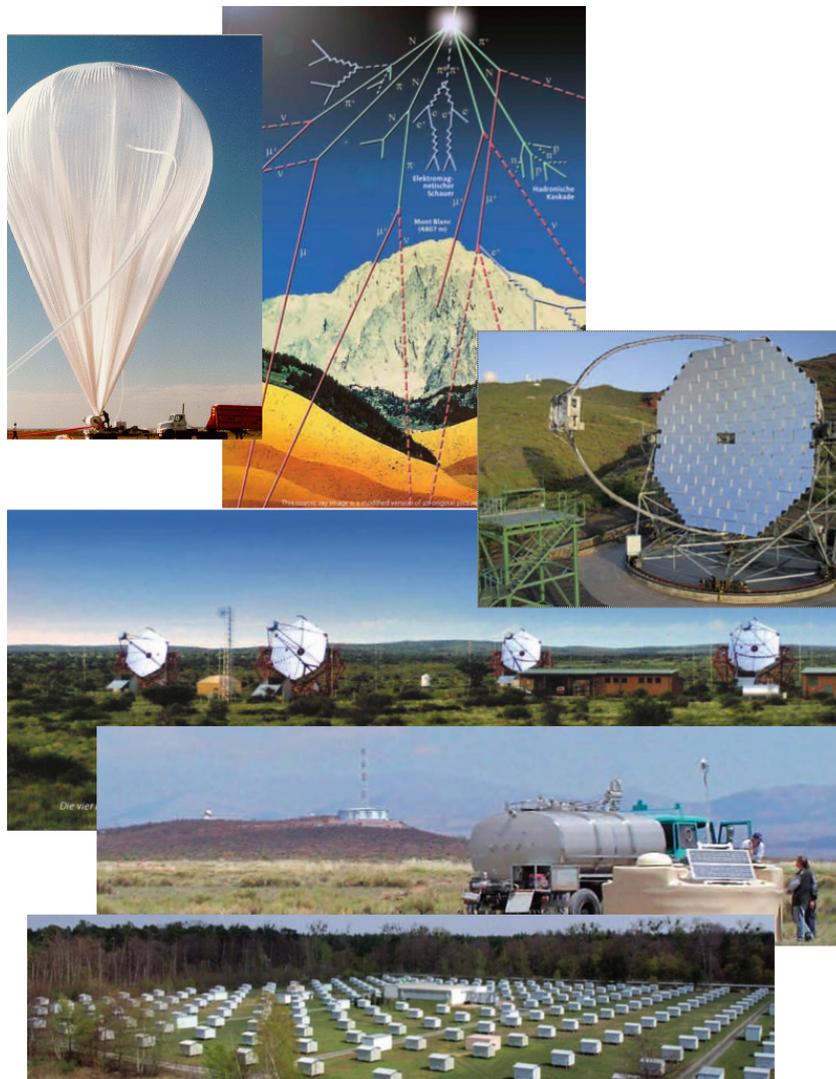


Anleitung F-Praktikum Luftschauer

Roger Wolf, Dieter Horns, Martin Tluczykont
Stand: 14. Februar 2014



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Entstehung von Luftschauern durch kosmische Strahlung	3
1.2	Nachweis von Luftschauern	9
2	Durchführung	13
2.1	Messinstrumente	14
2.1.1	Elektronische Module	14
2.1.2	Verwendung des Oszilloskops	16
2.2	Verkabelung der Ausleseelektronik	16
2.2.1	Einstellen der HV	16
2.2.2	Untersuchung des Signals mit dem Programm TEBMCA	18
2.2.3	Verstehen des Diskriminators	18
2.2.4	Amplitudenkalibration und Einstellen der Diskriminatorschwellen	22
2.2.5	Zeitkalibration	24
2.3	Beginn der Datennahme	27
2.3.1	Schalten des Triggers	27
2.3.2	Schalten der Auslekette	28
2.3.3	Das Datennahmeprogramm	28
2.3.4	Der erste Luftschauer	32
2.4	Auswertung eines ausgewählten Luftschauers	34
2.4.1	Berechnung des Zenitwinkels	34
2.4.2	Berechnung der Schauergröße	36
2.5	Ende der Datenahme	39
3	Auswertung	40
3.1	Schauergrößenspektrum	40
3.2	Zenitwinkelspektrum	41
A	Kontrollfragen	44

B	Lageplan des F-Praktikumsraums	46
C	Protokoll-Vorlagen für den Versuch Luftschauer	47

1 Einleitung

Die folgende Einleitung soll Ihnen nur eine Übersicht über das vermitteln, was Sie über Luftschauer und ihren Nachweis wissen sollten, um den Versuch erfolgreich bearbeiten zu können. Es werden die Entstehung von Luftschauern in den oberen Schichten der Atmosphäre, die Ausbildung elektromagnetischer Schauer und der Energieverlust geladener Teilchen durch Ionisation beim Durchgang durch Materie thematisiert. Sie sollten ferner mit dem Nachweis geladener Teilchen mit Hilfe von Szintillatoren, den Szintillationmechanismen und wichtiger spezifischer Daten organischer und anorganischer Szintillatoren und der Funktionsweise von Photomultipliern gut vertraut sein. Nutzen Sie hierzu auch die im Anhang angegebene Sekundärliteratur. Vor Beginn und während des Versuchs haben Sie die Möglichkeit, aufkommende Fragen zu diskutieren.

1.1 Entstehung von Luftschauern durch kosmische Strahlung

Luftschauer entstehen durch das Auftreffen primärer kosmischer Strahlung auf Atomkerne (hauptsächlich Stickstoff und Sauerstoff) in den oberen Schichten der Atmosphäre. Die Primärstrahlung besteht überwiegend aus Protonen mit einer mittleren Energie von etwa 10^{10} eV, wobei kosmische Strahlung mit Energien von bis zu einigen 10^{20} eV beobachtet worden sind. Die Häufigkeit fällt hierbei mit zunehmender Energie rasch ab. Der Verlauf der integralen Häufigkeit oberhalb einer gegebenen Energie E kann über weite Bereiche des gemessenen Spektrums mit einem steil abfallenden Potenzgesetz der Form $I(> E) = I_0 E^{-\Gamma+1}$ mit $\Gamma = 2.7 \dots 3.2$ in guter Näherung beschrieben werden (siehe auch Fig. 1).

Da der totale Wechselwirkungsquerschnitt (bei hohen Energien $\sigma_{\text{tot}} \approx \sigma_{\text{inel}} \approx 30 \text{ mbarn}$) für pp -Wechselwirkung asymptotisch nur schwach energieabhängig ist (siehe auch Fig. 2), können wir die Massenbelegung (Säulendichte) der mittleren freien Weglänge λ_i eines Protons für den für uns relevanten Energiebereich von 10^{14-16} eV durch die Atmosphäre ebenfalls als konstant annehmen. Der Wechselwirkungsquerschnitt $\sigma_{p+Luft} \approx 280 \text{ mbarn}$ ergibt dann für $\lambda = A \cdot m_p / \sigma = 83 \text{ g/cm}^2$. Üblicherweise wird die mittlere freie Weglänge in einem inhomogenen Medium mit der entsprechenden Massenbelegung (in g/cm^2) angegeben (Anmerkung: Warum ist das sinnvoll?).

Dies entspricht einer mittleren Weglänge von ungefähr 550 m auf Meereshöhe. Die Tiefe t_s der gesamten Atmosphäre beträgt ungefähr 1000 g cm^{-2} also 12 hadronische Wechselwirkungslängen. Als Resultat der quasi-elastischen und inelastischen Stöße entstehen überwiegend Nukleonen und geladene und neutrale Mesonen (hauptsächlich Pionen). Die Schwerpunktenenergie ($\sqrt{s} \approx (2m_{\text{target}} E_{\text{projectile}})^{1/2}$) dieser Reaktionen liegt bei einigen GeV, also weit unterhalb der kinematischen Energie des Schwerpunktsystems, es liegt also eine stark in Richtung des einlaufenden Protons *geboostete* Reaktion vor. Die

Energies and rates of the cosmic-ray particles

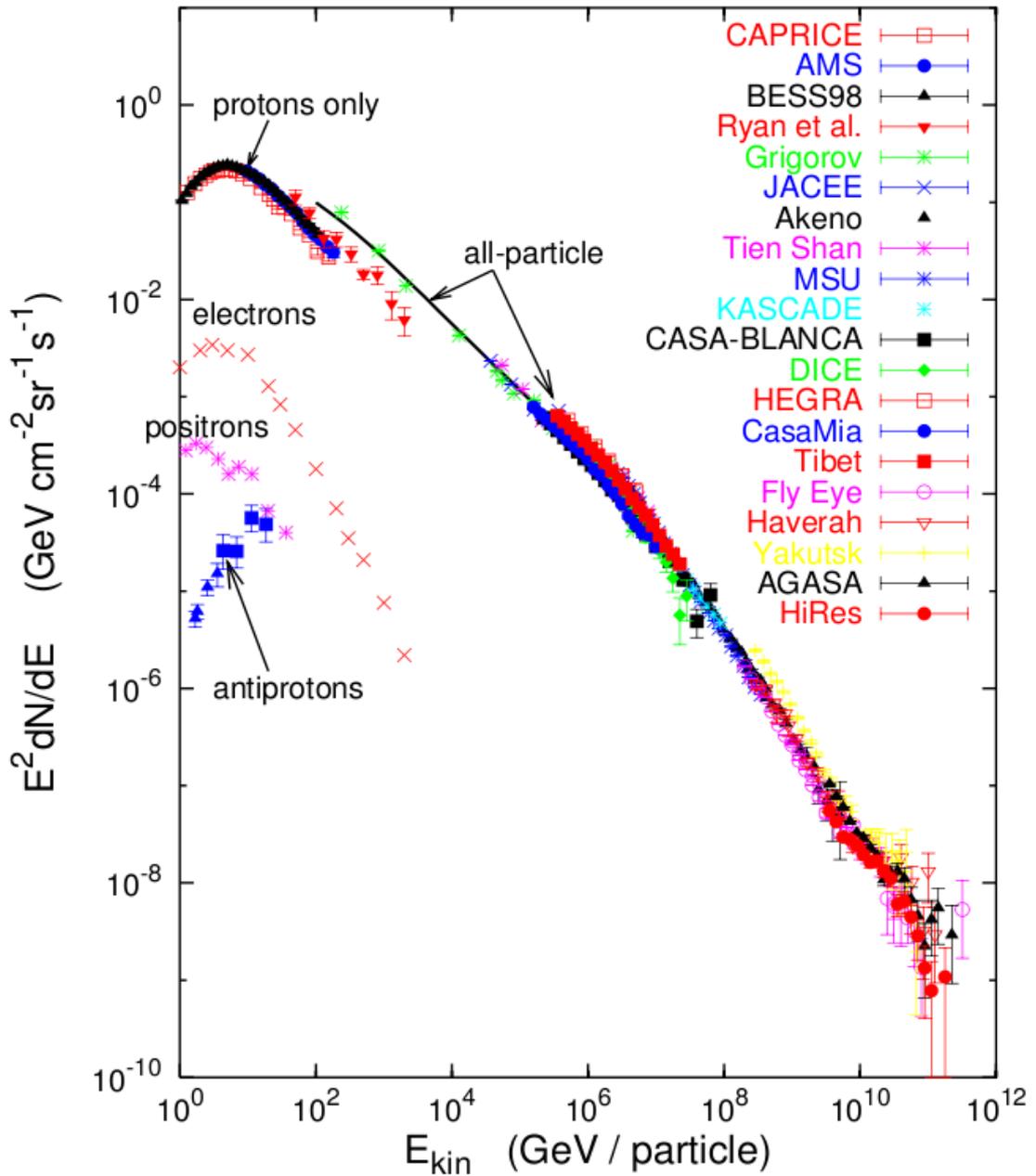


Abbildung 1: Differenzielles Energiespektrum der kosmischen Strahlung [2].

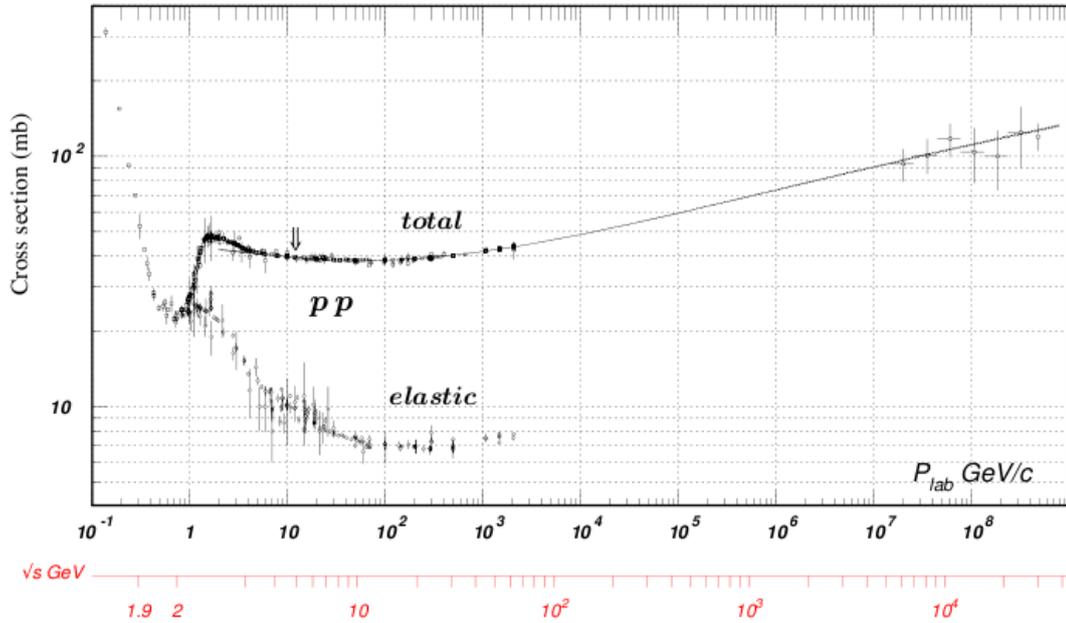


Abbildung 2: Totaler Wirkungsquerschnitt für pp-Stöße [3]

erzeugten Pionen zerfallen (mit einer Zerfallszeit von weniger als 10^{-10} s) über die in Gleichung 1 angegebenen Reaktionen in Photonen und Myonen und leiten damit einen Transfer von hadronisch getragener Energie in elektromagnetisch und myonisch getragene Energie ein.

$$\begin{aligned}
 \pi^0 &\rightarrow 2\gamma & (BR = 0.99) \\
 \pi^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu (+CC.) & (BR = 1.00)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Die Wechselwirkungen der so entstehenden Elektronen (Positronen) mit der sie umgebenden Materie erfolgt hauptsächlich durch Ionisationsverluste und Bremsstrahlung. Die Ionisationsverluste nehmen mit zunehmender Energie ab, während der Energieverlust durch Bremsstrahlung linear mit der Energie anwächst. Mit Bremsstrahlung wird hierbei der Prozess der Ablenkung des Elektrons im Coulombfeld des Kernes (und zu einem geringeren Anteil auch der Hüllenelektronen) unter Emission von Photonen bezeichnet.

Oberhalb der (materialabhängigen) kritischen Energie E_{krit} dominieren Energieverluste durch Bremsstrahlung, während die Elektronen bei geringeren Energien ihre Energie hauptsächlich durch Ionisationsverluste einbüßen. In guter Näherung ist die kritische Energie gegeben durch $E_{\text{krit}} \approx 600 \text{ MeV}/Z$ wobei Z die (mittlere) Ladungszahl des durchquerten Mediums ist (für Luft ist $\langle Z \rangle \approx 0.79 \cdot 7 (N_2) + 0.21 \cdot 8 (O_2) = 7.2$, also

$E_{\text{krit}} = 600/7.2 = 83 \text{ MeV}$). Für $E > E_{\text{krit}}$ dominiert der Bremsstrahlungsverlust, aus dem sich die charakteristische Energieverlustlänge X_0^{em} , die *Strahlungslänge*, ableiten lässt:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

$$X_0^{\text{em}} = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln(183Z^{-1/3})}$$

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} \quad (2)$$

$$X_0^{\text{em}} = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (3)$$

wobei E der Energie des einfallenden Teilchens, α der Feinstruktur Konstanten, N_A der Avogadro (Loschmidt'sche) Konstante, Z der Kernladungszahl, A der Massenzahl des durchquerten Materials und r_e dem klassischen Elektronradius entspricht. In Luft beträgt die Strahlungslänge $X_0 \approx 37 \text{ g cm}^{-2}$, ist also ungefähr halb so groß, wie die Wechselwirkungslänge des einlaufenden Protons. Die Strahlungslänge ist materialabhängig: $X_0 \propto A/Z^2 \approx 1/Z$ Anmerkung: Warum spielt Bremsstrahlung für Myonen und für Protonen praktisch keine Rolle?

