

Charakterisierung der
Vorverstärkerelektronik
der Myonzzähler des AMIGA Projekts

Bachelor-Arbeit
zur Erlangung des akademischen
Grades
Bachelor of Science
(B.Sc.)

dem Fachbereich Physik der
Universität Siegen

vorgelegt von
Michael Scharun

August 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Motivation	5
2	Kosmische Strahlung	7
2.1	Geschichte der Entdeckung	7
2.2	Zusammensetzung und Herkunft der Primärstrahlung	8
2.3	Energiespektrum der Primärstrahlung	9
2.4	Sekundäre kosmische Strahlung	11
3	Das Auger Experiment	13
3.1	Auger South	13
3.1.1	SD - Surface Detektoren	14
3.1.2	FD - Fluorescence Detektoren	15
3.2	Die Erweiterungen	15
3.2.1	HEAT	16
3.2.2	AMIGA	16
3.2.3	Der Aufbau des Myonenzählers	17
4	Das Daughter Board	19
4.1	Grundlegender Messaufbau	19
4.2	Die Verstärkung eines Operationsverstärkers	20
4.2.1	DC-Verstärkung	21
4.2.2	AC-Verstärkung	23
4.2.3	Zusammenfassung	25
4.3	Das Frequenzverhalten	26
4.4	Das reale Signalverhalten	30
4.5	Das Zeitverhalten des Comparators	31
4.6	Das Auflösungsvermögen	34
4.6.1	Die minimale Pulsbreite	34
4.6.2	Der minimale Abstand zwischen zwei Pulsen	35
4.7	Die Leistungsaufnahme	36
4.8	Die erwartete Signalthöhe	38
4.9	Das Übersprechverhalten	40
5	Diskussion der Ergebnisse	41
5.1	Ideales und reales Verhalten	41
5.2	Das ideale Verstärkungsverhältnis	41
5.3	Die ideale Referenzspannungshöhe	42
6	Zusammenfassung und Ausblick	45

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schockwellenbeschleunigung	9
2.2	Kosmisches Energiespektrum	10
3.1	Geografische Lage von Auger South	13
3.2	Surface Detektor	14
3.3	Fluorescence Detektor Los Leones	15
3.4	Ereignis in SD und FD	15
3.5	Unitary Cell	16
3.6	Struktur des Myonenzählers	17
4.1	Blockdiagramm der Messapparaturen	19
4.2	Schaltbild des Daughter Boards	20
4.3	Schaltbild des OpAmp	20
4.4	Kurvenverlauf für halbes Board DC	21
4.5	Kurvenverlauf für komplettes Board DC	22
4.6	Verstärkungsfit für halbes Board DC	22
4.7	Verstärkungsfit für komplettes Board DC	23
4.8	Kurvenverlauf für halbes Board AC	23
4.9	Kurvenverlauf für komplettes Board AC	24
4.10	Verstärkungsfit für halbes Board AC	24
4.11	Verstärkungsfit für komplettes Board AC	25
4.12	Zeitverzögerung eines Signals	26
4.13	Das Frequenzverhalten für drei verschiedene Verstärkungen	28
4.14	Das Frequenzverhalten für das komplette Daughter Board	28
4.15	Eingangssignalverhalten	30
4.16	Ausgangssignalverhalten	31
4.17	Dreieckssignalverlauf	32
4.18	Dreiecksspannung Fit	33
4.19	Minimal auflösbare Signalbreite	34
4.20	Doppelrechteck-Doppeltrapez	35
4.21	Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Frequenz	36
4.22	Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Signalhöhe	37
4.23	Gemessene Anzahl der durch ein Myon erzeugten Photonen	39

Tabellenverzeichnis

4.1	Vergleich Verstärkungsverhältnisse	26
4.2	Bestimmung der Bandbreite des kompletten Boards	29
4.3	Rise- und Falltime	31
4.4	Referenzspannung-Pulsdauer	33

Kapitel 1

Physikalische Motivation

Die Erde wird ständig von Teilchen aus dem All getroffen. Diese erzeugen z.B. Aurora Borealis, das Nordlicht. Die Teilchen weisen ein Energiespektrum von über zehn Größenordnungen auf, wobei die höchstenergetischen elementaren Teilchen eine kinetische Energie besitzen, die der eines Tennisballs nach dem Aufschlag einer Profispielerin entspricht. Diese Energien sind erheblich größer als alles, was der Mensch in Teilchenbeschleunigern erzeugen kann. Um die kosmischen Teilchen zu untersuchen, wurde das Pierre Auger Experiment ins Leben gerufen und um die Untersuchung weiter voranzutreiben, wurden Erweiterungen für das Experiment beschlossen.

Hierfür sollen in der argentinischen Pampa in etwa 3 m Tiefe Szintillatoren inklusive der Auslese-Elektronik vergraben werden. Da das Erreichen dieser Stellen zeit- und kostenaufwendig ist, muss vor der Inbetriebnahme sichergestellt werden, dass die gesamte Elektronik einwandfrei funktioniert, da ein erneutes Ausgraben und Ersetzen sehr schwer werden würde.

Um die einwandfreie Funktion zu gewährleisten, werden von allen elektronischen Komponenten Prototypen entwickelt und getestet. Die Durchführung solcher Tests an einem Prototypenboard, das Teil der Erweiterung ist, bildet den Hauptbestandteil dieser Bachelor-Arbeit. Durch diese Tests soll eine ideale Konfiguration des Boards erreicht und sichergestellt werden, dass das Verhalten so ist, wie es erwartet und erwünscht wird.

Kapitel 2

Kosmische Strahlung

2.1 Geschichte der Entdeckung

Im Jahre 1896 experimentierte der französische Physiker Antoine Henry Becquerel mit Uransalzen. Er entdeckte bei diesen Experimenten, dass Uransalzpräparate Fotoplatten schwärzten, selbst wenn diese in einem dunklen Raum gelagert wurden. Daraus schlussfolgerte er, dass aus diesen Salzen eine Strahlung hervorgehen musste. Im Jahr 1903 erhielt er für die Entdeckung der ionisierenden radioaktiven Strahlung den Nobelpreis für Physik. Das Auftreten von ionisierender Strahlung auf der Erdoberfläche wurde auf radioaktive Nuklide in der Erde zurückgeführt.

Victor Franz Hess unternahm 1912 Heißluftballonflüge. Dabei entdeckte er mit Hilfe von mitgeführten Magnetspektrometern, dass die Intensität der Strahlung erst wie erwartet mit der Höhe abnahm, sich dann aber wieder verstärkte. Daraus schloss er, dass die Strahlung nicht nur aus der Erde sondern aus dem Kosmos kommen musste und nannte sie daher kosmische Strahlung. Für seine Entdeckung erhielt er 1936 den Nobelpreis für Physik.

Dem russischen Physiker Dimitry Skobelzyn gelang es erstmals 1927 Teilchen mittels Nebelkammer zu detektieren und zu fotografieren. Damit war ihm der erste Nachweis von sekundären kosmischen Teilchen gelungen.

Da die ersten Teilchenbeschleuniger, die Teilchen auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigen konnten, erst in den 1950er Jahren vom Menschen gebaut werden konnten, waren die kosmischen Teilchen bis dato die einzige Möglichkeit, Teilchenphysik mit höheren Energien zu betreiben und Elementarteilchen zu untersuchen. Im Laufe verschiedener Experimente konnten durch die kosmische Strahlung unter anderem Positronen, Myonen und Pionen entdeckt und vermessen werden.

Ab 1938 analysierte Pierre Victor Auger am schweizer Jungfrauoch auf 3500 m Höhe die kosmische Strahlung. Dabei verwendete er mehrere Nachweisgeräte im Abstand von etwa 300 m. Es gelang ihm, in mehreren Detektoren zeitgleich Ereignisse nachzuweisen. Damit hatte er die ersten ausgedehnten Teilenschauer beobachtet.

In späteren Jahren führte er weitere Versuche zur kosmischen Strahlung als Professor an der Sorbonne und als Leiter der European Space Research Organisation durch. Nach ihm wurde das Pierre Auger Experiment benannt.

Im Laufe der Zeit wurden weitere Experimente durchgeführt, um die kosmische Strahlung besser zu untersuchen. Bekannte Experimente sind unter anderem: Haverah Park, Fly's Eye, AGASA und KASCADE Grande.

Im Jahre 1992 entwarfen Jim Cronin und Alan Watson das Pierre Auger Observatorium. Die ersten Design-Studien wurden 1995 unternommen, 2004 wurde die Datenaufzeichnung begonnen.

2.2 Zusammensetzung und Herkunft der Primärstrahlung

Die Erde wird ständig von elementaren Teilchen aus dem Weltall getroffen. Diese weisen Energien von einigen MeV bis zu etwa 100 EeV auf. Die geladene kosmische Strahlung besteht zu rund 98% aus Atomkernen und zu rund 2% aus Elektronen. Die Atomkerne reichen von Wasserstoffkernen - also Protonen - als leichteste Vertreter bis hin zu Eisenkernen - den schwersten bei Kernfusion erzeugbaren stabilen Kernen. Die Atomkernkomponente setzt sich zu etwa 87% aus Protonen, zu 12% aus α -Teilchen und zu 1% aus schwereren Kernen zusammen. Diese Zusammensetzung entspricht in etwa der Elementhäufigkeit in Sonnen.

Im Weltall können freie elementare Teilchen durch verschiedene Vorgänge beschleunigt werden und je nach Art der Beschleunigung typische Energien annehmen.

An Sonnen können **Sonnenflecken** beobachtet werden. An diesen Stellen ist die Temperatur niedriger und damit die Leuchtkraft geringer als in ihrer Umgebung. Die geringere Temperatur ergibt sich, da ein Teil der Energie bei Sonnenflecken in einem Magnetfeld gespeichert ist. Diese Magnetfelder sind zeitlich nicht konstant und erzeugen dadurch nach dem Induktionsgesetz eine Spannung:

$$-\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\vec{B} \cdot \vec{A}}{dt} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = U \quad (2.1)$$

Aufgrund dieser Spannung können Elektronen und Atomkerne beschleunigt werden und erreichen somit Energien bis etwa 100 GeV.

Auf der Sonnenoberfläche können Eruptionen, sogenannte **Sonnenflares**, beobachtet werden. Bei solchen Eruptionen wird Plasma ausgestoßen. Das Plasma besteht aus Protonen und Elektronen mit Energien bis 10 GeV.

Bei **Supernovaexplosionen** wird Materie mit sehr hoher Geschwindigkeit in das Weltall geschleudert. Die Materie breitet sich kugelförmig in Schockfronten aus. Trifft ein sich auf die Schockfront zubewegendes Teilchen darauf, so wird es reflektiert und dabei beschleunigt. Die Geschwindigkeit der Schockwellen nimmt mit steigendem Radius ab. Gerät ein Teilchen der Geschwindigkeit v zwischen zwei Schockwellen der Geschwindigkeiten v_1 und v_2 ($v_1 > v_2$), so wird das Teilchen an der 1. Schockwelle beschleunigt und reflektiert und läuft zur 2. Schockwelle. Dort kann es wieder reflektiert werden und verliert etwas Energie. Dieser Vorgang kann mehrmals wiederholt werden. Der Verlauf ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Der Energiegewinn ergibt sich für $v \gg v_1, v_2$ zu:

$$\Delta E = m\beta c\Delta v \quad (2.2)$$

Hierbei ist m die Masse des Teilchens, βc dessen Geschwindigkeit und $\Delta v = v_1 - v_2$ die Geschwindigkeitsdifferenz der Schockwellen. Diese Art der Beschleunigung ist sehr ähnlich der Fermi-Beschleunigung und verhält sich linear zur Geschwindigkeit des Teilchens. Sie wird daher auch als Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung bezeichnet. Durch diesen Mechanismus können Energien bis etwa 100 TeV erreicht werden.

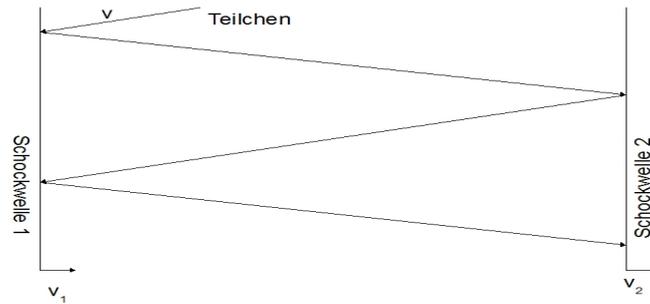


Abbildung 2.1: Schockwellenbeschleunigung

Ein geladenes kosmisches Teilchen kann ebenfalls durch bewegte Plasmawolken beschleunigt werden. Diese Art der Beschleunigung ist nach ihrem Entdecker Enrico Fermi **Fermi-Beschleunigung** benannt. Diese funktioniert ähnlich der Schockwellenbeschleunigung. Hierbei wird das Teilchen an einer bewegten Plasmawolke reflektiert und beschleunigt. Als Energiegewinn ergibt sich:

$$\Delta E = \frac{4}{3}\beta^2 \quad (2.3)$$

Da die Beschleunigung quadratisch in der Geschwindigkeit ist, wird sie auch Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung genannt. Da sich dieser Vorgang im Normalfall nur einmal ereignet, sind die hieraus gewonnenen Energien gering.

Nach einem Supernovakollaps entstehen sehr dichte Neutronensterne, sogenannte **Pulsare**, die riesige Magnetfelder und extrem hohe Rotationsgeschwindigkeiten aufweisen. Da Rotationsachse und Magnetfeldachse im Normalfall nicht zusammenfallen, werden elektrische Felder nach Gleichung 2.1 induziert. Diese können sehr hoch sein und Teilchen sehr stark beschleunigen.

In Binärsystemen, bestehend aus einem Pulsar und einem normalen Stern, entsteht durch die hohe Gravitation des Pulsars ein Sog und auf Grund der Drehimpulserhaltung eine Akkretionsscheibe. Ein Proton, das sich in diesem Sog auf den Neutronenstern zubewegt und dessen Geschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld steht, erfährt durch das elektrische Feld eine hohe Beschleunigung. Dadurch können Energien bis etwa 10 EeV erreicht werden.

