bestimmte zeitliche Abstand zweier Pulse beträgt hier 783,8 ns. Der Gauß-Fit ergibt einen Mittelwert von 775,4 ns.

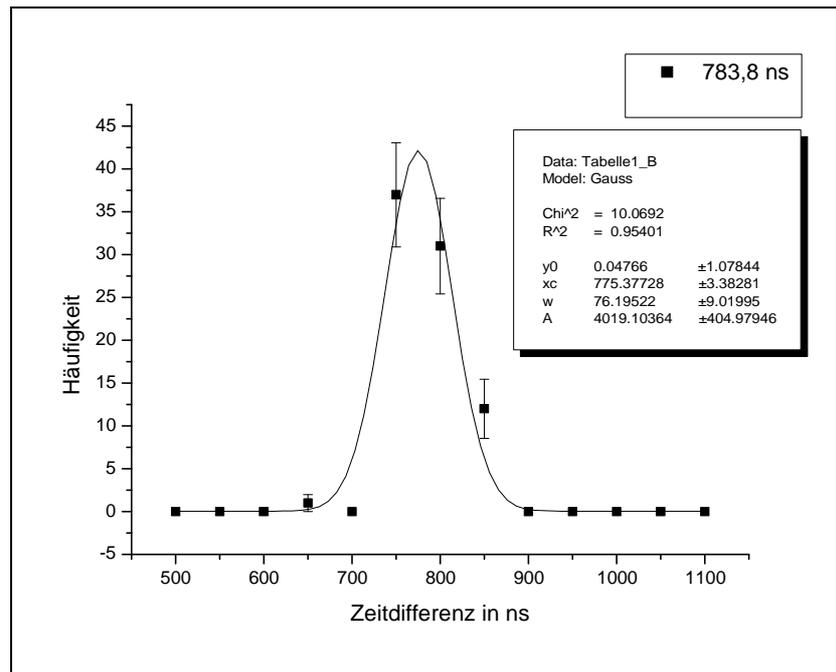


Abbildung 47: Gauß-Fit für ein Beispiel der Einsortierung der Doppelpulszeit.

Kapitel 11

Schulversuche



Abbildung 48: Der Versuchsaufbau in der Übersicht¹⁰⁷.

An dieser Stelle sollen mehrere Experimente vorgestellt werden, die mit dem vorne beschriebenen Aufbau möglich sind. Dies sind Ratenmessungen, eine Messreihe zum Durchdringungsvermögen der Myonen, ein Experiment zur Winkelabhängigkeit und die Bestimmung der Lebensdauer. Allen Experimenten wurden Schemazeichnungen beigefügt, welche den Aufbau schnell nachvollziehbar machen. Die Bedienung des LabVIEW-Programms ist in Kapitel 9.3.2 erläutert. Zusätzlich steht mit Anhang 6 eine Kurzbedienungsanleitung mit Anweisungen und Hinweisen für die Durchführung der Versuche zur Verfügung. Vier verschiedene Experimente und die Schritte zur Auswertung werden an dieser Stelle erläutert.

¹⁰⁷ Auf dem Photo nicht berücksichtigt ist, dass die Kamme mit einem Tuch vor eindringendem Streulicht geschützt werden sollte. Auch der Anschluss eines Oszilloskophs ist nicht gezeigt (vgl. Abbildung 25). Das Verwenden einer zweiten Kamme (siehe Koinzidenzmessungen bei der Winkelabhängigkeit) geschieht analog.

11.1 Ratenmessungen

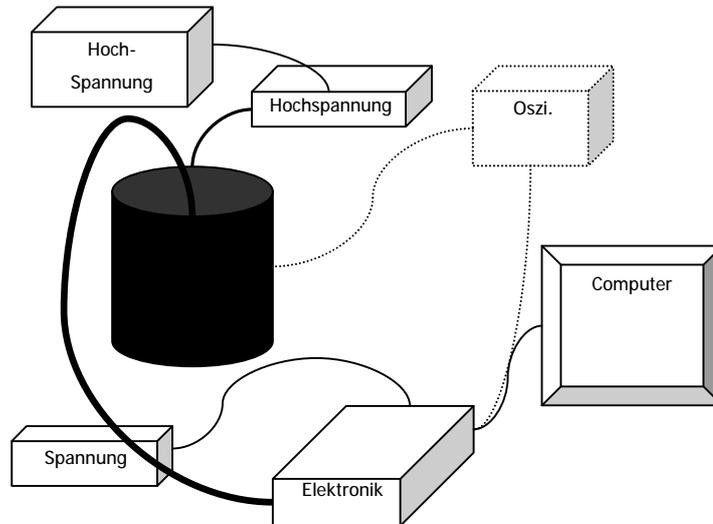


Abbildung 49: Schematischer Versuchsaufbau für Ratenmessungen.

Bei Ratenmessungen ist es interessant, sich die *Zufälligkeit* der Myonenereignisse plausibel zu machen. Hierfür kann man die Ratenverteilung einer 3-Minuten-Messreihe¹⁰⁸ betrachten (Abbildung 50).

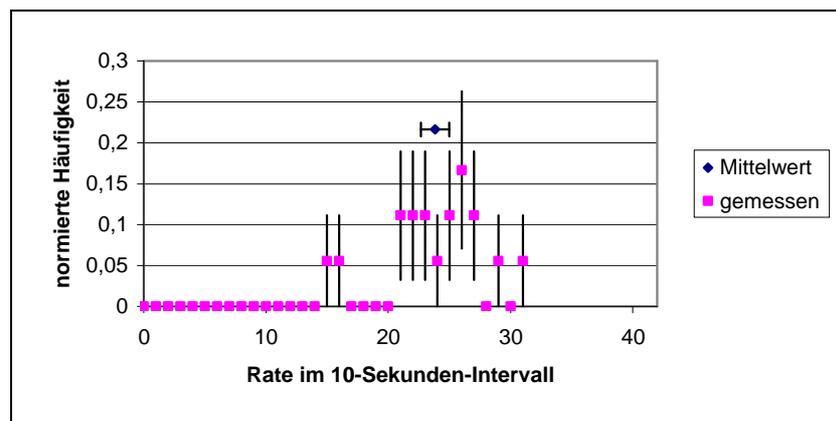


Abbildung 50: Ratenverteilung einer 3-Minuten-Messung (18 Intervalle à 10 Sekunden).

Die Myonenrate liegt, dem Zufall entsprechend, zwischen $15 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$ und $31 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$. Ihr Mittelwert beträgt $(23,83 \pm 1,15) \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$. Eine Bestimmung der Myonenrate ist diesen wenigen Messdaten jedoch nicht zu entnehmen.

¹⁰⁸ Bei einer Hochspannung von 1,45 kV

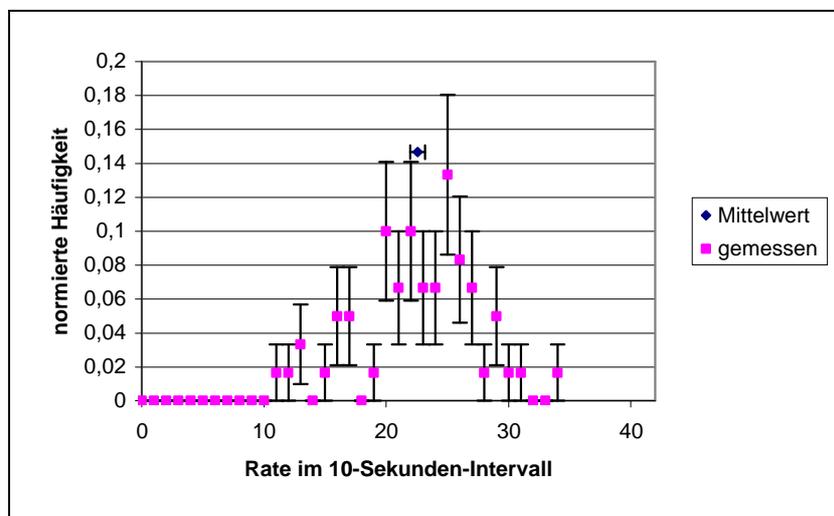


Abbildung 51: Ratenverteilung einer 10-Minuten-Messung (60 Intervalle à 10 Sekunden).

Verlängert man die Messzeit auf 10 Minuten, so wird eine Tendenz zu $20 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$ bis $25 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$ sichtbar (Abbildung 51). Der Mittelwert der 10minütigen Messung beträgt $22,57 \pm 0,61 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$, wieder ist aber eine befriedigende Bestimmung der Rate nicht möglich. Es bedarf einer längeren Messreihe, um hinreichend viele Daten zu sammeln.

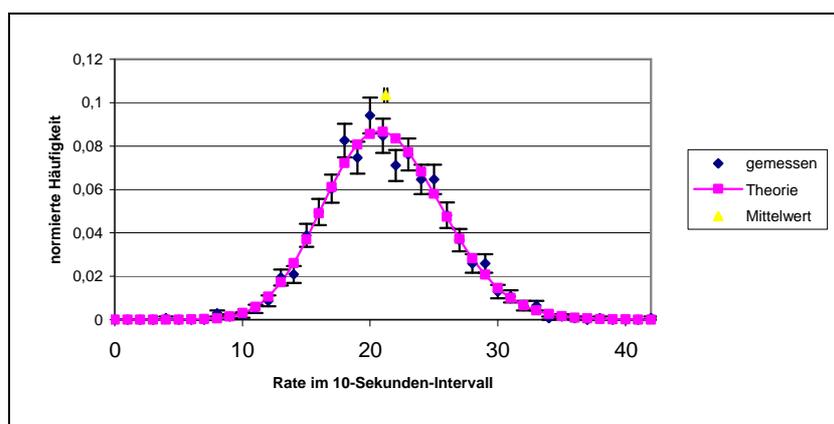


Abbildung 52: Ratenverteilung einer gesamten Messung (ca. 4 Stunden, entspricht 1392 Intervallen).

Abbildung 52 zeigt die normierte Auswertung einer Messung, welche über etwa 4 Stunden lief. Der Mittelwert μ ist ebenfalls eingetragen, er beträgt $(21,23 \pm 0,12) \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$.

Die Myonenrate ist poissonverteilt¹⁰⁹. Die Wahrscheinlichkeit P , r Ereignisse zu beobachten beträgt [Le94]: $P(r) = \frac{\mu^r e^{-\mu}}{r!}$. Die Verteilung ist diskret und nur der Mittelwert μ der Ereignisse bestimmt ihren Verlauf. Die Standardabweichung σ der Poissonverteilung beträgt $\sigma = \sqrt{\mu}$.

¹⁰⁹ Da die Anzahl der Versuche N gegen unendlich und die Wahrscheinlichkeit p , ein Ereignis zu beobachten gegen Null geht, so dass der Erwartungswert $\mu = N \cdot p$ finit bleibt.

Man kennt zwar den exakten Wert von μ nicht, der errechnete Mittelwert $\mu=21,23 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$ dient in diesem Fall als bester Schätzer. Die Abweichung von diesem Fehler ergibt sich aus $\sigma = \sqrt{\frac{\mu}{n}}$, wenn n die Gesamtzahl der Einzelmessungen ist. So wurden die Poisson-Kurven in die Diagrammen eingetragen.

Um nun eine Aussage über die absolute Rate zu machen, muss man noch die Verteilung der *schlechten Ereignisse* in der Auswertung berücksichtigen und ein Messreihe ohne Wasser bei denselben Einstellungen durchführen. Das Ergebnis einer 2-Stunden Messung zeigt Abbildung 53. Die mittlere Rate beträgt hierbei $(16,88 \pm 0,38) \frac{\text{Ereignisse}}{1\text{Min}}$, was auf ein Intervall von 10 Sekunden Länge etwa $(2,81 \pm 0,06) \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$ bedeutet. Die Korrektur muss also berücksichtigt werden.

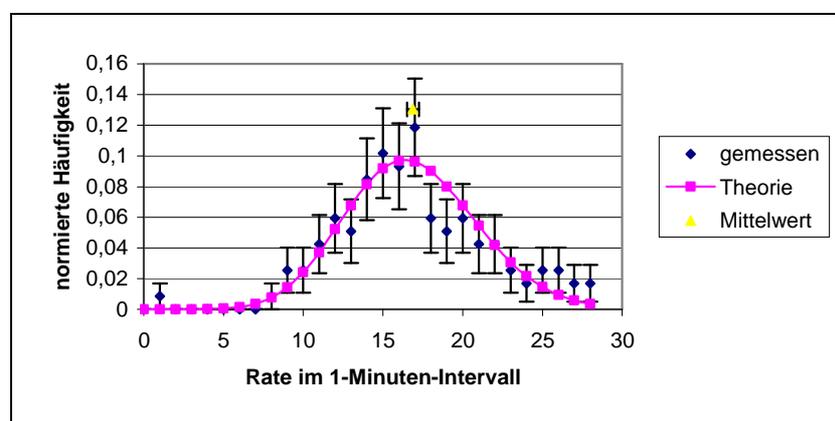


Abbildung 53: Nullratenverteilung von 118 1-Minuten Intervallen.

Eine weitere Rolle spielt die Effizienz der Kanne. Sie wurde von Klein auf 80% bis 90% mit Hilfe einer Anordnung zweier Plastiksintillatoren ober- und unterhalb der Kanne bestimmt (vgl. [KI00, S.34f.]).

Rechnet man dies auch noch ein¹¹⁰, ergibt sich eine mittlere absolute Rate von etwa $21 \frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$.

11.2 Durchdringungsvermögen

Geladene Teilchen, welche Materie durchdringen, verlieren auf ihrem Weg Energie. Diese Absorption wird durch elektromagnetische Interaktionen, genauer: inelastische Stöße mit den Elektronen der beteiligten Stoßatome, verursacht. Im Falle von Myonen, welche in Was-

¹¹⁰ Angenommene Effizienz: 85%.

ser eindringen, liegt die Ursache der Energieabgabe in Ionisation und Anregung [KI00]. Beschrieben wird der Energieverlust durch die Bethe-Bloch-Formel [Le94]¹¹¹:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi \cdot N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right]$$

Formel 3: Bethe-Bloch-Formel

$\frac{dE}{dx}$: differentieller Energieverlust der Teilchen auf der Wegstrecke dx

N_a : Avogadrokonstante: $6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol

r_e : klassischer Elektronenradius: $2,817 \cdot 10^{-13}$ cm

m_e : Ruhemasse des Elektrons: 511 keV/c²¹¹²

ρ : Dichte der absorbierenden Materie

Z : Ordnungszahl, Kernladungszahl des durchdrungenen Materials

A : Atommasse des durchdrungenen Materials, in g/mol

z : Anzahl der Elementarladungen des Projektilteilchens

β : auf c normierte Geschwindigkeit des Projektilteilchens: $\beta = v/c$

γ : Lorentzfaktor: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

W_{\max} : maximaler Energietransfer, der bei einer Kollision übertragen wird

I : mittleres Anregungspotenzial der Atome des Materials, in eV

I lässt sich, abhängig von Z , mittels folgender Formeln bestimmen:

$$\frac{I}{Z} = 12 + \frac{7}{Z} \text{ eV für } Z < 13$$

$$\frac{I}{Z} = 9,76 + 58,8 \cdot Z^{-1,19} \text{ eV für } Z \geq 13$$

W_{\max} wird nach folgender Formel berechnet:

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

wobei M die Masse des Projektils ist, hier also die Myonenmasse.

¹¹¹ Nicht berücksichtigt werden hier Korrekturen für die Dichte des Absorbermaterials und die Hülle dessen Atome.

¹¹² 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J

Möchte man zeigen, dass die Myonen tatsächlich durch Materie abgeschwächt werden, empfiehlt es sich, Messungen im Schulhaus in unterschiedlichen Höhen zu machen, oder Bleiabschirmungen mit verschiedenen Dicken zu verwenden.

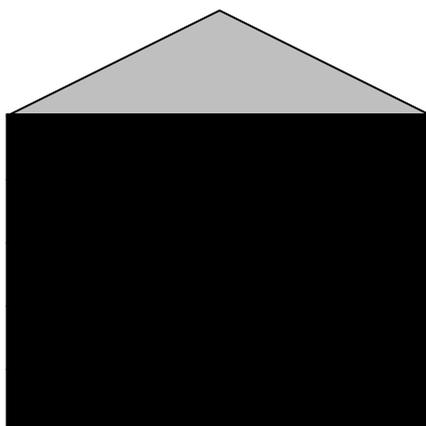


Abbildung 54: Schematischer Aufbau zur Untersuchung des Durchdringungsvermögens.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Raten einer Kanne im Erdgeschoss und im 4. Stock bei gleichen Einstellungen der Hochspannung und der Triggerschwelle gemessen. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse zweier Messreihen, die jeweils über drei bis fünf Stunden liefen.

Messung	Zählrate im EG	Zählrate im 4. Stock
	$\frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$	$\frac{\text{Ereignisse}}{10\text{sek}}$
1	$13,72 \pm 0,12$	$19,93 \pm 0,10$
2	$8,32 \pm 0,11$	$13,11 \pm 0,11$

Tabelle 12: Zählraten auf unterschiedlichen Höhen.

Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der Rate zwischen dem 4. Stock und dem Erdgeschoss. Zusätzlich wurde in Messreihe 1 dem Wasser haushaltübliches Kochsalz beigefügt¹¹³, was sich offensichtlich in einer höheren Zählrate niederschlägt. Weitere Messreihen mit unterschiedlichen Zusatzstoffen müssten ähnliche Ergebnisse bringen.

11.3 Winkelverteilung

Möchte man die Winkelabhängigkeit der Myonen (wie in Kapitel 5.3 angegeben) nachweisen, muss man die Kannen in Koinzidenz betreiben. Das bedeutet, dass ein Ereignis nur gezählt wird, wenn es in beiden Kannen praktisch gleichzeitig stattgefunden hat. Für diese Messreihe wurden die Kannen in drei unterschiedlichen Anordnungen positioniert (vgl. Abbildung 55(a) bis (c)). Signale, die ein Myon in beiden Kannen hinterlassen hat, zeigt Abbildung 56.

¹¹³ Es wurde eine übersättigte Lösung hergestellt.

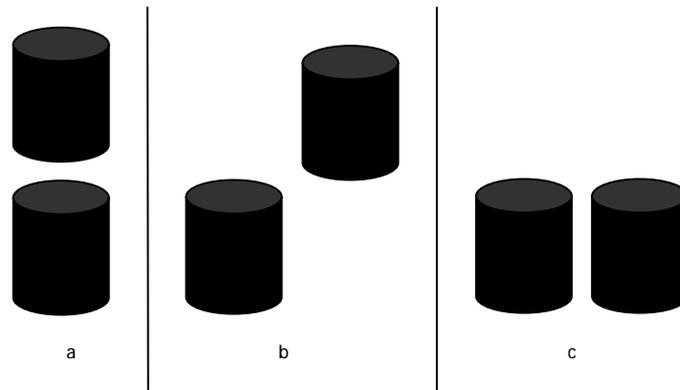
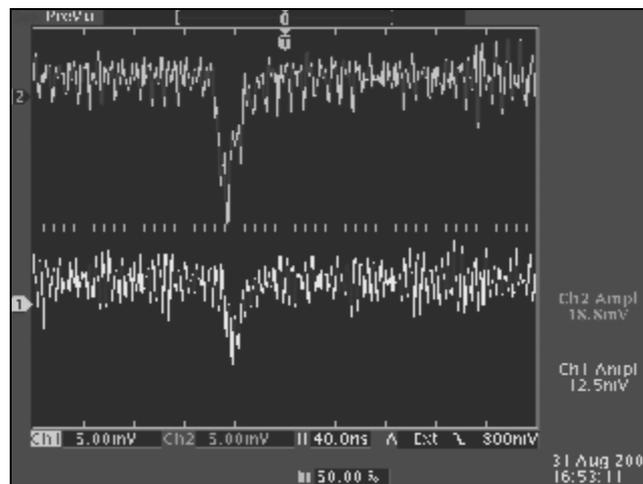
Abbildung 55: Schematischer Aufbau für die Messreihe *Winkelverteilung*.Abbildung 56: Original Photomultiplier-Pulse in Anordnung a.
Kanal1: oberer Photomultiplier.
Kanal2: unterer Photomultiplier.