Die durch die Bremsstrahlung (sowie die aus π^0 Zerfällen) erzeugten Photonen tragen wiederum über Paarproduktion im Coulombfeld der Kerne (und Hüllenelektronen) zur Erzeugung von hochenergetischen Elektron-Positronpaaren bei. Die mittlere freie Weglänge für die Paarproduktion ist $9/7X_0$, also vergleichbar zur Strahlungslänge. Die abwechselnde Paarproduktion und Bremsstrahlung treibt so eine kaskadenartige Entwicklung an. Ein einfaches, qualitatives Modell soll die Entwicklung eines Schauers verdeutlichen:

Nehmen wir zur Vereinfachung an, dass sich in der elektromagnetischen Kaskade nach einer Strahlungslänge die mittlere Teilchenzahl verdoppelt, während sich die Energie der Teilchen entsprechend halbiert. Nehmen wir weiterhin an, dass die Teilchenzahl ihr Maximum erreicht, wenn die mittlere Energie auf die kritische Energie abgesunken ist, so lässt sich zeigen, dass die mittlere Eindringtiefe (in Strahlungslängen) $t_{\text{max}} \propto \ln E$ und die Zahl der Teilchen im Schauermaximum $N(t_{\text{max}}) \propto E$ ist.

Die longitudinale Schauerentwicklung als Funktion der Eindringtiefe des Schauers in die Atmosphäre ist in Fig. 3a dargestellt. Die Abbildung bestätigt die Vorhersagen des einfachen Modells in guter Näherung. Man bezeichnet die Anzahl der Teilchen eines Schauers als Schauergröße. Aufgrund dieses einfachen Modells wird deutlich, dass eine gute Korrelation zwischen der Schauergröße und der Energie des einfallenden Teilchens der kosmischen Primärstrahlung eine kalorimetrische Energiemessung erlaubt.

Auf Meereshöhe lässt sie sich durch

$$E_{\text{prim}} = 10 \cdot N [\text{GeV}] \quad (4)$$

abschätzen. Die Bestimmung der Größe der einfallenden Luftschauer erlaubt so eine indirekte Messung der Energie des einfallenden primären Teilchens. Anmerkung: Wodurch ist diese indirekte Messung limitiert? Wie vergleicht sich diese Messung mit der Kalorimetrie an Beschleunigerexperimenten (hadronisches und elektromagnetisches Kalorimeter)?

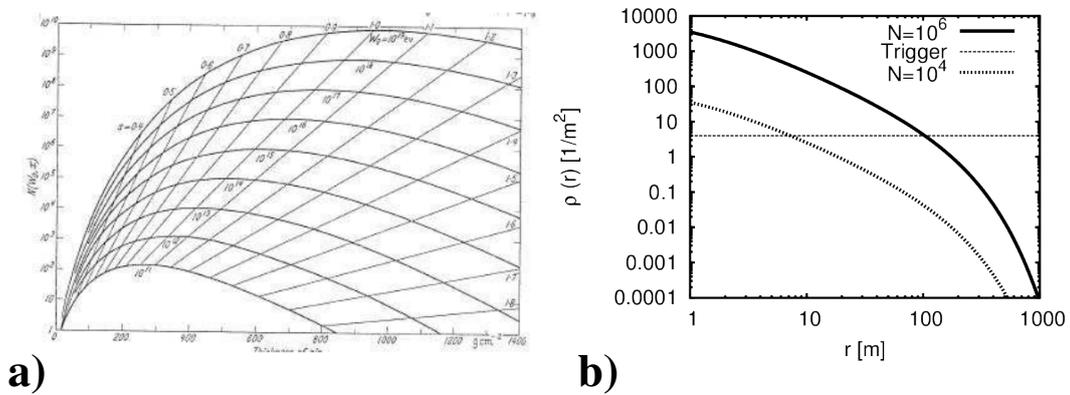


Abbildung 3: (a) Longitudinales und (b) laterales Schauerprofil.

Die laterale Verteilung des Schauers (siehe 3) entwickelt sich im Laufe der longitudinalen Schauerentwicklung. Um diese Entwicklung zu charakterisieren, eignet sich das sogenannte Schaueralter $s = 3t/(t + 2 \log(E/E_{\text{krit}}))$ ($s = 1$ entspricht dabei der Position des Schauermaximums). Mit zunehmendem Schaueralter wird die Lateralverteilung durch Vielfachstreuung aufgeweitet und dadurch "breiter". In dem von uns betrachteten Energiebereich ist sie im Mittel durch

$$\rho(r) = A \cdot N \cdot (r + 1)^{-\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{r}{120 [\text{m}]}\right) \quad (5)$$

gegeben, wobei A eine Normierungskonstante, N die Schauergröße und r der Abstand zur Schauerachse ist. Die Lateralverteilung ist in Fig. 3b dargestellt. Sie finden eine weitergehende Diskussion der Lateralverteilung in Abschnitt 2.4.2.

Für eine hadronische Wechselwirkung innerhalb des Schauers, finden etwa zwei elektromagnetische Wechselwirkungen statt, was zu einer schnellen Multiplikation elektromagnetischer Teilchen und damit deren Dominanz im Schauer führt. Die oben ausgeführten

Eigenschaften für einen Luftschauer gelten also auch für einen Luftschauer, der durch einen Kern ausgelöst worden ist.

Wie Sie Fig. 3 entnehmen können, kann es sehr wohl vorkommen, dass ein Luftschauer in der Erdatmosphäre absorbiert wird, bevor er die Erdoberfläche erreicht. Tatsächlich haben fast alle Luftschauer, die die Erdoberfläche erreichen, ihr Maximum bereits überschritten. Was den Erdboden jedoch immer erreicht und oftmals noch weit in den Erdboden eindringt ist die myonische Komponente des Schauers, die durch den Zerfall der geladenen Pionen nach Gleichung 1 entsteht und die man als unkorrelierte kosmische Höhenstrahlung bezeichnet. Beantworten Sie hierzu die folgenden Fragen:

- Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein einlaufendes Proton aus der kosmischen Primärstrahlung den Erdboden ohne Wechselwirkung in der Atmosphäre erreicht?
- Welche Arten der Wechselwirkungen elektromagnetischer Teilchen mit Materie erachten Sie in den hier diskutierten Energiebereichen als dominant?
- Warum bezeichnet man die myonische Komponente in der Atmosphäre absorbiertes Luftschauer als unkorrelierte kosmische Strahlung? Was an dieser Art der kosmischen Strahlung im Gegensatz zu einem Luftschauer ist unkorreliert?
- Warum durchdringen Myonen im Gegensatz zu ihren leptonischen Partnern, den Elektronen die Atmosphäre nahezu ungehindert. Welche physikalische Eigenschaft ist dafür verantwortlich?
- Schätzen Sie die Strahlungslänge für Myonen aus Gleichung 2 ab. Wie groß ist die Strahlungslänge für Protonen. Spielt der Energieverlust durch Bremsstrahlung für Protonen also eine Rolle?

Der kontinuierliche Fluss von Myonen aus der unkorrelierten kosmischen Höhenstrahlung beträgt

$$\phi = 160 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

Dies entspricht einer Rate von 40(130) Hz bei einer aktiven Detektorfläche von 0.25(0.81) m², wie dies für die vier inneren (äußeren) Detektoren der Fall ist. Die Energie der Myonen, die den Erdboden erreichen, beträgt im Mittel 1 GeV.

In Fig 4 finden Sie einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften eines Luftschauers und dessen experimentellen Nachweis.

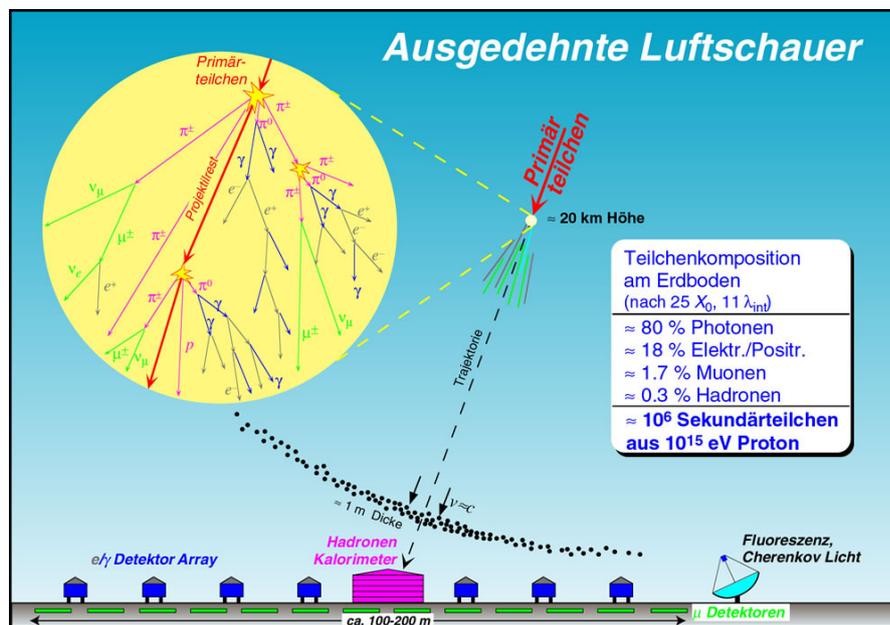


Abbildung 4: Überblick über die Entstehung und die Eigenschaften eines Luftschauers .

1.2 Nachweis von Luftschauern

Der Nachweis von Luftschauern erfolgt über möglichst großflächige Anordnungen von Detektoren, in denen der zeitlich korrelierte Durchgang der geladenen Teilchen innerhalb des Schauers nachgewiesen wird (Ankunftszeit und Teilchenzahl). Sie werden hierzu eine Anordnung bestehend aus acht Szintillationsdetektoren D_1 bis D_8 verwenden, die sich in lichtdicht abgeschlossenen Hütten befinden und mit Photomultipliern ausgelesen werden. Die vier inneren Detektoren D_1 bis D_4 befinden sich im Praktikumsgebäude. Sie werden sowohl zur Teilchenzahlmessung als auch zur Bestimmung des Winkelspektrums der einfallenden Schauer genutzt und sind zu diesem Zweck zur unabhängigen Auslese mit zwei Photomultipliern versehen. Das Nachweismaterial ist organischer Szintillator mit einer Fläche von $0.5\text{ m} \cdot 0.5\text{ m}$ und einer Dicke von 50 mm . Vier weitere Detektorhütten befinden sich außerhalb des Gebäudes. Sie werden ausschließlich für die Teilchenzahlmessung benutzt. Auch in diesem Fall besteht das Nachweismaterial aus organischem Szintillator mit einer Fläche von $0.9\text{ m} \cdot 0.9\text{ m}$ und einer Dicke von 40 mm . In beiden Fällen hat der Szintillator in guter Näherung eine Dichte von $\rho = 1\text{ g cm}^{-3}$. Die genaue Lage aller acht Detektoren in den für Ihren Versuch relevanten Koordinaten ist in Fig. 5 angegeben. Eine schematische Darstellung beider Detektortypen ist in Fig. 7 gezeigt. Wie Sie der Darstellung darin entnehmen können, ist jeder Detektor zusätzlich mit einer LED-Lichtquelle versehen, die von außen ange-

steuert werden kann, um die Funktion des Photomultipliers und später der integralen Ausleseelektronik überprüfen und kalibrieren zu können.

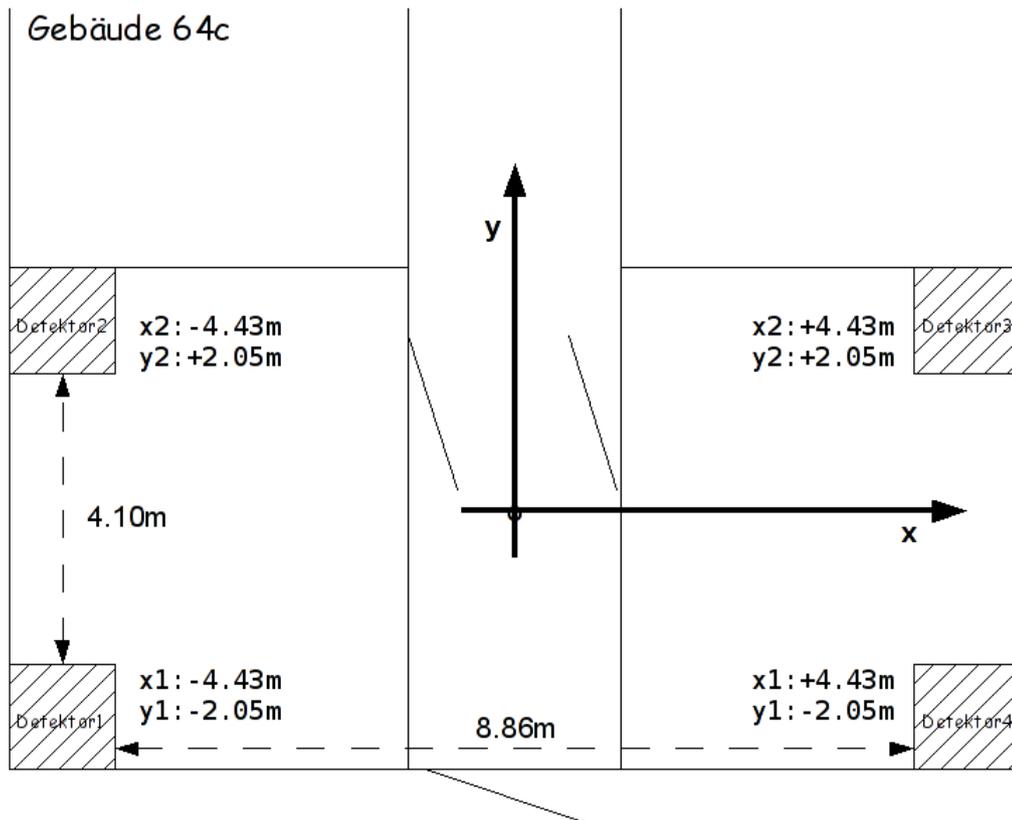


Abbildung 5: Für den Versuch gewähltes Koordinatensystem.

Der Nachweis der die Szintillatorschicht durchquerenden Teilchen erfolgt über deren Energieverlust durch Ionisation. Die pro Wegstrecke abgegebene Ionisationsenergie folgt für dünne Schichten (wenige Streuprozesse) einer Landauverteilung. Der im Versuch verwendete Szintillator entspricht einer dicken Schicht, bei der sich die resultierende Energieverlustkurve asymptotisch einer symmetrischen Gaussverteilung annähert. Die Bestimmung der Anzahl der den Detektor durchquerenden Teilchen erfolgt durch deren

mittleren Energieverlust. Dieser folgt der Bethe-Bloch Gleichung

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right], \quad (7)$$

wobei $K = 4\pi N_A r_e m_e c^2$, A der Isotopenzahl des absorbierenden Materials, m_e der Elektronenmasse, z der Ladung des einfallenden Teilchens, T der maximalen kinetischen Energie, die an ein freies Elektron durch einen elastischen Stoß übertragen werden kann, I einer materialspezifischen Konstanten und δ einer Konstanten für den Dichte-Effekt entspricht. Wie in Fig. 6 dargestellt, ist der Verlauf der Bethe-Bloch Gleichung (angegeben in $\text{MeV}/(\text{g cm}^{-2})$) als Funktion der relativistischen Teilchengeschwindigkeit $\beta\gamma = p/m$ charakteristisch und für fast alle Teilchenarten und Materialien gleich. Demzufolge erfährt jede Teilchenart einen minimalen Energieverlust von etwa $2 \text{ MeV}/(\text{g cm}^{-2})$ für $\beta\gamma = p/m \approx 3-4$. Für langsamere Teilchen zeigt sich ein rascher Anstieg der Energieverlustrate ($O(1/\beta^2)$). Für relativistische Teilchen ergibt sich ein moderater Anstieg der Energieverlustrate ($O(\log x)$) mit einem anschließenden Plateau bei etwa (10-20) % oberhalb des minimalen Energieverlustes (Fermi-Plateau). Dieser Verlauf ist unabhängig von der betrachteten Teilchenart. Man bezeichnet Teilchen mit Impulsen weit oberhalb ihrer Ruhemasse, wenn es um ihren Energieverlust durch Ionisation beim Durchgang durch Materie geht daher unabhängig von ihrer wahren Teilchenart als *Minimal Ionizing Particle* oder *MIP*. Der Energieverlust eines *MIP* entspricht in guter Näherung $2 \text{ MeV}/(\text{g cm}^{-2})$ durchquerter Materie.