Ähnliches geschieht bei **aktiven galaktischen Kernen (AGN)**. Hierbei erzeugen supermassive schwarze Löcher Akkretionen im Bereich von mehreren Kiloparsec (kpc). Senkrecht zu der Akkretionsscheibe bilden sich Plasmaeruptionen (Jets) aus. Diese können Längen von mehreren Mpc erreichen. Der genaue Prozess ist noch nicht verstanden. Der Mechanismus gilt als Kandidat, Quelle für die höchstenergetischen kosmischen Teilchen mit Energien bis etwa 100 EeV zu sein.

2.3 Energiespektrum der Primärstrahlung

Für das Energiespektrum kann ein Potenzgesetz gefunden werden. Die Verteilung des Teilchenflusses Φ in Abhängigkeit der Energie lässt sich daher schreiben als:

$$\Phi(E) \propto E^{-\gamma} \quad (2.4)$$

Hierbei ist γ der spektrale Index. Die Abbildung 2.2 zeigt den experimentell gefundenen Zusammenhang zwischen der Energie und der Auftrittshäufigkeit.

Die Verteilung folgt bis zu einer Energie von etwa 5 PeV einem Potenzgesetz mit dem spektralen Index $\gamma=2,7$. Danach erkennt man das sogenannte erste Knie. Ab dort fällt die Verteilung stärker ab und der spektrale Index erhöht sich auf $\gamma=3,1$. Das erste Knie wird auf die Verringerung des Flusses der leichten Primärteilchen zurückgeführt. Für diesen Knick können mehrere mögliche Ursachen gesehen werden. Zum einen wird die Schockwellenbeschleunigung bei diesen Energien ineffektiv und liefert fast keine Teilchen mit höheren Energien. Zum anderen können Teilchen ab diesen Energien die Milchstraße verlassen.

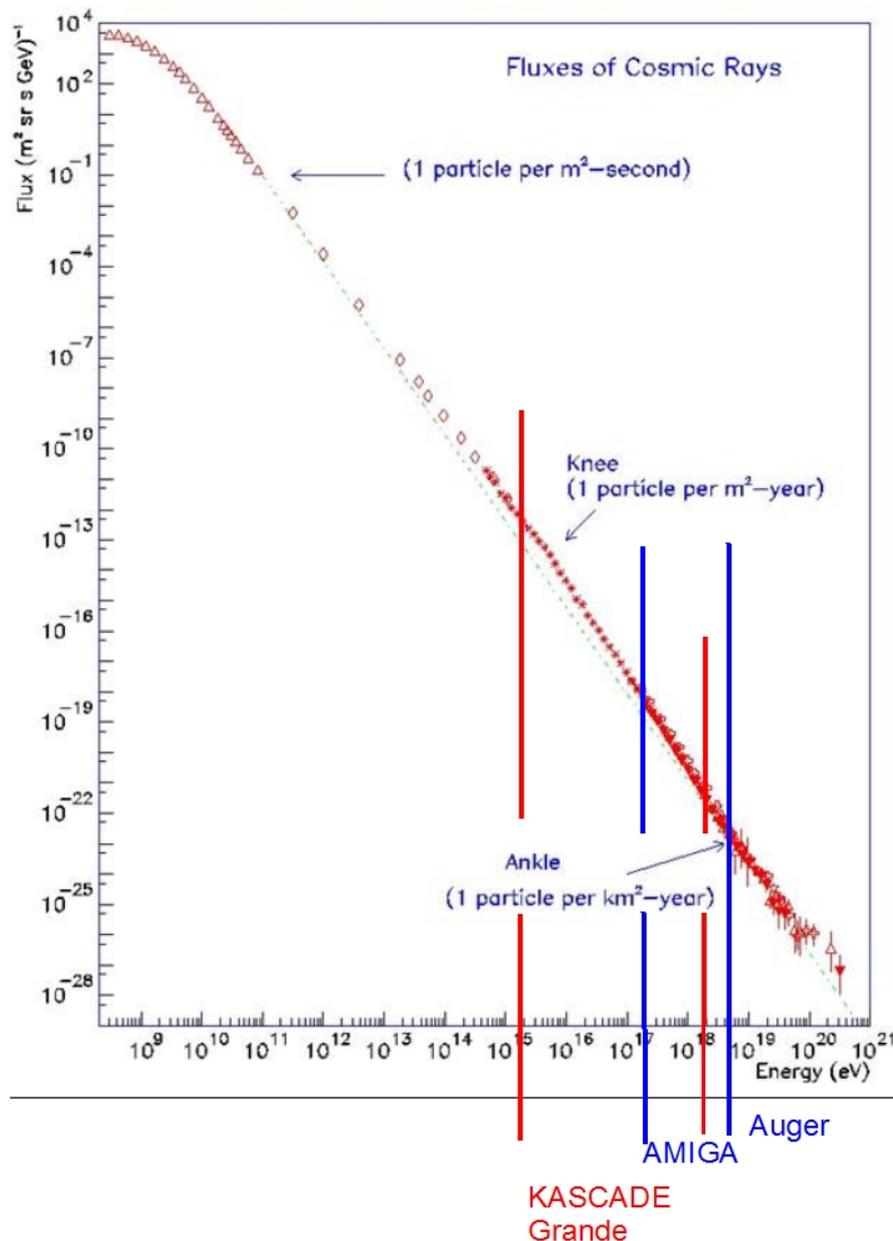


Abbildung 2.2: Kosmisches Energiespektrum und der Messbereich von KASCADE Grande, Auger und AMIGA [apcaug]

Im Bereich um 0,4 EeV zeichnet sich das 2. Knie ab und im Bereich von 3 EeV der sogenannte Knöchel. In diesem Bereich nimmt die Verteilung in etwa wieder den alten Abfall an und der spektrale Index verringert sich auf $\gamma=2,7$. Im Bereich zwischen 2. Knie und

Knöchel verändern sich die Quellen der kosmischen Strahlung. Bei Energien im Bereich von 10^{17} bis 10^{19} eV wird der Larmor-Radius des galaktischen Magnetfeldes größer als der Radius einer Galaxie, sodass die Teilchen mit solchen Energien die Galaxie verlassen können. Diese können auch die Erde erreichen und dort Schauer erzeugen.

Es wird vermutet, dass am 2. Knie der Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen stattfindet. In dem Falle ist die momentan für richtig gehaltene Theorie für den Knöchel, dass dort Paarerzeugung durch Wechselwirkung der Protonen mit der kosmischen Hintergrundstrahlung nach Gleichung 2.5 stattfindet ([Etc06]).

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow p + e^- + e^+ \quad (2.5)$$

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (2.6)$$

Sollte sich das 2. Knie aus einem anderen Grund ergeben, wäre der Knöchel der erwartete Punkt für den Übergang von galaktischer zu extragalaktischer Strahlung.

Im höchstenergetischen Bereich ($E > 10^{19,5}$ eV) verringert sich der Fluss auf Grund des GZK-Cutoffs. Hierbei bildet ein Proton bei einer Reaktion nach Gleichung 2.6 mit der kosmischen Hintergrundstrahlung ein Pion und verliert dabei Energie. Daher verringert sich der Fluss der höchstenergetischen Teilchen (UHECR). Die Anzahl niederenergetischerer Teilchen wird damit leicht erhöht. Die mittlere freie Weglänge für Protonen mit Energien oberhalb der GZK-Cutoff-Schwelle beträgt etwa 10 Mpc ([Gru00] S.66).

2.4 Sekundäre kosmische Strahlung

Trifft ein primäres Teilchen auf einen Atomkern in der Erdatmosphäre, so finden dort Reaktionen statt und es werden weitere Teilchen gebildet. Für sehr hoch energetische Teilchen entstehen ausgedehnte Schauer mit Milliarden von Tochterteilchen.

Diese Tochterteilchen werden Sekundärteilchen genannt. Man unterscheidet sie in vier Gruppen:

1. Hadronische Komponente: Trifft ein Projektil (ab jetzt o.B.d.A. ein Proton als Beispiel) auf einen Atomkern (N) in der Atmosphäre (Stickstoff, Sauerstoff,...), so werden hauptsächlich Pionen und Kaonen gebildet. Pionen und Kaonen sind die leichtesten Vertreter der Mesonenfamilie. Es werden etwa zehnmal mehr Pionen als Kaonen gebildet. Daher können die Kaonen vernachlässigt werden.

$$p + N \rightarrow p' + N' + r\pi^+ r\pi^- + k\pi^0 \quad (2.7)$$

$$p + N \rightarrow n' + N + (r + 1)\pi^+ + r\pi^- + k\pi^0 \quad (2.8)$$

Alle Arten von Pionen werden etwa gleich häufig gebildet, so dass $k=r$ gilt. Die Anzahl der geladenen Pionen ist damit doppelt so groß wie die der neutralen. Das in der 2. Reaktion (Gleichung 2.8) ein π^+ mehr gebildet wird, spielt bei hohen Energien keine Rolle, da die Gesamtzahl der gebildeten Pionen sehr hoch ist. Da π^0 eine sehr geringe Lebensdauer ($\tau=8,4 \times 10^{-8}$ ns) haben, zerfallen diese sofort wieder. Geladene Pionen haben eine höhere Lebensdauer ($\tau=26$ ns) und können, wenn sie tief genug gebildet werden, die Erdoberfläche erreichen und nachgewiesen werden. Es werden außerdem sekundäre Protonen und Neutronen detektiert. Die geladenen Pionen können auch selbst mit der Atmosphäre reagieren und weitere Pionen bilden. Die hadronische Komponente umfasst geladene Pionen, Protonen und Neutronen.

2. Weiche Komponente: Beim Zefall eines neutralen Pions entstehen fast immer 2

Gamma-Quanten (siehe Gleichung 2.9). Diese hochenergetischen Gammas betreiben an atmosphärischen Kernen Paarteilchenerzeugung (Gleichung 2.10). Die dabei entstandenen Positronen und Elektronen erzeugen durch Bremsstrahlung wieder Gammas, die dann wiederum Paarerzeugung durchführen. Dadurch bildet sich eine ganze Kaskade.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (2.9)$$

$$\gamma + N \rightarrow N + e^+ + e^- \quad (2.10)$$

Ist die Kaskade soweit fortgeschritten, dass die Energie für weitere Paarerzeugung nicht mehr ausreicht, so ist das Maximum erreicht und die Zahl der weichen Bestandteile des Schauers nimmt auf Grund von u.a. Ionisation wieder ab.

3. Myonische Komponente: Werden geladene Pionen und Kaonen in großen Höhen gebildet, so zerfallen sie bevor sie die Erde erreichen hauptsächlich zu Myonen oder Elektronen. Da die Myonen sehr wenig wechselwirken, können sie auf der Erde nachgewiesen werden. Ihre Zahl verringert sich nur gering beim Durchdringen der Erdatmosphäre. Da sich die Zahl der Elektronen stärker verringert, kann das Verhältnis aus Elektronen und Myonen verwendet werden, um festzustellen in welcher Höhe die Schauerentwicklung einsetzte.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.11)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.12)$$

4. Neutrino-Komponente: Bei den Reaktionen 2.11 und 2.12 sowie beim Zerfall einiger Myonen nach Gleichung 2.13 und 2.14 entstehen Neutrinos. Diese wechselwirken fast überhaupt nicht und erreichen dadurch in großer Zahl die Erdoberfläche. Leider lassen sie sich so auch nur sehr schwer detektieren und können mit normalen Detektoren nicht nachgewiesen werden.

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2.13)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.14)$$

Kapitel 3

Das Auger Experiment

3.1 Auger South

Wie die Abbildung 2.2 zeigt, verringert sich der Teilchenfluss bei sehr hohen Energien extrem. So wird für eine Energie von 100 EeV nur noch ein Teilchen pro Quadratkilometer pro Jahrhundert erwartet. Daher kann in solchen Energiebereichen nicht mehr das primäre Teilchen mit Hilfe von z.B. Ballons oder Satelliten gemessen werden, da diese nur eine kleine Fläche abdecken können und im Falle des Ballons nur ein paar Wochen Daten nehmen können. Daher wird dazu übergegangen, statt in großer Höhe das Primärteilchen zu detektieren, auf der Erdoberfläche die Sekundärteilchen zu messen und aus diesen Ergebnissen die Energie und die Art des Primärteilchens zu rekonstruieren. Mit dieser Methode können große Detektoren gebaut werden und somit auch höchstenergetische Teilchen mit einer Rate von mehreren Ereignissen im Jahr gemessen werden.

Auch das Pierre-Auger-Experiment verwendet diese Messtechnik. Es besteht eigentlich aus zwei Observatorien, eines auf der Südhalbkugel und eines auf der Nordhalbkugel. Der Bau auf der Südhalbkugel ist fast abgeschlossen, der Versuchsaufbau auf der Nordhalbkugel ist noch in Planung.

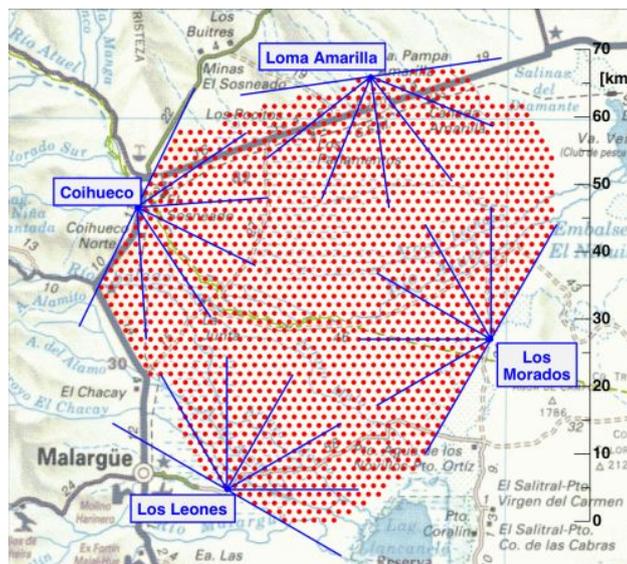


Abbildung 3.1: Geografische Lage der Detektoren des Auger South Observatoriums in Argentinien [augdel]

Das Auger South Observatory befindet sich in der Nähe der Stadt Malargüe in der Provinz Mendoza in Argentinien ($35,2^\circ$ S $69,5^\circ$ W). Es liegt im Hochland der argentinischen Pampa auf etwa 1400 m NN. Ziel des Experiments ist es, die Energie und chemische Komposition der Primärteilchen sehr genau zu bestimmen. Man erhofft sich dadurch, mehr

über die Quellen der kosmischen Strahlung zu erfahren und die Beschleunigungsmechanismen des Universums zu verstehen. Diese sind in der Lage, Teilchen auf eine Energie zu beschleunigen, die etwa 10 Millionen mal höher ist als die bisher vom Menschen bei Teilchenexperimenten maximal erreichte Energie. Dafür werden beim Auger Experiment zwei Techniken zur Sekundärteilchenmessung, nämlich Surface Detektoren und Fluoreszenzdetektoren, die im Folgenden beschrieben werden, kombiniert. Diese Hybridanlegung des Experiments und die enorme Fläche von 3000 km^2 ermöglichen dem Pierre Auger Experiment Messungen der höchsten Energien mit hoher Genauigkeit.