Tabelle 13 gibt die Messdaten und zur Information auch die Messzeiten wieder:

Anordnung	Zählrate $\frac{\text{Ereignisse}}{2\text{Minuten}}$	Dauer Stunden
a	$9,01 \pm 0,07$	≈ 67
b	$8,82 \pm 0,06$	≈ 71
c	$2,06 \pm 0,03$	≈ 75

Tabelle 13: Messreihen zur Winkelverteilung

Deutlich ist eine Abnahme zwischen den Anordnungen a und c bzw. b und c zu erkennen. Dies wurde auch erwartet (vgl. Kapitel 5.3). Um die geringe Abnahme zwischen a und b zu verstehen, muss man sich klar machen, dass sich in den verschiedenen Anordnungen die Detektorfläche ändert (Abbildung 57):

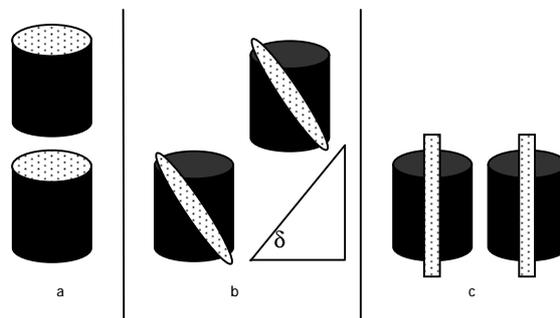


Abbildung 57: Zu berücksichtigende Flächen bei einer Messung der Winkelabhängigkeit

Durch das Umpositionieren werden also nicht nur die Winkel geändert, sondern auch die Flächen, durch welche ein Myon fliegen muss, um in beiden Kannen einen Cherenkovblitz auszulösen. Sie hängen vom Innendurchmesser d der Kanne und ihrer Füllhöhe h wie folgt ab:

Anordnung	Fläche A
a ¹¹⁴	$\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$
b ¹¹⁵	$\pi \frac{d^2}{4 \cdot \cos(\delta)}$
c ¹¹⁶	$d \cdot h$

Tabelle 14: Flächen bei der Winkelmessung.

Die verwendeten Kannen haben einen Durchmesser d von ca. 12 cm. Die Füllhöhe beträgt in etwa 7 cm. In der Messreihe c beträgt der Winkel $\delta=45^\circ$. Normiert man dann die Raten aus Tabelle 13 auf die Flächen, erhält man folgende Tabelle 15:

Anordnung	Zählrate $\frac{\text{Ereignisse}}{2\text{Minuten} \cdot \text{cm}^2}$
a	$\approx 80 \cdot 10^{-3}$
b	$\approx 55 \cdot 10^{-3}$
c	$\approx 25 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 15: Auf die Flächen normierte Zählraten bei der Winkelmessung.

Die theoretische Abnahme der Rate von Anordnung a zu Anordnung b um die Hälfte¹¹⁷ wird durch die gleichzeitige Zunahme der Fläche um den Faktor 1,4¹¹⁸ praktisch kompensiert. Tabelle 15 ist daher besser geeignet, diesen Sachverhalt aufzudecken als Tabelle 14.

¹¹⁴ In diesem Fall die die Fläche ein Kreis.

¹¹⁵ In diesem Fall ist die Fläche eine Ellipse mit den Halbachsen $\frac{d}{2}$ und $\frac{d}{2 \cdot \cos(\delta)}$

¹¹⁶ In diesem Fall die die Fläche ein Rechteck.

¹¹⁷ $\cos^2(45^\circ)=0,5$

¹¹⁸ $\pi \frac{d^2}{\cos(\delta)} / \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 1 / \cos(\delta)$, hier $\delta=45^\circ$

11.4 Bestimmung der Lebensdauer

Die Messzeit für eine Lebensdauerermessung ist auf Grund der wenigen erwarteten Doppelpulse erheblich länger als die einer Ratenmessung. Zeitspannen von mehreren Tagen sind einzuplanen. Der Aufbau und die Voreinstellungen der Hochspannung und der Triggerschwelle gleichen denen bei einer Ratenmessung (vgl. auch Kurzbedienungsanleitung in Anhang 6).

Eine durchgeführte Messung¹¹⁹ über eine Zeit von ca. 66,5 Stunden brachte folgendes Ergebnis (Abbildung 58).

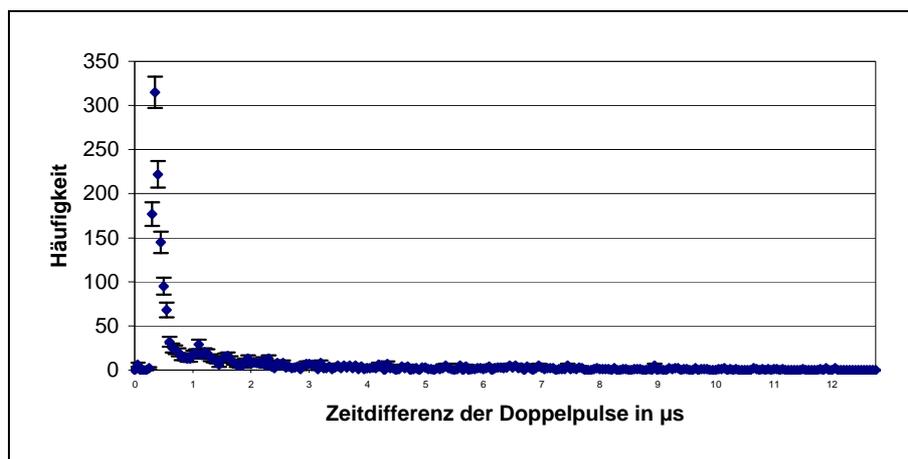


Abbildung 58: Lebensdauerermessung – gesamt.

Die x-Achse zeigt die Zeitdifferenz der Doppelpulse in Mikrosekunden und die y-Achse die Häufigkeit dieser Doppelpulse an.

Myonen zerfallen mit einer mittleren Zerfallszeit $\tau = 2,2 \mu\text{s}$. Ein in die Kanne eingeflogenes Myon wird gestoppt und zerfällt dann in ein Elektron, bzw. ein Positron. Die Zeit dazwischen wird durch die Elektronik registriert und vom PC aufgenommen und dargestellt. Die Auswertung muss noch erfolgen.

Die theoretische Verteilung der Doppelpulse gehorcht dem Zerfallsgesetz (vgl. Kapitel 6):

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$. Im vorderen Ausschnitt der Messung zeigt sich auch ein exponentieller Verlauf (vgl. Abbildung 59). Das Fehlen der Einträge in den Intervallen $0 \mu\text{s}$ bis ca. $0,4 \mu\text{s}$ lässt sich durch die verwendete Zeitkonstante zum Verlängern des Pulses in der Elektronik erklären (vgl. Kapitel 9.2.2).

¹¹⁹ Bei einer Hochspannung von 1,45 kV und einer Triggerschwelle von 2,27 V

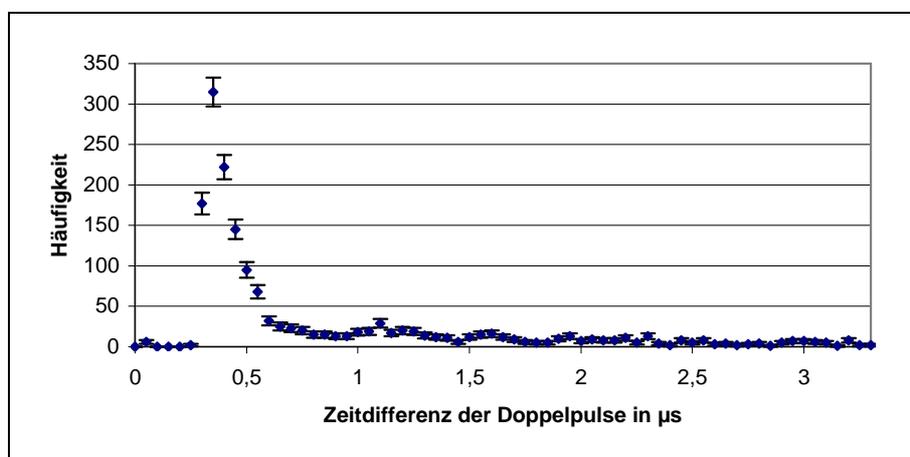
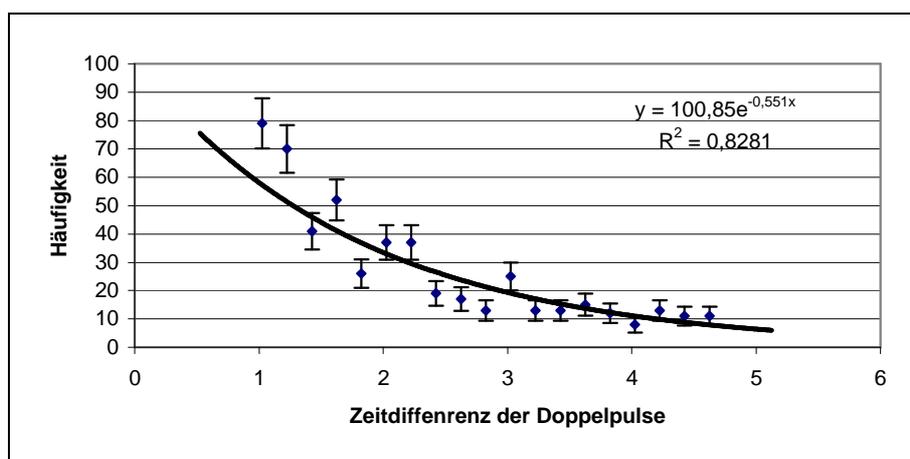


Abbildung 59: Lebensdauerermessung – Abschnitt 0 µs bis 3,3 µs.

Eine bessere Auswertung erhält man, wenn die Daten in mehreren *Bins* zusammengefasst und die nichtrelevanten *Bins* außer Acht gelassen werden. Für Abbildung 60 wurden je 4 *Bins* zusammengefasst und nur die Daten zwischen 1 µs und 4,5 µs berücksichtigt. Die Lebensdauer ergibt sich dann aus dem Exponenten der angepassten exponentiellen Funktion zu:

$$\tau = \frac{1}{0,551} \mu\text{s} \approx 1,8 \mu\text{s}.$$

Abbildung 60: Lebensdauerermessung – Auswertung μ^+ .

Wertet man die Lebensdauer der ersten *Bins* (0,35 bis 0,95 µs) aus, so ergibt sich eine Lebensdauer von $t = \frac{1}{5,5719} \text{ms} \approx 0,179 \text{ms}$.

Der Unterschied der beiden Zahlen lässt sich durch die unterschiedliche Entstehungsweise der Doppelpulse bei positiven und negativen Myonen erklären. Stoppt ein positives Myon im Wasser zerfällt es in ein Elektron oder ein Positron. Der hierbei gemessene zeitliche Abstand zwischen den Pulsen ist die Lebensdauer des Myons. Bei den negativen Myonen kommt der Effekt des Kerneinfangs (Kapitel 5.2) hinzu. Die negativen Myonen verfälschen bei einer Le-

bensdauerermessung somit das Ergebnis erheblich. Der große Unterschied der Lebensdauern lässt sich dadurch erklären, dass während des Versuchs eine ca. 50 mm dicke Bleischicht oberhalb der Kanne angebracht war.

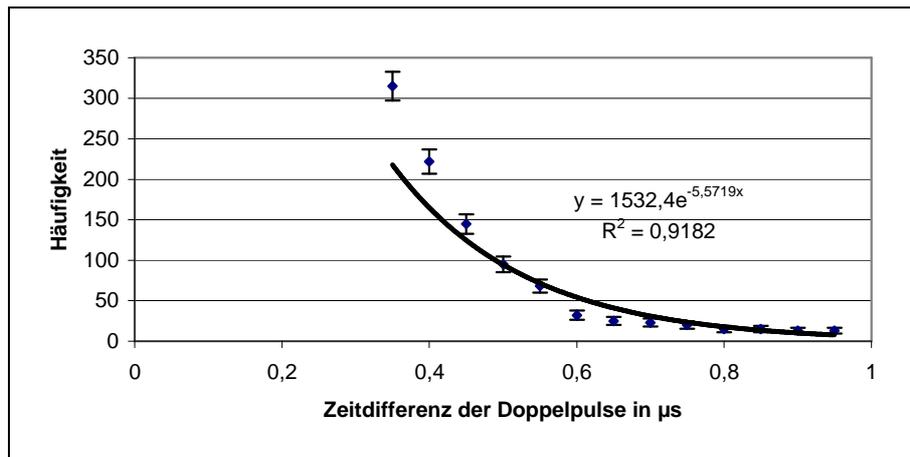


Abbildung 61: Lebensdauer – Auswertung μ .

Eine weitere Messung ohne Blei zeigt Abbildung 62. Durch eine logarithmische Darstellung der y-Achse ist der exponentielle Zusammenhang gut erkennbar.

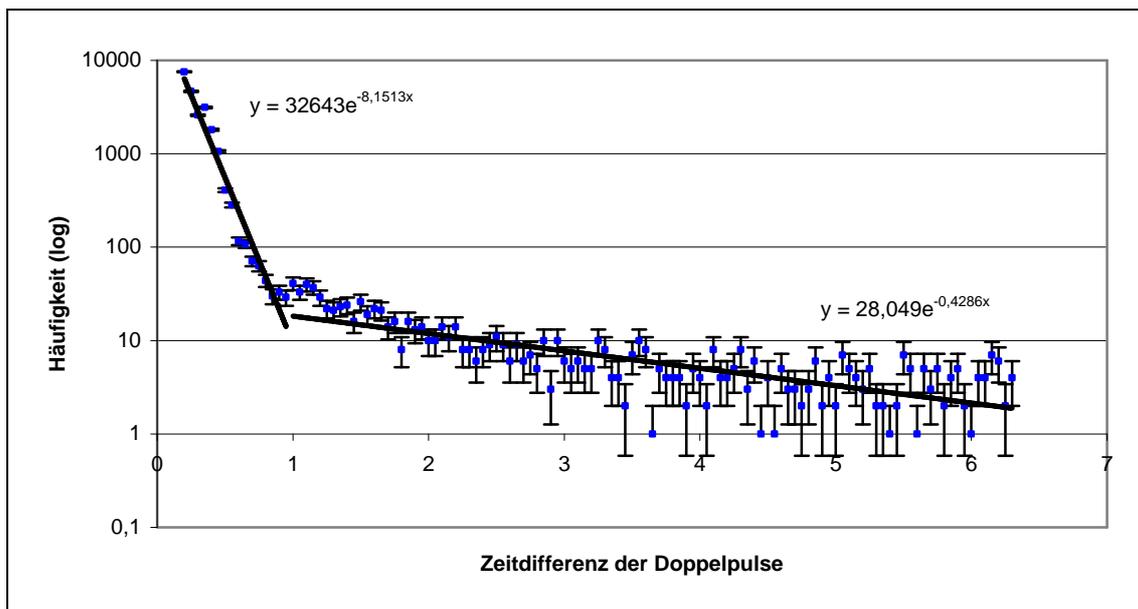


Abbildung 62: Lebensdauerermessung in logarithmischer Darstellung.

Hier kann man die Lebensdauer der Myonen auf etwa $2,33 \mu\text{s}$ bestimmen.

Kapitel 12

Lehrplanbezug

Exemplarisch werden an dieser Stelle Anknüpfungspunkte zu den beiden zurzeit gültigen Lehrplänen in Rheinland-Pfalz und Hessen aufgezeigt. Die Verbindungen ergeben sich aus der beschriebenen historischen Entwicklung, vor allem aber aus den vorgestellten Schulversuchen.

12.1 Rheinland-Pfalz

Gemäß der fachdidaktischen Konzeption des rheinland-pfälzischen Lehrplans soll Physikunterricht „Kopf, Herz und Hand der Schülerinnen und Schüler“ [MB99, S. 8] ansprechen: Das Experiment steht im Vordergrund des Unterrichts und stellt das Bindeglied zwischen Theorie und Wirklichkeit dar. Die Physik ist gekennzeichnet durch eine große Methodenvielfalt und unter anderem geprägt durch die Mathematik und die experimentelle Überprüfung der Vermutungen. Des Weiteren sollen Schülerinnen und Schüler lernen, ihre Experimente sachgerecht durchzuführen und die Ergebnisse anschließend mediengerecht zu präsentieren.

Der bausteinartige Aufbau des Lehrplans gestattet eine Auswahl aus einigen Themen und ermöglicht es Lehrerinnen und Lehrern, den fünf Leitideen (*Schülerorientierung, Fach- und Wissenschaftsorientierung, Problemorientierung, Handlungsorientierung und Projektorientierung* [MB99]) zu folgen.

Sowohl im Grund- als auch im Leistungskurs gibt es einige Wahlpflichtbausteine, die eine Durchführung der hier vorgestellten Versuche gestatten. Der am nahe liegendste ist wohl der Baustein *Elementarteilchenphysik* (siehe Abbildung 63).

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

Abbildung 63: Der Baustein Elementarteilchenphysik aus [MB99].

Aber auch in *Elektronik* lassen sich Lerninhalte an Hand der hier verwendeten Schaltungen (siehe Kapitel 9.2.2) vermitteln.

Den Baustein Geschichte der Physik gibt es nur im Leistungskurs. In ihm kann der Versuch ebenfalls zum Einsatz kommen, schließlich stellte die kosmische Strahlung über Jahrzehnten hinweg einen der Hauptforschungssektoren dar. Es gibt auch heute noch eine Vielzahl von Experimenten, die sich damit befassen (siehe Anhang 5).

Die Bausteine zur Relativität (im Grundkurs: Relativität und im Leistungskurs: Relativistische Kinematik I & II) lassen eine Verwendung des Versuches ebenfalls zu (siehe Kapitel 6), da in beiden Kursen experimentelle Belege für die Spezielle Relativitätstheorie unterrichtet werden sollen.

Ein nicht ganz so nahe liegender Wahlbaustein für die Durchführung der Versuche könnte der zum Thema Kosmologie und Weltbilder sein: Die untersuchten Myonen sind Zerfallsprodukte der primären kosmischen Strahlung, welche ununterbrochen auf die Erdatmosphäre prasselt (vgl. Kapitel 3).

Bei der Vielfalt der Einsatzgebiete des Versuchsaufbaus ist es sicherlich sinnvoll, den Unterricht projektartig aufzubauen, um so alle Aspekte der Experimente erfassen zu können.