Das Prinzip des *Minimal Ionizing Particle* machen Sie sich bei der Kalibration Ihrer Detektoren zu Nutze. Die Teilchen, die Sie zur Kalibration nutzen, sind dabei die Myonen aus der unkorrelierten kosmischen Höhenstrahlung, also Überreste in der Atmosphäre absorbierter Luftschauer selbst. Beantworten Sie hierzu die folgenden Fragen:

- Ist es zulässig, Ihre Detektoren mit Myonen zu kalibrieren, wenn ein Luftschauer im wesentlichen aus Elektronen, Positronen und Photonen besteht?
- Sind Myonen aus der unkorrelierten Höhenstrahlung überhaupt *MIPs*? Müssen Sie hierzu den genauen Impuls der Myonen kennen oder welche Information genügt Ihnen hierzu schon?
- Wie groß ist der Energieverlust eines *MIP* beim Durchgang durch einen der vier inneren/äußeren Detektoren? Alle hierfür relevanten Informationen können Sie aus dem vorangegangenen Abschnitt entnehmen. Wieviel Energie hinterlässt also ein *MIP* in einem inneren/äußeren Detektor, wieviel Energie zwei, drei oder n *MIPs*?
- Ein Teilchen, dessen Impuls um ein Vielfaches über seiner Ruhemasse liegt, bewegt sich in guter Näherung mit Lichtgeschwindigkeit c . Was passiert mit einem

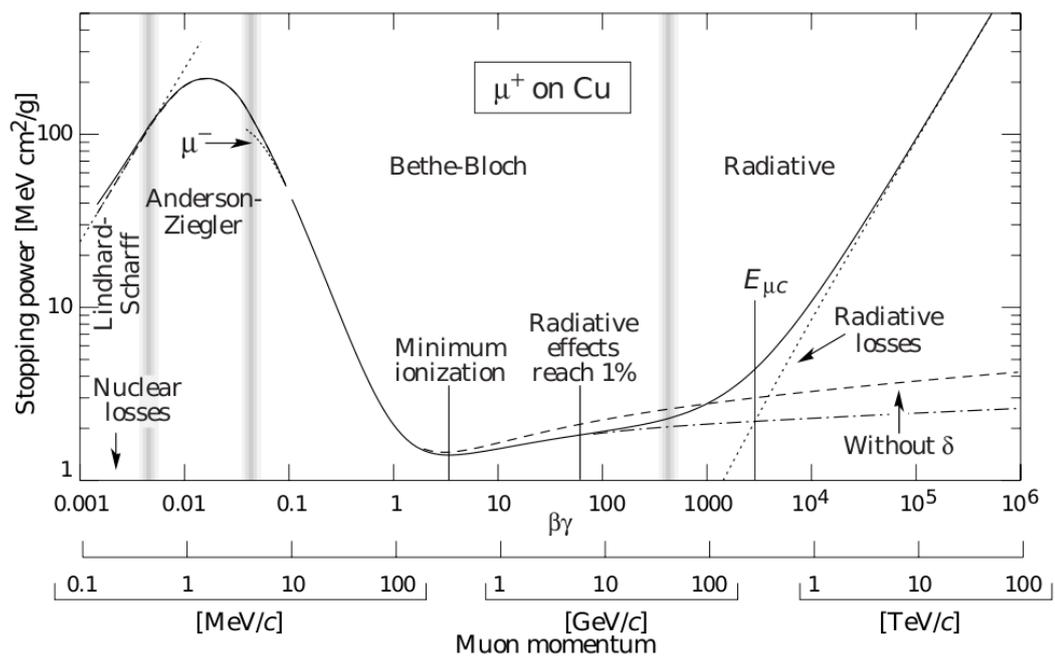


Abbildung 6: Verlauf der Bethe-Bloch Kurve zur Beschreibung des mittleren Energieverlustes geladener Teilchen durch Ionisation.

Teilchen, dessen Geschwindigkeit deutlich geringer ist als c ? Welche Schlussfolgerungen ziehen Sie daraus über die Geschwindigkeit und Breite der Schauerfront?

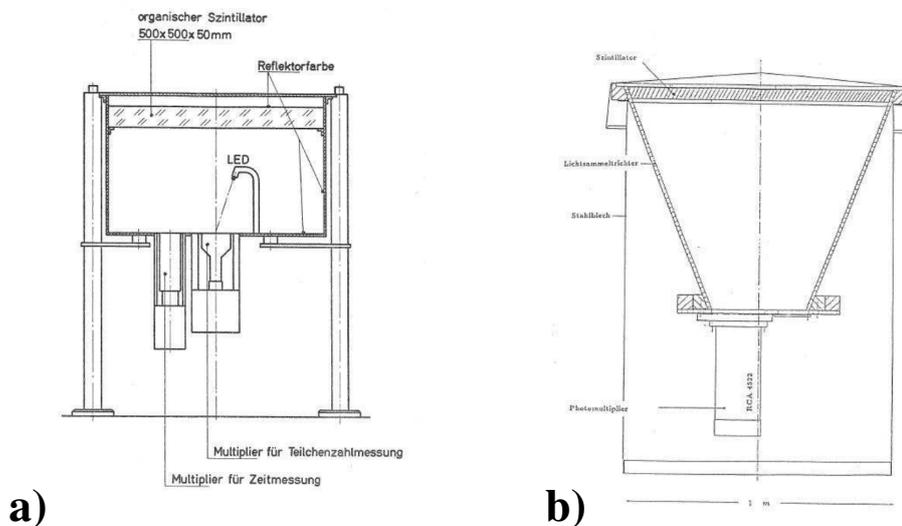


Abbildung 7: Schematische Darstellung (a) der inneren und (b) äußeren Detektoren.

2 Durchführung

Der Versuch hat zwei Ziele: die Bestimmung eines **Luftschauergrößenspektrums** und eines **Zenitwinkelspektrums**. Jeder Versuchsteil soll dabei von einer Gruppe aus zwei bis drei Studenten durchgeführt werden. Jeder Versuchsteil hängt von der ordnungsgemäßen und gewissenhaften Durchführung des jeweils anderen Teils ab. Beide Gruppen sollten daher gut zusammenarbeiten. Die Vermessung der Schauergröße erfolgt mit Hilfe einer Amplitudenmessung der Signale aus den Szintillationsdetektoren, die Zenitwinkelmessung durch die Messung der Zeitdifferenz der eintreffenden Signale. Der Ablauf des Praktikums ist wie folgt gegliedert:

- **Montag:** Verkabelung der Auslese-Elektronik und Verstehen der Ausleseketten mit Hilfe des Oszilloskops. Amplituden- und Zeitkalibration der Szintillationsdetektoren.

- **Dienstag:** Einrichten des Triggers und der Datennahmesoftware. Start der Datennahme.
- **Mittwoch:** Bestimmung der Schauergröße und des Zenitwinkels eines ausgewählten Luftschauers von Hand. (Zur Bestimmung der Schauergröße ist es dabei notwendig, ein kleines Programm zu schreiben).
- **Donnerstag:** Ende der Datennahme, Besprechung der Datenauswertung.
- **Freitag:** FP-Seminar, Klärung letzter Details.

2.1 Messinstrumente

2.1.1 Elektronische Module

Dieser Abschnitt dient als Einführung (Erinnerung) in die Funktion der unterschiedlichen elektronischen Module, die in diesem Versuch Verwendung finden.

Photomultiplier (PMT) bestehen aus einer Vakuumröhre mit einer Photokathode (bedampftes Eintrittsfenster), mehreren Dynoden und einer Anode. Ein auftreffendes Photon löst auf der Photokathode ein Elektron aus. Eine Potenzialdifferenz zwischen Kathode und erster Dynode sorgt für einen Energiegewinn des ausgelsten Photoelektrons, das beim Auftreffen auf der ersten Dynode mehrere weitere Elektronen auslöst. Durch mehrere hintereinander geschaltete Dynode entsteht so eine Verstärkung des ursprünglichen Photons um typischerweise 10^4 bis 10^7 .

Linear fan in / fan out dient der Vervielfältigung der Photomultipliersignale; besteht aus 4 Untereinheiten, die auf den Eingängen angelegte analoge Signale unverändert auf vier Ausgänge verteilt. Der linear fan in fan out dient auch als Impedanzwandler von der hochohmigen Stromquelle PMT zu einer 50 Ohm Spannungsquelle.

PM Amplifier erzeugt eine konstante Verstärkung der Photomultipliersignale. In diesem Versuch werden PM Amplifier zur Vorverstärkung vor der Diskriminator Stufe der PMTs zur Amplitudenmessung benötigt.

Diskriminator liefert eine logische Aussage zur Amplitude eines Signals relativ zu einer einstellbaren Schwelle. Wenn die Amplitude des Signals die eingestellte Schwelle überschreitet, liegt am Ausgang des Diskriminators eine logische 1 an. Sonst eine logische 0. Die logische 1 ist durch einen Rechteckpuls realisiert.

NIM und TTL Standard sind zwei unterschiedliche logische Standards. NIM: die logische 0 entspricht 0mA, bzw. 0V bei 50 Ohm. Die logische 1 entspricht -12 mA bis -32 mA, bzw. -0.6 V bis -1.6 V bei 50 Ohm. Im TTL Standard ist die logische 0 durch Spannungen 0 V bis 0.4 V, und die logische 1 durch Spannungen von 3.3 V bis 5 V gegeben.

AND OR Gate ermöglicht eine logische Analyse der Eingänge. Jeder Eingang kann einzeln aktiviert werden, und als logische 1 oder 0 verlangt werden. Ein Ausgang bietet eine logische AND-Verbindung dieser Eingänge, ein anderer Ausgang die logische OR-Verbindung.

Gate generator erzeugt Rechteckpulse einstellbarer Länge. Ein zusätzliches kurzes NIM-Signal tritt am Ende der Pulsdauer an einem weiteren Ausgang auf und kann genutzt werden, um eine weitere Einheit anzusteuern.

Main amplifier Signalverstärker, integriert schnelle analoge Signale und gibt ein verstärktes zum ursprünglichen Signal proportionales langsames Signal aus. Der Ausgang des Hauptverstärkers liefert einen bipolaren Puls.

Time to amplitude converter (TAC) misst die Zeitdifferenz zwischen einem Signal am Start-Eingang und einem Signal am Stopp-Eingang. Über das Aufladen eines Kondensators wird eine der Zeit proportionale Ladungsmenge gesammelt. Am Ausgang liegt ein zur Aufladungszeit (Zeitdifferenz start-stop) proportionaler Ausgangspuls an.

Analog digital converter (ADC) wandelt analoge Eingangssignale in Digitale Daten um. In Verbindung mit einem Computer mit entsprechender Software entsteht ein Vielkanalanalysator (MCA), der Pulsamplitudenverteilungen in Einheiten von ADC-Kanälen darstellt.

Scaler / Zähler dienen dem Zählen von Pulsen. Es werden Normsignale ab einer bestimmten Mindestlänge verarbeitet.

Kabelstecker die meisten verwendeten Kabelstecker sind LEMO-Stecker. Diese haben eine Manchette, welche bei Abziehen eines Kabels zurückgezogen werden muß, um den Einrastmechanismus zu lösen.

2.1.2 Verwendung des Oszilloskops

Das Oszilloskop stellt Ihnen zahlreiche wichtige und hilfreiche Funktionen zur Verfügung. Es ist ihr wichtigstes Hilfsmittel zum Verständnis der Auslese des Versuchs. Machen Sie sich immer klar, was Sie eigentlich wollen und wie Sie es erreichen können. Jedes Oszilloskop braucht selbst einen Trigger. Eine sinnvolle Vorgehensweise zur Suche eines Signals beginnt immer mit der Einstellung des Bereichs in dem man das Signal erwartet, gefolgt von der Einstellung des Triggers. Triggern sie auf den richtigen Kanal? Auf welche Flanke sollten Sie triggern, fallend oder steigend? Schließlich justieren Sie die Triggerschwelle (positives oder negatives Signal?). Machen Sie sich mit den Menüs *Trigger*, *Acquire* und *Measure* vertraut. Diese helfen Ihnen auch bei der Bestimmung der im vorangegangenen Abschnitt geforderten Daten.

2.2 Verkabelung der Ausleseelektronik

Die Ausleseelektronik besteht aus verschiedenen Einschüben in zwei Elektronikracks entsprechend den zwei Teilen des Versuchs. Im linken *rack* befinden sich die Einschübe zur Amplitudenmessung (Schauergröße), im rechten *rack* die Einschübe zur Zenitwinkelmessung. Zu Beginn des Versuchs wird jede Gruppe ein eigenes Messprotokoll erhalten. Die Protokolle unterscheiden sich für jede der beiden Gruppen geringfügig. Sie dienen zur Dokumentation und zum Anhalt, so dass Sie keinen der für den Versuch wichtigen Einstellungs- und Messwerte vergessen. Beide Protokolle finden Sie mit einigen Erklärungen versehen auch im Anhang dieser Anleitung. Am Ende des ersten Tages sollten Sie bis auf die jeweils letzte Spalte (Pedestal) alle Spalten ausgefüllt haben. Die Protokollzettel enthalten außerdem Schaltpläne für die zu steckende Elektronik, die Sie jederzeit zu Hilfe nehmen können.

Bevor Sie mit der Arbeit beginnen, sollten Sie sich noch einmal klar machen, was und wie Sie messen möchten. Eigenständiges Experimentieren ist eine der wichtigsten Lektionen des Fortgeschrittenen-Praktikums. Werfen Sie ruhig einen Blick auf einen der im Raum befindlichen Detektoren. Können Sie die Photomultiplier der beiden Szintillationsdetektoren erkennen? Wieviele Kabelanschlüsse hat ein Photomultiplier? Verfolgen sie den Verlauf der Kabel.

2.2.1 Einstellen der HV

Die Versorgung der im Raum befindlichen Szintillationsdetektoren mit HV erfolgt für die Amplituden- (bzw. Zeitmessung) über ein Hochspannungsgenerator (HV) im linken (bzw. rechten) *rack*. Für die Amplitudenmessung sollten Sie die HV auf etwa 2.1 kV

bis 2.2 kV einstellen. Für die Zeitmessung sollte der Generator auf etwa 2.4 kV eingestellt sein. Die Verteilung der Hochspannung auf die vier Photomultiplier und ihre Feineinstellung erfolgt jeweils über ein Potentiometer oberhalb des entsprechenden HV-Generators. Achten Sie auf die verwendeten Ein- und Ausgänge der Potentiometer bei der Nachjustierung. Für die Amplitudenmessung sind noch vier weitere Detektoren in Verwendung. Sie befinden sich in Detektorhütten außerhalb des Gebäudes. Die für die Photomultiplier benötigte Hochspannung wird dort vor Ort erzeugt, um zu vermeiden, dass Hochspannungskabel über weite Strecken verlegt werden müssen (Sicherheit). Für diese vier Detektoren können Sie Feineinstellungen der HV an vier Hochspannungsreglern in einem Einschub über dem linken Potentiometer vornehmen. Beachten Sie bitte, dass diese Hochspannungsregler sehr viel empfindlicher reagieren, als die Drehknöpfe der Potentiometer. Bei der Feineinstellung der äußeren Detektoren mit Hilfe der Hochspannungsregler ist also ein wenig Feingefühl angebracht.

Die 8(4) Signalkabel für die Amplituden- (Zeit-)messung können an den Ausgängen auf halber Höhe in linken (rechten) *rack* abgegriffen werden. Es empfiehlt sich, die Kabel mit dem ersten Einschub dem *Linear Fan In Fan Out* verbunden zu lassen. Es bietet dem eingehenden Signal einen wohldefinierten Endwiderstand (von 50Ω) und die Möglichkeit, das Signal ohne Qualitätsverlust zu teilen. Von hieraus sollte das Signal mit dem Hauptverstärker (*Main Amplifier*) verbunden werden. Bitte verändern Sie die Einstellungen der Hauptverstärker **NICHT!**

Sehen Sie sich mindestens einen der Kanäle vor und nach dem Hauptverstärker auf dem Oszilloskop an und zeichnen Sie den Signalverlauf in Ihr Protokoll. Der Signalverlauf sollte jeweils mit den folgenden Informationen versehen sein:

- Signalamplitude
- Signallänge
- Fall-/Steigzeit

(jeweils vor und nach Verstärkung des Signals mit dem Hauptverstärker). Das hilft Ihnen, falls notwendig, das Signal wieder zu finden und ist Bestandteil ihrer Auswertung. Seien Sie sich über die folgenden Fragen im Klaren bevor Sie anfangen:

- Sollten Sie überhaupt schon ein Signal erwarten? Wenn ja, wo kommt es her? Ist es ein positives oder ein negatives Signal?
- Welchen Effekt hat der Hauptverstärker auf das Signal (insbesondere auf die Signallänge)? Würden Sie also für die Zeitmessung nach Möglichkeit das Signal verstärkt oder unverstärkt weiterverwenden?