3.1.1 SD - Surface Detektoren

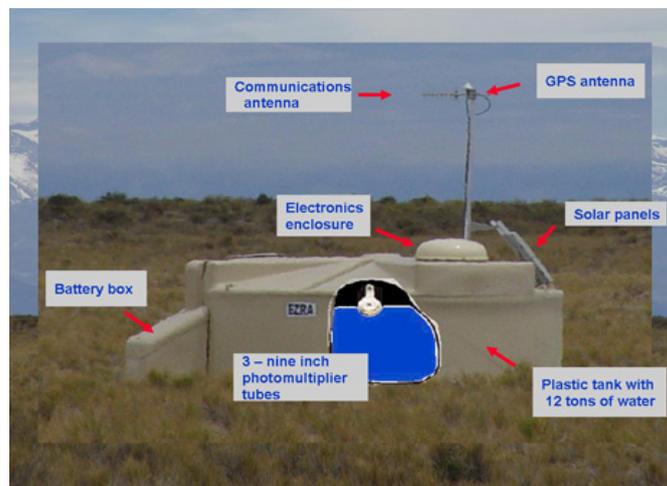


Abbildung 3.2: Foto eines Surface Detektor Tanks samt Komponenten [augorg]

Den ersten Teil des Experiments bilden 1600 Surface Detektoren, die jeweils im Abstand von 1500 m in einem gleichseitigen Dreieck positioniert sind und dadurch eine Fläche von 3000 km^2 abdecken. In Abbildung 3.1 sind sie durch die roten Punkte dargestellt. Ein Surface Detektor besteht aus einem „kuhsicheren“ Plastiktank, gefüllt mit 12 t ultra reinem destilliertem Wasser, einer Radioantenne, einer 24 V Batterie und einem Solarpaneel. Dadurch ist jeder Detektor autark und muss nicht mit Strom von außen versorgt werden. Im Deckel sind drei Photo Multiplier Tubes (PMT) mit jeweils 9 in (rund 23 cm) Durchmesser symmetrisch angebracht.

Dringt ein geladenes, hochenergetisches Teilchen mit Geschwindigkeit $v \approx c$ in das Wasser ein, so bewegt es sich dort mit mehr als der Mediumlichtgeschwindigkeit. Dadurch bildet sich eine Art elektromagnetische Front aus und es wird Cherenkov Licht abgestrahlt, vergleichbar mit dem Überschallknall bei z.B. Flugzeugen. Diese Photonen werden von den Photomultipliern aufgefangen und in elektrische Pulse umgewandelt. Die Höhe des Pulses ist proportional zur Anzahl der Teilchen, die den Detektor durchflogen haben und fast unabhängig von deren Energie. Die Ergebnisse werden via Funk an die Basisstation übertragen. Es ergibt sich ein zweidimensionales Bild der angesprochenen Tanks mit Signalhöhe und Ankunftszeit der Teilchen. Daraus kann der Schauer lateral auf Bodenniveau rekonstruiert und der Einfallswinkel des Primärteilchens bestimmt werden. Aus dem S_{1000} -Wert, der rekonstruierten Signalstärke in einem Abstand von 1000 m von der Schauerachse, kann die Energie des Primärteilchens mit einem Fehler von ca. 22% bestimmt werden. Die Surface Detektoren laufen 24 Stunden am Tag, 7 Tage die Woche. Es werden also durchgehend Daten genommen.

3.1.2 FD - Fluorescence Detektoren

Der zweite Teil des Experiments wird von den Fluorescence Teleskopen gebildet. Die blauen Punkte in Abbildung 3.1 entsprechen den Teleskopen, die blauen Linien deren Sichtbereich. Es gibt vier Teleskopstationen die jeweils aus sechs Teleskopen bestehen - insgesamt also 24. Die Teleskope decken sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung einen Winkelbereich von 30° ab.



Abbildung 3.3: Fluorescence Detektor Teleskop Station bei Los Leones [augde]

Schauerpartikel regen beim Durchfliegen der Atmosphäre die Stickstoffatome an, die dadurch zum fluoreszieren gebracht werden. Dieses Fluoreszenzlicht kann von den Detektoren bei klaren, dunklen mondlosen Nächten gesehen werden und damit ein longitudinales Schauerprofil erstellt werden. Aus diesem Grund wurde das Auger South Observatory in der argentinische Pampa gebaut, da dort die Luft sehr rein und nicht mit Abgasen verschmutzt ist und kaum Streulicht von größeren Städten vorhanden ist. Trotzdem können nur in etwa 10-15% der Zeit Daten aufgenommen werden. Durch die Daten der Fluoreszenzteleskope kann die Energie der Primärteilchen bestimmt werden und somit kann mit Ereignissen, die sowohl SD als auch FD aufgenommen haben (siehe Abbildung 3.4), ein Detektor geeicht werden.

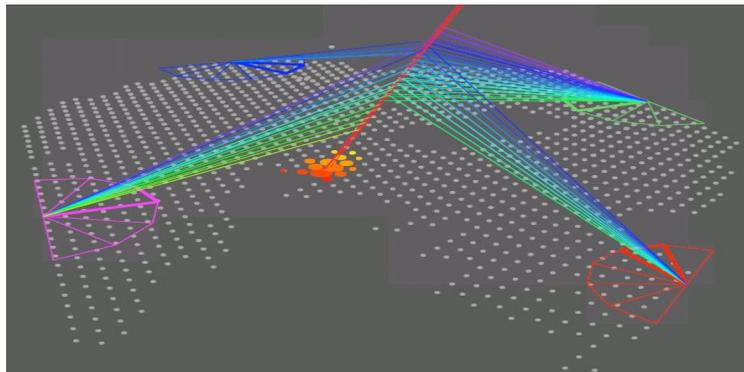


Abbildung 3.4: Zentrales Ereignis, das von SD und FD detektiert wurde [augde]

3.2 Die Erweiterungen

Ein gesehenes Signal in mehreren SD kann nur dann als Ereignis rekonstruiert werden, wenn ein Tank und mindestens zwei weitere Tanks in direkter Nachbarschaft gleichzeitig ein Signal geben. Dadurch soll verhindert werden, dass Streuteilchen, die ihren Ursprung nicht in der kosmischen Strahlung haben, als Ereignisse detektiert werden. Beim vorgegebenen Abstand der Tanks ergibt sich eine Triggereffizienz von mindestens 99% bei einer

Minimalenergie von etwa $10^{18,5}$ eV für Protonen bzw. etwas weniger (0,5 EeV) für Eisenkerne. Um die benötigte Energie zum Triggern zu verringern, müsste der Abstand der Tanks verkleinert werden.

Zur Bestimmung der chemischen Komposition der kosmischen Strahlung ist es von Interesse, den Anteil an Myonen im Schauer zu bestimmen. Da schwere Ionen (z.B. Eisen) aus vielen Nucleonen bestehen, haben sie eine höhere Wahrscheinlichkeit mit einem Target in der Atmosphäre zu wechselwirken und z.B. Pionen zu bilden (Gleichungen 2.7, 2.8). Schauer mit Eisenprojektil entwickeln sich daher höher in der Atmosphäre als die mit einem Proton als Projektil. Im Verlauf eines Schauers verlieren Elektronen u.a. durch Ionisation Energie. Dadurch wird ein Teil der Elektronen niederenergetisch und kann gestoppt werden. Der Energieverlust für Myonen ist dagegen sehr gering, sodass die Anzahl der Myonen nur sehr wenig abnimmt. Aus diesem Grund wird der Anteil an Myonen für ein Eisenprojektil auf Bodenhöhe größer sein als für ein Proton. Durch die Bestimmung des Myonen-Elektronen-Verhältnisses könnte also auf die Art des Primärteilchens zurückgeschlossen werden.

Daher werden einige Erweiterungen durchgeführt.

3.2.1 HEAT

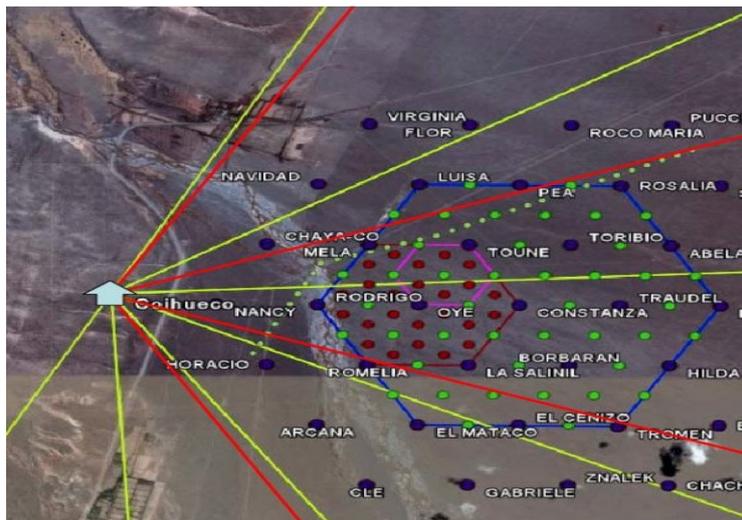


Abbildung 3.5: Lage der AMIGA Unitary Cell und der HEAT Teleskope [augde]

HEAT steht für High Elevation Auger Telescope. Es ist geplant, beim Teleskop in Coihueco drei weitere Teleskope aufzubauen (mit roten Linien in Abbildung 3.5 dargestellt). Diese sollen über den ursprünglichen Teleskopen angebracht werden und den polaren Winkelbereich von 28° bis 58° untersuchen. Somit können Schauer in größerer Höhe beobachtet werden. Da in den Höhen auch schwächeres Fluoreszenzlicht gesehen werden kann, ist es möglich, auch leuchtschwächere energieärmere Schauer zu untersuchen. Dies verringert die untere Grenze der beobachtbaren Energie auf etwa 0,1 EeV. Dadurch wird es möglich, das 2. Knie und den Knöchel zu untersuchen und es entsteht ein Überlapp mit dem Messbereich von KASCADE Grande, durch den die Messwerte verglichen werden können (siehe Abbildung 2.2).

3.2.2 AMIGA

Die zweite geplante Erweiterung stellt AMIGA - Auger Muons and Infill for the Ground Array - dar. AMIGA besteht aus zwei Teilen. Der eine ist eine Verringerung der Gitterweite für einen Teil des Ground Arrays. Es werden 85 neue Tanks zwischen die bestehenden

gebaut. Dadurch entsteht auf einer Gesamtfläche von $23,5 \text{ km}^2$ eine Zelle, deren Detektorabstand nur noch 750 m bzw. 433 m beträgt. Durch die Verringerung des Tankabstandes erreicht AMIGA eine Triggereffizienz von 99% bereits bei $0,1 \text{ EeV}$, was auch dem Energiebereich von HEAT entspricht. Somit kann auch mit AMIGA das 2. Knie und der Knöchel untersucht werden und KASCADE Grande Daten können zum Vergleich benutzt werden. Die Elementarzelle ist 6 km vom Cihueco Teleskop entfernt zentriert und wird somit von HEAT überblickt.

Der zweite Teil von AMIGA ist ein Myonenzähler. Dafür werden jeweils vier 10 m^2 große Szintillatormodule in unmittelbarer Nähe der neuen Tanks etwa 3 m tief im Boden vergraben. Ein Modul besteht aus 64 Fasern die jeweils 400 cm lang, $4,1 \text{ cm}$ breit und 1 cm hoch sind. Die Lichtsignale werden mit PMTs in elektrische Signale umgewandelt, ausgelesen und per Radio weitergeleitet. In drei Metern Tiefe sind alle nichtmyonischen Bestandteile des Schauers (bis auf Neutrinos, die gar nicht detektiert werden) bereits absorbiert, sodass jedes Ereignis, das ein Szintillator aufnimmt, von einem Myon stammt. Zusammen mit den Ergebnissen des Tanks kann so der Myonenanteil bestimmt werden. Aus den Werten mehrerer Tanks lässt sich dann $N_\mu(600)$, die Myonenrate in 600 m Abstand von der Schauerachse, berechnen. Mit Hilfe des aus den Tankdaten und FD-Daten bestimmten X_{max} , der atmosphärischen Tiefe bei der das Schauermaximum lag, lässt sich auf die Art des Primärteilchens schließen. Dabei ist die Bestimmung des Primärteilchens größtenteils unabhängig vom benutzten hadronischen Wechselwirkungsmodell.