12.2 Hessen

Der aktuell gültige Lehrplan für das Fach Physik an Gymnasien in Hessen lässt eine Gliederung nach folgendem Muster zu:

Didaktisch-methodische Grundlagen

Dem Leitgedanken „Grundsätzlich steht das *Experiment* im Mittelpunkt“ [HK03, S. 2] des Hessischen Lehrplans wird insofern Rechnung getragen, als dass es mit dem vorliegenden Aufbau, wenn er einmal in der Klasse eingeführt wurde, möglich ist, mehrere Aspekte einer Theorie aufzuzeigen und experimentell zugänglich zu machen.

Fachspezifische Lerninhalte

Es ist möglich, im Grund- und im Leistungskurs im 2. Halbjahr der 13. Jahrgangsstufe die Inhalte *Elementarteilchen* und *Relativitätstheorie* mit den hier vorgestellten Themen und den dazugehörigen Versuchen zu motivieren, bzw. Aspekte daraus zu behandeln.

Ebenso lassen sich besonders in der *Elementarteilchenphysik* auch historische Entwicklungen aufzeigen; wobei auch die aktuelle physikalische Forschung auf diesem Themengebiet Gegenstand des Unterrichts sein kann.

Fächerverbindender Unterricht

Eine fächerübergreifende Verbindung lässt sich zur Informatik und zur Mathematik einfach herstellen. Die in der Informatik zu erwerbenden Grundkenntnisse des Programmierens und der Logik dienen der Zugänglichkeit des LabVIEW-Programmes und der Logikschaltungen im Digitalteil. Der Computer zeichnet die Messdaten auf und regelt die unterschiedlichen Messungen. Zum Teil bereitet er auch die gewonnenen Daten so auf, dass eine Weiterverarbeitung mit einer einfachen Tabellenkalkulation möglich wird (vgl. den Querverweis „Messen-Steuern-Regeln“ im Lehrplan [HK03]). Für die Auswertung der Versuche werden grundlegende Sachverhalte aus der Mathematik wie z.B. Poisson-Statistik und das exponentielle Zerfallsgesetz benötigt.

Ziele und Methoden [HK03, S. 34f]

Die Versuche setzen eine *intensive Auseinandersetzung* mit den verwendeten Geräten voraus und gestatten somit eine Einsicht in die Arbeitsweise der Physik.

Das geforderte Ziel der Überprüfung von Theorie und Experiment auf Übereinstimmung und Widerspruch kann durch Versuchsreihen eingeübt werden.

Des Weiteren können die Schülerinnen und Schüler in diesen Versuchsreihen eigenverantwortlich Messungen nach vorgelegtem Muster aufbauen, neue Messreihen planen (z.B. Abhängigkeit der Rate vom Luftdruck, der Höhe, etc.) und die gewonnenen Daten selbst *auswerten und interpretieren*.

Ganz besonders fruchtbar könnte ein *Projekt* zum Thema „Myonen“ sein, das alle oben genannten Inhalte miteinander auf einem zeitlich überschaubaren Rahmen verknüpft und so die Lernerfahrung der Schülerinnen und Schüler möglicherweise intensiviert [HK03, S. 3].

Kapitel 13

Schlussbemerkungen

Die durchgeführten Experimente können in der Schule einen guten Zugang zur Elementarteilchenphysik schaffen. Mit Hilfe von ViMPS und den Versuchen in der Wellenwanne wurde eine Brücke gefunden, den für das menschliche Auge unsichtbaren, weil zu lichtschwachen, Cherenkoeffekt für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar zu machen.

Die erprobten Versuche funktionieren gut und können das Repertoire an Schulen im Bereich der *Hochenergie- und Teilchenphysik* erweitern. Die Messreihen bestätigen die theoretischen Vorhersagen. Weitere Untersuchungen sind mit dem Versuchsaufbau möglich. Denkbar ist zum Beispiel eine Ratenmessung in Abhängigkeit des Detektormaterials (man könnte dem Wasser verschiedene Stoffe zumischen oder Plastiksintillatorflüssigkeit benutzen), der Umgebungstemperatur, des Wetters und des Luftdrucks. Des Weiteren könnten die Kannen durch ein größeres Gefäß ersetzt werden und mit zwei Photomultipliern an der Elektronik in Koinzidenz betrieben werden, um die Unsicherheiten in der Lebensdauer- und der Ratenmessung zu minimieren.

Die Weiterentwicklung der Elektronik war schwierig, ist aber mit großer Hilfe einiger Mitarbeiter der Arbeitsgruppe verwirklicht worden. Um einen solchen Versuch zur Serienreife zu bringen, braucht es Zeit und viele gute Ideen. Das LabVIEW-Programm ist ausbaufähig und den Bedürfnissen und Wünschen der Schulen weiter anpassbar. Es ließen sich zum Beispiel noch Funktionen zum Auswerten der Messreihen und Beschreibungen der Protokolldateien (wie „im Erdgeschoss“ oder „im 3. Stockwerk“) einbauen.

Eine Erweiterungsmöglichkeit böte der Zusammenschluss mehrerer Schulen zu einem Detektor-Array. Hierzu bedarf es lediglich einer Zeitsynchronisation (mittels GPS) und eines Auswerteprogramms der Messdateien aller Schulen (vgl. Projekt Sky-View).

Von einigen Personen, die den Versuchsaufbau schon in Schule oder Universität eingesetzt haben, wird von einer hohen Motivation und Faszination berichtet: Die verwendeten Bauteile sind hauptsächlich Alltagsgegenstände (Kaffeekanne und Wasser) und machen den menschlichen Sinnen unzugängliches wahrnehmbar.

Es bleibt zu hoffen, dass der Versuchsaufbau in vielen Schulen zum Einsatz kommt und dass damit Schülerinnen und Schülern sowie ihren Lehrerinnen und Lehrern einige solide Experimente ermöglicht werden.

ANHANG

Anhang 1

Nobelpreise

Die folgende Tabelle soll als Anregung dienen, den historischen Aspekt der Physik der kosmischen Strahlung und der Teilchenphysik in den Unterricht einfließen zu lassen.

1918	Max Planck	„als Anerkennung des Verdienstes, das er sich durch seine Quantentheorie um die Entwicklung der Physik erworben hat“
1921	Albert Einstein	„für seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts“
1923	Robert A. Millikan	„für seine Arbeiten über die elektrische Elementarladung sowie den photoelektrischen Effekt“
1927	Charles T. R. Wilson	„für die Entdeckung der Methode, durch Dampfkondensierung die Bahnen elektrisch geladener Partikel wahrnehmbar zu machen“
1936	Viktor F. Hess	„für die Entdeckung der kosmischen Strahlung“
1936	Carl D. Anderson	„für die Entdeckung des Positrons“
1948	Patrick Blackett	„für die Weiterentwicklung der Anwendung der Wilsonschen Nebelkammer und seine damit gemachten Entdeckungen auf den Gebieten der Kernphysik und der kosmischen Strahlung“
1949	Hideki Yukawa	„für seine auf der Theorie der Kernkräfte beruhende Vorhersage der Existenz der Mesonen“
1950	Cecil F. Powell	„für die Entwicklung der photographischen Methode zur Untersuchung der Kernvorgänge und die damit verbundene Entdeckung der Mesonen“
1954	Walter Bothe	„für seine Koinzidenzmethode und seine mit deren Hilfe gemachten Entdeckungen“
1957	Chen N. Yang, Tsung-Dao Lee	„für ihre grundlegenden Forschungen über die Gesetze der so genannten Parität, die zu wichtigen Entdeckungen über die Elementarteilchen führten“
1958	Ilja M. Frank, Igor J. Tamm, Pavel A. Cherenkov	„für die Entdeckung und Interpretation des Cherenkoeffekts“
1959	Emilio G. Segrè, Owen Chamberlain	„für ihre Entdeckung des Antiprotons“
1960	Donald A. Glaser	„für die Erfindung der Blasenkammer“
1968	Luis Alvarez	„für seinen entscheidenden Beitrag zur Elementarteilchenphysik [...]“
1969	Murray Gell-Mann	„für seine Beiträge und Entdeckungen betreffend der Klassifizierung der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen“
1976	Burton Richter, Samuel C. C. Ting	„für ihre führenden Leistungen bei der Entdeckung eines schweren Elementarteilchens neuer Art“ [das charm-Quark]
1979	Sheldon L. Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg	„für ihre Mitwirkung an der Theorie der Vereinigung schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen [...]“

1980	James W. Cronin, Val Logsdon Fitch	„für die Entdeckung von Verletzungen fundamentaler Symmetrieprinzipien im Zerfall von neutralen K-Mesonen“
1984	Carlo Rubbia, Simon v. d. Meer	„für ihre entscheidenden Einsätze bei dem großen Projekt [am CERN ¹²⁰], das zur Entdeckung der Feldpartikel W und Z, Vermittler schwacher Wechselwirkung, führte“
1988	Leon M. Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger	„für ihre grundlegenden Experimente über Neutrinos - schwach wechselwirkende Elementarteilchen mit verschwindender oder sehr kleiner Ruhemasse“
1990	Jerome Friedman, Henry W. Kendall, Richard E. Taylor	„für ihre Experimente zum Nachweis der Quarks, elementarer Teilchen mit drittelzahliger Ladung“
1992	Georges Charpak	„für seine grundlegenden Arbeiten an Detektoren für die Teilchenphysik, [...]“
1995	Martin Lewis Perl	„für seine Entdeckung eines massereichen subatomaren Elementarteilchens (Tau) mit negativer Ladung“
1995	Frederick Reines	„für seine Entdeckung eines ungeladenen subatomaren Elementarteilchens (Neutrino)“
2002	Raymond Davis Jr., Masatoshi Koshiba	„für bahnbrechende Arbeiten in der Astrophysik, insbesondere für den Nachweis kosmischer Neutrinos“
	Riccardo Giacconi,	„für bahnbrechende Arbeiten in der Astrophysik, die zur Entdeckung von kosmischen Röntgenquellen geführt haben“.

Tabelle 16: Überblick über die Nobelpreise, die für Forschung rund um die Gebiete *kosmische Höhenstrahlung* und *Elementarteilchen* vergeben wurden¹²¹.

¹²⁰ siehe Anhang 5

¹²¹ Quelle: <http://www.nobel.se> „Nobel e Museum“ [23.08.2003]

Anhang 2

Anwendungen der Myonen und der kosmischen Höhenstrahlung

In diesem Anhang sollen sechs Anwendungen der Myonen Erwähnung finden. Diese machen deutlich, dass sich seit der Grundlagenforschung zu Beginn des 20. Jahrhunderts einige Einsatzgebiete entwickelt haben.

A2.1 Verfahren der so genannten Myon-Spin-Rotation

Dieses Verfahren beruht auf dem Effekt, dass beim Zerfall eines Myons ein Elektron, bzw. ein Positron abgestoßen wird. Die Richtung des emittierten Teilchens hängt von der Orientierung des myonischen Magneten ab. Die magnetische Wirkung rührt von der in sich rotierenden elektrischen Ladung (dem Spin) des Myons her, da es damit einen *subatomaren Magneten* darstellt [C186].

Chemiker nutzen diese Eigenschaft aus, um die Struktur von Kohlenwasserstoffen aufzudecken. Positive Myonen verhalten sich nämlich so ähnlich wie „leichte Protonen“ und koppeln an die Elektronen. Somit kann geklärt werden, wie Protonen in der Regel an solche Gruppen ankoppeln.

A2.2 Kalte Kernfusion

In der Hoffnung, eine weniger riskante Energiequelle als die Kernspaltung nutzen zu können, möchten Physiker *Myonen als Katalysator für Kernfusionsreaktoren* einsetzen [C186]. Kernfusionen, zum Beispiel in der Sonne, laufen bei sehr hohen Temperaturen ab. Die kalte Kernfusion hingegen, soll schon bei Zimmertemperatur einsetzen. Der Brennstoff für solche Reaktoren soll ein Gemisch aus Deuterium und Tritium, zwei schwere Wasserstoffisotope¹²², sein. Gelingt es, diese Kerne entgegen ihrer Abstoßung nahe zusammenzubringen, so zerschmelzen sie zu einem Helium-4-Kern. Dieser besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Der neue Kern braucht weniger Energie für den Zusammenhalt. Daher wird Energie frei, welche das übrig gebliebene Neutron wegtragen könnte. Die Rolle des Myons wäre, sich in diesem Gemisch mit einem Tritiumkern zu verbinden. Das so entstandene Neutron-ähnliche Gebilde kann dann leicht in einem Deuterium-Molekül (aus 2 Atomen) eindringen und sich an einen

¹²² Die Kerne der Isotope haben wie der Wasserstoffkern je ein Proton und zusätzlich ein, bzw. zwei Neutronen eingebaut.

der beiden Deuteriumkerne heften. Damit ist die Voraussetzung für die Fusion erfüllt und das Myon wird wieder freigesetzt und kann weitere Reaktionen katalysieren. Die Erzeugung von Myonen ist aber energieaufwendig und so müsste jedes Myon mindestens 300-400 Fusionen katalysieren, dass sich die Energiebilanz rentiert [CI86].

A2.3 Geologische Anwendungen

Auf der Suche nach Bodenschätzen könnten Myonen bzw. Neutrinos zum Einsatz kommen [CI86]. Hierfür gibt es zwei Konzepte. Kernstück dieser Konzepte ist ein Protonenbeschleuniger, mit einem Umfang von 160 km, welcher auf dem offenen Meer schwimmt.

A2.3.1 GEMINI

Der erzeugte intensive Strahl hochenergetischer Neutrinos könnte in verschiedene Richtungen unter verschiedenen Winkel geleitet werden, um durch die Erdoberfläche zu dringen. Die durch diese Neutrinos in den Gesteinsschichten erzeugten Myonen treten aus der Erdoberfläche aus und ihre Verteilung lässt Rückschlüsse auf die geologische Beschaffenheit des Erdbodens zu. So neigen zum Beispiel schwere Substanzen wie z.B. Uranerze dazu, mehr Myonen zu erzeugen als leichteres Gestein. Das Projekt trägt den Namen „Geological Exploration with Muons produced in Neutrino Interactions“¹²³ [CI86].

A2.3.2 GENIUS

Auf der Suche nach Erdgas oder Erdöl könnte man die Neutrinostrahlen ebenfalls einsetzen. Auf ihrem Weg durch das Gestein geben die Neutrinos Energie ab. Das Projekt „Geological Exploration by Neutrino-Induced Underground Sound“¹²⁴ würde die erzeugten Schallwellen detektieren und die Unterschiede in den Schallgeschwindigkeiten nutzen, um die Dichteschwankungen in der Materie zu bestimmen. Eingeschlossene Öl- oder Gasvorkommen könnten damit detektiert werden [CI86].

A2.4 Archäologische Anwendung

Bei Grabungen in der Chephren-Pyramide in Ägypten (eine der beiden Pyramiden von Gize) fand man nur eine kleine Kammer. Die Cheops-Pyramide hingegen hat vier Kammern. Da lag die Vermutung der Archäologen nahe, dass in der Chephren-Pyramide nicht alle Kammern entdeckt wurden. Daraufhin wurde vorgeschlagen, die Pyramide „im Licht der kosmischen

¹²³ engl.: Geologische Forschung mit Myonen, welche aus Neutrinowechselwirkungen erzeugt wurden.

¹²⁴ engl.: Geologische Forschung durch Neutrino-Induzierten Untergrund-Schall.

Strahlung“ zu sehen [Gr93]¹²⁵. Hierzu wurde mittig auf der Basis der Chephren-Pyramide in die Belzoni-Kammer ein $2 \times 2 \text{ m}^2$ *Myonenabsorptionsdetektor* eingebracht. Die Messungen beruhten darauf, dass die Myonen bei ihrem Flug durch die Steine der Pyramide unterschiedlich geschwächt werden. Bei einer angenommenen Kammerhöhe von 5m hätte dies eine relative Intensitätszunahme von 10% bedeutet. Jedoch wurde innerhalb der Auflösung und der Statistik der Messdaten keine weitere Kammer gefunden.

A2.5 Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung

Am Paul-Scherer-Institut (PSI) in der Schweiz wird mit Myonen *Materialforschung* betrieben. Myonen werden in Materialien implantiert und geben so mit hoher Präzision Auskunft über innere lokale Magnetfelder auf einer atomaren Skala (weniger als ein Nanometer). Auch das Myon-Spin-Verfahren (vgl. A2.1) kommt zum Einsatz, um Auskünfte über die Eigenschaften von Kohlenstoffen in Materialien zu erhalten. Von den Forschern werden Myonen als empfindliche Sonden für Defekte in der Struktur und Verunreinigungen in Materialien eingesetzt.

„Die Myon-Anlagen am PSI erlauben Festkörperphysikern, Chemikern und Materialwissenschaftlern die Erforschung fundamentaler und technologisch relevanter Aspekte von strukturellen, magnetischen und elektronischen Phänomenen in magnetischen Materialien, Halbleitern und Isolatoren. Die untersuchten Materialien umfassen reine Elemente, anorganische und organische Verbindungen und molekulare Systeme in den unterschiedlichsten Formen (kristallin, amorph, flüssig, etc.). Die messbaren magnetischen Felder reichen von etwa einem Zehntel bis zum Hunderttausendfachen des Magnetfeldes der Erde, und die charakteristischen Zeiten von Nano- bis Millisekunden. Myonen sind universell anwendbare mikroskopische magnetische Sonden, weil sie in jedes beliebige Material und unter einer Vielzahl von äußeren Bedingungen (Temperatur, Druck, magnetische oder elektrische Felder etc.) implantiert werden können [PS03].“

A2.6 Durchleuchten mit Myonen

Mit Hilfe von Myonen aus der kosmischen Strahlung sollen z.B. auf Flughäfen Container und andere Frachtstücke *durchleuchtet* werden [Bo03]. Das bisherige Röntgenverfahren ist in der Größe der zu untersuchenden Objekte und im Durchdringungsvermögen beschränkt, daher können dichte Materialien wie Uran oder Plutonium nicht durchleuchtet werden. Mit einer relativ kurzen Bestrahlungszeit könnten Objekte mit Myonen durchleuchtet werden. Dies könnte auch die gesundheitsgefährdende Röntgenstrahlung ablösen. Anwendung könnte diese Technik in der Überwachung von grenzüberschreitenden Transporten nuklearen Materials finden.