Für die Zeitmessung steht Ihnen (im rechten *rack*) nur ein Hauptverstärker zur Verfügung. Sie benötigen ihn nur zur Feinabstimmung der HV und zur Einstellung der Diskriminatorschwellen.

2.2.2 Untersuchung des Signals mit dem Programm **TEBMCA**

Im nächsten Schritt sollten Sie sich die einlaufenden Signale auf dem ADC (*Analog Digital Converter*) ansehen. Es ist der äußerst rechte Einschub auf halber Höhe im linken *rack*. Es handelt sich um ein analoges Signal, das Sie untersuchen wollen. Führen Sie es also in den untersten Eingang ein. Der ADC hat eine Signaltiefe von 10 Bit bei einer maximalen Amplitude von 10 V, d.h. er bildet ein positives analoges Signal von bis zu 10 V auf $2^{10} = 1024$ Kanäle ab. Die Auslese erfolgt über ein Buskabel, das den ADC mit Hilfe einer Steckkarte mit einem Computer verbindet und eine geeignete *software*. Schalten Sie den Computer (PC1) rechts von Ihnen ein. Eine Übersicht über die im Praktikum verwendeten Computer finden Sie in Fig. 8. Starten Sie das Betriebssystem mit

> win

und schließlich das Ausleseprogramm *TEBMCA* durch Doppelklick. (MCA steht hierbei für *Multi Channel Analyzer*.) Machen Sie sich mit dem Programm vertraut: Rechts oben erkennen Sie jeweils einen Knopf für *Start*, *Stop* und *Clear*. Oben in der Mitte erkennen Sie die Koordinatenanzeige von drei *cursor*n, von denen der gelbe und der cyanfarbene als untere und obere Integrationsgrenzen verwendet werden können. Auf der linken Seite oben erkennen Sie ein Menü, das Ihnen die Möglichkeit gibt, die Integration innerhalb der durch die *cursor* festgelegten Grenzen und eine Messung in einem fest vorgebbaren Zeitfenster ein und auszuschalten. Sehen Sie sich eines der einlaufenden Signale einmal vor und einmal nach der Verstärkung durch den Hauptverstärker direkt mit dem MCA an und beantworten Sie die folgenden Fragen:

- Welche Verteilung erwarten Sie?
- Welche Amplituden (auf dem Oszilloskop) entsprechen den kleinen Kanalzahlen und welche den großen Kanalzahlen?

Nehmen Sie für jeden der Fälle jeweils ein qualitatives Bild des Kurvenverlaufs in Ihr Protokoll auf.

2.2.3 Verstehen des Diskriminators

Die vielen Einträge bei kleinen Kanalzahlen (also niedrigen Energien) rühren von elektronischem Rauschen her, das bei jedem elektronischen Bauteil oder Detektor mehr oder

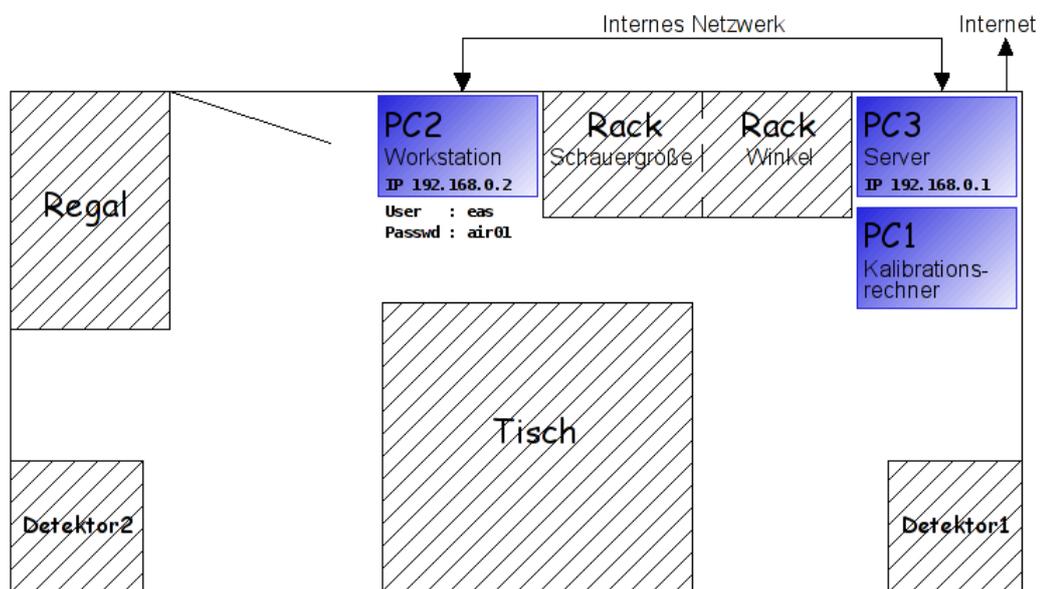


Abbildung 8: Position, Benennung und Login Daten der für das Praktikum verwendeten Computer Infrastruktur.

minder stark auftritt. Es hat einen charakteristischen Energieverlauf und fällt schnell zu hohen Energien hin ab. Um das Rauschen der vier inneren Detektoren zu unterdrücken werden *Diskriminatoren* verwendet. Es handelt sich dabei um Bauteile, die ein logisches Signal ausgeben, sobald ein anliegendes Eingangssignal eine regelbare Schwelle übersteigt. In Ihrem Fall ist diese Schwelle an einem Drehknopf regelbar. Bitte gehen Sie sorgsam mit den Drehknöpfen um und überdrehen Sie sie vor allem nicht. Sie finden die für Ihre Messung wichtigen *Diskriminatoren* in der obersten Reihe im linken *rack* für die Amplitudenmessung und in der Reihe zwischen Potentiometer und den Anodensignalausgängen im rechten *rack* für die Zeitmessung.

Es ist offensichtlich, dass das Eingangssignal, um diskriminierbar zu sein, eine für den *Diskriminator* spezifische Mindesthöhe (in Ihrem Fall von 50 mV) haben muss. Da dies für das Signal zur Zeitmessung bereits der Fall ist (prüfen Sie Ihr Protokoll!) brauchen Sie in dieser Gruppe weiter nichts zu tun. Das Signal für die Amplitudenmessung muss jedoch zu diesem Zweck noch einmal verstärkt werden. Dies erfolgt über einen PM-Zwischenverstärker, der sich ebenfalls in der obersten Reihe des linken *racks* befindet.

Schauen Sie sich nun das Diskriminatorsignal auf dem Oszilloskop an. Es handelt sich um ein logisches Standardsignal (*NIM* oder *TTL*). Notieren Sie Signalhöhe und -länge und ob es sich um ein positives oder ein negatives Signal handelt. Im weiteren Verlauf, sollten Sie das *NIM* Signal verwenden, es hindert Sie jedoch niemand daran, sich das *TTL* Signal auch einmal anzusehen. Greifen Sie in einem nächsten Schritt das Signal zweimal am *FAN/out* ab und legen Sie sowohl das Diskriminatorsignal (auf Kanal 1) als auch das (un-)verstärkte Amplitudensignal auf das Oszilloskop (auf Kanal 2). Triggern Sie dabei auf das logische Signal aus dem *Diskriminator*. Beantworten Sie dann die folgenden Fragen:

- Welche Abbildung würden Sie mit dieser Schaltung auf dem Oszilloskop erwarten?
- Welche Flanke sollten sie verwenden, spielt das hier überhaupt eine Rolle?
- Wie sähe das Bild auf dem Oszilloskop aus, wenn Sie stattdessen auf das analoge Amplitudensignal triggerten?

Versuchen Sie sich diese Fragen zuerst zu beantworten, danach probieren Sie es einfach aus. Zu guter Letzt, werfen Sie noch einmal einen etwas genaueren Blick auf den ADC. Dieser besitzt neben dem analogen Eingang, den wir bisher für die Signalamplitude verwendet haben noch einen logischen Eingang, der zur Ansteuerung des ADC dient: Liegt auf diesem Eingang ein positives Signal an, nimmt der ADC Daten auf, sonst nicht. Über diesen Eingang werden Sie den ADC nur dann ansteuern, wenn Ihr Detektorsignal die von Ihnen bestimmte Diskriminatorschwelle übersteigt. Um dem ADC diese Information zugänglich machen zu können müssen Sie sie jedoch noch etwas präparieren:

- Zum einen ist das *NIM* Signal negativ und nicht positiv.
- Zum anderen ist das Signal viel zu kurz, um dem ADC die Digitalisierung der vollen Amplitude zu ermöglichen. Hierzu sollte das 'Anschalten' des ADC über die Dauer einer vollen Amplitudenlänge erfolgen.

Um dies zu erreichen, kommen wir zum letzten Bauteil unserer Ausleseketten: Dem *Gate Generator*. Sie finden genau einen solchen Einschub ganz rechts in der obersten Reihe des linken *racks*. Wie viele andere Einschübe ist er zweigeteilt, lassen Sie den unteren Teil jedoch noch unangetastet. Beide Gruppen werden sich ohnehin einen *MCA* und so auch einen *Gate Generator* teilen müssen. Um zu sehen, wie der *Gate Generator* arbeitet, schleifen Sie das Diskriminatorsignal durch dieses Bauteil und betrachten Sie diesmal den Ausgang des *Gate Generators* und das Signal aus dem Hauptverstärker gemeinsam auf dem Oszilloskop. Beachten Sie, dass der *Gate Generator* wunschgemäß ein positives logisches Signal liefert. Sie werden daher Ihre Triggerschwelle am Oszilloskop unter Umständen neu einstellen müssen. Wenn Sie das Signal wiedergefunden haben, drehen Sie den Knopf mit der Aufschrift *gate* am *Gate Generator* langsam nach oben und sehen Sie, was auf dem Oszilloskop-Bildschirm geschieht. Öffnen Sie das Gatefenster so weit, bis das logische Ausgangssignal das analoge Amplitudensignal voll überstreicht. Mit diesem Signal werden Sie den *MCA* ansteuern. Nehmen Sie sich nun ruhig die Zeit, um die Diskriminatorschwelle vorsichtig nach oben und wieder nach unten zu regeln. Welche Veränderungen erwarten Sie auf dem Oszilloskop? Können Sie sich erklären was Sie sehen? Die gleiche Übung sollten Sie nun mit dem *MCA* durchführen. Sie werden deutlich sehen können, wie Sie durch das Erhöhen der Diskriminatorschwelle die niedrigen Signaleinträge im *MCA* Histogramm abschneiden. In Fig. 9 ist ein Blockschaltbild aller Komponenten der Ausleseelektronik gezeigt die sie zur Kalibration der Szintillationsdetektoren für die Teilchenzahlmessung benötigen. Verschaffen Sie sich am Ende dieser Übung noch Klarheit über die folgenden Fragen:

- Wozu haben Sie diesen ganzen Aufwand getrieben? Sind Sie sich noch über das Ziel Ihres Tuns im Klaren?
- Sie werden nur für die inneren Detektoren Diskriminatorschwellen bestimmen, für die äußeren Detektoren jedoch nicht. Warum ist es gerade für die Zeitmessung mit den inneren Detektoren von Bedeutung Detektorrauschen zu unterdrücken?
- Warum ist es für die Amplitudenmessung mit den vier äußeren Detektoren nicht so bedeutungsvoll, wie für die Amplitudenmessung mit den vier inneren Detektoren?

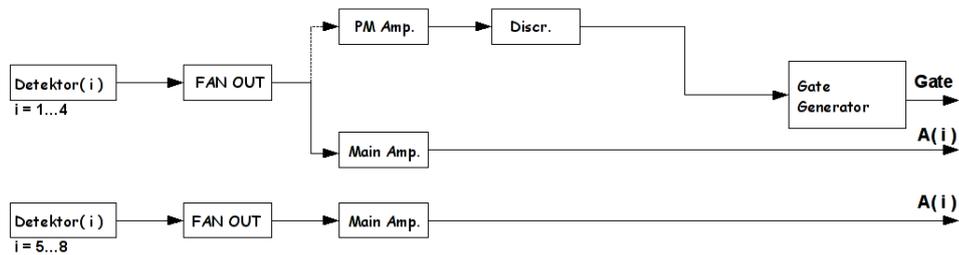


Abbildung 9: Blockschaltbild für die Kalibration der Szintillationsdetektoren für die Teilchenzahlmessung. Der obere Teil des Blockschaltbildes gilt für die Detektoren 1 bis 4 im inneren des Praktikumsgebäudes. Der untere Teil des Blockschaltbildes gilt für die Detektoren 5 bis 8 außerhalb des Praktikumsgebäudes.

2.2.4 Amplitudenkalibration und Einstellen der Diskriminatorschwellen

Sie sind nun soweit, für die Szintillationsdetektoren eine Amplitudenkalibration durchführen zu können. Für die Bestimmung des Luftschauergrößenspektrums sollten die Potentiometerschrauben und HV-Regler dabei so eingestellt sein, dass sich die Maxima der Vielkanalspektren bei Kanal 20 befinden. Dort befinden sich die Szintillationsdetektoren im linearen Bereich. Auch das Ausleseprogramm erwartet Werte in diesem Bereich. Regeln Sie erst die HV für alle acht Szintillationsdetektoren ein und bestimmen Sie dann die entsprechenden Diskriminatorschwellen für die vier inneren Detektoren. Legen Sie etwas Sorgfalt an den Tag, wenn es um das Einstellen der Diskriminatorschwellen geht. Dabei empfiehlt es sich wie folgt vorzugehen:

- Nehmen Sie einige Ereignisse ohne Diskriminatorschwelle auf (Drehschraube auf Minimum), bis Sie die Strukturen im Spektrum einigermaßen sicher erkennen können.
- Setzen Sie nun einen der *cursor* auf das Minimum zwischen dem Maximum und Rauschspektrum dort, wo Sie das Rauschen Abschneiden wollen.
- Löschen Sie den Bildschirm und drehen Sie die Diskriminatorschwelle weit nach oben.
- Wenn Sie nun die Diskriminatorschwelle wieder langsam nach unten regeln sehen Sie, wie das Signal von oben her einläuft und wann Sie den richtigen Schwellenwert erreicht haben.

Als letzten Konsistenztest und zur Feinabstimmung machen Sie noch die folgende Übung: Aktivieren Sie die Integralfunktion und legen Sie die beiden *cursor*, die den Integralrand bestimmen so, dass sie möglichst das ganze Amplitudenspektrum erfassen. Messen Sie für 40 Sekunden und bestimmen Sie die Anzahl der Ereignisse. Die physikalischen Signale, die sich in dem Spektrum wiederfinden lassen, stammen von Myonen aus der unkorrelierten kosmischen Höhenstrahlung. Diese Myonen haben einen Fluss von

$$\phi = 160 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1} \quad (8)$$

Die inneren Detektoren der Anordnung haben eine aktive Fläche von 0.25 m^2 . Wieviele Ereignisse erwarten Sie also auf eine Messdauer von 40 Sekunden? Nehmen Sie daraufhin ihre Feineinstellung der Diskriminatorschwellen vor. Welche Abweichungen von Ihrer Erwartung wollen Sie dabei noch tolerieren?

Halten Sie alle Potentiometer und HV-Reglereinstellungen in Ihrem Protokoll fest, ebenso wie die Diskriminatoreinstellungen und die Anzahl der Ereignisse, die Sie bei der Feineinstellung der *Diskriminatoren* gezählt haben. Sie werden feststellen, dass die vier äußeren Detektoren sehr viel stärker Rauschen, als die inneren Detektoren. Auch wenn es hier keine Diskriminatorschwellen einzustellen gilt, führen sie trotzdem den oben beschriebenen Test durch. Bestimmen Sie dabei nur das Integral ab dem Minimum zwischen dem Signal- und Rauschspektrum. Wenn Sie für 40 Sekunden Messzeit zwischen 5 000 und 6 000 Ereignisse erhalten, können Sie zufrieden sein. Beachten Sie, dass die aktive Fläche der vier äußeren Detektoren (mit 0.81 m^2) mehr als dreimal so groß ist, wie die Fläche der inneren Detektoren. Tragen Sie auch diese Werte in Ihr Protokoll ein.