3.2.3 Der Aufbau des Myonenzählers

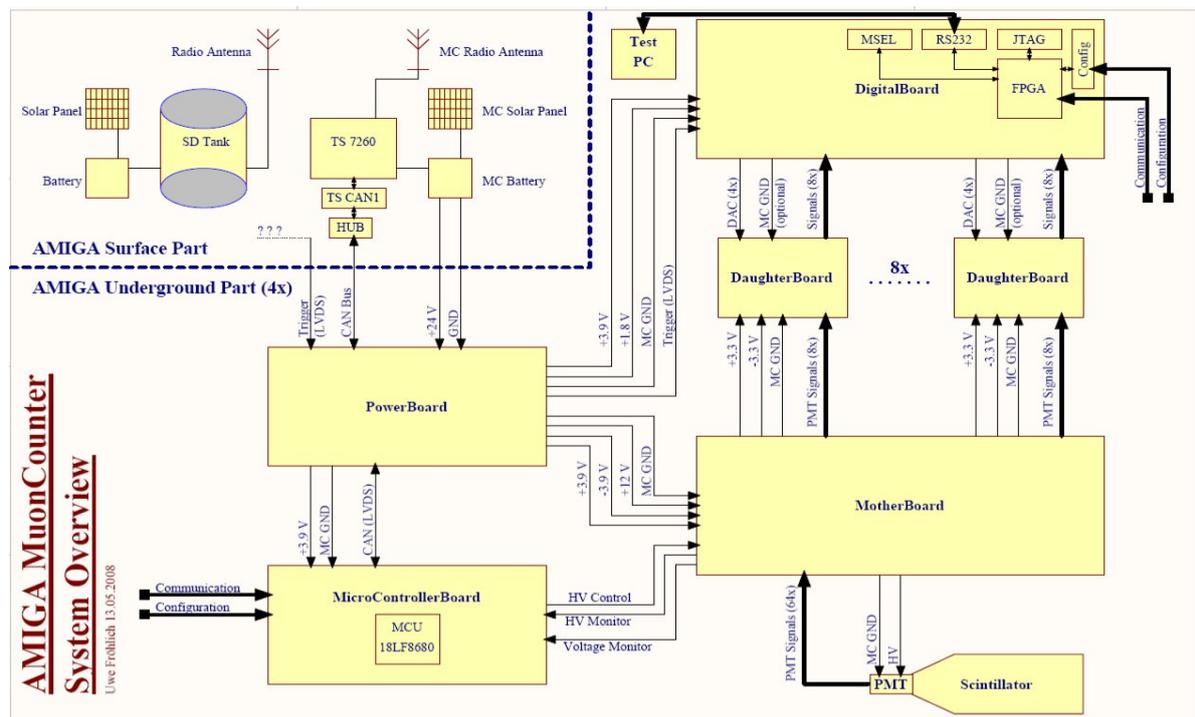


Abbildung 3.6: Modularer Aufbau des Myonenzählers

Quelle: Uwe Fröhlich Stand: 13.05.2008

In Abbildung 3.6 ist die Gesamtstruktur des Myonenzählers samt seiner Steuerungs- und Auslese-Elektronik dargestellt. Er ist aus einem oberirdischen und einem unterirdischen Teil aufgebaut. Oberhalb der Erdoberfläche befindet sich die Stromversorgung. Diese besteht aus einem Solar-Paneel und einem 24 V -Akku. Des Weiteren existiert eine Radioantenne. Diese dient zum Versenden der genommenen Daten an und dem Empfangen von Befehlen von der Basisstation. Beide Systeme sind von denen des Tanks unabhängig.

Lediglich die Definition des elektrischen Erdniveaus (Ground GND) wird vom Tank übernommen.

Der unterirdische Teil besteht aus dem Szintillator, der die Signale gibt und fünf verschiedenen Sorten von Elektronik-Karten.

Das **Power Board** wird mit der Betriebsspannung von 24 V, Ground, Trigger und CAN-Bus von der Oberfläche versorgt. Es entkoppelt den Myonenzählerground (MC GND) vom Tankground und versorgt Mother Board, Digital Board und MC-Board mit den jeweils benötigten Versorgungsspannungen. Trigger und CAN-Bus Signal werden an das MC-Board weitergeleitet.

Das **Microcontroller-Board (MC-Board)** ist für die Kommunikation zwischen Außenwelt (Basisstation) und Digital Board zuständig. Es leitet Befehle an den FPGA auf dem Digital Board weiter und konfiguriert diesen damit. Des Weiteren werden die Messdaten vom Digital Board und Informationen über die Hochspannungsversorgung (HV) vom Mother Board an das MC-Board gesandt und von dort an die Basisstation weitergeleitet.

Das **Mother Board** stellt die Hochspannung für die PMT-Versorgung bereit, erhält die PMT-Signale der 64 Kanäle und teilt diese auf die acht Daughter Boards auf. Es stellt auch die Versorgungsspannung für die Daughter Boards bereit.

Die **Daughter Boards** verarbeiten jeweils die digitalen Signale von acht Kanälen des PMT. Diese werden erst verstärkt und dann mit einem Referenzwert verglichen. Die Ausgabe des Daughter Boards ist ein digitales Signal, welches ein oder kein Myon in einem Kanal repräsentiert

Das **Digital Board** erhält die digitalen Signale der acht Daughter Boards und verarbeitet diese weiter, um sie an das MC-Board weiterleiten zu können. Dabei wird eine erste Triggerentscheidung vorgenommen. Es liefert auch die Einstellung für das Referenzsignal für die Daughter Boards.

Kapitel 4

Das Daughter Board

4.1 Grundlegender Messaufbau

In Abbildung 4.1 ist ein Blockdiagramm der Messungen aufgezeichnet. Es enthält alle für den Betrieb und die Messung genutzten Geräte. Je nachdem welche Art von Eingangssignal benötigt wurde, wurde eine der vier Eingangsquellen genutzt. Für Experimente, bei denen eine Gleichspannung am Eingang benötigt wurde, wurde mit einer der beiden Gleichspannungsquellen (Isotech IPS2303D, Agilent E3648A) gearbeitet. Für Messungen mit Sinus-, Dreieck- oder Doppelpulssignalen mit einer Maximalfrequenz von 80 MHz wurde der Waveformgenerator (Agilent 33250A) genutzt. Für die Erzeugung von Rechteckpulsen und Sinussignalen mit einer Frequenz von mehr als 80 MHz stand der Pattern-Pulsegenerator (Agilent 81110A) zur Verfügung. Für die Bestimmung des jeweiligen Ausgangswertes wurden je nach Messung ein digitales Oszilloskop (HP Infinium 54845A) mit angeschlossenerm Tastkopf (Probe) und/oder die digitalen Voltmeter benutzt. Alle verwendeten Komponenten wurden bei einer Messung mit demselben Groundniveau genutzt. Für die Spannungsversorgung des Daughter Boards und zum Bereitstellen der Thresholdspannung standen zwei weitere Gleichspannungsquellen (Agilent E3648A, Isotech IPS2303D) zur Verfügung.

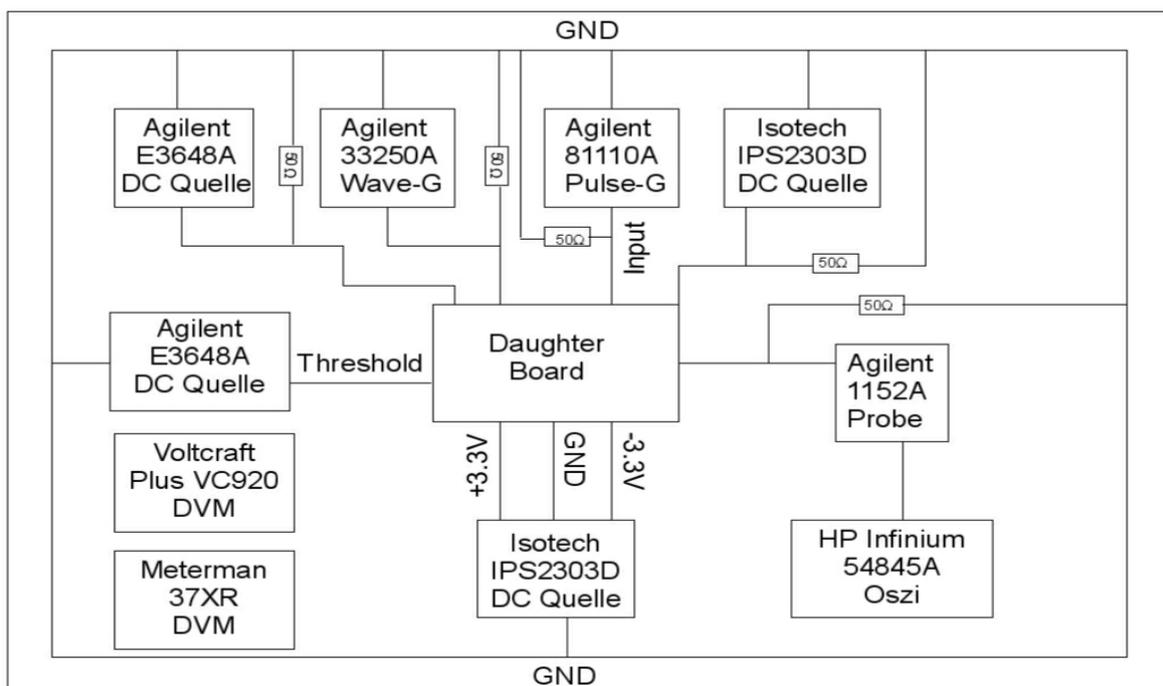


Abbildung 4.1: Blockdiagramm zur Darstellung aller genutzter Apparaturen

Abbildung 4.2 zeigt die grundlegende Verschaltung des Daughter Boards. Sie besteht im Wesentlichen aus einem invertierenden Operationsverstärker (OpAmp), einem Comparator, einem Digital-Analog-Converter (DAC) und Filtern für die Spannungsversorgungen. Das negative PMT-Signal wird an den Eingang angelegt. Durch den OpAmp wird es verstärkt und invertiert (um 180° gedreht). Das verstärkte Signal wird im Comparator mit einer vom DAC gelieferten Referenzspannung verglichen. Liegt das Signal über der Referenz, so liegt am Ausgang 0 V an, liegt es unter der Referenz, so liegt am Ausgang die positive Versorgungsspannung an. OpAmp, Comparator und DAC werden mit $\pm 3,3$ V Versorgungsspannung betrieben.

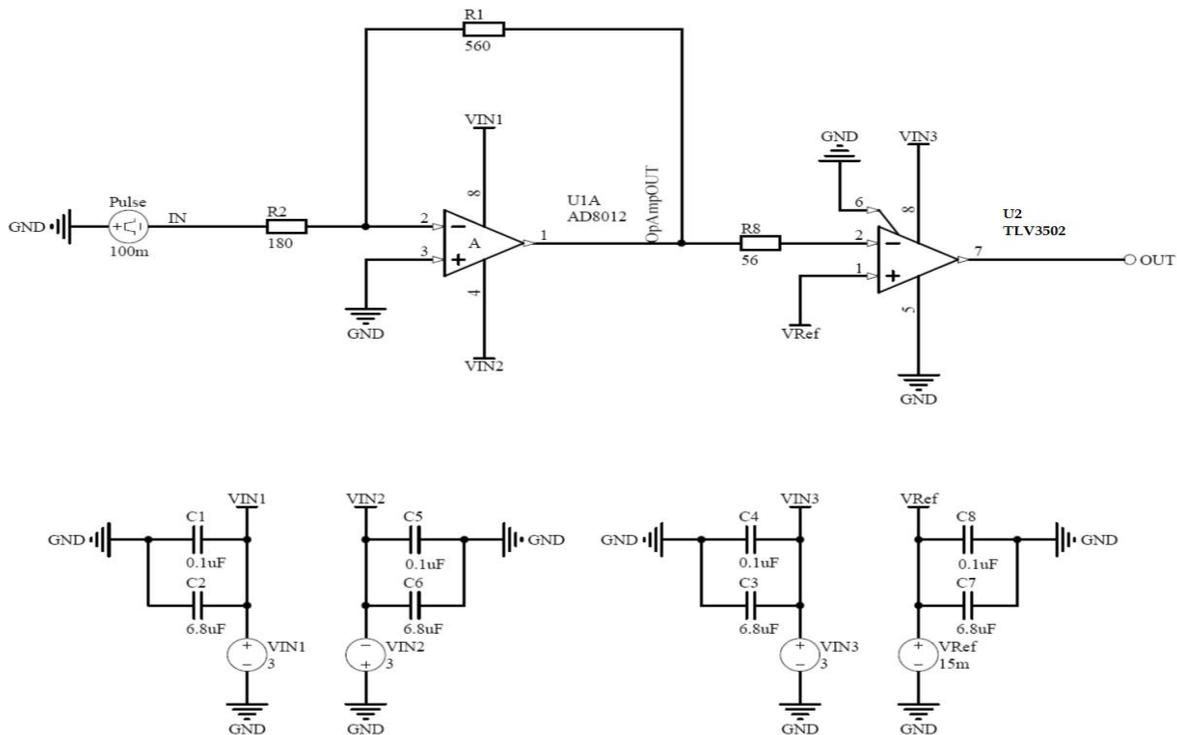


Abbildung 4.2: Schaltbild des Daughter Boards mit Größenangaben der verwendeten Komponenten
 Quelle: Uwe Fröhlich Stand: 27.05.2008

4.2 Die Verstärkung eines Operationsverstärkers

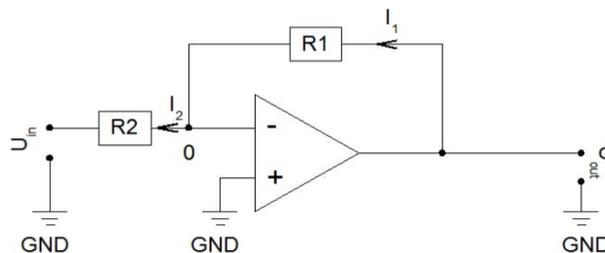


Abbildung 4.3: Schaltbild eines invertierenden Operationsverstärkers

In Abbildung 4.3 ist die Verschaltung eines rückgekoppelten, invertierenden Operationsverstärkers zu sehen, wie er auf dem Daughter Board verwendet wird. Nach der goldenen Regel versucht ein Operationsverstärker, die Spannungsdifferenz an

seinen Eingängen auf 0 V zu halten. Durch den Operationsverstärker fließt kein Strom. An den Eingang der Schaltung (U_{in}) wird eine negative Spannung angelegt. Dadurch ergeben sich für die Ströme:

$$I_1 = I_2 \quad (4.1)$$

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes und der Definition des Groundpotentials auf 0 V ergeben sich für die beiden Spannungen:

$$U_{in} = -R_2 I_2 \quad (4.2)$$

$$U_{out} = R_1 I_1 \quad (4.3)$$

Mit Gleichung 4.1 ergibt sich für die Verstärkung eines idealen invertierenden Operationsverstärker mit Rückkopplung:

$$-\frac{U_{out}}{U_{in}} = G = \frac{R_1}{R_2} \quad (4.4)$$

4.2.1 DC-Verstärkung

Für die Bestimmung der Gleichstromsignalverstärkung wurde mit Hilfe der Gleichspannungsquelle eine Gleichspannung an den Eingang angelegt und die Signalhöhe variiert. Die gegebene Eingangssignalhöhe wurde mit Hilfe eines DVM am Vorwiderstand (R_2), die Ausgangsspannung am Ausgangspin des OpAmps gemessen.