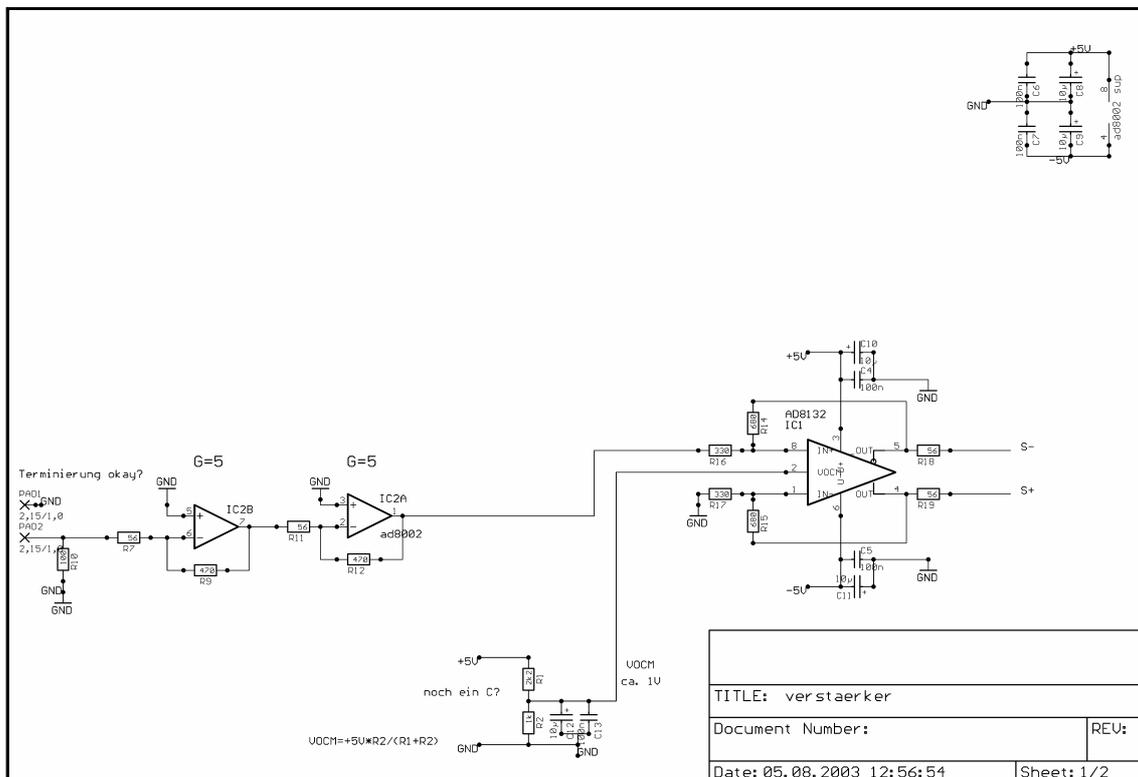
¹²⁵ Forschungen unter der Leitung von Luis Alvarez (vgl. Anhang 1)

Anhang 3

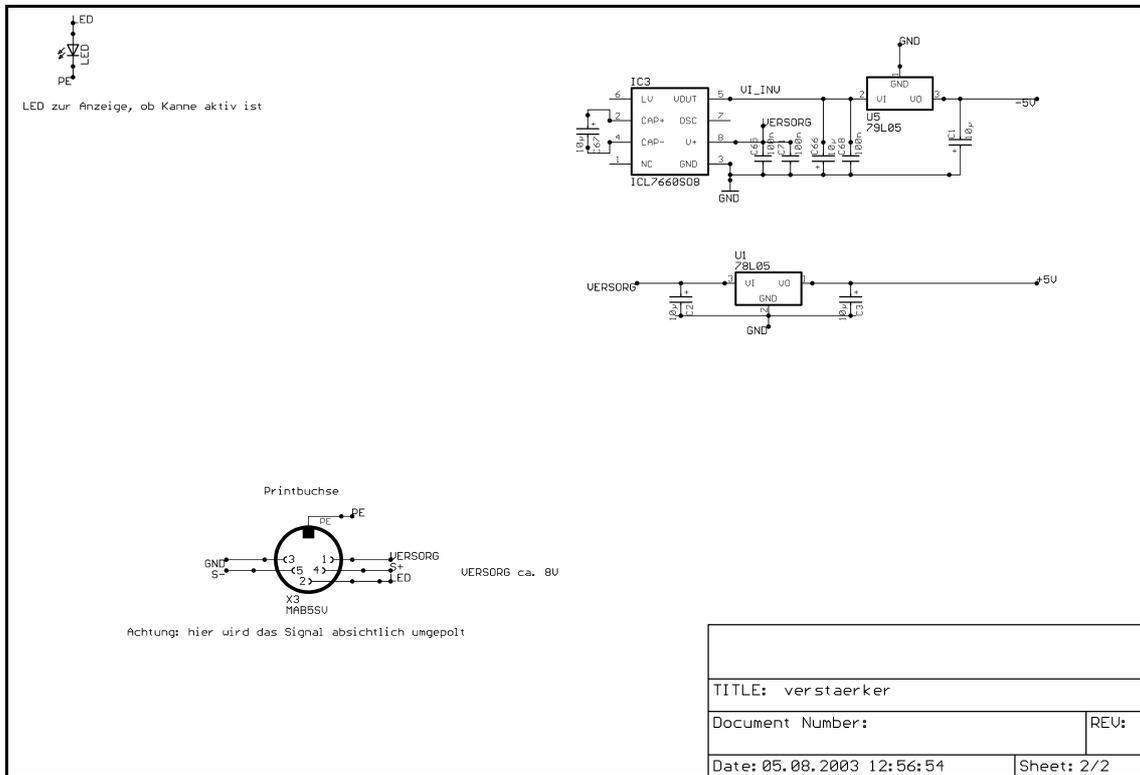
Schaltpläne

Die Layouts der Schaltpläne und die der dazugehörigen Platinen wurden mit dem Programm EAGLE erstellt (vgl. Anhang 4)

A3.1 Verstärker



(a)



(b)

Abbildung 64: (a) – (b) Schaltpläne der Verstärkereinheit.

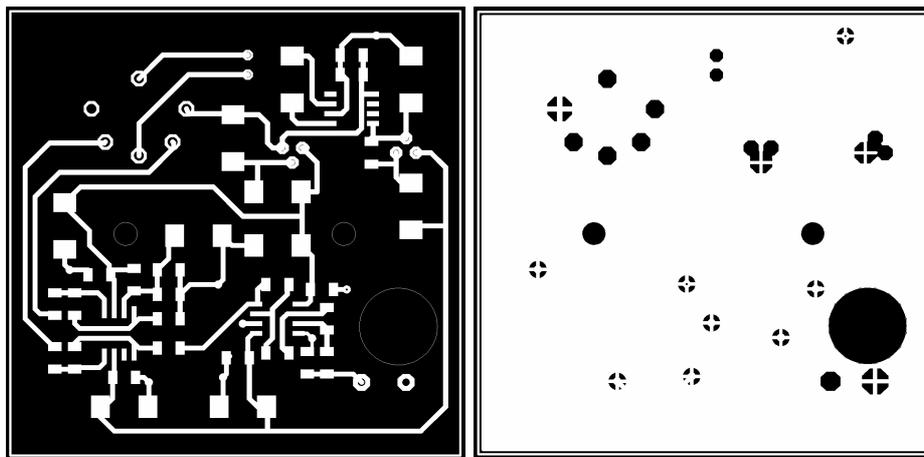


Abbildung 65: Top-Layer (links) und Bottom-Layer (rechts) der Verstärkerplatine.

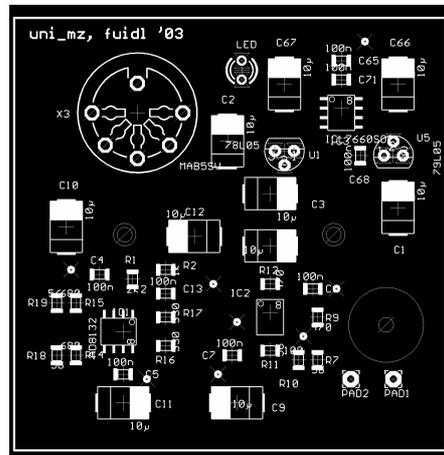
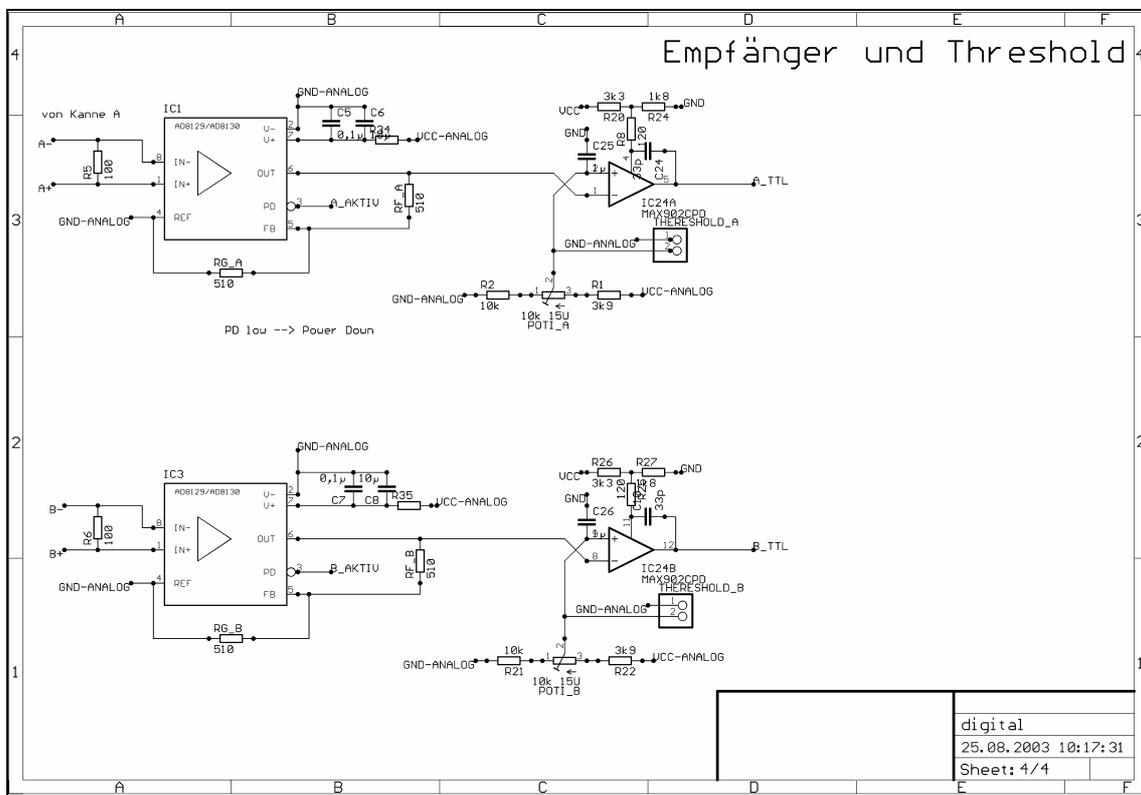
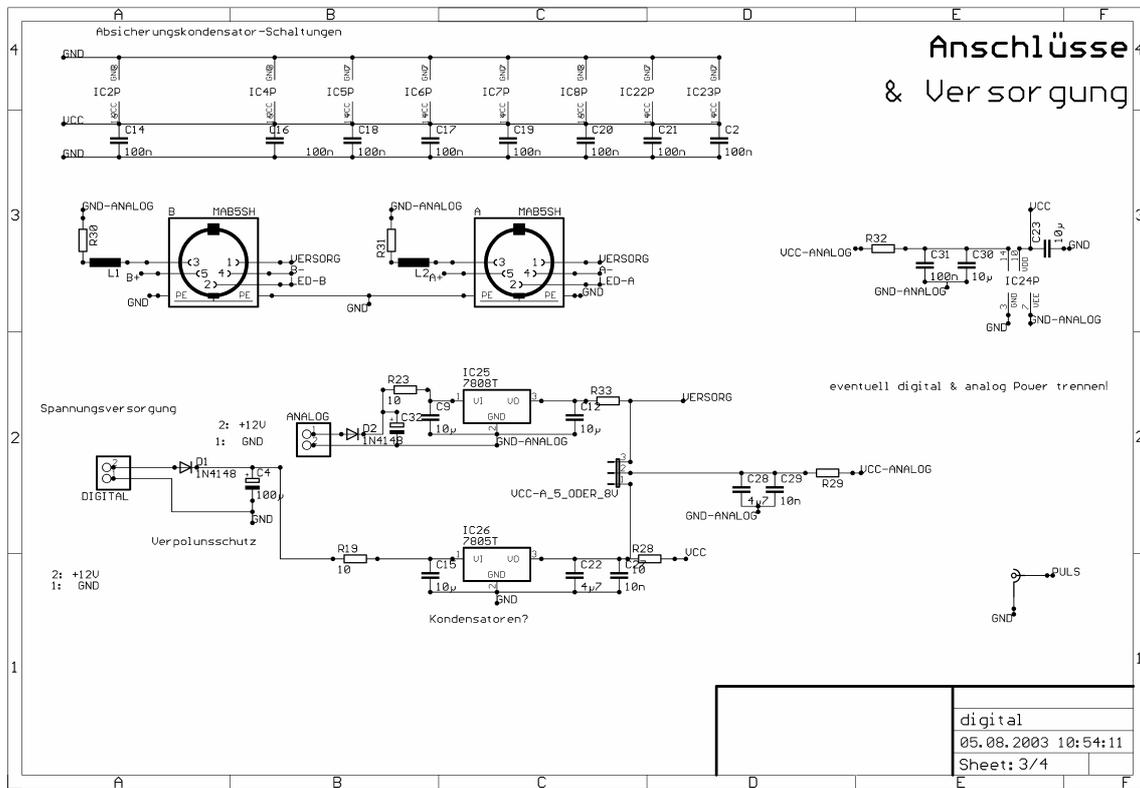


Abbildung 66: Bestückungsplan der Verstärkerplatine.

A3.2 Digitalplatine

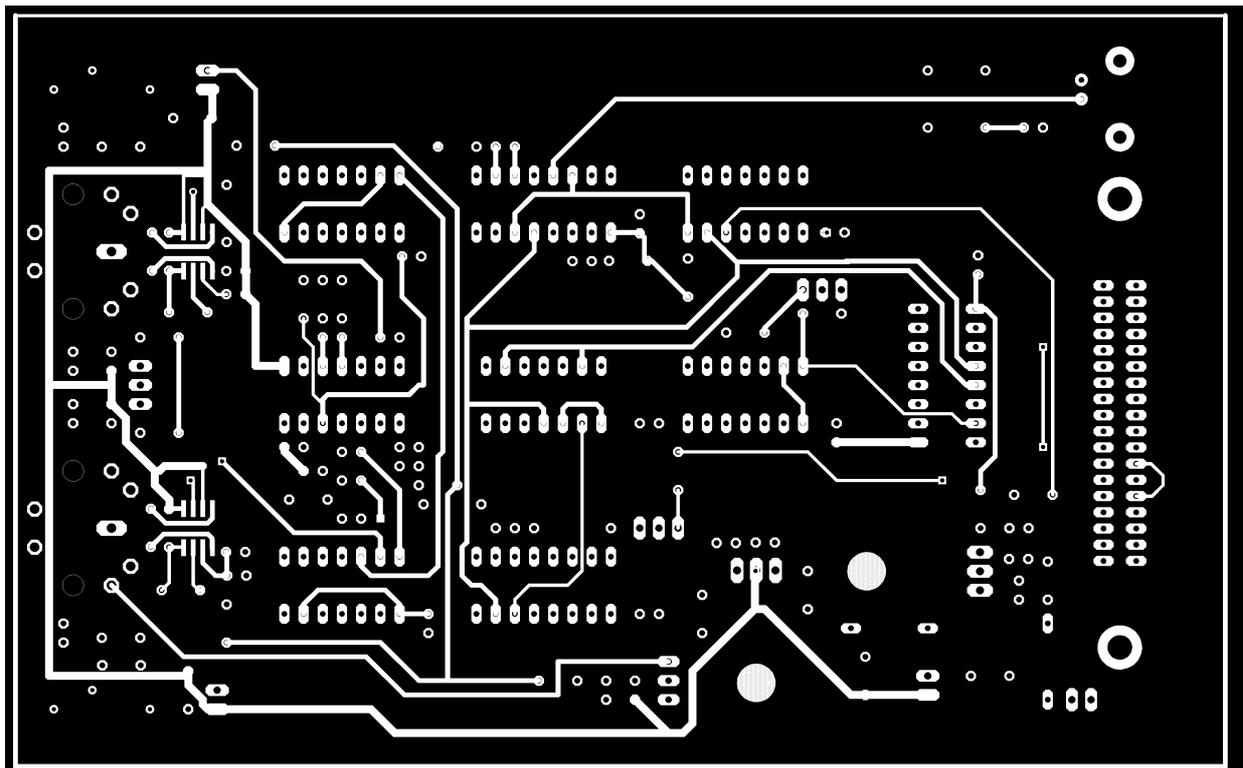


(a)

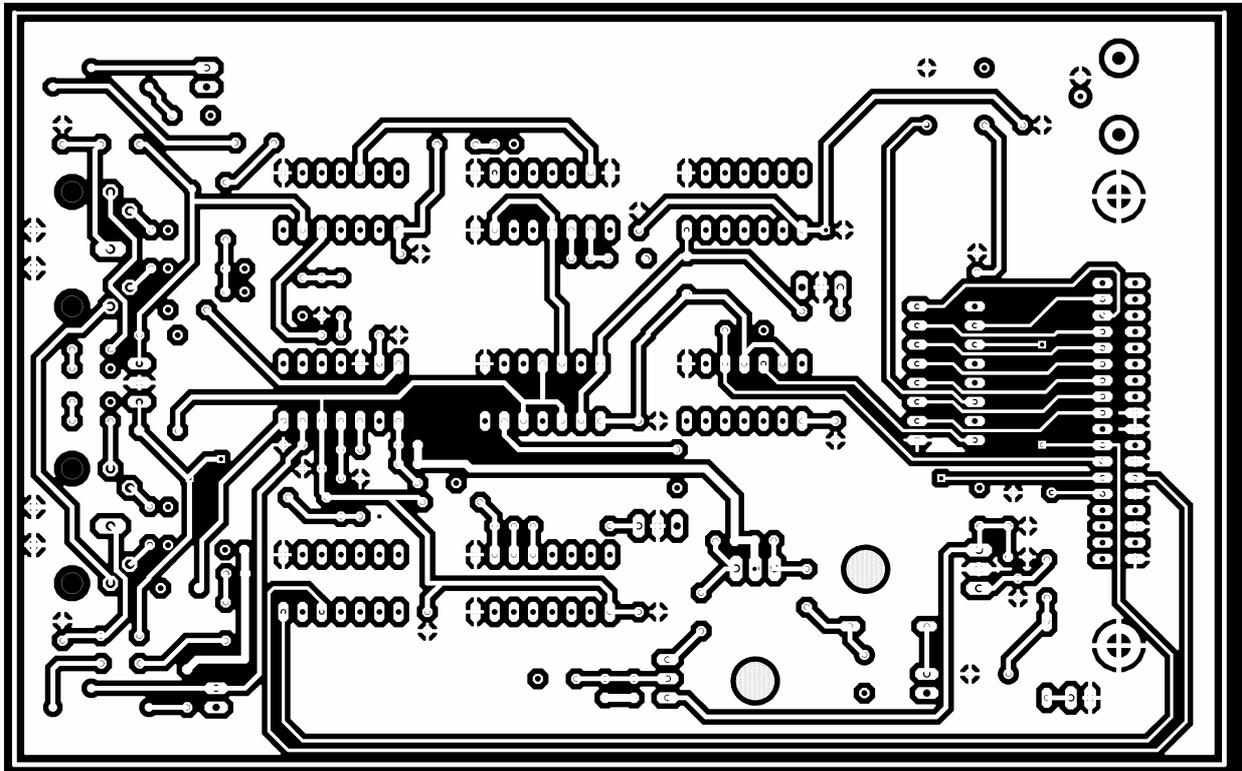


(d)

Abbildung 67: (a) – (d) Schaltpläne des Digitalteils.



(a)



(b)

Abbildung 68: Top-Layer (a) und Bottom-Layer (b) der Digitalplatine.