Alle acht Detektoren besitzen zur Überprüfung ihrer Funktionalität jeweils eine eingebaute LED. Sie können alle acht LED gleichzeitig über einen Pulsgenerator ansteuern, der sich in einem Einschub ganz links in der halb unteren Reihe des linken *racks* befindet. Zu guter Letzt schalten Sie die LED ein und vermessen sie den Mittelwert des sich ergebenden Signals. Falls Sie das Signal nicht gleich im *MCA*-Histogramm sehen überprüfen Sie, ob Sie einen geeigneten Messbereich verwenden. Auf der *x*-Achse lässt sich der Messbereich auf bis zu 4096 Kanäle erweitern. Der Pulsgenerator wird mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Wenn Sie Zeit haben, können Sie an einem der Detektoren mit einer Integralmessung in einem festen Zeitfenster überprüfen, ob Sie diese Frequenz bestätigen können. Die Gruppe mit der Aufgabe, das Spektrum der einfallenden Luftschauer zu bestimmen, sollte die Amplitudenkalibration bis zum Ende des ersten Praktikumstages (Montag) abgeschlossen haben. Zu diesem Zeitpunkt sollten alle Felder Ihres Protokolls bis auf die letzte Spalte (Pedestal) ausgefüllt sein. Lassen Sie es vom Assistenten abzeichnen, damit er Ihre Messwerte nochmal auf ihre Konsistenz überprüfen kann.

Für die Zeitmessung ist die Höhe der Amplituden nicht so bedeutungsvoll. Es geht in erster Linie um die Messung der Zeitdifferenz der Signalankünfte in den einzelnen Detektoren. Sie sollten Ihre Detektoren trotzdem zumindest grob auf die gleiche Amplitude

einstellen. Nutzen Sie hierfür den einen Hauptverstärker im rechten *rack* nacheinander für jeden der vier Signalausgänge. Beachten Sie, dass Sie beim Einstellen der HV mit den Potentiometerschrauben an den Anschlag geraten können. Erfahrungsgemäß ist eine Einstellung mit den Maxima des Signalspektrums zwischen Kanal 80 und 120 günstig. Verwenden Sie Sorgfalt auf die folgende Einstellung der Diskriminatorschwellen. Gehen Sie dabei so vor, wie Ihre Kollegen bei der Amplitudenmessung und vergessen Sie nicht, alle Werte in Ihr Protokoll einzutragen und auch die Lage der LED peaks zu vermessen.

2.2.5 Zeitkalibration

Ein senkrecht einlaufender Luftschaer genügend großer Ausdehnung würde alle Szintillations-Detektoren gleichzeitig auslösen. Fällt der Luftschaer nicht senkrecht ein, erreicht die Schaerfront bestimmte Detektoren früher als andere. Die Bestimmung des Zenitwinkelspektrums der einfallenden Luftschaer erfolgt über die Messung dieser Zeitunterschiede. Sie verwenden dabei die vier in Geb. 64c befindlichen inneren Detektoren, die Sie mit jeweils vier eigenen Photomultipliern auslesen. Die Detektoren stehen auf den Eckpunkten eines gedachten Rechtecks mit etwa $4.1\text{ m} \cdot 8.86\text{ m}$ Kantenlänge¹. Sie können davon ausgehen, dass die Schaerfront nicht dicker als 1 m ist und sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Beantworten Sie hierzu die folgenden Fragen:

- In welcher Größenordnung erwarten Sie also die Laufzeitunterschiede? Warum verwenden Sie hierzu das unverstärkte Signal?
- Weshalb ist für Ihre Messung die sorgfältige Einstellung der Diskriminatorschwellen besonders wichtig?
- Sie werden für die weitere Messung nur mehr die Signalinformation der *Diskriminatoren* benötigen. Warum haben Sie zur Bestimmung der Diskriminatorschwellen überhaupt einen Verstärker verwendet?

Die Umwandlung der Zeitdifferenz zweier Signale in eine Spannungsamplitude erfolgt mit Hilfe des *TAC* (*Time to Amplitude Converter*). Im wesentlichen können Sie sich dieses Bauteil aus einem Kondensator bestehend vorstellen, der zwischen einem Start- und einem Stoppsignal mit einem möglichst konstanten Strom aufgeladen wird. An jedem *TAC* finden Sie jeweils einen Eingang für das Start- und Stoppsignal, einen Regler zur Angabe der Zeit, ab der die ansteigende Spannung automatisch wieder auf Null zurückspringen soll (meist in der Größenordnung von μs) und oft noch einen Regler, mit dem sich die maximale Amplitude einstellen lässt. Sie werden die vier *TACs* benutzen,

¹Siehe auch Fußnote weiter oben

die sich rechts neben den *Fan Outs* Ihrer Detektorsignale befinden. Diese sind bereits voreingestellt, Sie brauchen Sie nur zu verkabeln. Folgen Sie dabei dem Schaltplan in Fig. 10.

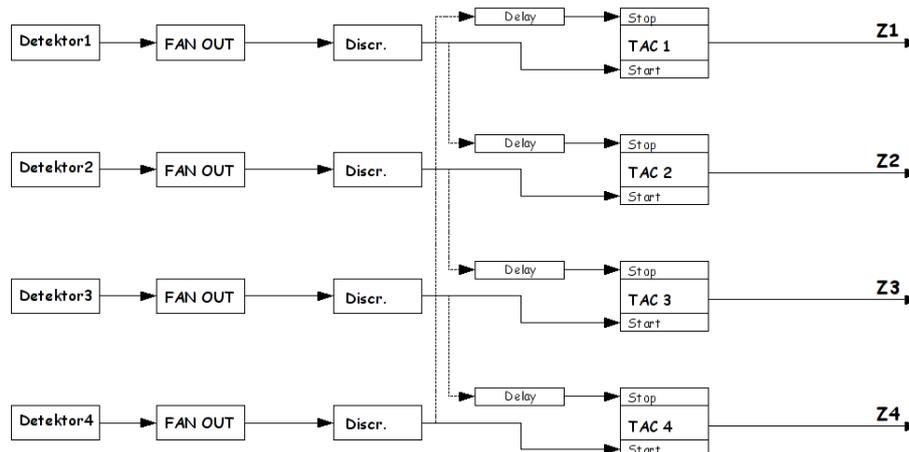


Abbildung 10: Plan für die Schaltung der *Diskriminatoren* und *TACs* für die Winkelmessung.

Wie Sie sehen, wird jedes Diskriminatorsignal zweimal abgegriffen und zyklisch vertauscht einmal als Start- und einmal als Stoppsignal für einen der vier *TACs* verwendet. Dabei sollten Sie jeweils die zwei untersten (schnellen) Ausgänge der *Diskriminatoren* verwenden. Für den ordnungsgemäßen Betrieb eines *TACs* ist es wichtig sicherzustellen, dass das Startsignal immer *vor* dem Stoppsignal eintrifft. In ihrer Schaltung stellen Sie dies durch ein Kabel *delay* sicher: Verbinden Sie den *TAC* Start jeweils mit einem BNC Kabel von 1 m Länge (braune Stecker) und den *TAC* Stop mit einem Kabel von 10 m Länge (grüne Stecker). Die Signallaufzeit durch diese Kabel beträgt 5 ns/m. Insgesamt erhalten Sie so also ein sehr genaues *delay* von 45 ns. In welcher Reihenfolge Sie die Detektorsignale in die *TACs* einführen ist für die Messung der Zeitdifferenzen grundsätzlich nicht wichtig. Es hat nur Einfluss auf die Zeitdifferenz der Signale relativ zueinander. Halten Sie sich aber trotzdem genau an den vorgegebenen Schaltplan, denn dem Ausleseprogramm liegt genau diese Schaltung bei der Auswertung der aufgenommenen Luftschauer zugrunde. Beantworten Sie dabei die folgenden Fragen:

- Wieviele verschiedene Zeitdifferenzen könnten Sie mit vier Detektoren maximal messen?

- Wieviele gültige Zeitmessungen benötigen Sie zur Bestimmung der Schauerebene?

Sie müssen nun die vom *TAC* ausgegebene Signalhöhe auf eine Zeitdifferenz kalibrieren. Sie tun dies mit Hilfe der in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen LED, mit denen Sie insbesondere auf die vier inneren Detektoren ein wohldefiniertes gleichzeitiges Signal geben können. Verbinden Sie die LED mit dem Pulsgenerator und geben Sie das Ausgangssignal des ersten *TAC* direkt auf den Eingang des *ADC*. Welches Signal erwarten Sie? Beachten Sie, dass Gleichzeitigkeit im Sinne Ihrer Messelektronik keineswegs bedeuten muss, dass zwei Signale die Elektronik zur gleichen Zeit erreichen. Im Falle des *TAC* wäre das sogar schädlich. Vielmehr bedeutet Gleichzeitigkeit eine wohldefinierte Zeitkorrelation. Zur Zeitkalibration benötigen Sie Zeitdifferenzen. Diese erzeugen Sie mit Hilfe eines weiteren BNC Kabels, diesmal von 4 m Länge (rote Stecker) das Sie zur Kalibration jedes *TAC* abwechselnd einmal am Start- und einmal am Stopeingang zwischenschalten können. Ein Blockschaltbild für die Kalibration der Winkelmessung finden Sie in Fig. 11. Welches *delay* erreichen Sie damit? Wie vergleicht sich das mit der Größenordnung der minimalen Laufzeitdifferenz, die Sie zuvor für einen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Luftschauer abgeschätzt haben? Versuchen Sie zu erraten, in welcher Konfiguration der Kabel sich der *TAC* peak nach rechts oder nach links verschiebt? Bestimmen Sie die Lage der drei *TAC* peaks in jeder Konfiguration der verwendeten *delay* Kabel und das FWHM am zentralen peak. Die peaks haben in guter Näherung Gauß'sche Form. Das *full width half maximum* (FWHM) ist daher mit der Standardabweichung σ über die Gleichung

$$\text{FWHM} = 2.3 \cdot \sigma$$

verknüpft. Bestimmen Sie eine Kalibrationsgerade aus den drei gemessenen peaks und die Zeitauflösung Ihres Detektors aus der Breite des mittleren peaks. Wie ermitteln Sie die Unsicherheit der von Ihnen bestimmten Erwartungswerte der peaks? Welche Unsicherheit gibt die Standardabweichung σ an? Die Gruppe mit der Aufgabe das Zenitwinkelspektrum der einfallenden Schauer zu bestimmen sollte die Zeitkalibration bis zum Ende des ersten Praktikumstages (Montag) abgeschlossen haben. Zu diesem Zeitpunkt sollten alle Felder Ihres Protokolls bis auf die letzte Spalte (Pedestal) ausgefüllt sein. Lassen Sie das Protokoll vom Assistenten abzeichnen, damit er Ihre Messwerte noch einmal auf ihre Konsistenz überprüfen kann. Bitte vergessen Sie nicht, die LED wieder vom Pulsgenerator zu trennen, bevor Sie nach Hause gehen. Sie sollten sich zu Hause nochmal die Zeit nehmen, eine saubere Ausgleichsgerade mit den gewonnenen Daten zu bestimmen aus der Sie die Kalibrationsfaktoren mit einer entsprechenden Unsicherheit ablesen können.

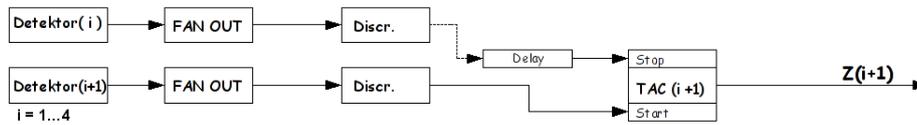


Abbildung 11: Blockschaltbild für die Kalibration der Szintillationsdetektoren für die Winkelmessung.

2.3 Beginn der Datennahme

Mit der von Ihnen in Betrieb genommenen Detektoranordnung sollten Sie in etwa alle zwei bis drei Minuten einen Luftschauer registrieren. Die Auslese und Verwaltung erfolgt über eine eigens gefertigte Auslesekarte im obersten Einschub des rechten *racks*, das durch ein Buskabel mit dem Computer zur Linken des *racks* verbunden ist. Der Beginn der Datennahme ist für den zweiten Praktikumstag (Dienstag) vorgesehen. Beide Gruppen sollten den Tag damit beginnen für sich und die Kollegen aus der anderen Gruppe zu rekapitulieren, was Sie am Vortag gemacht haben. Unterschätzen Sie nicht die Schwierigkeit jemand anderem zu erklären, was Sie glauben verstanden zu haben. Machen Sie sich dann daran, die letzten Teile der Auslesekette zu verbinden.

2.3.1 Schalten des Triggers

Die Szintillationsdetektoren werden nicht ständig ausgelesen. Stattdessen werden Sie auch hier einen Trigger verwenden, mit dem Ziel, alle wichtigen Luftschauerereignisse aufzunehmen, uninteressante Ereignisse jedoch von der Datennahme auszuschließen. Beispiele für uninteressante 'Ereignisse' sind bloßes Detektorrauschen oder Myonen aus unkorrelierter kosmischer Höhenstrahlung. Eine einfache und geeignete Triggerbedingung besteht aus der Koinzidenz eines Signals oberhalb der zuvor bestimmten Diskriminatorschwellen (≥ 1 MIP) in allen vier inneren Detektoren. Das Bauteil, das Sie hierzu benötigen, ist eine Vierfach-Koinzidenzschaltung. Sie finden sie in der obersten Reihe im linken *rack*, gleich neben dem *Linear Gate Generator*. Tatsächlich handelt es sich um eine Achtfach-Koinzidenz, von der Sie jedoch nur vier Eingänge nutzen werden. Verbinden Sie sie mit den Ausgängen der *Diskriminatoren* aus der Amplitudenmessung (linkes *rack*). Der Ausgang der Koinzidenz ist bereits mit dem unteren Teil des *Linear Gate Generators* und mit einer separaten Zählleinheit (Scaler) verbunden. Prüfen Sie, ob die Koinzidenz tut, was Sie von ihr erwarten, indem Sie die LED Leuchten nocheinmal kurz mit dem Pulsgenerator verbinden. Die so aufgesetzte Triggerschaltung kann immer noch durch eine zufällige Koinzidenz von vier Myonen aus der unkorrelier-

ten Höhenstrahlung ausgelöst werden. Versuchen Sie, aus der Einzelrate der Myonen die Rate für solche zufälligen Koinzidenzen abzuschätzen. Dazu müssen Sie sich erst darüber klar werden, was Koinzidenz für Ihren Detektor bedeutet. Innerhalb welches Zeitfensters gelten vier Ereignisse als gleichzeitig? Vergleichen Sie diese Abschätzung später mit der Gesamtzahl aller in dieser Praktikumswoche aufgenommenen Luftschauer Ereignisse. Sie werden feststellen, dass sich mit dieser einfachen Triggerbedingung schon eine nahezu untergrundfreie Stichprobe von Luftschauerereignissen aufnehmen lässt.

2.3.2 Schalten der Auslekette

Als letzten Schritt vor der Datennahme überprüfen Sie nocheinmal am Oszilloskop, ob die Größe des durch den *Linear Gate Generator* erzeugten Signalfensters ausreichend ist, um das analoge Signal bei der Auslese voll erfassen zu können. Verbinden Sie hierzu die LED noch einmal kurz mit dem Pulsgenerator. Ist sie zu Ihrer Zufriedenheit, notieren Sie sich die Breite des Gate-Fensters und verbinden Sie die verstärkten Amplitudensignale und die *TAC*-Ausgangssignale mit den Auslekarten in der oberen rechten Reihe. Ein Plan, wie die Verkabelung vorzunehmen ist, findet sich direkt daneben. Halten Sie sich unbedingt daran! Auf der linken Seite des Ausleseeinschubs finden Sie zwei weitere Steckverbindungen mit den Bezeichnungen 'in' und 'out'. Verbinden Sie den mit 'out' bezeichneten Ausgang mit den LED Leuchten und den mit 'in' bezeichneten Eingang mit dem Ausgang des *Linear Gate Generators*. Bitte stellen Sie sicher, dass die LED-Leuchten nicht mehr mit dem Pulsgenerator verbunden sind bevor Sie den Trigger mit der Auslekette verbinden. Starten Sie nun den Computer zur Linken des *racks*. Ein komplettes Schaltbild der Auslese-Elektronik und des Triggers für die Amplitudenmessung finden Sie in Fig. 12. Die Schaltung der Winkelmessung können Sie Fig. 13 entnehmen.