Zuerst wurde die Messung für vier verschiedene Vorwiderstände (aufgelistet für halbes Board in Tabelle 4.1 auf Seite 26) und damit vier verschiedene Verstärkungsverhältnisse auf einer Seite eines Daughter Boards durchgeführt, dessen Rückseite beschädigt war. Danach wurde die Messung mit einem vollständigen Daughter Board mit acht Kanälen wiederholt. Hierfür wurde auf alle acht Kanäle ein 180 Ω Vorwiderstand aufgelötet. Die genauen Werte können Tabelle 4.1 entnommen werden. Dieser soll auch auf den Karten zum Einsatz kommen, die in Argentinien verwendet werden.

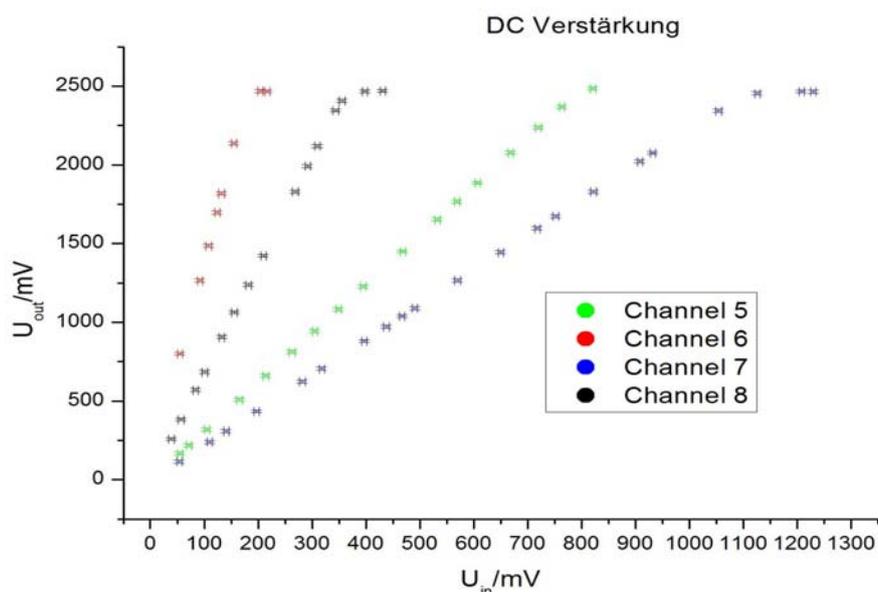


Abbildung 4.4: Ausgangsspannungsverlauf für vier verschiedene Verstärkungen mit DC-Signalen

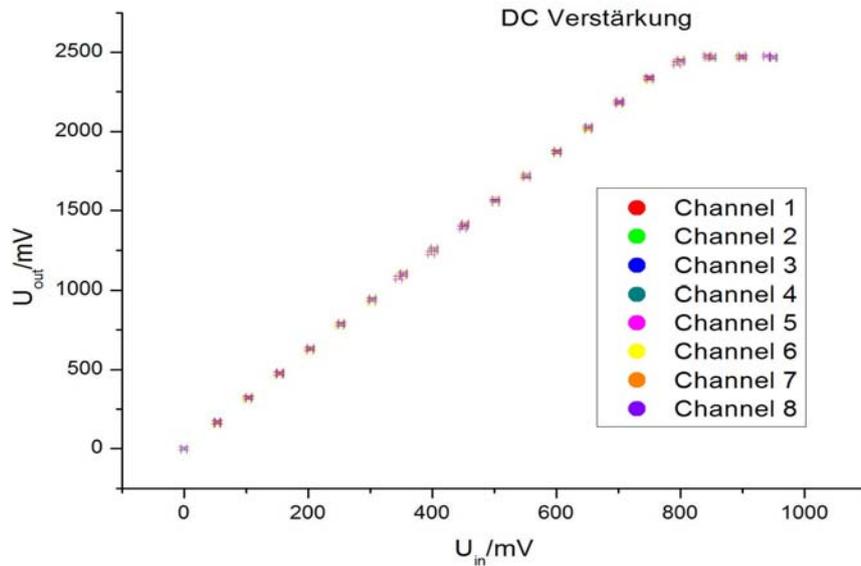


Abbildung 4.5: Ausgangsspannungsverlauf für acht gleiche Kanäle mit DC-Signalen

In den Abbildungen 4.4 und 4.5 sind die kompletten Kurvenverläufe der Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung aufgetragen. Es ist jeweils der Betrag der Eingangsspannung aufgetragen. Der eigentlich gemessene Wert ist negativ. Abb. 4.4 zeigt den Verlauf für das halbe Board, auf das vier verschiedene Vorwiderstände aufgelötet wurden, Abb. 4.5 zeigt den Graphen für das komplette Board mit acht identischen Vorwiderständen (Abweichung kleiner 0,5%). Die Messung ergab einen proportionalen Bereich, in dem die Ausgangsspannung, wie theoretisch erwartet, linear mit der Eingangsspannung anwächst. Bei einer Versorgungsspannung von $\pm 3,3\text{ V}$ ergab sich, dass die Ausgangsspannung bei etwa 2,5 V ein Plateau erreicht und nicht weiter ansteigt. Dies ist auf die Sättigung des Operationsverstärkers zurückzuführen. Im proportionalen Bereich folgt mit Gleichung 4.4:

$$U_{out} = -GU_{in} \quad (4.5)$$

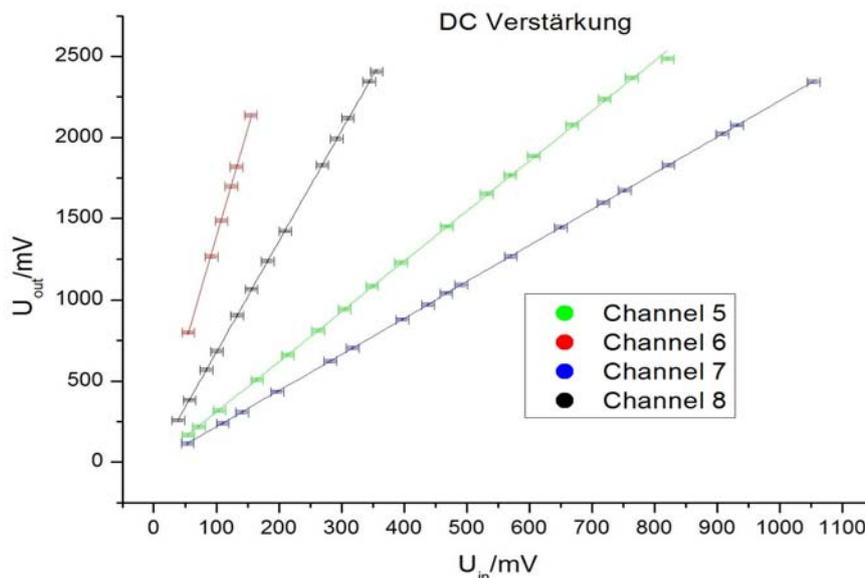


Abbildung 4.6: Fit des proportionalen Bereichs für vier verschiedene Verstärkungen mit DC-Signalen

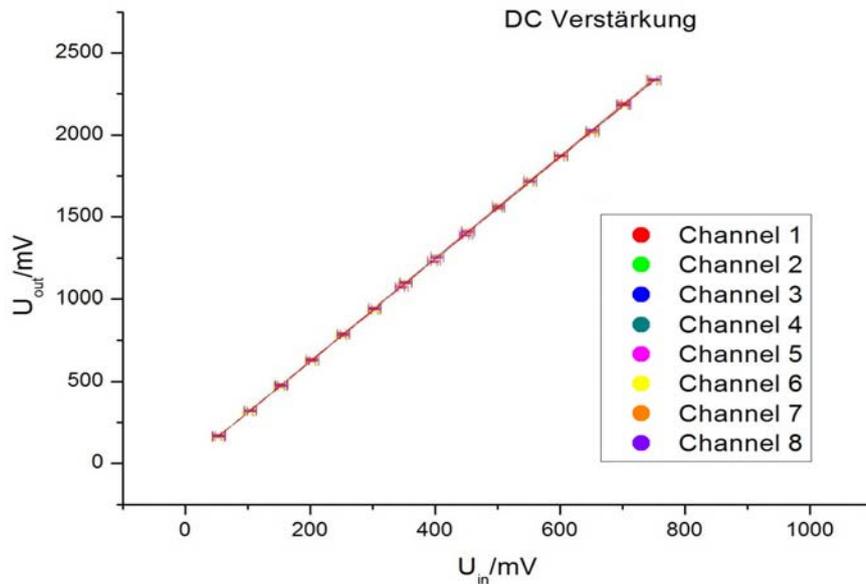


Abbildung 4.7: Fit des proportionalen Bereichs für das komplette Board mit DC-Signalen

In den Abbildungen 4.6 und 4.7 sind die Messdaten und die zugehörigen Geradenfits aufgetragen. Für die Berechnung wurden die Messwerte bis 95% der Sättigungshöhe verwendet, also $U_{out} < 2,35\text{ V}$. Durch lineare Regression lässt sich aus den gemessenen Eingangs- und Ausgangsspannungen die Verstärkung bestimmen. Abb. 4.6 zeigt die Fits für das halbe, Abb. 4.7 die für das komplette Board, jeweils durchgeführt für jeden einzelnen Kanal. Die Ergebnisse der Fits sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Die Fehler der gemessenen Eingangs- und Ausgangsspannungen ergeben sich aus Abschätzung zu 5 mV für U_{in} bzw. 10 mV für U_{out} . Dieser liegen die Schwankungen der Messgeräte und deren Messgenauigkeit bzw. Messbereich zugrunde.

4.2.2 AC-Verstärkung

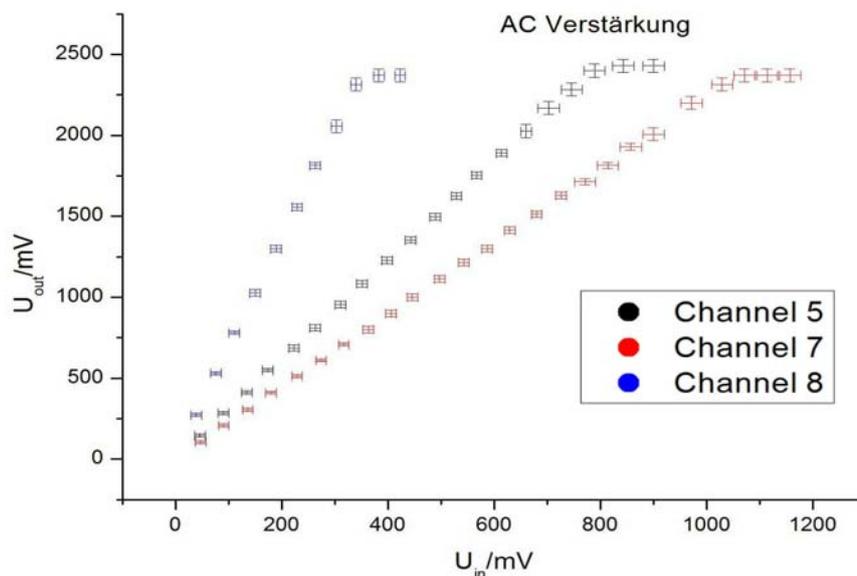


Abbildung 4.8: Ausgangsspannungsverlauf für drei verschiedene Verstärkungen mit AC-Signalen

Für die Messung der Wechselstromsignalverstärkung wurde mit Hilfe des Waveformgenerators ein 1 kHz Sinus-Signal an den Eingang des Daughter Boards gelegt und die Signalhöhe verändert. Die Eingangsspannung wurde am Vorwiderstand abgegriffen und mit dem Oszilloskop vermessen. Das Ausgangssignal wurde am Ausgangspin des OpAmps gemessen.

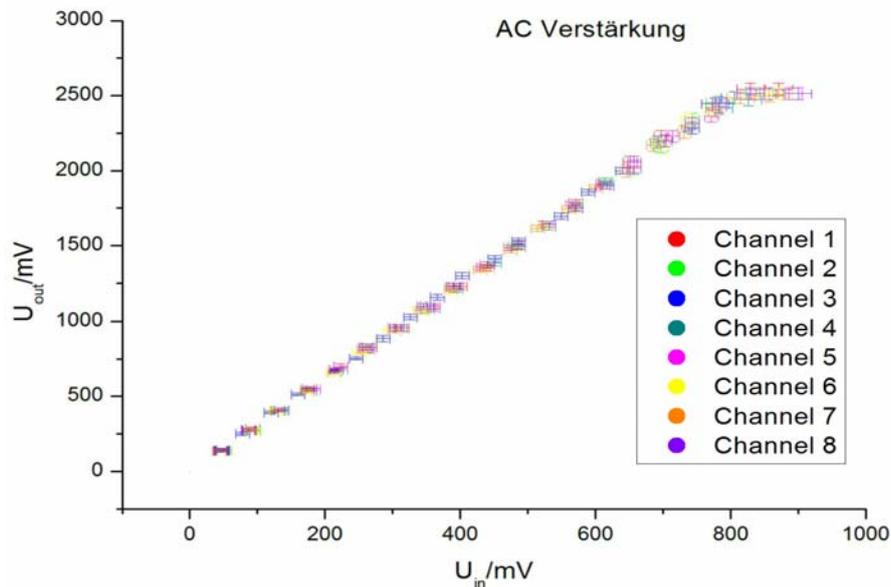


Abbildung 4.9: Ausgangsspannungsverlauf für acht gleiche Kanäle mit AC-Signalen

Die Messung wurde einmal für drei verschiedene Verstärkungen am halben Daughter Board durchgeführt und dann für ein komplettes Board wiederholt. Der vierte Kanal des halben Boards (Channel 6) wurde zwischen der Messung der DC-Verstärkung und der AC-Verstärkung zerstört. Daher konnten keine weiteren Messungen mit diesem Kanal gemacht werden.