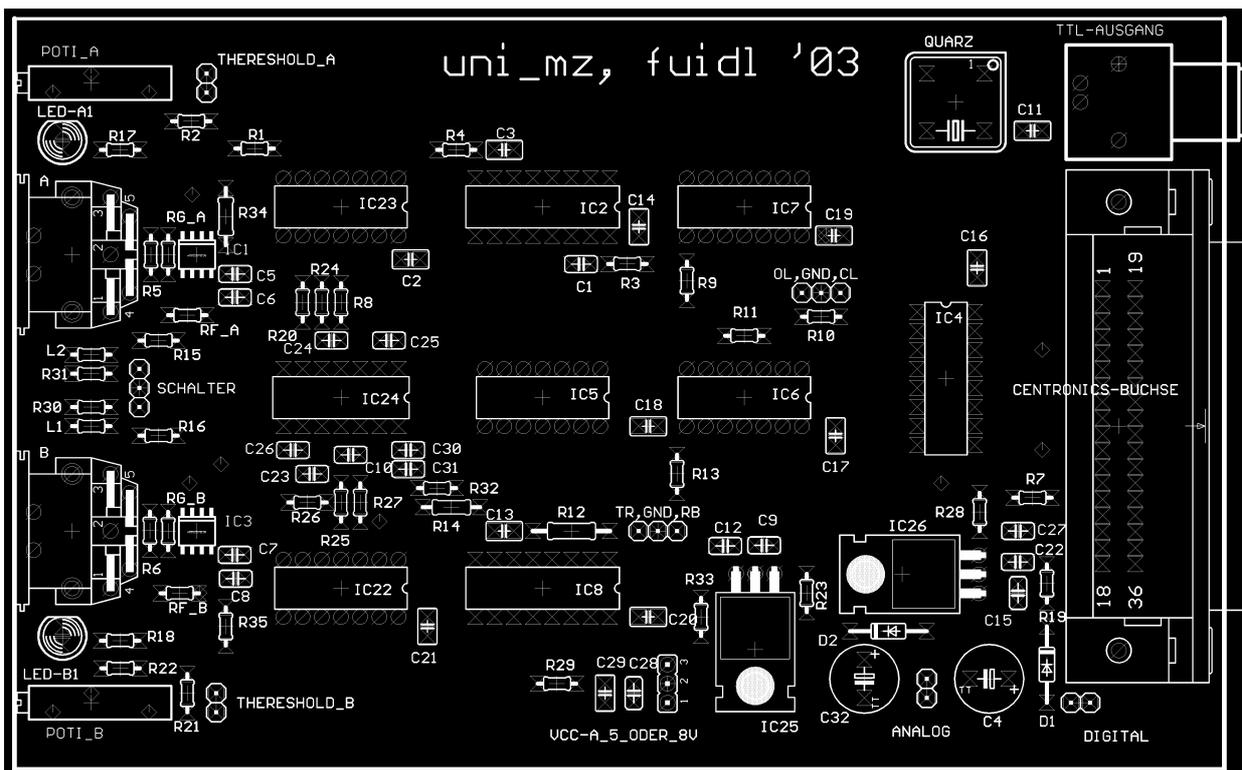


Abbildung 69: Bestückungsplan der Digitalplatine.

Anhang 4

Bezugsquellen

An der Universität Mainz im Fachbereich Physik sind sog. Laborkoffer „Myonenkanne“ käuflich zu erwerben.

Nähere Informationen sind unter www.physik.uni-mainz.de/lehramt [25.08.2003] verfügbar.

Dennoch werden hier die wichtigsten Teile aufgelistet:

- Thermoskannen:
HELIOS Dr. Bulle GmbH & Co. KG
Am Eichamt 10
97877 Wertheim
<http://www.helios-vacufalks.com> [25.08.2003]
Artikelnummer: 3334-001, schwarz
- LabVIEW:
National Instruments Germany GmbH
Konrad-Celtis-Straße 79
D-81369 München
E-Mail: info.germany@ni.com
- AccessHW:
[http://exchange.ni.com/servlet/com.quiq.servlet.GetObject/accesshw_lv6.llb?](http://exchange.ni.com/servlet/com.quiq.servlet.GetObject/accesshw_lv6.llb?KEY=101.97.62219.14&SIG=101.97.62219.14&EXT=llb)
KEY=101.97.62219.14&SIG=101.97.62219.14&EXT=llb [25.08.2003]
- Platinen-Layout-Programm EAGLE:
CadSoft Computer GmbH
Hofmark 2
D-84568 Pleiskirchen
www.cadsoft.de [25.08.2003]
- Platinen:
Multi PCB Ltd.
Schäfflerstrasse 4
85653 Aying
E-Mail: info@multi-pcb.de
Die Bauteile sind über Elektronikfachgeschäfte wie z.B.: Conrad zu beziehen.
- Frontplatten:
Schaeffer-Apparatebau KG

Hohentwielsteig 6a

14163 Berlin

E-Mail: info@schaeffer-apparatebau.de

- Kästchen der Digitalplatine:

iselautomation KG

Bürgermeister-Ebert-Straße 40

36124 Eichenzell

E-Mail: automation@isel.com

- Hochspannungs-Gerät¹²⁶:

Phywe Systeme GmbH

Robert-Bosch-Breite 10

D-37079 Göttingen

E-Mail: info@phywe.de

verwendet wurde das Modell 13670.93

- HV-Kästchen:

Conrad Electronic GmbH

Klaus-Conrad-Str.1

92240 Hirschau

www.conrad.de [25.08.2003]

Bestellnummer: 523100-45

¹²⁶ Es funktioniert im Prinzip jedes Hochspannungsnetzgerät. Voraussetzungen für den Betrieb sind allerdings negative Hochspannung (bis ca. 1,7kV) und einen zugesicherten Strom beim Einsatz zweier Kannen von ca. 1,5mA!

Anhang 5

Großexperimente im Überblick

Es wird ein kurzer Überblick über Großforschungsprojekte gegeben, welcher zu weiteren Erkundungen ins Internet einladen soll.

A5.1 Fly's Eye (Weiterentwicklung: HiRes)

In Utah, in den USA, werden mit einem *Fliegenauge* ausgedehnte Luftschauer erforscht. Das Szintillationslicht der Strahlung in der Atmosphäre wird hier mit Hilfe von 67 Spiegeln von je 1,6 m Durchmesser (ausgestattet mit 12-14 Photomultipliern) registriert. Aus der gemessenen Intensität wird die Schauerenergie bestimmt. Einschränkung hierbei ist, dass die Datennahme nur in klaren mondlosen Nächten erfolgen kann¹²⁷ [Gr93].

Nähere Informationen gibt es unter: <http://www.cosmic-ray.org> [25.08.2003]

A5.2 Pierre Auger Projekt

Beheimatet in Westargentinien ist das Südobservatorium des *Pierre Auger Projektes*¹²⁸, welches 1.600 Cherenkov-Tanks und 24 Fluoreszenz-Teleskope (wie bei Fly's Eye) zur Schauerdetektierung einsetzen wird. Geplant sind je ein Observatorium auf der Nord- und der Südhalbkugel der Erde mit einer Gesamtfläche von 5.000 km². Der Standort auf der Nordhalbkugel wird in Utah sein.

Weitere Informationen: <http://www.auger.org> [25.08.2003]

A5.3 Sky-View

„Die gut geeignete Infrastruktur an den Schulen in den Ballungszentren Nordrhein-Westfalens [NRW] soll genutzt werden, um Schüler für die Naturwissenschaften zu begeistern und gleichzeitig eine Nachweisanlage für hochenergetische Teilchen aus dem Kosmos aufzubauen [<http://www.sky-view.de>, 19.08.2003].“ Es handelt sich hierbei um ein Projekt einiger Universitäten in Zusammenarbeit mit den Schulen in NRW. Es soll ein Detektorfeld mit Hilfe der Schulen aufgebaut werden, um hochenergetische kosmische Teilchen zu detektieren. Die angegebene Homepage enthält Näheres.

¹²⁷ Da sich das Observatorium auf einer Militärbasis der Amerikanischen Streitkräfte befindet, ist Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Zutritt seit den Terroranschlägen in den USA am 11.09.2001 erschwert.

¹²⁸ Benannt nach Pierre Auger, der 1937 als erster Luftschauer erforschte.

A5.4 AGASA¹²⁹

In Japan wird u.a. mit diesem Experiment der kosmischen Strahlung auf die Spur gekommen. Es handelt sich um 111 Detektoren, verteilt auf eine Fläche von 100 km², wobei der jeweils nächste Nachbar etwa 1 km entfernt ist. Eines, der höchstenergetischen Ereignisse die jemals registriert wurde, wurde hier mit $2 \cdot 10^{20}$ eV am 03.12.1993 gemessen.

Auf der Homepage <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA> [25.08.2003] befindet sich u.a. ein Bild dieses Ereignisses.

A5.5 KASCADE-Grande¹³⁰

Auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe steht ebenfalls ein Experiment zur Erforschung der Luftschauber.

Unter anderem wird hier aber auch in Zusammenarbeit mit dem Krebsforschungszentrum Heidelberg an einer Ionisationskammer geforscht, welche die Strahlenbelastung der Tumortherapien an menschlichen Organen simulieren soll.

Mehr unter: http://ik1au1.fzk.de/KASCADE_home.html

A5.6 (Super-) Kamiokande¹³¹

Ein Detektor für kosmische Neutrinos in der Kamioka-Mine in Japan. Herzstück ist eine mit 50,000 Tonnen Wasser gefüllte Kammer. Um sie herum sitzen Photomultipliermodule, die das Cherenkovlicht registrieren.

Unter <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.html> [25.08.2003] gibt es u.a. eindrucksvolle Bilder des riesigen Detektors zu sehen.

A5.7 AMANDA, (Weiterentwicklung: Ice-Cube)

Bekannt geworden ist AMANDA¹³² unter dem Stichwort *NeutrinoFischen*. Am Südpol befindet sich eine Forschungsstation, die das klare Eis des Pols als Detektormaterial ausnutzt. In der letzten Ausbaustufe soll es eine Größe von einem Kubikkilometer umfassen. Eingelassen in das Eis sind Photomultiplier, die Cherenkovlicht registrieren. Auf der Homepage <http://icecube.wisc.edu/> gibt es einen Überblick über den Aufbau, Informationen über die

¹²⁹ Akeno Giant Air Shower Array

¹³⁰ Karlsruhe Shower Core and Array Detector – Grande

¹³¹ Super-KAMIOKA Nucleon Decay Experiment or Neutrino Detection Experiment

¹³² AMANDA: Antarctic Muon and Neutrino Detector Array

Kooperationspartner (u.a. Universität Mainz) und Unterrichtsmaterialien incl. Hinweise für Lehrende.

A5.8 CERN¹³³

An diesem Großforschungsstandort bei Genf in der Schweiz haben einige wichtige physikalische Experimente stattgefunden, z.B. wurden hier das W- und das Z-Boson 1983 entdeckt. Es ist das weltweit größte Teilchenphysikzentrum.

Ausgehend von der Startseite www.cern.ch [25.08.2003] lassen sich die einzelnen Experimente entdecken, Fortbildungsangebote nutzen, oder online Material für den Schulunterricht herunterladen, usw.

¹³³ frz. Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire: Europäisches Zentrum für Nukleare Forschung

Anhang 6

Kurzbedienungsanleitung zur Myonenkanne

A6.1 Allgemeiner Aufbau Digitalteil

1. 12 V Gleichspannung hinten an den Bananenbuchsen anschließen.
2. Evtl. PC mittels Druckerkabel anschließen.
3. Evtl. Oszillograph an der hinteren BNC-Buchse anschließen. Dort liegt ein TTL-Puls (5 V bzw. 0V, ca. 130 ns lang) an.



A6.2 Allgemeiner Aufbau Kannen und Photomultiplier

1. Evtl. Kanne mit Wasser füllen.
2. Röhre auf Kanne aufschrauben.
3. Ca. 1,4-1,6 kV negative Hochspannung mit Hilfe des Hochspannungskästchens (siehe Bild: oben Bananenbuchsen, rechts und links: MHV-Stecker) anlegen¹³⁴. Vor einer Messreihe brauchen die Photomultiplier eine gewisse *Vorwärmphase*.
4. Evtl. Oszillograph an „Signal“ BNC-Buchse anschließen (1 M Ω Terminierung). Hier liegt der Originalpuls aus dem Photomultiplier an (ca. 10 mV, 10 ns).
5. Verbindung zwischen der Kanne und dem Digitalteil mit 5 adrigem Kabel (DIN-Stecker) herstellen.
6. Evtl. Kanne mit lichtundurchlässigem Tuch abdecken.



A6.3 Ratenmessungen

1. Zuerst ohne Wasser:
Mit dem Schalter in der Mitte des Digitalteils den richtigen Ein-/Ausgang auswählen. Eine rote LED zeigt den gewählten Ein-/Ausgang. Die Triggerschwelle mit einem Schraubendreher (rechts bzw. links unten im Bild) so weit herunterdrehen, dass die Trigger-LED (grün) per-



¹³⁴ Hochspannungsgerät muss bei zwei eingesetzten Kannen ca. 1,5 mA Strom liefern können!

manent leuchtet. Dann langsam die Schwelle hochdrehen, bis die LED gerade so ausgeht und nur ab und zu aufleuchtet. Dann ist die Schwelle knapp über dem Grundrauschen des Photomultipliers eingestellt. Evtl. mit einem Spannungsmessgerät über die Bananenbuchsen (gelb und schwarz Masse) die Triggerschwelle ablesen¹³⁵. PC-Programm *Ratenmessung* starten.

2. anschließend mit Wasser:

Schwelle und Hochspannung nicht verstellen. Photomultiplier mit angelegter Hochspannung *nicht* dem Licht aussetzen! *Ratenmessung* im PC-Programm starten.

3. Messungen auswerten:

Im PC-Programm *Auswerten* auswählen und die Länge der Intervalle (in ms) eingeben, in welche die komplette Messzeit unterteilt werden soll¹³⁶. Es werden dann zuerst die Ereignisse im 1., 2., 3.,... Intervall gezählt. Dann diese Anzahlen histogrammiert und in eine Datei gespeichert.

A6.4 Koinzidenzmessungen

1. Für beide Kannen Schritte 1 und 2 der Ratenmessung durchführen.
Den Schalter am Digitalteil jeweils richtig einstellen!
2. Dann beide Kannen gleichzeitig betreiben. Dafür den Schalter am Digitalteil in Mittelstellung bringen.
3. PC-Programm *Ratenmessung* starten.
4. Anschließend *Auswerten*.

A6.5 Lebensdauer messungen

Ebenfalls die Triggerschwelle richtig einstellen. Dazu eine Ratenmessreihe zuerst ohne, dann mit Wasser durchführen und auswerten (vgl. Schritte 1 und 2 der Ratenmessung). Wenn diese Messungen gute Ergebnisse bringen, im PC-Programm Lebensdauer messung auswählen. Es wird eine Messprotokoll-Datei *[gewählter Dateiname].kan* angelegt. Ergebnis ist eine Datei *Tabelle_zu_[gewählter Dateiname].kan* mit den Einträgen der Zeitspannen zwischen den Doppelpulsen (in ns) und der Anzahl der bei dieser Zeitspanne registrierten Doppelpulse.

¹³⁵ Es hat sich gezeigt, dass sich die Spannung der Schwelle ändert, je nachdem, ob ein Messgerät angeschlossen ist, oder nicht. Daher wird empfohlen es entweder während der gesamten Messzeit angeschlossen zu lassen oder die Schwellenspannung zu messen, wenn keine Messreihe läuft, und das Gerät anschließend wieder zu entfernen.

¹³⁶ Hier haben sich 10.000 ms=10 s (für Messreihen mit Wasser) bzw. 60.000 ms=1 Min (für Reihen ohne Wasser) bewährt. Bei Koinzidenzmessungen entsprechend länger.

A6.6 Hinweise

Für gute Ergebnisse ist der Versuchsaufbau mit lichtundurchlässigen Tüchern o.ä. abzudecken. In einem abgedunkelten Raum kann mit einer Taschenlampe demonstriert werden, dass die Kanne nicht absolut lichtdicht ist und der Photomultiplier seinen Namen zu Recht trägt. Der größte Lichteinfall liegt am Einfüllstutzen der Kanne. Ein Loch im PVC-Rohr könnte dazu dienen, gezielt Licht in den Aufbau zu lassen, um den Lerninhalt „Photomultiplier reagiert sensibel auf Licht“ zu vermitteln.

Des Weiteren wird empfohlen, destilliertes Wasser zu verwenden, da durch Kalkablagerungen die Verspiegelung der Kanneninnenseite leidet. Ebenso sollte, um Geruchs- und/oder Schimmelbildung vorzubeugen, der Aufbau gut getrocknet aufbewahrt werden. Zusatzstoffe wie z.B. Kochsalz könnten zu einer Verbesserung der Apparatur führen. Hierzu fehlen im Moment noch Erfahrungswerte.

Das aktuelle Messprogramm lässt sich auf den Lehramtsseiten des Fachbereichs Physik an der Uni Mainz unter <http://www.uni-mainz.de/lehramt> herunterladen.

Anhang 7

Wahrheitstabellen

A7.1 AND (UND)

Bedingung 1	Bedingung 2	Ergebnis
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

A7.2 OR (ODER)

Bedingung 1	Bedingung 2	Ergebnis
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

A7.3 XOR (EXKLUSIV-ODER)

Bedingung 1	Bedingung 2	Ergebnis
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

A7.4 NOT (NICHT)

Bedingung	Ergebnis
1	0
0	1

A7.5 NAND (NICHT-UND)

Bedingung 1	Bedingung 2	Ergebnis
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Anhang 8

Dokumentation des PC-Programms

Im Folgenden werden die einzelnen Diagramme der LabVIEW-Module kurz vorgestellt¹³⁷.

A8.1 Hauptmenü

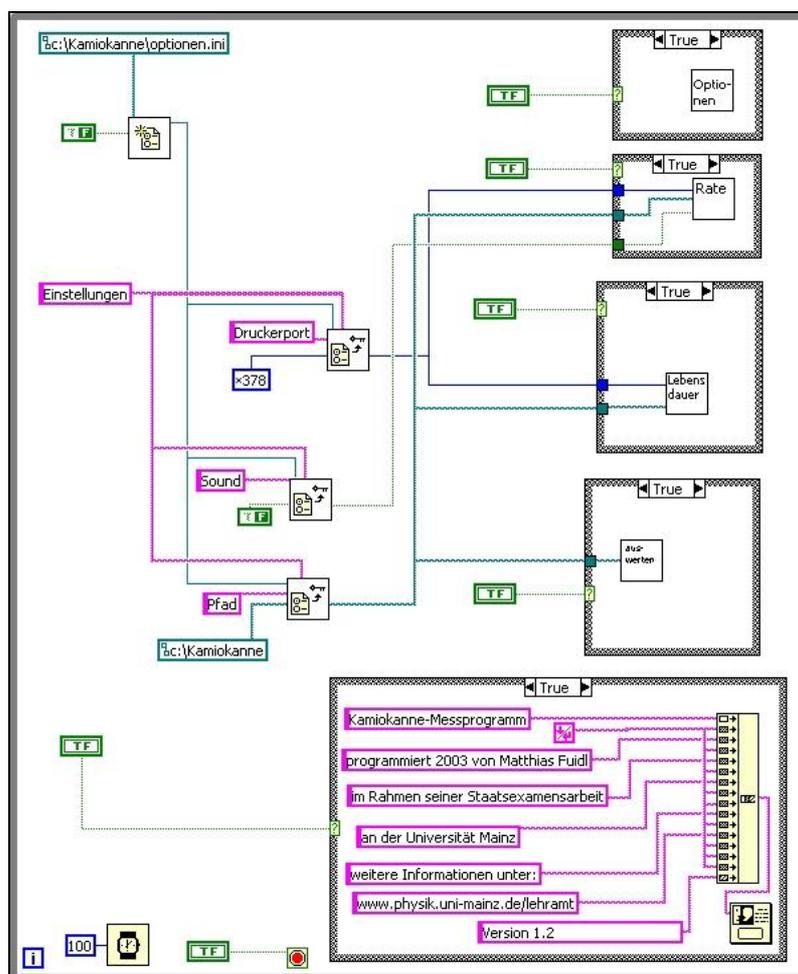


Abbildung 70: Diagramm des Hauptmenüs.