2.3.3 Das Datennahmeprogramm

Die Datennahme des Luftschauerversuchs erfolgt über den *Server-PC* (PC3 in Fig. 8) der ausschließlich durch den *Workstation-PC* (PC2 in Fig. 8) angesprochen wird. Starten Sie den *Workstation-PC* links von den *racks*, falls er nicht bereits läuft. Verwenden Sie dabei die folgenden Login-Daten:

```
user :eas
password :air01
```

Der PC läuft mit dem Betriebssystem *Ubuntu 7.10*. Die Steuerung der Datennahmesoftware erfolgt ausschließlich über PHP-Skripte per Webbrowser. Starten Sie also einen

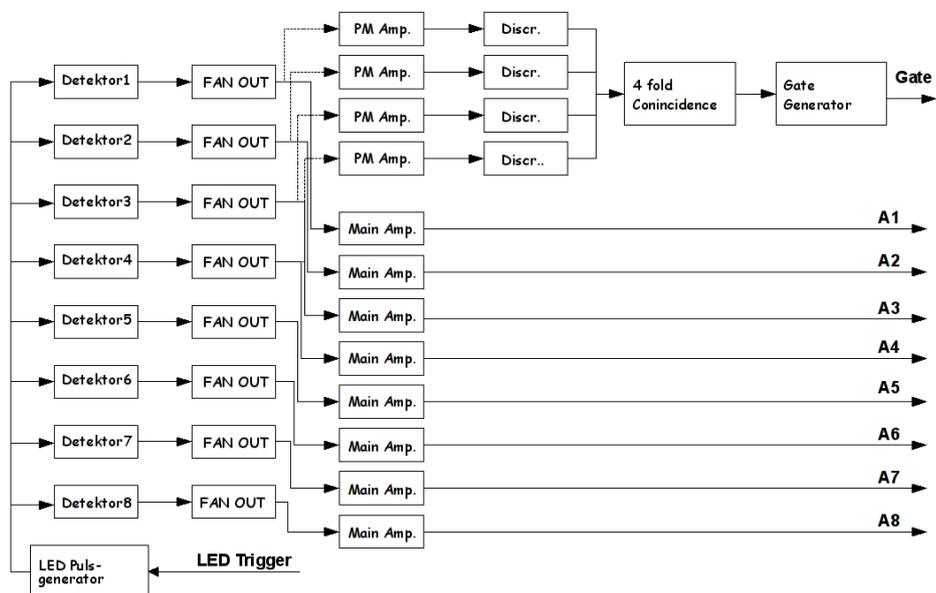


Abbildung 12: Komplettes Blockschaltbild der Auslese-Elektronik und des Triggers für die Amplitudenmessung.

Webbrowser, falls dies nicht bereits der Fall ist und geben Sie die IP-Adresse des *Server-PCs* (192.168.0.1) ein, um auf die Oberfläche des Datennahmeprogramms zu gelangen. Um Fehleingaben zu verhindern, verwenden die Eingabeformulare zum Teil *JavaScript*. Verändern Sie daher die Browsereinstellungen nicht und deaktivieren Sie insbesondere die Ausführung von *JavaScript* nicht. Auf der Arbeitsfläche des Datennahmeprogramms finden Sie folgende Programme zur Aufnahme der Daten und zur späteren Kontrolle und Analyse:

- **Testmessung:** Sie können diese Funktion nutzen, um Testschauer auszulösen ohne die Daten zu speichern oder auszuwerten. Sie können dieses Programm zum Test der integralen Schaltung vor Beginn der Datennahme nutzen. Warten Sie nach aktivieren der Funktion einen Augenblick, bis die grüne LED-Leuchte an der Auslesekarte aktiv ist. Auch die Pedestalwerte der Auslesekarten lassen sich mit dieser Funktion leicht bestimmen, indem Sie sukzessive die Kabel für die einzelnen Kanäle abstöpseln und einige Testschauer auslösen. Die Funktion *Testmessung* steht Ihnen nur zur Verfügung, solange keine Hauptmessung aktiv ist.
- **Hauptmessung:** Mit dieser Funktion starten und stoppen Sie die Datennahme. Bevor die Datennahme beginnt werden Sie durch das Programm aufgefordert, Ihre Kalibrationsdaten einzugeben. Zuerst die Pedestalwerte der 8 Amplituden- und der 4 Zeit-Kanäle (in Kanälen), dann die Position des Teilchen-Peaks (in mV), die Amplituden der TACs für einen *delay* von 45 ns und die Steigung der Kalibrationsgeraden der TACs (in mV/ns). Um einzelne Detektoren von der Messung auszuschließen geben Sie den Pedestalwert -1 für den entsprechenden Detektor ein. Sie sollten dies für die (derzeit nicht angeschlossenen) Detektoren 5 bis 8 tun. Geben Sie schließlich noch einen Projektnamen ein, unter dem Sie Ihre Daten später wiederfinden können. Nach Eingabe aller Daten wird die Datennahme gestartet.
- **Status:** Mit dieser Funktion können Sie jederzeit während der Datennahme die Primärdaten und die rekonstruierten Sekundärdaten des letzten ausgewerteten Luftschauers überprüfen und weitere Testschauer auslösen. Als Sekundärdaten werden die Winkel, die Schauergöße, der während der Auswertung minimierte Qualitätsparameter σ^2 und die Koordinaten des rekonstruierten Schauerzentrums angezeigt. In einer Graphik wird für das bei der Rekonstruktion verwendete Gitter von $101 \cdot 101$ Punkten im Abstand von 1 m der Wert des zu minimierenden Qualitätsparameters (σ^2) farbkodiert dargestellt. Die Umrisse des Praktikumsgebäudes sind in der Graphik angedeutet, die Lage der verwendeten Detektoren sind durch schwarze Sternchen und das rekonstruierte Zentrum des Schauers durch ein rotes Sternchen markiert. Weiterhin können Sie die folgenden Angaben finden: die aktuelle Statistik, die Sie für die Auswertung verwenden können,

die Anzahl der getriggerten Ereignisse, die Anzahl der aussortierten Ereignisse, die Anzahl der ausgelösten Testschauer. Sie finden außerdem ein Textfeld in das Sie Notizen eingeben können, die mit der Dateiendung *.log* im Arbeitsverzeichnis abgespeichert werden.

- **Eff. Flächen:** Mit dieser Funktion können Sie die effektive Fläche der Detektoranordnung als Funktion der Schauergröße anzeigen lassen. Die Werte werden dargestellt und in die Datei *effarea.txt* abgespeichert. Sie können sie auf dem zugehörigen *HP-Laserjet* Drucker ausdrucken lassen.
- **Archiv:** Mit dieser Funktion können Sie die bisher abgespeicherten Projekte unter ihren Projektnamen auflisten lassen. Klicken Sie eines der Projekte an, um die *Buttons* nutzen zu können. Mit dem *Button Anzeigen* werden die vier Dateien, die zu dem Projekt gehören geladen. Es handelt sich dabei um die rohen Primärdaten (mit der Endung *.pri*), die rekonstruierten Sekundärdaten (mit der Endung *.sec*), die Statistikdatei (mit der Endung *.dat*) und die Logdatei (mit der Endung *.log*). Mit dem *Button Bearbeiten* können Sie die Primärdaten bearbeiten um zum Beispiel fehlerhafte Kalibrationsdaten zu korrigieren und die Sekundärdaten daraufhin unter Verwendung des *Buttons Neu berechnen* neu zu berechnen. Beachten Sie, dass Ihre alten Daten (in der entsprechenden *.sec* und *.dat* Datei) überschrieben werden. Weiterhin können sie die Histogramme aus der *.dat* Datei unter Verwendung des *Buttons Statistik drucken* auf dem zugehörigen *HP-Laserjet* Drucker ausdrucken lassen.

Alle Funktionen lassen sich per Mausklick starten. Starten Sie zunächst das Programm *Testmessung*. Warten Sie einen Augenblick, bis die Verbindung mit der Auslesekarte hergestellt ist. Drücken Sie dann das Feld 'Testschauer', wodurch ein Ausgabesignal an die Auslesekarte geleitet wird, das es Ihnen ermöglicht die LED-Leuchten in den Szintillationsdetektoren per Mausklick anzusteuern. Durch jeden Knopfdruck sollte auf diese Weise ein gleichzeitiges Signal der LED-Leuchten ausgelöst werden, welches die Triggerschaltung passieren und den Auslesevorgang auslösen sollte. Vergleichen Sie die angezeigten Werte der Primärdaten (in ADC counts) mit den Werten aus Ihrem Protokoll. Beachten Sie dabei, daß die Tiefe der Auslesekarte 12 Bit beträgt und nicht 10 Bit, wie dies bei dem ADC den Sie zur Kalibration benutzt haben der Fall war. Sie müssen die Werte aus Ihrem Protokoll zum Vergleich also mit 4 multiplizieren. Überprüfen Sie, ob alle Werte vergleichbar sind. Welche Toleranz erlauben Sie? Machen Sie sich anschließend daran, die letzte Spalte in Ihrem Protokoll auszufüllen.

Jeder *ACD* besitzt ein Pedestal. Das Pedestal (engl. *Sockel*) entspricht der willkürlich festgelegten Nulllinie des ADC. Bestimmen sie für jeden Ihrer Messwerte den Pedestal des entsprechenden *ADC*, indem Sie das Kabel an der Auslesekarte abziehen und einige Testschauer auslösen. Tragen Sie die so gewonnenen Werte zur Vervollständigung in

Ihr Protokoll ein. Wenn Sie dabei jedes Kabel einzeln ziehen, können sie die Richtigkeit Ihrer Verkabelung ein letztes mal überprüfen und vermeiden Fehler bei der Neuverkabelung.

Führen Sie dann die Funktion *Hauptmessung* durch. Bevor Sie loslegen können, müssen Sie dem Programm die von Ihnen ermittelten Kalibrationsdaten und Pedestalwerte, wie oben beschrieben mitteilen. Lesen Sie sie aus Ihrem Protokoll ab. Achten Sie darauf, dass Sie die Werte, wenn erforderlich, richtig umrechnen (z.B. in mV pro Kanal). Um grobe Fehler zu vermeiden, wird das Programm Werte, die gänzlich wider jede Erwartung sind zurückweisen. Gerade bei diesem letzten Schritt werden jedoch sehr oft Fehler gemacht.

2.3.4 Der erste Luftschauer

Das Datennahmeprogramm liest die an die Auslesekarten übergebenen Werte als Primärdaten (*.pri) aus und verarbeitet sie weiter. Die Auslese erfolgt über ‘sample and hold’ Schleifen, die auf ein Triggersignal hin gefüllt und anschließend zyklisch ausgelesen werden. Während des Auslesezyklus sind die ‘sample and hold’ Schleifen für die Aufnahme weiterer Daten blockiert, um die konsistente Auslese jedes Einzelereignisses gewährleisten zu können. Man bezeichnet diese Zeit als Totzeit. Nach Abschluß des Auslesezyklus werden sie für die Aufnahme weiterer Daten wieder freigegeben. Die Dauer eines Auslesezyklus beträgt etwa 20 ms. Bei einer Triggerrate von wenigen Ereignissen pro Minute spielt die Totzeit des Detektors in Ihrem Fall also keine Rolle. Eine schematische Darstellung des Auslesezyklus ist in Abbildung 13 dargestellt.

Die Primärdaten bestehen aus acht Amplituden und vier Zeitdifferenzmessungen. Sobald der erste Luftschauer registriert wird, finden Sie diese über dem Anzeigefeld. Daraus berechnet das Programm Eigenschaften des Luftschauers wie:

- Polarwinkel ϕ .
- Azimutwinkel θ .
- Lage des Schauerzentrums (in (x, y)) im vorgegebenen Koordinatensystem.
- Größe des Schauers (logarithmisch).

Diese Daten werden als Sekundärdaten (*.sek) im ASCII Format gespeichert und nach Beendigung der Datennahme von Ihnen analysiert. Um die Sekundärdaten zu berechnen, bestimmt das Programm intern auf einem Gitter von $101 \cdot 101$ Punkten im Abstand von 1m die Kompatibilität der gemessenen Primärdaten mit dem lateralen Schauerprofil eines Luftschauers als Funktion der freien Größe ($\log(N)$) und der Lage der Schauerachse in der Messebene ((x, y)). Die Sekundärdaten werden für den wahrscheinlichsten

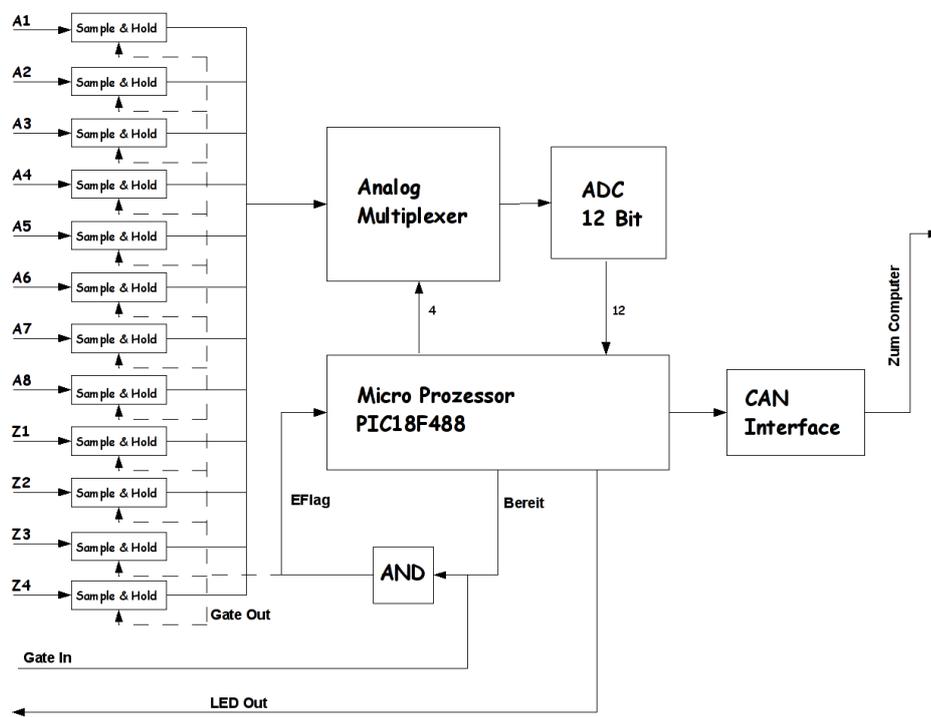


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Auslese mit Hilfe der Auslesekarten.

Wert des Tripels $(x, y, \log(N))$ bestimmt. Der zusätzlich angegebene Parameter σ dient dabei als Maß für die Güte der Anpassung. War sie erfolgreich, nimmt er Werte $O(1)$ an. Sie werden feststellen, dass dies nicht so selten der Fall ist, was für die Richtigkeit der angenommenen Hypothese spricht. Sie können allerdings auch mit Werten zwischen 1 und 3 schon zufrieden sein. Auf dem Anzeigefeld ist die Detektorebene dargestellt. Sie können die vier (acht) Detektoren als schwarze Sternchen darin erkennen. Farbko-diert erkennen Sie die Kompatibilität des Schauerprofils als Funktion von (x, y) , wobei grün gute und rot schlechte Kompatibilität bedeuten. Das laterale Schauerprofil fällt als Funktion des Abstandes vom Schauerzentrum steil ab. Die Anzahl der messbaren Teilchen, in jedem der Detektoren hängt daher sehr stark vom Zentrum und der Größe des Schauers ab. Versuchen Sie sich an einigen Beispielen anhand der Darstellung im Anzeigefeld und der angegebenen Primärdaten klar zu machen, wie der Algorithmus zu dem entsprechenden Ergebnis gekommen ist und ob es Ihnen plausibel erscheint. Für einen ausgewählten Luftschauer werden Sie die Berechnung der Sekundärdaten exemplarisch selbst durchführen, um zu verstehen, wie das Programm arbeitet. Bitten Sie den Assistenten darum, Ihnen einen geeigneten Schauer auszuwählen. Die Berechnung der Sekundärdaten des ausgewählten Luftschauers sollten Sie zu Hause durchführen. Die Aufnahme der Daten nimmt Ihnen im folgenden der Computer ab.