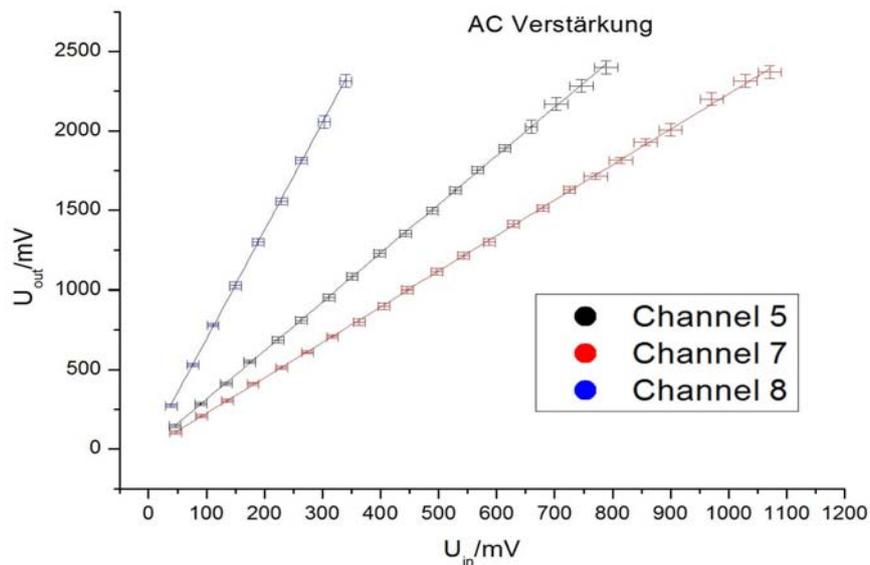


Abbildung 4.10: Fit des proportionalen Bereichs für drei verschiedene Verstärkungen mit AC-Signalen

In den Abbildungen 4.8 und 4.9 ist das Verhalten der Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung aufgetragen. Hierbei gehört die erste Abbildung zum halben Board mit drei verschiedenen Verstärkungen, die zweite zum kompletten Board. Auch in

dieser Messung ergab sich ein proportionaler Bereich, der sich dank etwas höherer Versorgungsspannung ($\pm 3,35\text{ V}$) bis zum Plateaubereich von $2,55\text{ V}$ erstreckt, welcher auf das Sättigungsverhalten zurückzuführen ist. Der Kurvenverlauf ähnelt dem, der mit DC-Signalen aufgenommen wurde, sehr stark.

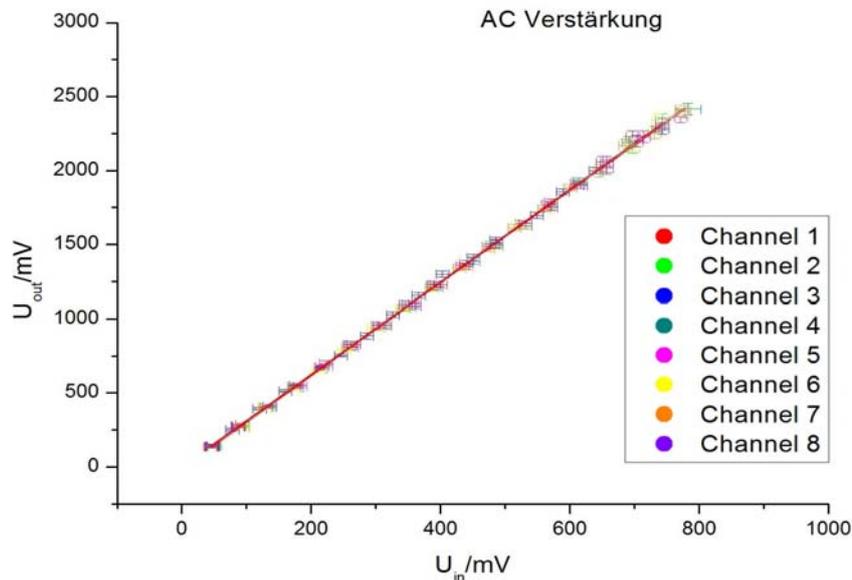


Abbildung 4.11: Fit des proportionalen Bereichs für das komplette Board mit AC-Signalen

In den Abbildungen 4.10 und 4.11 sind die Geradenfits aufgetragen. Abb. 4.10 gehört zum halben Board, Abb. 4.11 zum kompletten Board. Es ergibt sich die Verstärkung nach Gleichung 4.5 durch lineare Regression. Für die lineare Regression wurden Werte bis 95% der Sättigungsspannung, also $2,4\text{ V}$, genutzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Die Fehler ergeben sich aus Schätzungen, denen die jeweiligen Anzeige- und Messbereiche des Oszilloskops zugrunde liegen. Es wurde mit den vom Oszilloskop bereitgestellten Markern gemessen, die sich in einem fest definiertem Gitterabstand verschieben lassen. Für größere Messbereiche ergibt sich dadurch eine größere Differenz zwischen zwei Gitterpunkten und damit ein größerer Fehler. Die Fehler erstrecken sich über einen Bereich von 10 mV bis 40 mV .

4.2.3 Zusammenfassung

In Tabelle 4.1 sind für die gemessenen Kanäle jeweils die beiden Widerstände, das nach Gleichung 4.4 daraus errechnete Verstärkungsverhältnis und die gemessenen Verstärkungen samt Fehler (1σ) angegeben. Alle gemessenen Werte (sowohl DC wie auch AC) stimmen innerhalb von 3σ mit den theoretisch erwarteten überein. Für alle Messungen bis auf Kanal 6 mit der höchsten Verstärkung, für den die Anzahl der Messwerte sehr klein war, ist ein relativer Fehler kleiner als 1% erreicht worden.

Die Fehler für die gemessenen Widerstände ergeben sich aus dem Auflösungsvermögen des DVM. Für beide Widerstände des kompletten Boards und für R_2 des halben Boards ergibt sich ein Fehler von $0,1\ \Omega$. Beim halben Board wurde bei der Messung von R_1 auf das Bestimmen der Nachkommastelle verzichtet. Dadurch weisen diese Widerstände einen Fehler von $1\ \Omega$ auf. Aus diesen beiden Fehlern wird mit Fehlerfortpflanzung der Fehler für die theoretische Verstärkung bestimmt.

DB	KANAL NR.	R_1/Ω	R_2/Ω	$G_{Theorie}$	G_{DC}	G_{AC}
halbes Board	5	560	180,3	$3,106 \pm 0,006$	$3,089 \pm 0,010$	$3,06 \pm 0,02$
	6	555	40,3	$13,77 \pm 0,04$	$13,38 \pm 0,13$	-
	7	556	250,2	$2,222 \pm 0,004$	$2,231 \pm 0,008$	$2,231 \pm 0,013$
	8	559	81,9	$6,825 \pm 0,015$	$6,82 \pm 0,03$	$6,80 \pm 0,07$
komplettes Board	1	562,3	179,4	$3,134 \pm 0,002$	$3,117 \pm 0,012$	$3,14 \pm 0,02$
	2	560,9	180,3	$3,111 \pm 0,002$	$3,108 \pm 0,012$	$3,15 \pm 0,02$
	3	564,0	180,0	$3,133 \pm 0,002$	$3,109 \pm 0,012$	$3,12 \pm 0,02$
	4	561,7	179,8	$3,124 \pm 0,002$	$3,122 \pm 0,012$	$3,11 \pm 0,02$
	5	560,9	179,8	$3,120 \pm 0,002$	$3,117 \pm 0,012$	$3,11 \pm 0,02$
	6	558,3	179,8	$3,105 \pm 0,002$	$3,108 \pm 0,012$	$3,11 \pm 0,02$
	7	563,5	179,8	$3,134 \pm 0,002$	$3,109 \pm 0,012$	$3,12 \pm 0,02$
	8	559,7	179,9	$3,111 \pm 0,002$	$3,122 \pm 0,012$	$3,09 \pm 0,02$

Tabelle 4.1: Vergleich der Messwerte der Verstärkungsverhältnisse mit den theoretisch erwarteten

Im späteren Verlauf werden Messungen für drei verschiedene Verstärkungen gemacht. Dies erfolgt für die Kanäle fünf, sieben und acht auf dem halben Board. Diese weisen dann immer die Verstärkungen auf, die in dieser Tabelle angegeben sind.

4.3 Das Frequenzverhalten

Eine weitere wichtige Kenngröße eines Operationsverstärkers ist sein Verhalten in Abhängigkeit der Frequenz des Eingangssignals. Als Maß für das Frequenzverhalten eines OpAmps wird häufig die Bandbreite (f_{-3dB}) benutzt. Ein Operationsverstärker lässt sich dabei vereinfacht als Tiefpass darstellen, der auf Grund seiner Bauform (pn-Übergang) einen Eingangswiderstand und eine Eingangskapazität aufweist. Daher ist bei ihm die Bandbreite als die Frequenz definiert, bei der noch das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fache der Maximalausgangsspannung anliegt. Dies entspricht -3 dB.

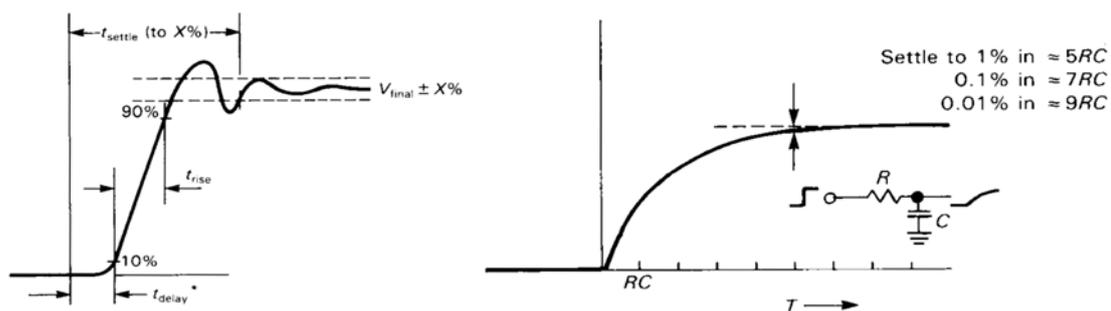


Abbildung 4.12: Zeitverzögerung eines Signals für einen Operationsverstärker (links) und einen RC-Tiefpass (rechts) [Hor89]

Eine weitere Kenngröße ergibt sich aus Bandbreite und Verstärkungsfaktor (Gain G). Für einen Operationsverstärker zeigt sich, dass das Produkt aus Bandbreite und Verstärkungsfaktor eine Konstante für einen bestimmten Verstärkertyp ist. Diese Größe wird als Gain-Bandwidth-Product oder typische Frequenz (f_t) bezeichnet. Gleichung 4.6 zeigt den Zusammenhang:

$$f_t = Gf_{-3dB} \quad (4.6)$$

Abbildung 4.12 veranschaulicht die Wirkung dieses Tiefpasses auf ein angelegtes Signal. Auf der linken Seite ist die Reaktion eines OpAmps auf ein angelegtes Rechtecksignal abgebildet. Die rechte Seite zeigt die Wirkung eines idealen RC-Tiefpasses. Ein Signal kann als Fouriertransformation in eine unendliche Reihe von Sinusfunktionen mit unterschiedlicher Höhe, Frequenz und Phase entwickelt werden.

$$U_{in}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (4.7)$$

Der Tiefpass schneidet die Sinii mit sehr hoher Frequenz ab. Dadurch ergibt sich eine Veränderung des zeitlichen Verlaufs des Pulses. Das Signal wird verzerrt und es wird durch den OpAmp zeitverzögert. Dies ist vor allem für sehr zeitkritische Anwendungen entscheidend. Vor allem bei Pulsen mit Sprung, wie z.B. bei Rechtecken, ergibt sich ein erhebliches Nachschwingen, das als Gibbssches Ringing bezeichnet wird. Die Zeit, die zwischen Beginn des Signals am Eingang bis zum Erreichen eines bestimmten Wertes ($n\%$ des Endwertes) vergeht, lässt sich mit der Zeitkonstante τ berechnen ([Hor89] S.409) und wird als Settle Time bezeichnet. Für diese Rechnung wird der OpAmp als RC-Tiefpass genähert. Man erhält:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{-3dB}} \quad (4.8)$$

Zwischen Settle Time und τ besteht ein linearer Zusammenhang.

$$t_{settle} = x\tau \quad (4.9)$$

Der Faktor vor dem τ lässt sich mit Gleichung 4.10 berechnen (Quelle:[AN359]):

$$x = -2,303 \log_{10}\left(1 - \frac{n}{100}\right) \quad (4.10)$$

Diese Berechnung der Settle Time ist nur eine Näherung. Das Frequenzverhalten eines OpAmp ist komplexer. Daher kann sein Verhalten nicht analytisch gelöst werden. Die berechnete Settle Time ist immer eine untere Grenze und kleiner als die reale. Allerdings stimmt sie in der Größenordnung überein und kann als einfache Abschätzung dienen.

Zur Bestimmung des Frequenzverhaltens des Verstärkers wurde an den Eingang mit Hilfe des Waveformgenerators (bis 80 MHz) und des Pulsegenerators (80-250 MHz) ein Sinussignal angelegt. Der Pulsegenerator konnte kein echtes Sinussignal liefern. Es wurde mittels eines Trapezpulses mit hoher Anstiegszeit ein Sinus simuliert. Dieser war stark sinusähnlich, allerdings nicht vollständig ein Sinus. Es wurde die Signalhöhe am Ausgang des Verstärkers mit dem Oszilloskop vermessen.