Im Diagramm des Hauptmenüs (Abbildung 70) wird auf der linken Seite oben die Konfigurationsdatei geöffnet, und die Adresse des Druckerports, die Soundeinstellung und der Pfad für die Messdateien werden ausgelesen. Falls diese Datei nicht existiert, werden Standardeinstellungen verwendet! Die booleschen Symbole **TF** stehen für die Buttons auf dem Frontpanel, mit welchen die verschiedenen Programmmodule angewählt werden. So stehen die Pro-

¹³⁷ Falls ein Struktursymbol leer ist, zum Beispiel bei einem Fall einer „CASE“-Verzweigung, so wird es hier nicht angegeben. Ebenso werden vordefinierte LabVIEW-Module nicht immer dokumentiert.

grammmodule in den „Wahr“-Fällen der CASE-Symbole. Ein weiteres boolesches Symbol, welches dem Ende-Button auf dem Frontpanel entspricht, ist mit dem Knoten verknüpft, der festlegt wann die umgebende While-Schleife beendet wird. Das Symbol mit der Uhr hält die Ausführung für die angegebene Zeit (in ms) an¹³⁸.

A8.2 Optionen

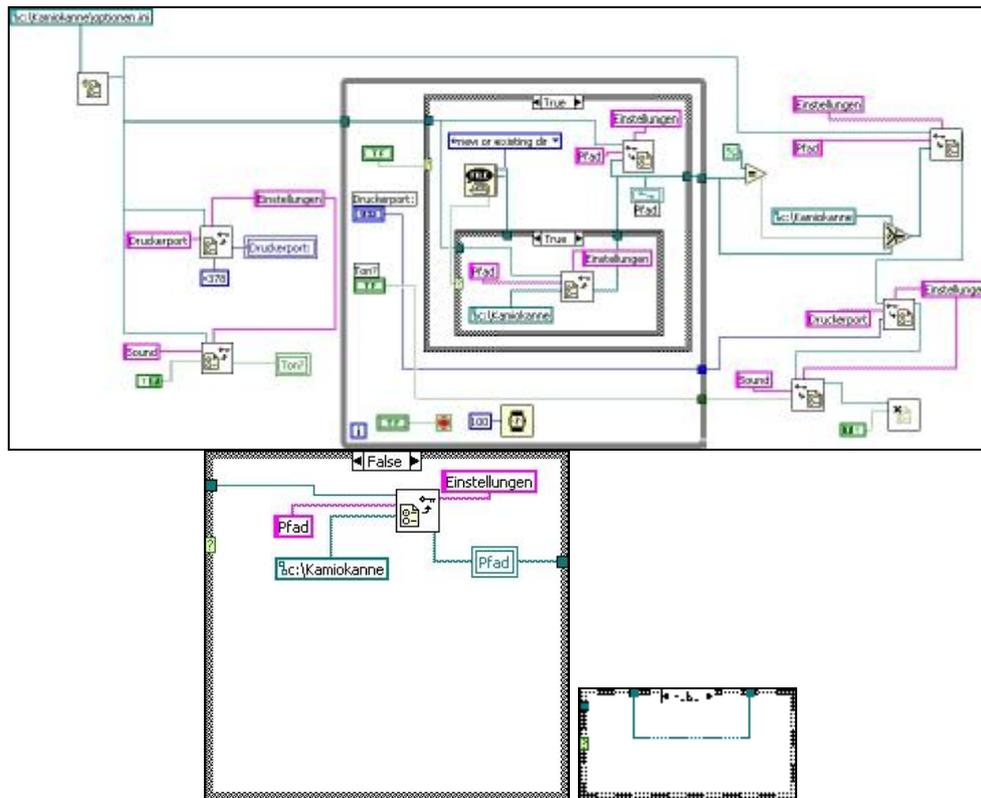


Abbildung 71: Diagramme zum Einstellen der Optionen.

In diesem Diagramm (Abbildung 71) wird die Konfigurationsdatei *Optionen.ini* für die Optionen ausgelesen, oder, falls nötig, neu angelegt. Die Datei trägt Informationen über die Adresse des Druckerports, weil nicht davon auszugehen ist, dass der Druckerport bei allen in Zukunft eingesetzten Rechnern die Adresse x378 hat. Des Weiteren können die Pfad- und Soundeinstellungen gespeichert werden, damit sie beim nächsten Programmstart wieder zur Verfügung stehen.

¹³⁸ Dies ist nötig, da das Programm sonst die komplette Rechenleistung des ausführenden PCs belegt.

A8.3 Exkurs: Zugriff auf die Druckerschnittstelle

Bevor die einzelnen Module für die Datenerfassung dargestellt werden, folgt an dieser Stelle eine Erläuterung des Zugriffs auf den Parallelport anhand der Unteroutine „Initialisieren“, welche für die Steuerung der Schaltung verwendet wird

A8.3.1 Setzen und Löschen von Bits

Mit diesem Unterprogramm soll der Pin 14 des Druckeranschlusses auf der Digital-Platine auf High, bzw. Low gesetzt werden (siehe Schaltpläne). Dies entspricht nach Tabelle 9 und Tabelle 10 dem Bit 1 im Steuerregister. Das Setzen und Löschen von Bits geschieht mit einem Schreibzugriff auf den Port, wobei man vorher den aktuellen Stand auslesen muss, um die anderen Bits (Pins) beim Schreiben nicht zu verändern. Um den Wert zu ermitteln, der geschrieben werden muss, bedient man sich OR- bzw. AND-Verknüpfungen (siehe Anhang 7). Möchte man ein Bit setzen, liest man das entsprechende Byte aus dem Register aus und vergleicht es mit Hilfe einer OR-Verknüpfung mit einem Vergleichsbyte, bei dem die zu setzenden Bits auf 1 stehen, alle anderen auf 0 (vgl. Tabelle 17). Möchte man ein Bit löschen, vergleicht man das ausgelesene Byte mit einer AND-Verknüpfung mit einem Vergleichsbyte, bei dem die zu löschenden Bits auf 0 stehen, alle anderen auf 1 (vgl. Tabelle 18):

Bit:	7	6	5	4	3	2	1	0	Summe:
Wert:	$2^7=$ 128	$2^6=$ 64	$2^5=$ 32	$2^4=$ 16	$2^3=$ 8	$2^2=$ 4	$2^1=$ 2	$2^0=$ 1	255
Beispiel: vom Port	0	1	0	1	0	1	0	1	85
Vergleichsbyte	0	0	0	0	0	0	1	0	2
Ergebnis OR- Verknüpfung:	0	1	0	1	0	1	1	1	87

Tabelle 17: Das Setzen von Bits.

Bit:	7	6	5	4	3	2	1	0	Summe:
Wert:	$2^7=$ 128	$2^6=$ 64	$2^5=$ 32	$2^4=$ 16	$2^3=$ 8	$2^2=$ 4	$2^1=$ 2	$2^0=$ 1	255
Beispiel: vom Port	0	1	0	1	0	1	1	1	87
Vergleichsbyte	1	1	1	1	1	1	0	1	253
Ergebnis AND- Verknüpfung:	0	1	0	1	0	1	0	1	85

Tabelle 18: Das Löschen von Bits.

A8.3.2 Das Modul „Initialisieren“

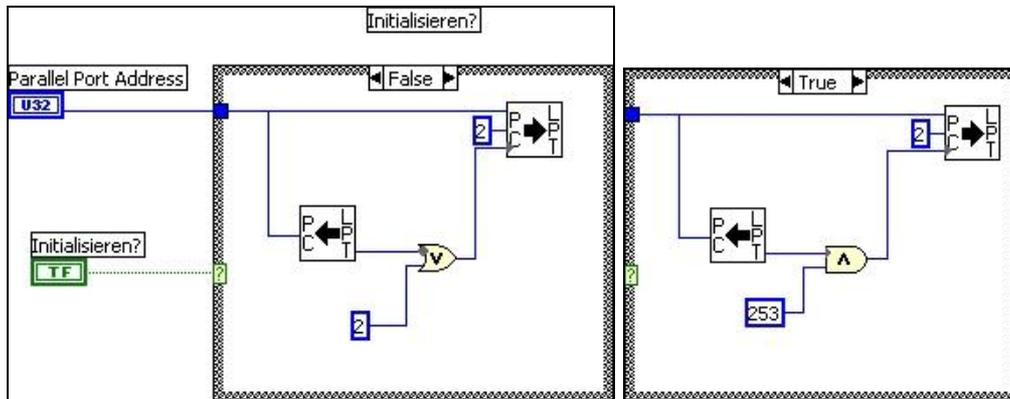


Abbildung 72: Das Modul „Initialisieren“.

Im Diagramm (Abbildung 72) erkennbar ist, dass im False-Fall das aus dem Status-Register ausgelesene Byte durch ein OR mit der Zahl 2 und im True-Fall durch ein AND mit 253 verglichen wird und das Ergebnis in das Status-Register geschrieben wird; genau wie oben erläutert.

A8.3.3 Lesen und Schreiben am Parallelport

Der Zugriff auf den Port geschieht mit den von LabVIEW bereitgestellten Modulen „InPort“ und „OutPort“¹³⁹. Hierfür müssen nur die Adresse und das Register angegeben werden; beim Schreiben selbstverständlich auch der Wert, der geschrieben werden soll (Abbildung 73 und Abbildung 74).

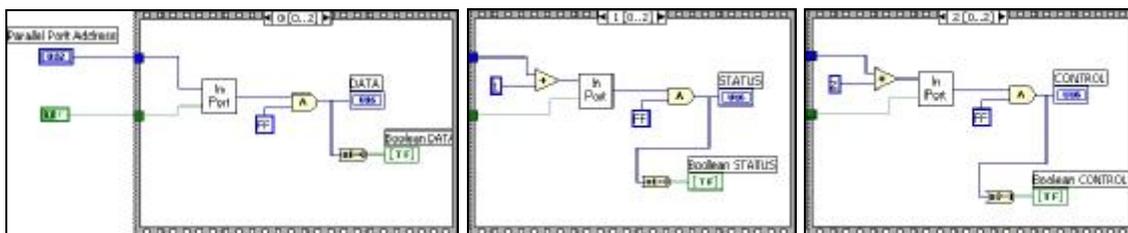


Abbildung 73: Lesen des Parallelports.

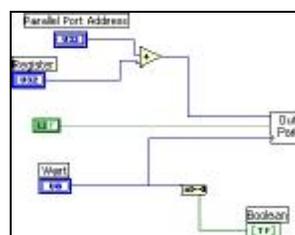
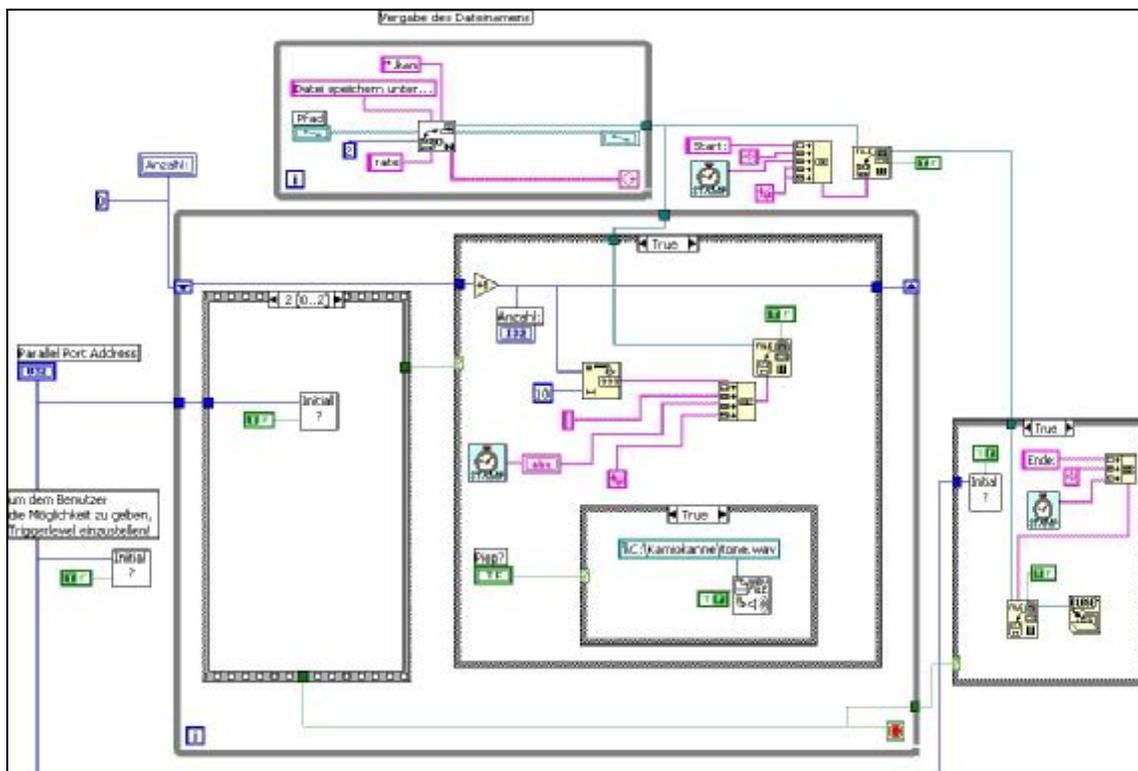


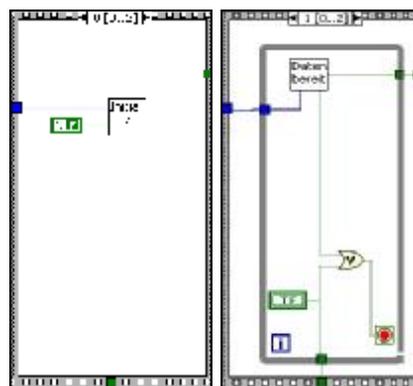
Abbildung 74: Schreiben auf den Parallelport.

¹³⁹ Allerdings muss das aktuelle Programmpaket AccessHW installiert sein (vgl. Fußnote 101).

A8.4 Erfassung der Ereignisse für die Ratenmessung



(a)



(b)

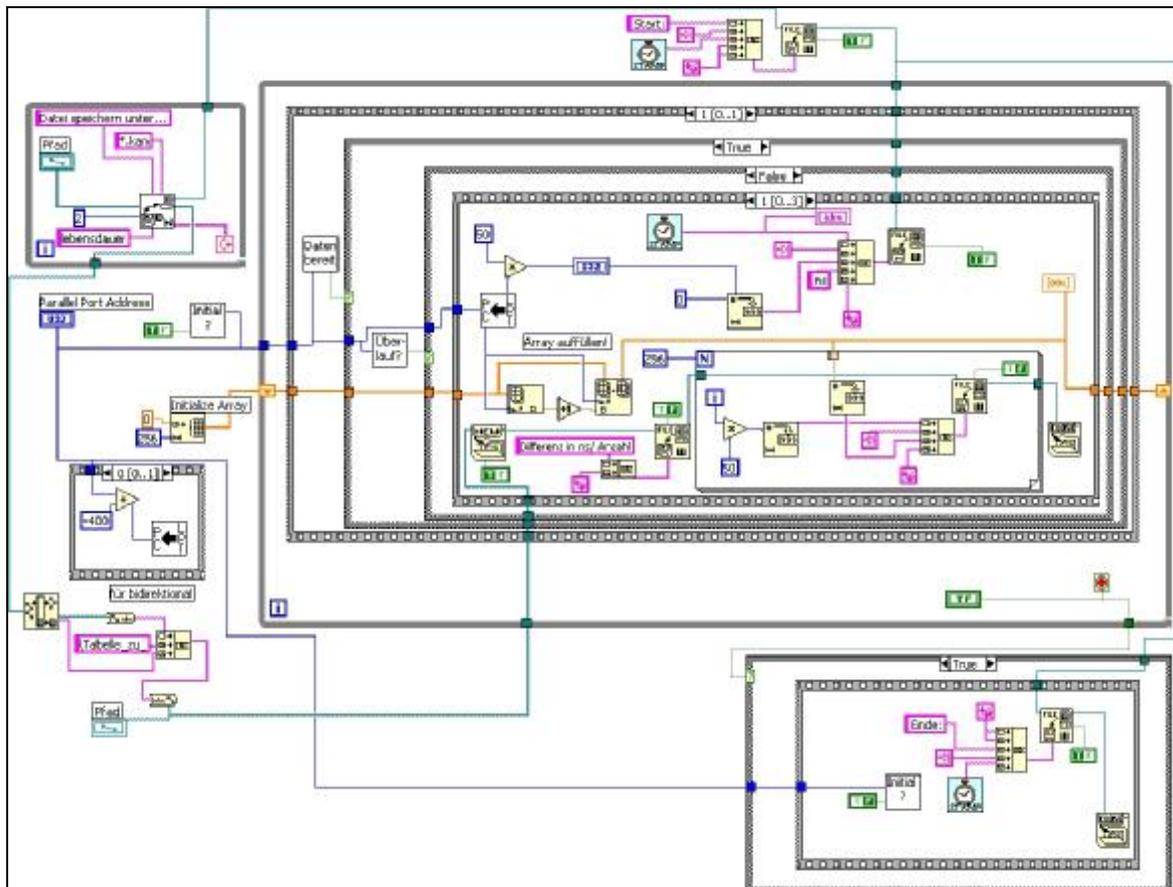
(c)

Abbildung 75 (a) bis (c): Diagramme für die Ratenmessung.

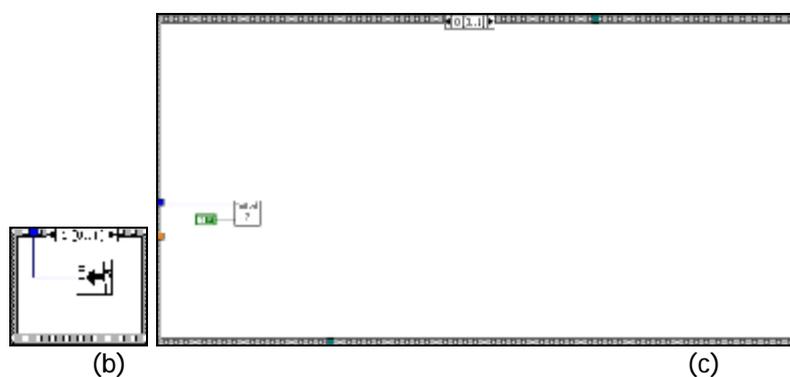
Mit diesem Diagramm (Abbildung 75) wird die Datennahme für die Ratenmessung gesteuert. Im oberen Teil ist eine While-Schleife zu erkennen (Abbildung 75 (a)), die den Benutzer immer wieder auffordert, einen Dateinamen einzugeben, bis ein gültiger Name eingegeben wurde. Die große While-Schleife in der Mitte des Diagramms läuft solange, bis der Button **TF** auf dem Frontpanel gedrückt wurde. Dann ist dieses Modul zu Ende. Die Sequenz an der linken Seite der großen While-Schleife initialisiert im ersten Schritt (Abbildung 75 (b)) die Schaltung. Im zweiten Schritt (Abbildung 75 (c)) wird innerhalb einer While-Schleife gewartet bis Daten anliegen, um dann im dritten Schritt (in Abbildung 75 (a)) die Schaltung zu-

rückzusetzen. Wenn Daten anliegen wird dann innerhalb der großen While-Schleife der Zählerstand um eins erhöht und die Protokolldatei um eine Zeile mit dem aktuellen Zeitstempel und dem aktuellen Zählerstand ergänzt. Falls gewünscht wird auch ein Ton ausgegeben. Ist die große While-Schleife beendet, wird in die Protokolldatei noch der Zeitpunkt des Beendens geschrieben und die Datei geschlossen.