2.4 Auswertung eines ausgewählten Luftschauers

Um zu verstehen, wie die Bestimmung der Größe und des Einfallswinkels eines Luftschauers im Einzelnen vonstatten geht, sollen Sie diese Größen für einen ausgewählten Luftschauer von Hand ausrechnen. Für die Gruppe zur Bestimmung des Schauergrößenspektrums ist es dazu notwendig, ein kleines Minimierungs-Programm zu schreiben. Wie oder in welcher Sprache Sie das tun, bleibt Ihnen überlassen. Das mathematische Rüstzeug dazu wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

2.4.1 Berechnung des Zenitwinkels

Zur Berechnung des Zenit- und des Azimutwinkels eines Schauers führen Sie ein Koordinatensystem so ein, dass die vier inneren Detektoren D_1 bis D_4 in der Ebene $z = 0$ liegen und in einem Rechteck angeordnet sind, dessen Kanten parallel zu den beiden Achsen der Koordinaten x und y liegen (siehe Abbildung 5). Die Detektoren D_1 und D_2 haben den Abstand a , die Detektoren D_2 und D_3 den Abstand b . Die Front eines herannahenden Schauers wird durch eine Ebene angenähert, die sich mit Lichtgeschwindigkeit c fortbewegt. Sie kann analytisch durch die *Hesse'sche Normalform* beschrieben werden. Zum Zeitpunkt t_i , wenn die Schauerfront auf den Detektor D_i trifft, gilt für alle

Punkte der Ebene (siehe auch Fig. 14)

$$lx_i + my_i + nz_i - d_i = 0 \quad (9)$$

Dabei entsprechen l , m und n den jeweiligen Richtungscosinussen der Schauerrachse mit den Koordinatenachsen und d_i dem Abstand der Schauerebene vom Koordinatenursprung. Zum Zeitpunkt t_k hat die Schauerebene den Detektor D_k erreicht, und es gilt eine entsprechende Gleichung:

$$lx_k + my_k + nz_k - d_k = 0 \quad (10)$$

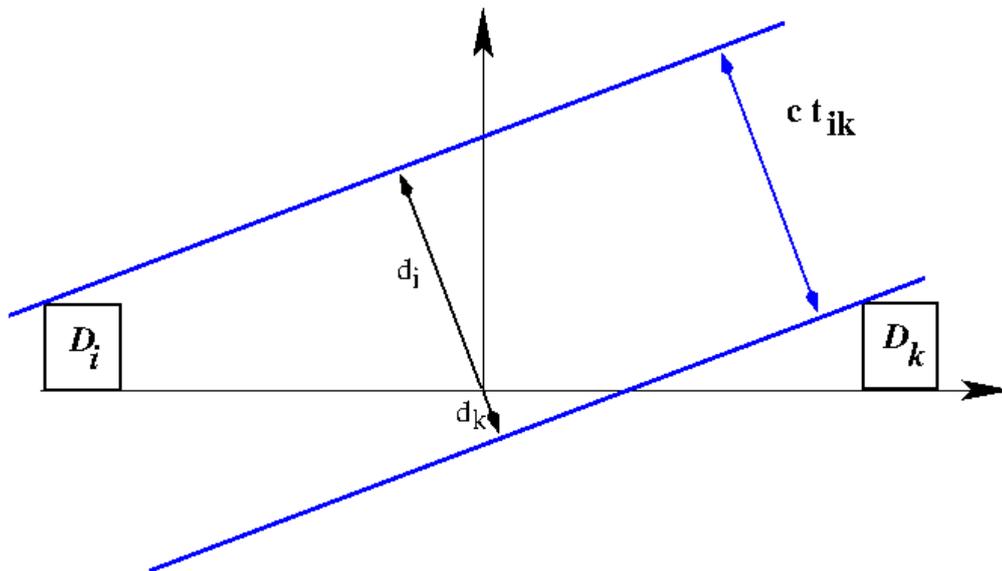


Abbildung 14: Darstellung der Schauerebene zu zwei Zeitpunkten (beim Auftreffen auf Detektor D_i und D_k).

In der Zeitdifferenz t_{ik} hat der Schauer die Wegstrecke

$$d_i - d_k = ct_{ik} \quad (11)$$

zurückgelegt. Zieht man Gleichung 10 von Gleichung 9 ab erhält man unter Verwendung von 11

$$l(x_i - x_k) + m(y_i - y_k) = ct_{ik} + \sigma_{ik} \quad (12)$$

Da in Ihrem Experiment die vier Zeitdifferenzen t_{14} , t_{21} , t_{32} und t_{43} gemessen werden, können vier Gleichungen des Typs 12 aufgestellt werden. Sie stellen ein überbestimmtes

Gleichungssystem für die Unbekannten l und m dar, dass allerdings nur dann exakt lösbar wäre, wenn keine Messfehler aufträten und die Schauerscheibe unendlich dünn wäre. In der Praxis sind diese Einflüsse jedoch nicht vernachlässigbar und müssen durch die Einführung eines weiteren additiven Terms σ_{ik} berücksichtigt werden. In einem Minimierungsverfahren wird nun das Lösungspaar (l, m) gesucht, für das das Quadrat des Gesamtfehlers

$$\sigma^2 = \sum_{i,k} \sigma_{ik}^2$$

minimal wird. Für diesen Fall gilt:

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial l} = \frac{\partial \sigma^2}{\partial m} = 0$$

Aufgrund der gewählten Geometrie ($x_1 = x_2, x_3 = x_4, y_2 = y_3, y_4 = y_1$) ergeben sich hieraus die Gleichungen:

$$\begin{aligned} l(x_2 - x_3)^2 + l(x_4 - x_1)^2 &= ct_{32}(x_3 - x_2) + ct_{14}(x_1 - x_4) \\ m(y_1 - y_2)^2 + m(y_3 - y_4)^2 &= ct_{21}(y_2 - y_1) + ct_{43}(y_4 - y_3) \end{aligned} \quad (13)$$

Mit $x_1 - x_4 = x_2 - x_3 = b$ und $y_1 - y_2 = y_4 - y_3 = a$ folgt daraus:

$$l = \frac{c(t_{14} - t_{32})}{2(x_1 - x_4)} \quad ; \quad m = \frac{c(t_{43} - t_{21})}{2(y_1 - y_2)} \quad (14)$$

wobei n der Richtungscosinus der Schauerachse mit der z -Achse ist. Mit der Nebenbedingung (a) erhalten Sie so die definierenden Gleichungen (b) für den Zenitwinkel und (c) und (d) den Azimutwinkel.

$$\begin{aligned} l^2 + m^2 + n^2 &= 1 & (a) \\ \cos \theta = n &= \sqrt{1 - l^2 - m^2} & (b) \\ \cos \phi &= \frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2}} & (c) \\ \sin \phi &= \frac{m}{\sqrt{l^2 + m^2}} & (d) \end{aligned} \quad (15)$$

Überlegen Sie sich, wie Sie hieraus den Winkel ϕ bestimmen können.

2.4.2 Berechnung der Schauergröße

Als Lateralverteilung eines Luftschauers bezeichnet man die Teilchenflächendichte als Funktion des Abstandes r von der Schauerachse (x_s, y_s). Für unsere Belange reicht die folgende Parametrisierung:

$$\rho(r) = A \cdot N \cdot (r + 1)^{-\alpha} e^{-r/120} \text{ [m]} \quad (16)$$

Der Parameter α hängt dabei vom Alter des Schauers ab. Er hat auf Meereshöhe den Wert $\alpha = 1.5$. Die Normierungskonstante A ergibt sich aus der Forderung, dass das Integral über die Lateralverteilung der Schauergröße N entsprechen soll:

$$2\pi \int_0^{\infty} dr \cdot r \rho(r) = N$$

Für $\alpha = 1.5$ ergibt sich $A = 0.01$. Die Achsenkoordinaten und die Schauergröße N können durch die Anpassung der Lateralverteilung an die gemessenen Werte der Teilchenzahldichten

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{i=1}^8 \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^8 (\ln(\rho_i/n_i))^2 \\ n_i &= z_i/0.25 & i = 1..4 \\ n_i &= z_i/0.81 & i = 5..8 \end{aligned} \quad (17)$$

bestimmt werden, wobei z_i der in Detektor D_i gemessenen Teilchenzahldichte entspricht. Die Anpassung erfolgt durch die Minimierung des Ausdrucks aus Gleichung 17. Lassen Sie sich durch den Umstand, dass der Quotient ρ_i/n_i logarithmisch auftritt nicht verwirren. Dieser Trick dient zur Vereinfachung der Rechnung. Bedenken Sie, dass es sich beim Logarithmus um eine stetige und vor allem monotone Funktion handelt. Das Minimierungsproblem wird hierdurch also nicht verzerrt. Beachten sie weiterhin, dass in Gleichung 16 eine Exponentialfunktion auftritt. Am Minimum gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^2}{\partial N} &= 0; \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} \frac{\partial}{\partial N} (\ln \rho_i - \ln n_i)^2 &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} (\ln \rho_i - \ln n_i) = 0; \\ \ln(A \cdot N) &= \frac{1}{N_{\text{det}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} \left(\ln n_i + \alpha \cdot \ln(r_i + 1) + \frac{r_i}{120} \right); \end{aligned} \quad (18)$$

wobei N_{det} der Anzahl der berücksichtigten Detektoren entspricht. Für die weiteren Betrachtungen wird eine zusätzliche Substitution vorgenommen:

$$\begin{aligned} \ln(A \cdot N) &= \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} \frac{a_i}{N_{\text{det}}} \\ a_i &= \ln n_i + \alpha \cdot \ln(r_i + 1) + \frac{r_i}{120}. \end{aligned} \quad (19)$$

Durch Einsetzen dieses Ausdrucks in Gleichung 17 lässt sich die Abhängigkeit der Gleichung von N explizit entfernen:

$$\begin{aligned}\sigma^2(x_s, y_s, N) &= \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} \left(\ln n_i + \alpha \cdot \ln(r_i + 1) + \frac{r_i}{120} - \ln(A \cdot N) \right)^2 ; \\ \sigma^2 &= \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} \left(a_i - \sum_{j=1}^{N_{\text{det}}} \frac{a_j}{N_{\text{det}}} \right)^2 ; \\ \sigma^2 &= \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} a_i^2 - \frac{1}{N_{\text{det}}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} a_i \right)^2 = \sigma^2(x_s, y_s)\end{aligned}\quad (20)$$

so dass Gleichung 20 nur noch von x_s und y_s abhängt. Dieser Ausdruck wird nun für die Gitterpunkte eines Rasters (von mindestens 100 mal 100 Punkten) in der x - y -Ebene mit dem Mittelpunkt im Koordinatenursprung und einer Rasterweite von 1 m bestimmt. Der Rasterpunkt, der das kleinste Fehlerquadrat liefert, entspricht der besten Abschätzung für die Koordinaten der Schauerachse. Aus Gleichung 19 lässt sich daraus eine Abschätzung für die Schauergröße bestimmen.

Beachten Sie, dass Sie bei Berechnung der Abstände r_i der acht Detektoren D_i zum jeweiligen Rasterpunkt die Neigung des Schauers berücksichtigen müssen. Hierzu können Sie die Detektorebene in eine Ebene E projizieren, die durch den Koordinatenursprung geht und senkrecht zu der Schauerachse steht. Sind θ und ϕ der Zenit- bzw. Azimuthwinkel der Einfallsrichtung des Schauers, so hat der Einheitsvektor in Richtung der Schauerachse die Komponenten:

$$l = \sin \theta \cos \phi, \quad m = \sin \theta \sin \phi, \quad n = \cos \theta.$$

Ein Punkt $P = (x, y, 0)$ in der Detektorebene hat in der Projektion auf die Ebene E die Koordinaten:

$$\begin{aligned}x' &= (1 - l^2) \cdot x - ml \cdot y \\ y' &= (1 - m^2) \cdot y - ml \cdot x \\ z' &= -n(l \cdot x + m \cdot y)\end{aligned}\quad (21)$$

Der Abstand D_{ik} zweier Punkte P_i und P_k in der Detektorebene ändert sich bei Projektion in die Ebene E zu

$$D'_{ik} = \sqrt{(1 - l^2)(x_i - x_k)^2 + (1 - m^2)(y_i - y_k)^2 - 2ml(x_i - x_k)(y_i - y_k)}.$$

Zu guter Letzt noch einige Tipps zum Schreiben des Programms:

- Gehen Sie bei der Erstellung Ihres Programms Schritt für Schritt vor: Programmieren sie die Projektion, den Kern Ihrer Rechnung (für einen oder alle acht Detektoren) und zuletzt die Schleife, in der die Rechnung für alle Gitterpunkte durchgeführt werden soll. Hinterfragen Sie jeden Schritt. Nutzen Sie hierzu alle Informationen, die Ihnen zugänglich sind.
- Berechnen Sie σ^2 für einen Gitterpunkt (es empfiehlt sich der Ursprung) und mindestens einen Detektor von Hand. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem ihres Programms.

2.5 Ende der Datennahme

Sie beenden die Datennahme am Freitag. Schließen Sie das Programm *Hauptmessung* und analysieren Sie die aufgenommenen Daten mit den Ihnen zur Verfügung stehenden weiteren Programmfunktionen. Das Datennahmeprogramm besitzt einen internen Datenfilter, der Ereignisse aus der Ausleseketten ausschließt, die bestimmte Qualitätskriterien nicht erfüllen. Beispiele hierfür sind:

- Ereignisse, die als Testschauer ausgelöst wurden.
- Ereignisse, bei denen ein oder mehrere innere Detektoren zwar die Diskriminatortschwelle aber kein MIP registriert haben.
- Ereignisse mit weniger als drei gültigen Koinzidenzmessungen.
- Ereignisse, die keine eindeutige Lösung bei der Berechnung der Sekundärdaten liefern.

Notieren Sie sich die Anzahl aller aufgenommenen und gültigen Ereignisse und vergleichen Sie sie mit der Anzeige des unabhängigen Zählers auf halber Höhe im linken *rack*. Unter anderem haben Sie die Möglichkeit, für die ausgelesenen Werte jedes einzelnen Kanals (von A1-8 und Z1-4) gemittelt über alle ausgefilterten Ereignisse zu analysieren. Die Mittelwerte der vier Kanäle zur Zeitmessung sollten die gleiche Größenordnung haben und dem Einfall eines senkrechten Luftschauers entsprechen. Vergleichen Sie die Werte mit den Angaben in Ihrem Protokoll. Beantworten Sie hierzu die folgenden Fragen:

- Warum sollten die Mittelwerte der vier Kanäle zur Zeitmessung dem senkrechten Einfall eines Luftschauers entsprechen?
- Was bedeutet es, wenn dies nicht der Fall ist? Wie würde es sich auf die Verteilung Ihrer eigentlichen Messgrößen auswirken?

- Welche Abweichungen akzeptieren Sie noch?

Betrachten Sie im folgenden die tabellarische Darstellung der Spektren Ihrer Messgrößen die Sie für Ihre Auswertung histogrammieren sollen. Sie finden die Verteilung des Azimutwinkels ϕ (in linearer Darstellung in Grad), die Verteilung des Kosinus des Zenitwinkels $\cos \theta$ (in linearer Darstellung) und die Verteilung der Schauergroße $\log N$ der gemessenen Schauer (in logarithmischer Darstellung von 3.0-8.0) vor. Machen Sie sich den Verlauf der gemessenen Verteilung der Schauergroße klar. Entspricht dies Ihrer Erwartung? Machen Sie sich einen Ausdruck der Tabellen für Ihre Auswertung.

Mit der Detektoranordnung ihrer Messung können sie das Spektrum der Schauergroße nicht für beliebig große Schauer unverfälscht messen. Zum einen muß der Schauer groß genug sein, um die Erdoberfläche erreichen zu können. Zum anderen besitzt ihre Detektoranordnung eine effektive oder empfindliche Fläche: Unter der *empfindlichen Fläche* einer Detektoranordnung zur Messung von Luftschauern versteht man die Fläche, in die ein Schauer mit seiner Achse treffen muss, damit die Messung ausgelöst wird. Sie hängt von der Größe des Schauers und von der Triggerbedingung der Detektoranordnung ab. Wenn, wie in Ihrem Fall, die gleichzeitige Messung von n Teilchen pro m^2 in jedem der vier inneren Detektoren als Triggerbedingung gilt, dann lässt sich der maximale Abstand $r(N, n)$, den die Achse eines Schauers der Größe N von jedem der vier Detektoren haben darf, aus der Lateralverteilung (16) eines durchschnittlichen Luftschauers berechnen. Die empfindliche Fläche ergibt sich als Schnittfläche der vier Kreise mit Radius $r(N, n)$ um die vier inneren Detektoren D_1 – D_4 . Das Programm *Eff. Flächen* nimmt diese Berechnung für Sie vor. Sie können sich eine entsprechende Tabelle ausdrucken. Sie müssen das gemessene Spektrum später auf diesen Effekt hin korrigieren, um ein differenzielles Flusspektrum zu erhalten.

3 Auswertung

Die Auswertung des Versuchs kann über das sich anschließende Wochenende angefertigt werden. Vereinbaren Sie einen Termin zur Nachbesprechung mit Ihrem Assistenten. Die folgenden Kapitel enthalten noch einige Hinweise zur Auswertung.