Die ersten Messungen wurden mit drei verschiedenen Verstärkungen bis zu einer Frequenz von 80 MHz durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.13 aufgetragen. Auf der x-Achse ist die Frequenz des Sinus in Hertz, auf der y-Achse die Ausgangsspannung in mV gezeigt. Als Signalhöhe wurde am Generator 400 mV peak to peak eingestellt. In vorangegangenen Nutzungen zeigt sich allerdings, dass die Spannung, die der Generator anzeigt, nicht vollständig an dessen Ausgang anliegt. Bei Messungen, bei denen die Eingangsspannung von Bedeutung ist, wurde sie extern explizit gemessen. Da die Absoluthöhe des Eingangssignals hier keine Rolle spielt, wurde sie hier nicht aufgenommen. Der Fehler der Frequenz wurde zu 0 Hz abgeschätzt. Dafür wurde geschaut, wie stark für eine eingestellte Frequenz diese bei Messungen mit dem Oszilloskop schwankte. Die Schwankung war extrem gering und kann vernachlässigt werden. Der Fehler der Ausgangsspannung ist als die Standardabweichung bestimmt worden, welche das Oszilloskop aus der Mittelung für viele Durchläufe ausgab.

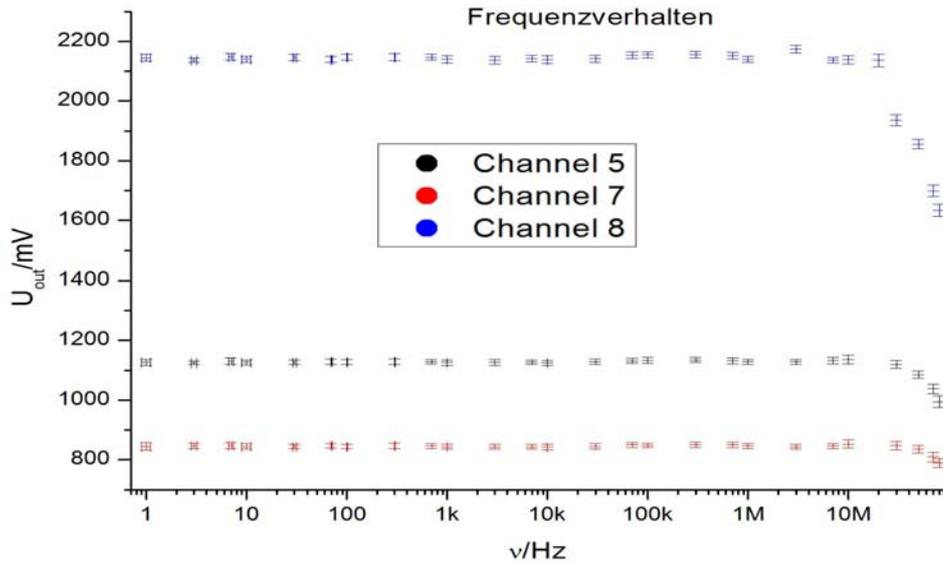


Abbildung 4.13: Das Frequenzverhalten für drei verschiedene Verstärkungen

In Abbildung 4.13 zeigt sich, dass die Ausgangsspannung für einen großen Frequenzbereich konstant bleibt. Erst im Bereich von mehr als 10 MHz fängt sie an einzubrechen. Dabei zeigt sich, dass das Abknicken umso früher beginnt, je höher die Verstärkung ist. Dadurch sollte auch die Bandbreite geringer sein. Dieses Verhalten ist auf die Konstanz der typischen Frequenz zurückzuführen. Nach Gleichung 4.6 muss daher für höhere Verstärkungen die Bandbreite geringer sein. Die Ergebnisse wurden nur mit dem Waveformgenerator aufgenommen. Da die Bandbreite für alle gemessenen Verstärkungen über 80 MHz liegt, kann hier keine Bandbreite bestimmt werden.

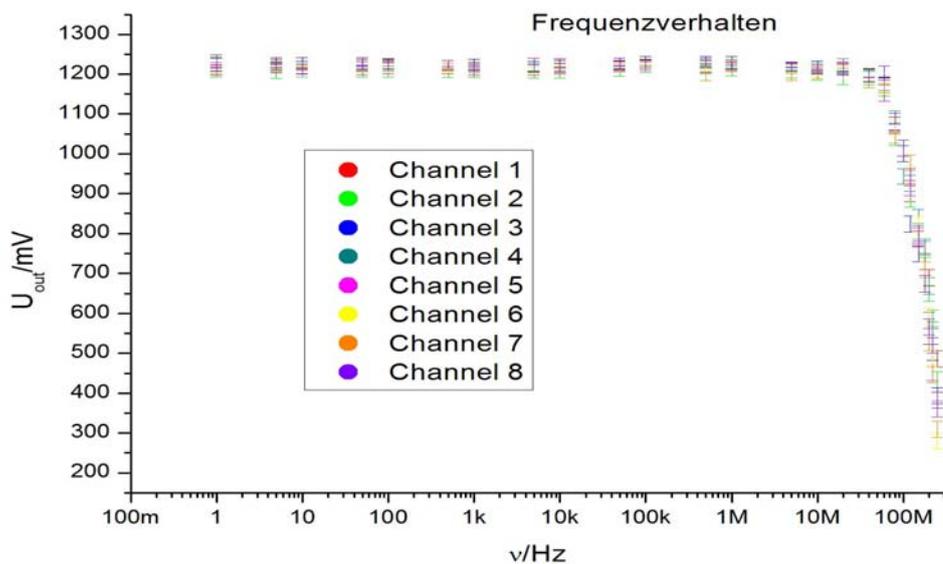


Abbildung 4.14: Das Frequenzverhalten für das komplette Daughter Board

Die Messung wurde mit dem kompletten Daughter Board wiederholt. Diesmal wurde bis 80 MHz mit dem Waveformgenerator gemessen, und dann ein sinusähnliches Signal mit dem Pattern Pulse Generator erzeugt, um Frequenzen bis 250 MHz zu erzeugen. Dadurch kann nun auch die Bandbreite bestimmt werden.

In Abbildung 4.14 ist ein ähnliches Verhalten wie in Abbildung 4.13 zu sehen. Die Bandbreitenbestimmung ist möglich, da bis 250 MHz gemessen wurde. Dafür muss die Maximalausgangsspannung bestimmt werden. Dies geschieht mit einem Fit einer Geraden parallel zur x-Achse an die Messwerte in dem Bereich, wo die Ausgangsspannung noch kein Abknicken zeigt (etwa 10 MHz). Aus diesem Fit wird die Plateauausgangsspannung bestimmt. Daraus wird dann der Wert berechnet, der für die Bandbreitenbestimmung benötigt wird. An diesem Wert wird die Bandbreite abgelesen. Der Fehler von U_{max} ergibt sich durch den Fit, der Fehler für die Bandbreitenspannung aus Fehlerfortpflanzung. Der Bandbreitenfehler wird abgeschätzt und ergibt sich durch die Menge der nutzbaren Messpunkte und durch die Ableseungenauigkeit. Die bestimmten Werte für die Spannungen und die Bandbreite jedes Kanals samt Fehler sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

CHANNEL NR.	U_{max}/mV	U_{-3dB}/mV	f_{-3dB}/MHz
1	1224 ± 3	866 ± 2	136 ± 5
2	1202 ± 2	$849,9 \pm 1,4$	140 ± 5
3	1229 ± 2	$869,0 \pm 1,4$	127 ± 5
4	1221 ± 2	$863,4 \pm 1,4$	138 ± 5
5	1211 ± 2	$856,3 \pm 1,4$	136 ± 5
6	1213 ± 2	$857,7 \pm 1,4$	139 ± 5
7	1214 ± 2	$858,4 \pm 1,4$	138 ± 5
8	1218 ± 2	$861,3 \pm 1,4$	136 ± 5

Tabelle 4.2: Bestimmung der Bandbreite des kompletten Boards

Im Datenblatt des Operationsverstärkers findet sich eine angegebene Bandbreite von 350 MHz bei einer Verstärkung von 1. Auf eine Verstärkung von 3,11 hochgerechnet mit Gleichung 4.6 ergibt sich eine erwartete Bandbreite von rund 115 MHz. Man erkennt, dass alle bestimmten Bandbreiten über der erwarteten liegen. Dies ist möglicherweise damit zu erklären, dass für die Frequenzen über 80 MHz kein echter Sinus verwendet werden konnte. Warum die Signalform eine Rolle bei der Bestimmung spielt wird im nächsten Kapitel erläutert. Untereinander sind die Bandbreiten der einzelnen Kanäle konsistent. Die Bandbreite eines OpAmp bewegt sich um etwa (135 ± 5) MHz herum. Setzt man diese Bandbreite an, so errechnet sich eine Settle Time bis 0,1% des Endwertes nach Gleichung 4.9 mit einem x von 7 zu:

$$t_{settle} = (8,3 \pm 0,3) \text{ ns} \quad (4.11)$$

Im Datenblatt des OpAmp wird für eine Verstärkung von 2 und ein Eingangssignal von 2 V eine Settle Time von 20 ns angegeben. Da eine Verstärkung von 3,11 benutzt wird, sollte die Settle Time etwas höher liegen. Allerdings wurde auch nur mit 400 mV Signalthöhe gemessen, da bei 2 V Eingangsspannung der Operationsverstärker in Sättigung ist. Für ein niedrigeres Signal wird mit einer kürzeren Reaktionszeit gerechnet. Daher scheinen die bestimmten 8,3 ns durchaus realistisch zu sein.

4.4 Das reale Signalverhalten

Mit einem Waveformgenerator kann jedes erdenkliche Signal erzeugt und an den Eingang des Daughter Boards angelegt werden. Bei der Erzeugung des Signals entstehen allerdings Störungen, die das Signal verzerren. Für Abbildung 4.15 wurde mit Hilfe des Waveformgenerators ein 40 ns langes Rechtecksignal mit einer Amplitude von 100 mV erzeugt. Die Anstiegszeit wurde auf 1 ns eingestellt. Dieses Signal wurde direkt mit einem Kabel auf das Oszilloskop gegeben. Abbildung 4.15 zeigt einmal ein Eingangssignal mit einem Durchlauf und einmal ein Eingangssignal, das über 64 Durchläufe gemittelt wurde.

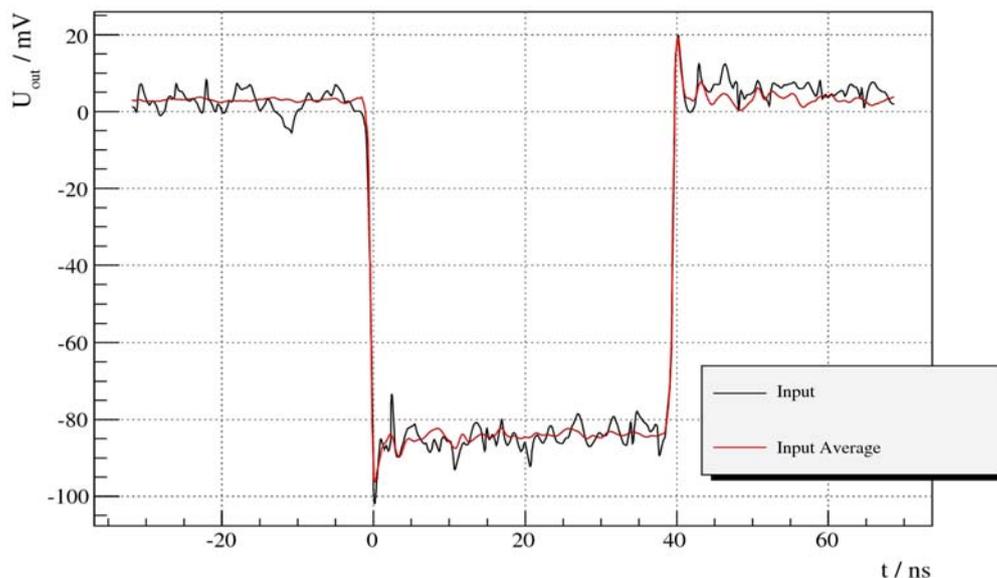


Abbildung 4.15: Eingangssignalverhalten

Das Signal kann in drei Teile unterteilt werden. Der erste Teil erstreckt sich vor dem Rechteckpuls (bis 0 ns), der zweite über den Rechteckpuls (0-40 ns) und der dritte nach dem Puls (ab 40 ns). Vergleicht man das gemittelte mit dem einzelnen Signal, so fallen einige Eigenschaften des Signals auf. Im ersten Bereich mittelt sich das Rauschen fast völlig heraus. Daher kann das Rauschen auf ein reines weißes, statistisch verteiltes Rauschen zurückgeführt werden. In Bereich zwei und drei hebt sich nur ein Teil des Rauschens beim Mitteln heraus. Daher folgt, dass hier eine Überlagerung von weißem Rauschen, das sich herausmittelt, und einem Nachschwingen existiert. Dieses Nachschwingen ist auf den Gibbschen Effekt (Gibbsches Ringing) zurückzuführen und entsteht überall, wo Sprünge im Signal vorhanden sind, die nur punktweise konvergieren und daher nicht fouriertransformiert dargestellt werden können.

Um diesen Effekt zu minimieren, werden Wechselstromsignal-Messungen mit einer Sinusspannung betrieben, da diese keine Sprünge aufweist. Im Idealfall sollte der Effekt dadurch nicht mehr auftreten.

In Abbildung 4.16 ist die Ausgabe des Verstärkers in mV in Abhängigkeit der Zeit in ns dargestellt. Als Eingangssignal wurde wieder ein 40 ns langer 100 mV hoher Rechteckpuls verwendet. Die Ausgabe wurde für vier verschiedene Verstärkungen aufgetragen. Es sind jeweils die für 64 Perioden gemittelten Werte genutzt wurden.

Es ist zu erkennen, dass die Ausgangssignale in der Form dem Eingangssignal folgen. Sie zeigen dasselbe Nachschwingverhalten. Des Weiteren lässt sich feststellen: je höher die Verstärkung ist (und damit auch die maximale Signalthöhe), desto länger benötigt der Operationsverstärker um den Maximalwert zu erreichen.

Die Zeit, die benötigt wird, um den ersten Peak zu erreichen (t_{peak}) und die Zeit bis das Plateau erreicht wird ($t_{plateau}$), sind in Tabelle 4.3 aufgetragen. Die Größen sind aus Abb.