A8.5 Datenerfassung für die Messung der Lebensdauer



(a)



(b)

(c)

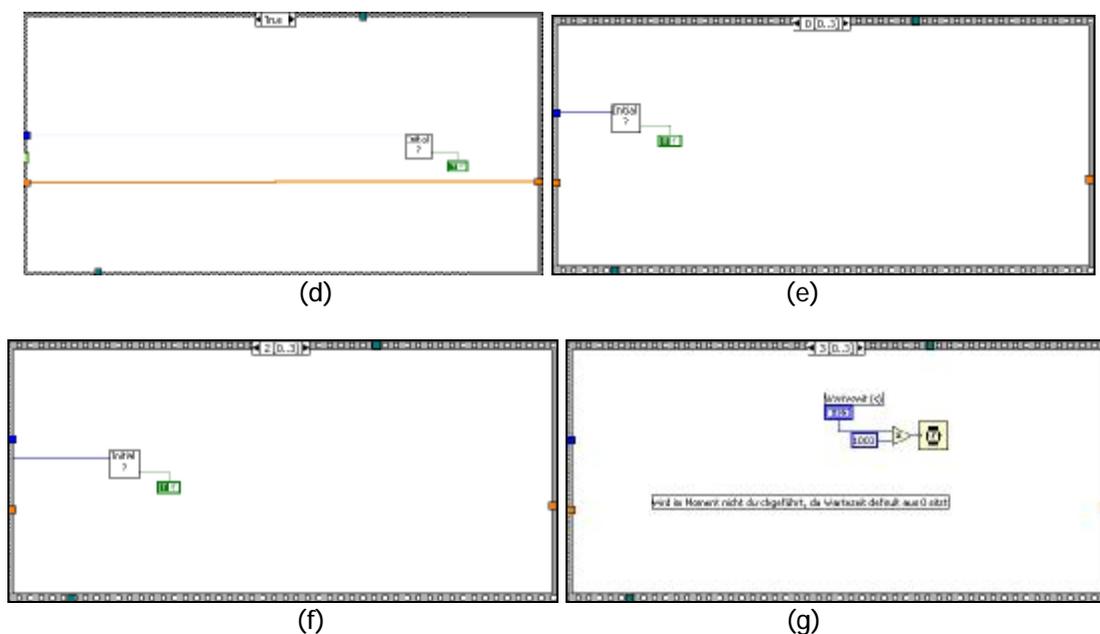


Abbildung 76 (a) bis (g): Diagramme des Moduls für die Lebensdauerermessung.

Im linken Teil des Moduls (Abbildung 76 (a)) wird wie im Modul der Ratenmessung ein Dateiname für die Messprotokolldatei vergeben. Ist dies geschehen, so wird im oberen Teil des Diagramms die Startzeit in die Datei geschrieben. Im linken Teil wird ein Array¹⁴⁰ angelegt, das aus 256 Feldern besteht. Die kleine Sequenz (vgl. Abbildung 76 (b)) am rechten Rand dient der Einstellung des Parallelports auf bidirektional¹⁴¹.

Die eigentliche Datenerfassung läuft wie folgt innerhalb der While-Schleife ab und wird durch die Diagramme in Abbildung 76 (a) und (c) bis (g) beschrieben, welche nicht im Einzelnen angesprochen werden. Vielmehr wird der Ablauf der Datenerfassung klar gemacht.

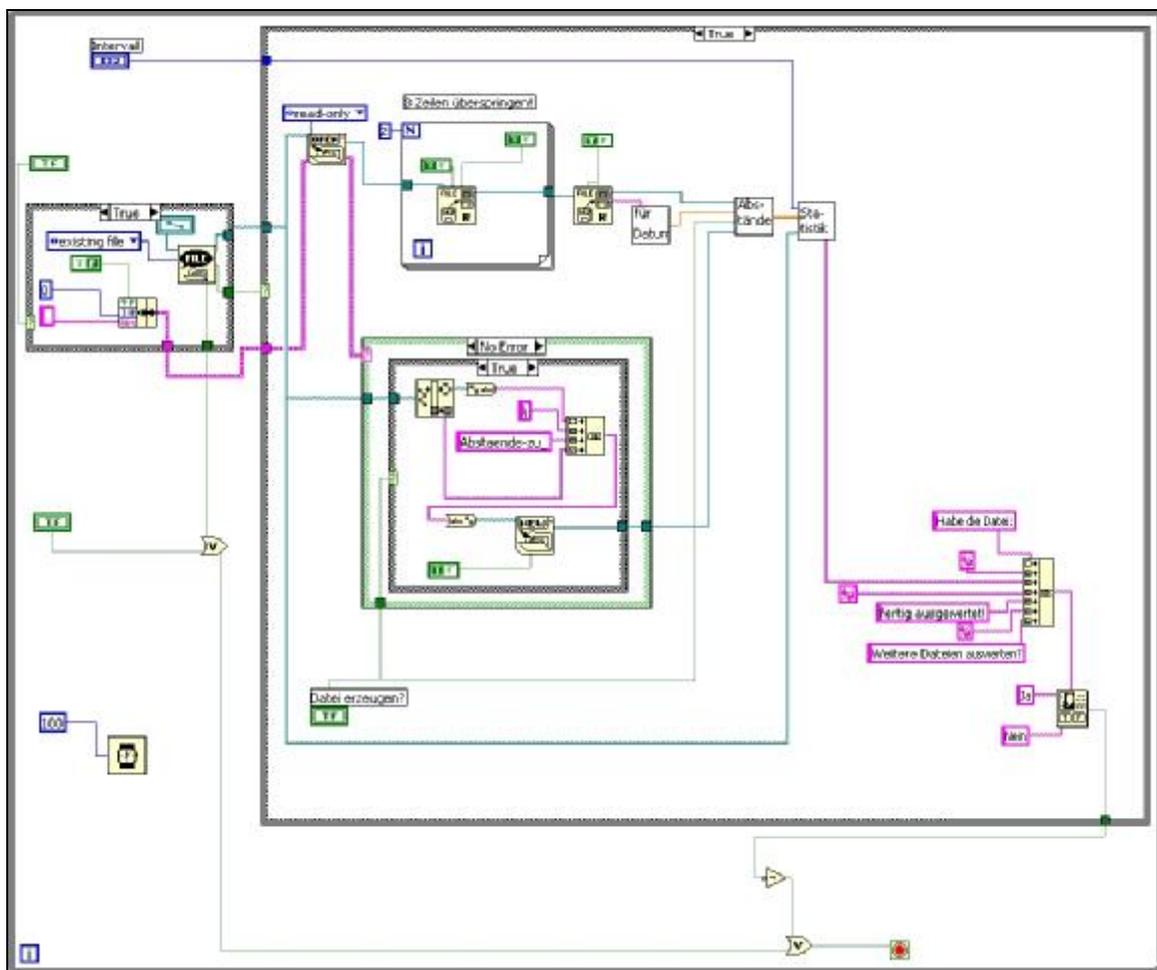
Zuerst wird die Schaltung bereit gemacht, Ereignisse registrieren zu können (Abbildung (c)). Anschließend wird mit dem Untermodul „Daten bereit?“ laufend am Druckerport geprüft, ob Daten vorliegen. Dies ist ein Indiz dafür, dass ein (erstes) Ereignis stattgefunden hat. Ist das der Fall, so wird geprüft, ob ein Überlauf am Zähler eingetreten ist. Ein Überlauf beschreibt, dass innerhalb von 12 μ s kein weiteres Ereignis stattgefunden hat. Die Schaltung muss also in diesem Falle initialisiert werden (Abbildung 76 (d)). Liegt aber kein Überlauf vor, so wurde ein weiteres Ereignis registriert und die Zeitspanne zwischen den beiden Ereignissen liegt an den Ausgängen des Zählers, also am Datenregister des Parallelports (vgl. Tabelle 9) an. Es wird ausgelesen, in dem die Schaltung angehalten (Abbildung 76 (e)) und anschließend der Zählerstand abgefragt wird. Der Zählerstand im entsprechenden Feld des Datenarrays wird

¹⁴⁰ Array engl. „Datenfeld“

¹⁴¹ Bidirektional: in beide Richtungen. Normalerweise dient der Parallelport dem Anschluss eines Druckers. Hierfür genügt eine Verbindung der Art *PC zum Drucker*. Im Versuch sollen aber die Datenleitungen ausgelesen werden. Daher muss man auf den bidirektionalen Modus umschalten.

erhöht, die Protokolldatei ergänzt und die Tabelle zur aktuellen Messung geschrieben (vgl. Abbildung 76 (a) in der Mitte rechts)¹⁴². Abschließend wird die Schaltung wiederum initialisiert (Abbildung 76 (f)). Eine für den Anwender versteckte Vorrichtung ist die Möglichkeit, eine Wartezeit nach einem Ereignis einstellen zu können¹⁴³. Dies könnte dazu dienen, um zeitweise auftretende Störsignale aus dem Stromnetz, welche eine Reihe von direkt aufeinander folgenden zufälligen Ereignissen erzeugen würde, zu minimieren. In der aktuellen Version beträgt diese künstliche Totzeit allerdings 0 ms.

A8.6 Auswertung



(a)

¹⁴² Die Tabelle wird bei jedem registrierten Ereignis neu in eine Datei geschrieben, da ein Datenverlust durch Ausschalten des PCs oder ähnlichem über die lange Messzeit hinweg nicht ausgeschlossen werden kann.

¹⁴³ Dies stellt eine künstliche *Totzeit* dar.

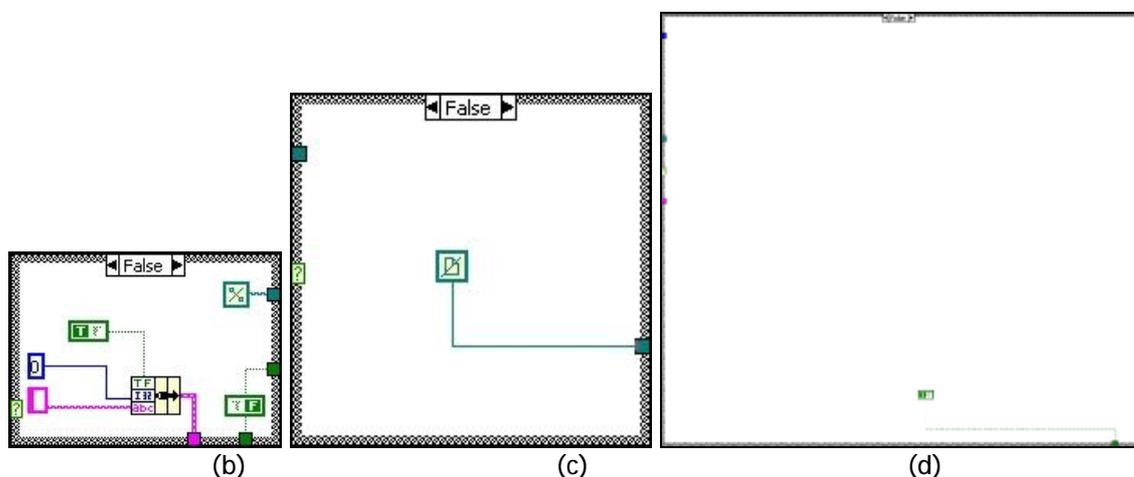
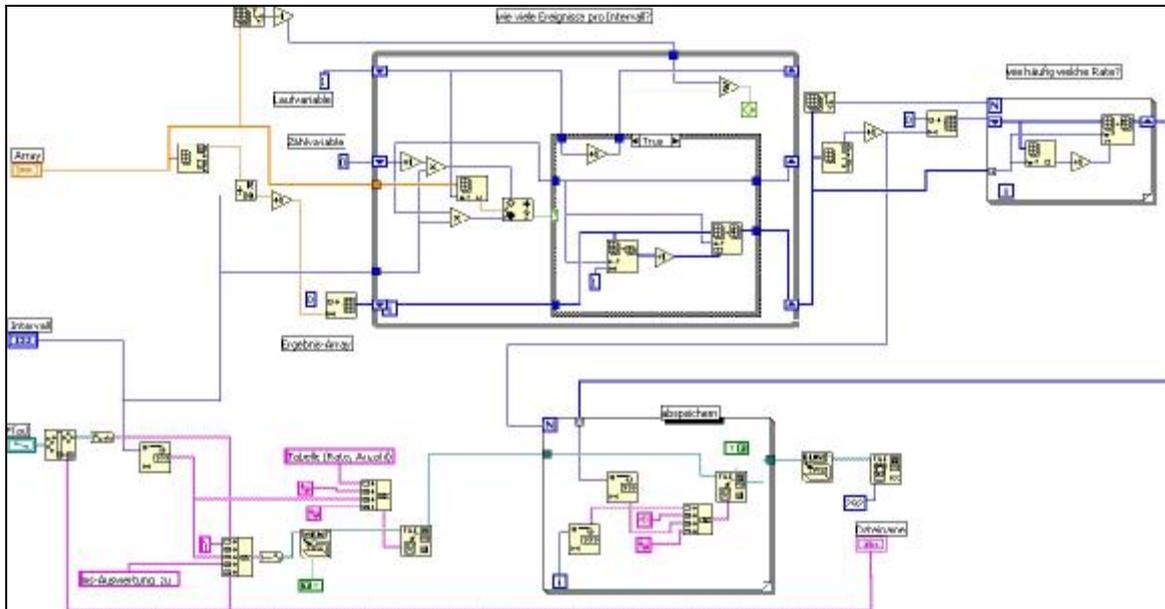


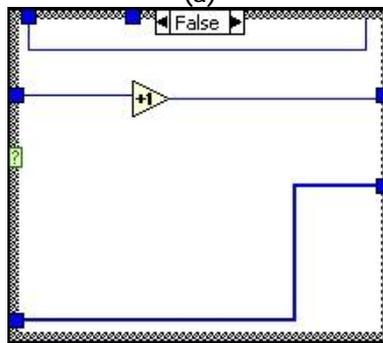
Abbildung 77 (a) bis (d): Diagramme für die statistische Auswertung der Ratenmessungen.

Das Diagramm zur Auswertung der Protokolldatei der Ratenmessungen besteht wieder aus einem Datei-Dialog, der sich öffnet, wenn der Benutzer den „Auswerten“-Button drückt (Diagramme aus der Abbildung 77 (a) und (b)). Wenn kein Fehler vorliegt, startet die Auswertung. Hierfür werden im ersten Schritt drei Zeilen Kommentar der Protokolldatei übersprungen, bevor die erste Zeit ausgelesen und mit der Routine „für Datum“ (vgl. Abbildung 77) in Millisekunden¹⁴⁴ umgewandelt wird. Mit dieser Zeitinformation geht es dann in die Routine „Abstände“ (vgl. Abbildung 78), welche dann alle weiteren Ereignisse Zeile für Zeile ausliest und die Zeitdifferenzen in Millisekunden zum ersten Ereignis berechnet und in einem Array zurückgibt. Dieses Array verarbeitet dann die Routine „Statistik“ (vgl. Abbildung 79) weiter. Sie ermittelt zuerst, wie viele Ereignisse pro Intervall auftraten, um dann die Ratenverteilung zu berechnen und in einer Datei abzuspeichern. Zum Abschluss der Auswertung bekommt der Benutzer noch eine Hinweismeldung, dass die Datei fertig ausgewertet wurde.

¹⁴⁴ Genauer: Millisekunden, die seit 12:00 Uhr am Freitag den 01.01.1904 vergangen sind. (Da dies eine Standardfunktion von LabVIEW ist).



(a)



(b)

Abbildung 79 (a), (b): Diagramme des Moduls „Statistik“.