3.1 Schauergroßenspektrum

Auf Meereshöhe besteht zwischen der Zahl N der geladenen Teilchen in einem Luftschauer und der Energie E_0 des Primärteilchens, das den Schauer ausgelöst hat, im Mittel der Zusammenhang:

$$E_{\text{prim}} = 10 \cdot N [\text{GeV}]$$

(Vergleichen Sie hierzu Gleichung 4.) Daher hat das differenzielle Spektrum der Schauergroße qualitativ die gleiche Form, wie das Energiespektrum der Teilchen der einfallenden kosmischen Primärstrahlung. Es lässt sich durch ein Potenzgesetz der Form

$$I(N) = K \cdot N^{-(\gamma+1)} dN$$

beschreiben, wobei der Exponent im Schauergroßenintervall von $\log N = 4-7$ ungefähr den Wert 1.7 hat. In doppelt logarithmischer Darstellung des Spektrums muss die Binbreite dN in logarithmische Bins umgerechnet werden:

$$dN = 2.3 \cdot N d(\log N)$$

wodurch das logarithmische differenzielle Spektrum die Form

$$I(N) = k \cdot N^{-\gamma} d(\log N) \quad (22)$$

annimmt. Die Schauerintensität ist definiert als die in der Messzeit T beobachtete Anzahl der Schauer $H(N)$ normiert auf die empfindliche Fläche $F(N)$ der Detektoranordnung.

$$I(N) = \frac{H(N)}{F(N)T}$$

Erfüllen Sie die folgenden Aufgaben:

- Verifizieren Sie, dass die gemessene Häufigkeitsverteilung durch ein Potenzgesetz der Form (22) beschrieben werden kann.
- Bestimmen Sie den Exponenten γ und stellen Sie ihn den Kollegen aus der anderen Gruppe zur Verfügung.

3.2 Zenitwinkelspektrum

Ein Luftschauer der Primärenergie E_0 erreicht das Maximum seiner Teilchenzahl N_{\max} im Mittel in einer atmosphärischen Tiefe von

$$t_{\max} = \ln(N_{\max}) \cdot X_0^{\text{em}}; \quad N_{\max} = E_0/E_{\text{krit}}$$

wobei E_{krit} der kritischen Energie und X_0^{em} der Strahlungslänge entspricht. Danach nimmt die Schauergroße wieder exponentiell ab:

$$N = N_{\max} e^{-(t-t_{\max})/\lambda}$$

Die Größe λ heisst Abklinglänge. Auf Meereshöhe haben alle Schauer das Maximum ihrer Entwicklung überschritten. Ein Luftschauer, der auf Meereshöhe unter dem Zenitwinkel θ einfällt hat gegenüber einem senkrecht einfallenden Schauer einen um den Betrag

$$\frac{t_s}{\cos \theta} - t_s = t_s(\sec \theta - 1)$$

(mit $\sec \theta = 1/\cos \theta$) längeren Weg zurückgelegt, so dass für seine Größe gilt:

$$N(\theta) = N(0)e^{-t_s/\lambda(\sec \theta - 1)} \quad (23)$$

wobei $t_s = 1030 \text{ gcm}^{-2}$ der atmosphärischen Tiefe entspricht. Betrachtet man Schauer gleicher Größe, so müssen geneigt einfallende Schauer eine entsprechend größere Primärenergie gehabt haben.

$$E(\theta) = E(0)e^{t_s/\lambda(\sec \theta - 1)} \approx E_0(1 + \sec \theta - 1)^{t_s/\lambda} = E_0 \sec(\theta)^{t_s/\lambda} \quad (24)$$

Das integrale Primärenergiespektrum entspricht einem Potenzgesetz der Form:

$$H = k \cdot E^{-\gamma}$$

(vergleichen Sie hierzu Gleichung 22), woraus sich für das Zenitwinkelspektrum der einfallenden Luftschauer die folgende Form ergibt:

$$H(\cos \theta) = k \cdot E(\theta)^{-\gamma} = \text{const} \cdot \sec^{-\alpha} \theta; \quad \alpha = \frac{\gamma t_s}{\lambda} \quad (25)$$

Erfüllen Sie die folgenden Aufgaben:

- Verifizieren Sie, dass die gemessene Häufigkeitsverteilung durch ein Potenzgesetz der Form (25) beschrieben werden kann.
- Bestimmen Sie den Exponenten α .
- Bestimmen Sie die Abklinglänge λ unter Kenntnis des Parameters γ , den Ihre Kollegen aus der anderen Gruppe bestimmt haben.

Literatur

- [1] W. Heisenberg (Hrsg.), “Luftschauer in Vorträge über kosmische Strahlung” Berlin, Göttingen, Heidelberg 1953
- [2] A. M. Hillas in “Cosmology, Galaxy Formation and Astroparticle Physics on the pathway to the SKA”, Herausgeber Klöckner, Jarvis, and Rowlings, Oxford, UK (2006), Vorabdruck unter arXiv:astro-ph/0607109
- [3] Amsler, C. et al. Physics Letters B667, 1 (2008)
- [4] G. Goconni, “Extensive Airshowers in Handbuch der Physik” Band XLVI, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1961
- [5] A. E. Sandström, “Cosmic Ray Physics” Amsterdam 1965
- [6] G. Khristiansen, G. Kulikov, J. Fomin “Cosmic Rays of Superhigh Energies” München 1980
- [7] E. Lohrmann, “Einführung in die Elementarteilchenphysik” Stuttgart 1983.
- [8] D. H. Perkins, “Introduction to High Energy Physics” Reading (Mass.) 1982
- [9] E. Fenyves, O. Haiman “The Physical Principles of Nuclear Radiation Measurement” Budapest 1969
- [10] O. C. Allkofer, “Teilchen-Detektoren” München 1971.
- [11] K. Kleinknecht, “Detektoren für Teilchenstrahlung” Stuttgart 1984.

A Kontrollfragen

Im Folgenden finden Sie eine Sammlung von Kontrollfragen, die Sie beantworten können sollten, um den Versuch erfolgreich durchführen zu können.

Luftschauer

- Durch welche Teilchen werden Luftschauer ausgelöst?
- Was versteht man unter Hadronen?
- Wie groß ist ihre freie Weglänge (in g cm^{-2})?
- Wie entwickelt sich die Hadronkaskade?
- Welche Teilchen nennt man Mesonen?
- Welche Mesonen sind für die Entstehung der Myonenkomponente im Luftschauer verantwortlich?
- Zu welcher Teilchenart gehören Myonen?
- Wie entsteht die elektromagnetische Komponente des Luftschauers?
- Welche Prozesse ermöglichen das Wachstum der elektromagnetischen Kaskade?
- Welche Energie haben die Teilchen im Maximum der Schauerentwicklung?
- Welcher Prozeß ist für das Ausstreben des Schauers verantwortlich?
- Wie dick ist die Atmosphäre (in g cm^{-2})?
- In welcher Tiefe erreicht ein Schauer der Primärenergie $E_0 = 10^{15}$ eV sein Maximum?
- Wie groß ungefähr ist dieser Schauer auf Meereshöhe?
- Wie sieht das differentielle Schauergrößenspektrum aus?
- Was versteht man unter der empfindlichen Fläche einer Luftschauerapparatur?
- Welche Form hat das Zenitwinkelspektrum der Luftschauer und wie kann man sie erklären?

Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie

- Welche Funktion beschreibt den mittleren Energieverlust geladener Teilchen durch Ionisation?
- Wie kann man sich den qualitativen Verlauf dieser Energieverlust-Beziehung erklären?
- Was sind Minimal Ionisierende Teilchen *Minimal Ionizing Particles*?
- Wie groß ist in etwa der mittlere Energieverlust Minimal Ionisierender Teilchen beim Durchgang durch Materie?
- Was beschreibt die Landau-Verteilung?
- Wie groß ist der mittlere Energieverlust durch Bremsstrahlung?
- Was ist die Strahlungslänge?
- Wie groß ist die Strahlungslänge von Myonen in Luft im Vergleich zu Elektronen?
- Was versteht man unter der kritischen Energie?
- Wie groß sind die kritischen Energien für Elektronen (Myonen) in Luft?
- Warum verlieren hochenergetische Myonen beim Durchgang durch Materie weniger Energie als Elektronen?
- Welche Prozesse treten beim Durchgang von elektromagnetischer Strahlung durch Materie auf?
- Wie groß ist ungefähr die freie Weglänge hochenergetischer Photonen in Luft?

Apparatur

- Welche Energie deponieren minimal-ionisierende Teilchen in einem 5 cm dicken organischen Szintillator?
- Wie wird diese Energie in einem organischen Szintillator in Photonen umgesetzt?
- Wie groß sind die Abklingzeiten in einem (an-)organischen Szintillator?
- Wie funktioniert ein Photomultiplier?
- Was ist ein *Diskriminator*?
- Wie funktioniert ein *Time to Amplitude Converter*?
- Wie funktioniert ein *Analog Digital Converter*?
- Was ist ein *Multi-Channel Analyzer*?

B Lageplan des F-Praktikumsraums

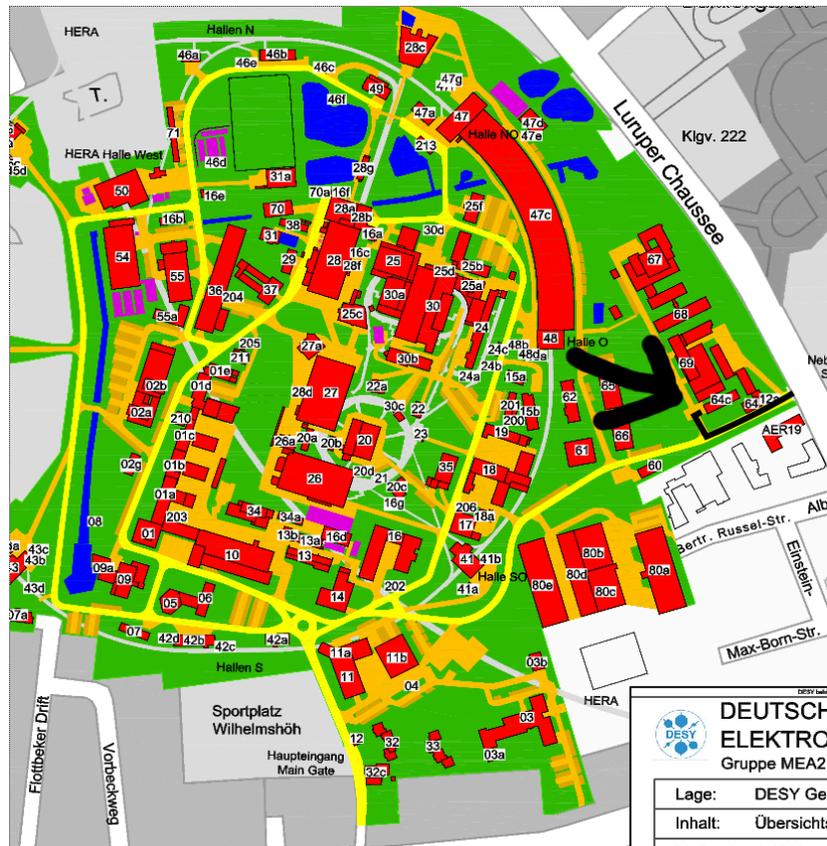


Abbildung 15: Lageplan des F-Praktikums Raums für den Versuch Luftschauer.

C Protokoll-Vorlagen für den Versuch Luftschauer

Elektronische Komponenten des Versuchsaufbaus

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise der wichtigsten, in diesem Versuch verwendeten, elektronischen Module erläutert.

Linear fan in / fan out

Discriminator

Gate

PM amplifier

Main amplifier

AND/OR gate

Analog Digital Converter (ADC)

Messung der Schauergröße

Sie finden das Protokoll zur Messung der Schauergröße in Fig. 16. Unter *HV (Generator)* sollten Sie die eingestellte Spannung am HV-Generator im linken *rack* in Volt eintragen. Notieren Sie in der ersten Spalte (*HV*), die Einstellung des entsprechenden Potentiometers (oder HV-Reglers) in Poti-Ticks. Tragen Sie in die zweite Spalte die Lage des Teilchen-Peaks in Kanälen ein. Er sollte in etwa bei Kanal 20 liegen. Tragen Sie in die dritte Spalte den umgerechneten Wert in mV ein. Sie werden ihn später als Eingabeparameter des Ausleseprogramms benötigen. Beachten Sie bei der Umrechnung, dass der ADC, den Sie zur Kalibration verwendet haben 10 V auf 1024 Kanäle abbildet. Gehen Sie analog mit den Spalten 5 und 6 für den *LED-Peak* vor. Tragen Sie die Einstellungen der Diskriminatoren (für die Detektoren 1 bis 4) in Poti-Ticks in Spalte 4 ein. In Spalte 7 sollten Sie festhalten, wieviele Ereignisse Sie mit den notierten HV und Diskriminator-Einstellungen in einem Zeitintervall von 40 s gemessen haben. Tragen Sie schließlich in die letzte Spalte die Pedestal Werte der Auslesekarte in ADC counts ein.

Messprotokoll

-Teilchenzahlmessung-

Datum: _____

HV (Generator): _____

	HV	Teilchen-Peak		Discr.	LED-Peak		μ -Rate	Pedestal
A1								
A2								
A3								
A4								
A5								
A6								
A7								
A8								

Poti-Ticks *Kanäle* *mV* *Poti-Ticks* *Kanäle* *mV* *Ereignisse/40 s* *ADC Counts*

Abbildung 16: Protokoll für die Messung der Schauergröße (Amplitudenmessung).

Messung des Winkelspektrums

Sie finden das Protokoll zur Messung des Winkelspektrums in Fig. 17. Für eine Beschreibung der Einträge in die erste Tabelle werfen Sie einen Blick in Abschnitt C. Unter *HV (Generator)* sollten Sie die eingestellte Spannung am HV-Generator im rechten *rack* in Volt eintragen. Notieren Sie in den ersten drei Spalten (mit der Bezeichnung *TAC Signal nach Delay*), die Lage des *TAC* Signals mit den drei verschiedenen *delays* von 25 ns, 45 ns, 65 ns ein. Beachten Sie, dass der *delay* mit dem Sie die Messung durchführen werden 45 ns betragen wird. Tragen Sie in die vierte Spalte (mit der Bezeichnung *Auflösung*) die Breite des Peaks bei 45 ns als Standardabweichung in Kanälen ein. In die Spalten 5 und 6 sollten Sie die ermittelte Steigung der Kalibrationsgeraden in Kanälen und mV eintragen. Tragen Sie schließlich in die letzte Spalte die Pedestalwerte der Auslesekarte in ADC counts ein.

Ausgleichsgerade bei fehlerbehafteten Messungen

Die Darstellung folgt z.B. *Numerical recipes*². Zur Anpassung einer Ausgleichsgeraden der Form

$$y(x) = y(x; a, b) = a + bx \quad (26)$$

an einen Datensatz mit N Messungen y_i und zugehörigen Gauss'schen Fehlern σ_i an den Stützstellen x_i lässt sich als Minimierungsproblem der Größe

$$\chi^2(a, b) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - a - bx_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (27)$$

auffassen. Aus den Bedingungen für das Minimum von $\chi^2(a, b)$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N \frac{y_i - a - b x_i}{\sigma_i^2} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N \frac{x_i (y_i - a - b x_i)}{\sigma_i^2} = 0 \quad (29)$$

²www.nr.com

Messprotokoll

-Winkelmessung-

Datum: _____

HV (Generator): _____

	HV	Teilchen-Peak		Discr.	μ -Rate	Pedestal
A1						
A2						
A3						
A4						

Poti-Ticks *Kanäle* *mV* *Poti-Ticks* *Ereignisse/40 s* *ADC Counts*

	TAC Signal nach Delay			Auflösung	Steigung	Ped.
A1						
A2						
A3						
A4						

Kanäle (25 ns) *Kanäle (45 ns)* *Kanäle (65 ns)* *Kanäle (45 ns)* *Kanal/sek* *mV/sek* *ADC Counts*

Abbildung 17: Protokoll für die Messung des Winkelspektrums (Zeitmessung).

leiten sich zwei Gleichungen für zwei Unbekannte (a, b) ab, für deren Lösung sich mit der Kurzform

$$S \equiv \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad S_x \equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2}, \quad S_y \equiv \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2},$$

$$S_{xx} \equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}, \quad S_{xy} \equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}$$

anschreiben lässt:

$$a S + b S_x = S_y$$

$$a S_x + b S_{xx} = S_{xy}$$

$$a = \frac{S_{xx} S_y - S_x S_{xy}}{\Delta} \quad (30)$$

$$b = \frac{S S_{xy} - S_x S_y}{\Delta}, \quad (31)$$

mit $\Delta \equiv S S_{xx} - (S_x)^2$. Mit Fehlerfortpflanzung ergibt sich für die Fehler

$$\sigma_a^2 = \frac{S_{xx}}{\Delta} \quad (32)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{S}{\Delta}, \quad (33)$$

und für die Kovarianz $cov(a, b) = -S_x/\Delta$. Um die Güte der Anpassung zu beurteilen, betrachten wir den Wert für χ^2 , der für $N - 2$ Freiheitsgrade der $\chi^2(N - 2)$ -Verteilung folgt. Der Erwartungswert für einen Wert $\langle \chi^2(n) \rangle = n$ für n Freiheitsgrade mit einer Varianz $var(\chi^2(f)) = 2n$.