Anhang 9

Abbildungs-, Formel- und Tabellenverzeichnis

ABBILDUNG 1: WILSONSCHE NEBELKAMMER [CL86].	7
ABBILDUNG 2: POSITRON-NACHWEIS IN EINER NEBELKAMMER [CL86]	7
ABBILDUNG 3: AUFNAHME EINES MYONZERFALLS [CL86].	8
ABBILDUNG 4: KANDIDATEN FÜR DIE QUELLEN DER HÖCHSTENERGETISCHEN PRIMÄRSTRAHLUNG [KA03].	11
ABBILDUNG 5: ELEMENTHÄUFIGKEITEN IN DER MILCHSTRAßE.	12
ABBILDUNG 6: DARSTELLUNG DER SCHAUER IN DER ERDATMOSPHÄRE [GR85].	13
ABBILDUNG 7: ÜBERSICHT UND EIGENSCHAFTEN DER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN (WW) NACH [PD02].	15
ABBILDUNG 8: BOSONEN NACH [PD02], „TRÄGER DER KRÄFTE“, $SPIN=0,1,2,\dots$	16
ABBILDUNG 9: FERMIONEN (LEPTONEN UND QUARKS) NACH [PD02], „KONSTITUENTEN DER MATERIE“	16
ABBILDUNG 10: EINIGE BARYONEN UND ANTIBARYONEN NACH [PD02].	17
ABBILDUNG 11: EINIGE MESONEN NACH [PD02].	18
ABBILDUNG 12: FEYNMANDIAGRAMM DES ZERFALLS DES (POSITIVEN) PIONS [GR00].	22
ABBILDUNG 13: FEYNMANDIAGRAMM DES ZERFALLS DES (NEGATIVEN) MYONS.	23
ABBILDUNG 14: INTENSITÄT DER MYONEN IN ABHÄNGIGKEIT IHRES IMPULSES [AL84].	24
ABBILDUNG 15: WINKELVERTEILUNG DER MYONEN IN MEERESHÖHE IN ABHÄNGIGKEIT VOM IMPULS NACH [AL84].	25
ABBILDUNG 16: LADUNGSVERHÄLTNIS HORIZONTALER UND VERTIKALER MYONEN AUF MEERESHÖHE [AL84].	25
ABBILDUNG 17: ZURÜCKGELEGTE STRECKEN DER MYONEN [TI03].	27
ABBILDUNG 18: VERANSCHAULICHUNG DES CHERENKOV-EFFEKTS NACH [AL71]:	28
ABBILDUNG 19: GEOMETRISCHE BEZIEHUNGEN BEIM CHERENKOVEFFEKT NACH [BS2.99].	29
ABBILDUNG 20: VERSUCHSAUFBAU IN DER WELLENWANNE.	31
ABBILDUNG 21: BESTIMMUNG DER PROJEKTILGESCHWINDIGKEIT.	32
ABBILDUNG 22: BESTIMMUNG DER AUSBREITUNGSGESCHWINDIGKEIT DER WASSERWELLEN.	33
ABBILDUNG 23: VERMESSUNG DES KEGELS IN VIMPS.	34
ABBILDUNG 24: AUSWERTUNG DER MESSWERTE IN EXCEL.	35
ABBILDUNG 25: SCHEMATISCHER VERSUCHSAUFBAU.	37
ABBILDUNG 26: SENKRECHTER SCHNITT DURCH DEN VERSUCHSAUFBAU.	38
ABBILDUNG 27: AUFBAU EINES PHOTOMULTIPLIERS [KL00].	38
ABBILDUNG 28: ORIGINALPULS AUS DEM PHOTOMULTIPLIER (BEI 1,6kV).	40
ABBILDUNG 29: DIE BESTÜCKTE VERSTÄRKERPLATINE.	41
ABBILDUNG 30: GESAMTVERSTÄRKUNG AD8002.	42
ABBILDUNG 31: BEIDE KANÄLE DER DIFFERENZIELLEN ÜBERTRAGUNG AM AUSGANG DES SENDERS.	43
ABBILDUNG 32: DIFFERENZIELLES SIGNAL, WELCHES ABGESCHWÄCHT AUF DER DIGITALPLATINE ANKOMMT.	43
ABBILDUNG 33: FERTIG BESTÜCKTE DIGITALPLATINE.	44
ABBILDUNG 34: AUSGANGSSIGNAL DES EMPFÄNGERS.	45
ABBILDUNG 35: AUSGANGSSIGNAL DES KOMPARATORS.	46
ABBILDUNG 36: VERLÄNGERUNG DES SIGNALS AUF CA. 300NS.	47
ABBILDUNG 37: TORZEIT FÜR DIE LEBENSDAUERMESSUNG.	48
ABBILDUNG 38: PULS, WELCHER AN DER BNC-BUCHSE ANLIEGT (KANAL 2)	49
ABBILDUNG 39: DAS HAUPTMENÜ.	52
ABBILDUNG 40: OPTIONEN BILDSCHIRM.	53
ABBILDUNG 41: BILDSCHIRM DER RATENMESSUNG.	54
ABBILDUNG 42: DAS MODUL ZUM AUSWERTEN VON RATENMESSUNGEN.	54
ABBILDUNG 43: BILDSCHIRM FÜR DIE LEBENSDAUERMESSUNG.	55
ABBILDUNG 44: INFORMATIONSFENSTER.	56
ABBILDUNG 45: SCHEMATISCHER VERSUCHSAUFBAU IN DER ÜBERSICHT.	57
ABBILDUNG 46: EINSTELLUNG DER HOCHSPANNUNG.	59
ABBILDUNG 47: GAUß-FIT FÜR EIN BEISPIEL DER EINSORTIERUNG DER DOPPELPULSZEIT.	60
ABBILDUNG 48: DER VERSUCHSAUFBAU IN DER ÜBERSICHT.	61
ABBILDUNG 49: SCHEMATISCHER VERSUCHSAUFBAU FÜR RATENMESSUNGEN.	62
ABBILDUNG 50: RATENVERTEILUNG EINER 3-MINUTEN-MESSUNG (18 INTERVALLE À 10 SEKUNDEN)	62
ABBILDUNG 51: RATENVERTEILUNG EINER 10-MINUTEN-MESSUNG (60 INTERVALLE À 10 SEKUNDEN).	63

ABBILDUNG 52: RATENVERTEILUNG EINER GESAMTEN MESSUNG.	63
ABBILDUNG 53: NULLRATENVERTEILUNG VON 118 1-MINUTEN INTERVALLEN.	64
ABBILDUNG 54: SCHEMATISCHER AUFBAU ZUR UNTERSUCHUNG DES DURCHDRINGUNGSVERMÖGENS.	66
ABBILDUNG 55: SCHEMATISCHER AUFBAU FÜR DIE MESSREIHE <i>WINKELVERTEILUNG</i>	67
ABBILDUNG 56: ORIGINAL PHOTOMULTIPLIPLIER-PULSE IN ANORDNUNG A.	67
ABBILDUNG 57: ZU BERÜCKSICHTIGENDE FLÄCHEN BEI EINER MESSUNG DER <i>WINKELABHÄNGIGKEIT</i>	68
ABBILDUNG 58: LEBENSDAUERMESSUNG – GESAMT.	69
ABBILDUNG 59: LEBENSDAUERMESSUNG – ABSCHNITT 0 μs BIS 3,3 μs	70
ABBILDUNG 60: LEBENSDAUERMESSUNG – AUSWERTUNG μ^+	70
ABBILDUNG 61: LEBENSDAUER – AUSWERTUNG μ^-	71
ABBILDUNG 62: LEBENSDAUERMESSUNG IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG.	71
ABBILDUNG 63: DER BAUSTEIN ELEMENTARTEILCHENPHYSIK AUS [MB99].	72
ABBILDUNG 64: (A) – (B) SCHALTPLÄNE DER VERSTÄRKEREINHEIT.	83
ABBILDUNG 65: TOP-LAYER (LINKS) UND BOTTOM-LAYER (RECHTS) DER VERSTÄRKERPLATINE.	83
ABBILDUNG 66: BESTÜCKUNGSPLAN DER VERSTÄRKERPLATINE.	84
ABBILDUNG 67: (A) – (D) SCHALTPLÄNE DES DIGITALTEILS.	86
ABBILDUNG 68: TOP-LAYER (A) UND BOTTOM-LAYER (B) DER DIGITALPLATINE.	87
ABBILDUNG 69: BESTÜCKUNGSPLAN DER DIGITALPLATINE.	87
ABBILDUNG 70: DIAGRAMM DES HAUPTMENÜS.	97
ABBILDUNG 71: DIAGRAMME ZUM EINSTELLEN DER OPTIONEN.	98
ABBILDUNG 72: DAS MODUL „INITIALISIEREN“.	100
ABBILDUNG 73: LESEN DES PARALLELPORTS.	100
ABBILDUNG 74: SCHREIBEN AUF DEN PARALLELPORT.	100
ABBILDUNG 75 (A) BIS (C): DIAGRAMME FÜR DIE RATENMESSUNG.	101
ABBILDUNG 76 (A) BIS (G): DIAGRAMME DES MODULS FÜR DIE LEBENSDAUERMESSUNG.	103
ABBILDUNG 77 (A) BIS (D): DIAGRAMME FÜR DIE STATISTISCHE AUSWERTUNG DER RATENMESSUNGEN.	105
ABBILDUNG 78: DIAGRAMM DES MODULS „ABSTÄNDE“.	106
ABBILDUNG 79 (A), (B): DIAGRAMME DES MODULS „STATISTIK“.	107
FORMEL 1: CHERENKOV-FORMEL.	29
FORMEL 2: ANZAHL DER BEIM CHERENKOV-EFFEKT ERZEUGTEN PHOTONEN.	29
FORMEL 3: BETHE-BLOCH-FORMEL.	65
TABELLE 1: ZUSAMMENSETZUNG DER PRIMÄRSTRAHLUNG.	10
TABELLE 2: REAKTIONEN, WELCHE KAONEN, LAMBDA-HYPERONEN UND SIGMA-HYPERONEN HERVORBRINGEN.	20
TABELLE 3: ZERFALLSKANÄLE ZUR MYONERZEUGUNG NACH [HI92].	21
TABELLE 4: ZERFALLSKANÄLE DER GELADENEN PIONEN.	22
TABELLE 5: ERHALTUNG DER LEPTONENZAHLEN BEIM ZERFALL DES (FREIEN) μ^+	22
TABELLE 6: GESCHWINDIGKEIT EINES BOOTES.	33
TABELLE 7: AUSBREITUNGSGESCHWINDIGKEIT DER OBERFLÄCHENWELLEN.	34
TABELLE 8: VERIFIZIERUNG DER FORMEL 1.	36
TABELLE 9: STANDARDBELEGUNG DER BITS IM PARALLELPORT.	50
TABELLE 10: PIN-BELEGUNG DER SCHALTUNG.	51
TABELLE 11: EINSTELLUNG DER HOCHSPANNUNG.	58
TABELLE 12: ZÄHLRATEN AUF UNTERSCHIEDLICHEN HÖHEN.	66
TABELLE 13: MESSREIHEN ZUR WINKELVERTEILUNG.	67
TABELLE 14: FLÄCHEN BEI DER WINKELMESSUNG.	68
TABELLE 15: AUF DIE FLÄCHEN NORMIERTE ZÄHLRATEN BEI DER WINKELMESSUNG.	68
TABELLE 16: ÜBERBLICK ÜBER DIE NOBELPREISE, DIE FÜR FORSCHUNG RUND UM DIE GEBIETE <i>KOSMISCHE HÖHENSTRAHLUNG</i> UND <i>ELEMENTARTEILCHEN</i> VERGEBEN WURDEN.	78
TABELLE 17: DAS SETZEN VON BITS.	99
TABELLE 18: DAS LÖSCHEN VON BITS.	99

Anhang 10

Literaturverzeichnis

- [Al71]: O. C. Allkofer: „Teilchendetektoren“, 1971, Verlag Karl Thiernig KG, München
- [Al84]: O. C. Allkofer et al: „Cosmic Rays on Earth“, 1984, Physik-Daten 25-1, Fachinformationszentrum Karlsruhe
- [Be99]: M. Becker: „Entwicklung eines multimedialen Präsentationssystems für physikalische Experimente“, Staatsexamensarbeit, Universität Mainz, 1999
- [Bo03]: K. N. Borozdin: „Radiographic imaging with cosmic-ray muons“, Nature, Vol. 422, 20 März 2003
- [Bl00]: H. Blümer und K.-H. Kampert: „Die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung“, Physikalische Blätter 56 (2000) Nr. 3
- [Bl02]: H. Blümer: „Die höchsten Energien im Universum“, Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe Jahrgang 33 2/2001 S. 95-102
- [BS2.99]: Bergmann, Schäfer: „Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2: Elektromagnetismus“, 1999, Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York
- [BS4.92]: Bergmann, Schäfer: „Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 4: Teilchen“, 1992, Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York
- [Ch58]: P. Cherenkov: „Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics“, Nobel Lecture, December 11, 1958
- [Cl86]: F. Close, M. Marten, Ch. Sutton: „Spurensuche im Teilchenzoo – die elementaren Bausteine der Materie“, 1986, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg
- [Co96]: G. Coughlan, J. Dodd: „Elementarteilchen, eine Einführung für Naturwissenschaftler“, dtsh. 1996, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden
- [Ge91]: J. Geisbüsch: „Lebensdauer und magnetisches Moment von Myonen aus der Höhenstrahlung“, Staatsexamensarbeit, Universität Mainz, 1991 und die von A. Winhart 2001 überarbeitete Fassung für den gleichnamigen Versuch des Fortgeschrittenen-Praktikums an der Universität Mainz.
- [Gr85]: C. Grupen: „Kosmische Strahlung“, Physik in unserer Zeit, 16. Jahrgang, Nr. 3 1985, S. 69ff
- [Gr93]: C. Grupen: „Teilchendetektoren“, 1993, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich
- [Gr00]: C. Grupen: „Astroteilchenphysik – Das Universum im Licht der kosmischen Strahlung“, 1. Auflage 2000, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden
- [Ha02]: K. Hagiwara et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 66, 010001 (2002); <http://pdg.lbl.gov>
- [He53]: W. Heisenberg (Hrsg.): „Vorträge über kosmische Strahlung“, 1953, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg
- [Hi92]: H. Hilscher: „Kosmische Myonen – Ein Hochenergieexperiment für die Schule“, PdN-Physik 3/41, Jg. 1992
- [HK03]: Hessisches Kultusministerium: „Lehrplan Physik, Gymnasialer Bildungsgang, Jahrgangsstufen 7 bis 13“, 2003
- [Ka03]: K.-H. Kampert: „Kosmische Strahlung – die höchstenergetischen Teilchen im Universum“, Vortrag im Rahmen des Physikalischen Kolloquiums an der Universität Mainz am 29.07.2003
- [KI92]: K. Kleinknecht: „Detektoren für Teilchenstrahlung“, 1992, Teubner-Verlag, Stuttgart

- [KI00]: M. Klein: „ Kosmische Myonen: Schulversuche zur Höhenstrahlung“, Staatsexamensarbeit, Universität Mainz, Oktober 2000
- [Ku95]: Kuchling: „Taschenbuch der Physik“, 1995, Fachbuchverlag Leipzig-Köln
- [Le94]: W. R. Leo: „Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments – A How-to Approach“, 1994, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [Ma01]: L.-P. May: „Analyse realer Bewegungsvorgänge im Physikunterricht: Zum Einsatz eines Videomess- und –präsentationssystems mit Anwendungsbeispielen aus Physik und Sport“, Staatsexamensarbeit, Universität Mainz, 2001
- [MB99]: Rheinland-Pfälzisches Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung: „Lehrplan Physik“, 1999
- [Mo49]: D. J. X. Montgomery: „Cosmic Ray Physics“, 1949, Princeton University Press
- [ND00]: Nuclear Data Evaluation Lab., Korea Atomic Energy Research Institute. Im Internet: <http://atom.kaeri.re.kr> [04.09.2003]
- [Ot98]: E. W. Otten: „Repetitorium Experimentalphysik mit Kurzrepetitorium“, 1998, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [PD02]: Particle Data Group of Lawrence Berkeley National Laboratory: „Particle Chart“, Internet Link: <http://particleadventure.org> [17.08.2003], copyright 2002
- [PS03]: Paul-Scherer-Institut, Schweiz: http://www.psi.ch/myonen_index.html [17.08.2003]
- [Sch01]: Th. Schliephake: „Nukleosynthese in Sternen“, Handout zum Vortrag im Seminar zum Fortgeschrittenenpraktikum, Universität Mainz, WiSe2001
- [Si90]: K. Simonyi: „Kulturgeschichte der Physik“, dtsh. 1990, Verlag Harri Deutsch, Thun/Frankfurt am Main
- [Ti03]: P. A. Tipler: „Moderne Physik“, 2003, Oldenbourg Verlag, München
- [Wa85]: T. Ward et al: „Laboratory study of the cosmic-ray muon lifetime“, Am. J. Phys., Vol. 53, No.6, June 85
- [We67]: A. O. Weissenberg: „Muons“, 1967, North-Holland Publishing Company, Amsterdam
- [Ze03]: Ch. Zeitnitz: Antwort-E-Mail vom 18.08.2003

Dankeschön

Über ein Jahr habe ich mich nun intensiv mit Myonen aus der kosmischen Höhenstrahlung und dem vorliegenden Versuchsaufbau beschäftigt. Viele Menschen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Dafür gilt es jetzt Danke zu sagen!

Die ersten Kontakte zum Thema kamen über das Demonstrationspraktikum für Lehramtsstudierende zu Stande. Hier sind *Günter Quast*, *Friedrich Kayser* und *Thomas Trefzger* zu nennen. Alle drei hatten und haben immer auch den Blick für die Anwendung in der Schule und offene Ohren für Lehramtsstudierende.

Weiter ging es bei der Veranstaltung mit SchülerInnen und Schülern zum Thema Myonen unter der Betreuung von *Rainer Wanke*. So kam es auch zu meiner Zugehörigkeit zur Gruppe *ETAP (Experimentelle Teilchen- und Atomphysik)*. Viele der elektronischen Detail-Ideen wurden mit *Bruno Bauss*, *Ulrich Schäfer* und *Christian Zeitnitz* durchgesprochen. Die Verwirklichung der Elektronik lag in den Händen der *Elektronikwerkstatt (Frau Barna, Herr Schuster mit den Auszubildenden, Herr Dickenscheid)*, wobei ich auch immer wieder *Brunos* Lötstationen benutzen durfte.

Bei der PC-Anbindung war mein Vorgänger *Martin Klein* hilfsbereit. Ein paar hilfreiche LabVIEW-Kniffe gab es von *Christian Zeitnitz*. Für die mechanischen Fragen (Bohrungen, senkrechter Schnitt durch die Kanne, etc.) war *Karl-Heinz Geib* immer zur Stelle (nach eigenen Aussagen ist er mit bis zu 80% seiner Arbeitszeit für die Erheiterung der Studierenden zuständig!) und beschäftigte die *mechanische Werkstatt* mit „meinen“ Aufträgen. *Frau Golczyk* in der Etatverwaltung war stets bereit, auch außerhalb der Öffnungszeiten eingereichte und per E-Mail bestellte Aufträge zu bearbeiten. *Silvia Müller*, die gute Seele der Arbeitsgruppe, war immer bereit, Fahrtkostenanträge entgegen zu nehmen und so manche bürokratische Hürde mit mir zu überwinden.

Einen kleinen Teil der Finanzierung stellte die *Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung* zusammen mit der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)* zur Verfügung.

Viele Hinweise zum Schulbezug gab es von den *Lehrern der Fortbildungsveranstaltung*, besonders von *Herrn Geyer* aus Wiesbaden und *Herrn Haupt* aus Kassel.

Kurz vor Toresschluss gab es von *Lars-Patrick May* noch einige Tipps zu ViMPS und EXCEL, und von *Friedrich Kayser* eine Kurzeinführung in die χ^2 -Berechnungen.

Jetzt ist die Arbeit fertig und wird von den Gutachtern, *Herrn Sander* und *Herrn Köpke*, bewertet. *Herr Sander* hat es wieder einmal ermöglicht, eine Arbeit mit fachdidaktischen Aspekten zu schreiben.

Vorher haben *Anna Gotthardt, Anna Hennig, Urs Matter, Frau Pilgram, Herr Sander, Thorsten Schliephake, Thomas Trefzger* und *Christian Vogl* akribisch Korrektur gelesen.

Immer wieder für einen Witz und ein aufheiterndes Wort war *Christian*, mein Bürogeselle zur Stelle!

Leckeress Essen gab es beim „Kochduell“ mit *Anna, Anna, Kerstin, Thorsten* und *Urs*. Überhaupt hat mir die Zeit mit *Urs* und *Thorsten*, die ich seit den ersten Tagen unseres Studiums kenne, und mit *Christian* bei allen Gelegenheiten immer sehr viel Spaß gemacht.

Meine Freundin *Anna* hat mich in allen Höhen und Tiefen (wobei rückblickend die Höhen doch überwiegen) immer liebevoll umsorgt und ist und war eine gute ZuhörerIn. Auch ihre Familie war mit aufmunternden Worten immer zur Stelle.

Meine beiden *Geschwister* haben sich immer nach mir erkundigt und die ersten Fahrversuche meiner Schwester *Sarah* haben mir sehr viel Spaß gemacht. *Sebastian* hat mit seinen immer wiederkehrenden Späßchen für manchen Lacher gesorgt.

Und Ihr, liebe *Eltern, Gisela* und *Norbert* habt mir all' das erst ermöglicht. Danke!

Erklärung

Ich versichere,
dass ich meine Staatsexamensarbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Taunusstein-Hahn, den 15.09.2003, _____

Matthias Fuidl

Impressum

Matthias Fuidl

Arndtstraße 33

65232 Taunusstein

E-Mail: matthias@fuidl.de

Matrikelnummer: 2503678

Geburtsort: Wiesbaden

Johannes Gutenberg Universität Mainz

Institut für Physik – ETAP –

Staudingerweg 7

55099 Mainz

www.physik.uni-mainz.de