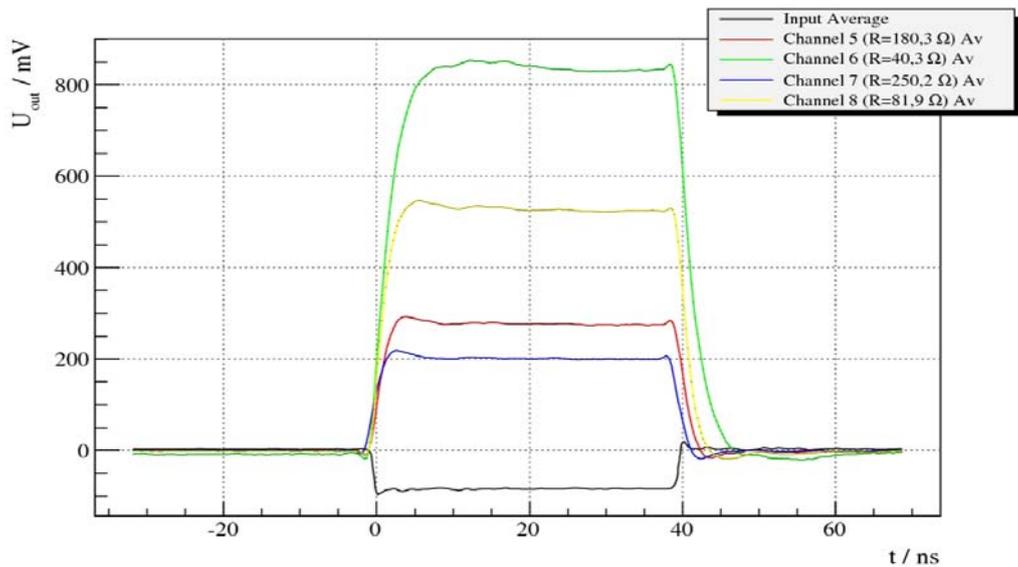


Abbildung 4.16: Ausgangssignalverhalten

4.16 abgelesen, die Fehler auf 1 ns abgeschätzt. Die Abfallzeit (t_{fall}) wurde ab dem zweiten Peak bis zum Erreichen des 0 V Plateaus bestimmt.

Die Anstiegs- und Abfallzeiten steigen mit der Verstärkung an. Dies ist auf die Trägheit des OpAmps zurückzuführen, der zum Erreichen der höheren Spannung mehr Zeit benötigt. Außerdem tritt der im Voraus erklärte Effekt der Settle Time auf. Dieses Verhalten ist bei zeitkritischen Analysen mit einzukalkulieren und die Verstärkung entsprechend zu wählen.

CHANNEL NR.	t_{peak} /ns	$t_{plateau}$ /ns	t_{fall} /ns
5	4	8	8
6	12	20	22
7	3	6	6
8	6	11	11

Tabelle 4.3: Anstiegs und Abfallzeiten für verschiedene Verstärkungen

4.5 Das Zeitverhalten des Comparators

Ein Comparator ist ein Verstärker mit besonderen Eigenschaften. Er vergleicht ein angelegtes Signal mit einem Referenzsignal (Threshold) und gibt, je nachdem ob die Spannung des Signals über oder unter dieser Schwelle liegt, eine bestimmte Spannung aus. Dadurch erzeugt er aus einem analogen Signal ein binäres digitales.

Der auf dem Daughter Board verbaute Comparator vergleicht die verstärkte Eingangsspannung mit einer durch den DAC angelegten Referenzspannung. Diese kann von außen vorgegeben werden. Ist der Pegel des Eingangssignals über der Referenz, so liegt am Comparatorausgang 0 V an, ist er geringer, so wird der Ausgang auf die Versorgungsspannung von +3,3 V gesetzt. Da auf dem zur Messung benutzten Daughter Board noch kein DAC existierte, wurde der Threshold von außen mit Hilfe einer Spannungsquelle simuliert.

Um das Signalverhalten des Comparators zu überprüfen, wurde eine Dreiecksspannung mit Hilfe des Waveformgenerators an den Eingang des Daughter Boards angelegt. Diese wurde durch den Operationsverstärker invertiert und verstärkt. Am Ausgang des OpAmps hatte sie eine Frequenz von 1 kHz und eine Signalhöhe von 1100 mV. Die Eingangsspannung

wurde so variiert, dass bei jedem Kanal dieselbe Spannung nach dem Verstärker anlag, damit eine Wirkung des Verstärkungsverhältnisses nicht mit betrachtet werden muss. Von außen wurde eine konstante Referenzspannung angelegt und in der Höhe variiert. Solange das Signal unterhalb des angelegten Threshold liegt, sollte +3,3 V (High) anliegen, sobald das Signal über der Schwelle liegt, sollten am Ausgang 0 V (Low) gemessen werden. Der Ausgang des Comparators wurde mit dem Oszilloskop aufgenommen und die Breite des High-Signals gemessen. Der Verlauf der Spannungen vor dem OpAmp, hinter dem Verstärker und nach dem Comparator sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Hierfür wurde ein 20 Hz Dreieckssignal verwendet um den Spannungsverlauf zu verdeutlichen. Durch die Laufzeit des Signals entsteht eine leichte Zeitverschiebung im ns-Bereich. Diese spielt für die Messung keine Rolle, da nur die Signalbreite gemessen wurde. Für die Verbildlichung des Messprinzips wäre sie allerdings störend.

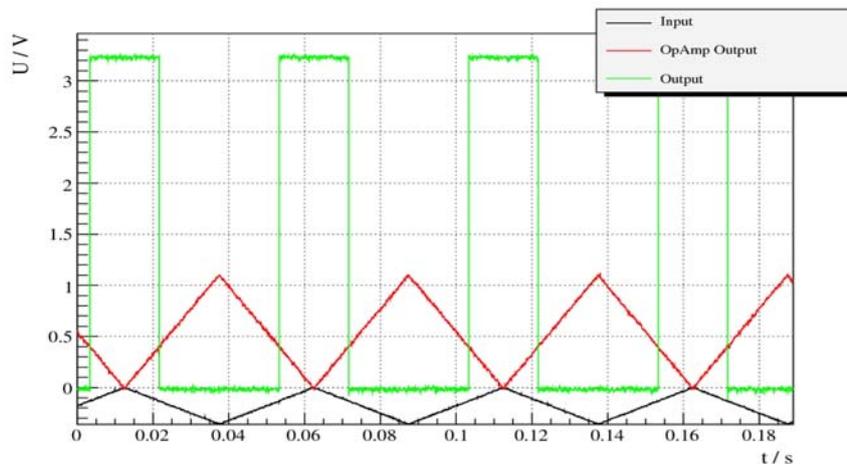


Abbildung 4.17: Verlauf der Spannung vor und nach dem OpAmp und nach dem Comparator

Da ein Dreieckssignal einen konstanten Anstieg und Abfall aufweist, wird für einen idealen Comparator ein linearer Zusammenhang zwischen gemessener Signalbreite und angelegter Referenzspannung erwartet. Dieser theoretische Zusammenhang ist in Gleichung 4.12 dargestellt. Hierbei ist U_{th} die angelegte Referenzspannung, U_{max} die maximale Höhe des Dreiecks nach dem Verstärker, t_{puls} die Pulsbreite des High-Signals und T die Periodendauer der Dreiecksspannung.

$$\frac{U_{th}}{U_{max}} = \frac{t_{puls}}{T} \quad (4.12)$$

Die beschriebene Messung wurde für alle acht Kanäle des kompletten Daughter Boards durchgeführt. In Abbildung 4.18 sind die gemessenen Pulsbreiten in μs in Abhängigkeit der Referenzspannung in mV aufgetragen. Die Fehler der Referenzspannung ergaben sich aus Abschätzungen, die auf der Schwankung und Ungenauigkeit des Generators beruhen. Die Fehler der Pulsbreite sind die vom Oszilloskop errechneten Standardabweichungen.

Es zeigt sich ein linearer Verlauf, wie er in Gleichung 4.12 theoretisch vorhergesagt wurde. Es wurde ein Geradenfit der Form $y = mx + n$ vorgenommen. Bei den vorgegebenen Werten für die Maximalspannung und die Periodendauer ergeben sich die erwarteten Werte zu:

$$m = \frac{1000 \mu s}{1100 mV} = 0,909 \mu s/mV \quad (4.13)$$

$$n = 0 \mu s \quad (4.14)$$

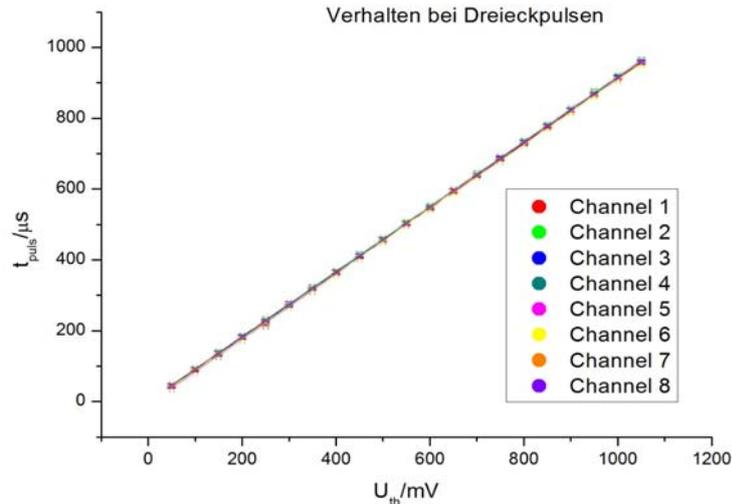


Abbildung 4.18: Geradenfit an die Messung der Pulsdauer in Abhängigkeit der Referenzspannung

In Tabelle 4.4 sind die durch die Fits bestimmten Werte für den Anstieg m und den Nulldurchgang n samt bestimmten Fehlern angegeben.

CHANNEL NR.	ANSTIEG / $\frac{\mu s}{mV}$	NULLDURCHGANG / μs
1	$0,920 \pm 0,001$	$-8,0 \pm 0,8$
2	$0,918 \pm 0,004$	1 ± 2
3	$0,917 \pm 0,004$	3 ± 3
4	$0,917 \pm 0,004$	-1 ± 2
5	$0,916 \pm 0,003$	$-0,2 \pm 1,7$
6	$0,911 \pm 0,003$	$-3,1 \pm 1,8$
7	$0,909 \pm 0,002$	$2,5 \pm 1,4$
8	$0,916 \pm 0,003$	$-0,3 \pm 1,8$

Tabelle 4.4: Anstieg und Nulldurchgang für die Referenzspannung-Pulsdauer-Messung

Vergleicht man die bestimmten Werte für m und n der acht Kanäle mit den theoretisch erwarteten, so stellt man fest, dass bis auf Kanal eins alle Werte innerhalb von 3σ im Bereich der theoretisch erwarteten liegen. Es liegt auch keine eindeutige Verschiebung in eine Richtung vor, sondern die Werte sind statistisch um die erwarteten verteilt. Kanal eins weist sehr kleine Fehler auf und erreicht die theoretischen Werte innerhalb von etwa 8σ .

Ein Grund für den geringen Fehler von Kanal eins können die aufgelöteten Filterkondensatoren sein. Für das finale Board sind für jede Referenzspannungslinie zwei Filterkondensatoren eingeplant, um Schwankungen in der vom DAC gelieferten Spannung auszugleichen. Da bei diesen Messungen die Referenzspannung von außen vorgegeben wurde, wurde auf die Kondensatoren verzichtet. Auf Kanal eins wurden allerdings die beiden Filterkondensatoren aufgelötet. Diese verringern Schwankungen der Referenzspannung und könnten daher auch für den kleineren Fehler bei diesen Messungen verantwortlich sein.

Diese Filterkondensatoren könnten auch den etwas niedrigeren Nulldurchgang von Kanal eins erklären. Da von kleinen zu großen Referenzspannungen gemessen wurde, würden die Filterkondensatoren die Thresholdspannung verringern. Verschiebt man die Gerade daher nach links, würde der Nulldurchgang höher und besser mit 0 verträglich.

Unter Betrachtung der bestimmten Werte und dem Verlauf des Graphen kann festgehal-

ten werden, dass der Comparator ein Verhalten zeigt, das dem theoretisch erwarteten entspricht. Er verhält sich linear und es ist kein unerwarteter Offset (jeder bestimmte Nulldurchgang bis auf Kanal eins ist innerhalb von 2σ mit 0 verträglich) aufgetreten.

4.6 Das Auflösungsvermögen

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Comparators ist sein zeitliches Auflösungsvermögen. Dabei sind zwei Eigenschaften von Interesse. Zum einen ist interessant, über welchen Zeitraum ein Puls wie hoch über der Referenzspannung liegen muss, damit der Comparator ihn als Puls erkennt und das Ereignis erkannt und gezählt werden kann. Außerdem kann es passieren, dass zwei Myonen sehr kurz hintereinander ein Signal in einer Fotofiber erzeugen. Daher ist es von Interesse, wieviel Zeit zwischen zwei Signalen vergehen muss, damit der Comparator sie unterscheiden kann und beide Myonen gezählt werden. Beides hängt auch von der Referenzspannung ab. Daher muss das Auflösungsvermögen bei der Bestimmung der Thresholdspannung mit bedacht werden, damit so wenig wie möglich Ereignisse verloren gehen und eine möglichst gute Bestimmung des Myonenverhältnisses erreicht werden kann.

4.6.1 Die minimale Pulsbreite

Für die Bestimmung der minimalen Pulsbreite wurde mit Hilfe des Pulsegenerators ein Rechteckpuls mit einer Wiederholfrequenz von 20 MHz auf den Eingang gegeben. Bei dieser Frequenz trat noch keine merkliche Abschwächung am Operationsverstärker auf und die Signale wiederholten sich häufig genug, um sie ordentlich vermessen zu können. Die Signalhöhe am Eingang wurde so eingestellt, dass nach dem Verstärker eine Spannung von 1100 mV anlag. Es wurde mit dem Oszilloskop der Ausgang des Comparators beobachtet. Von außen wurde eine Referenzspannung angelegt und die Pulsbreite des Rechtecks solange minimiert, bis der Comparator kein Signal mehr gab. Die Referenzspannung wurde variiert und für jeden Wert die minimale Pulsbreite bestimmt. Die Messung wurde nur für einen Kanal vorgenommen.

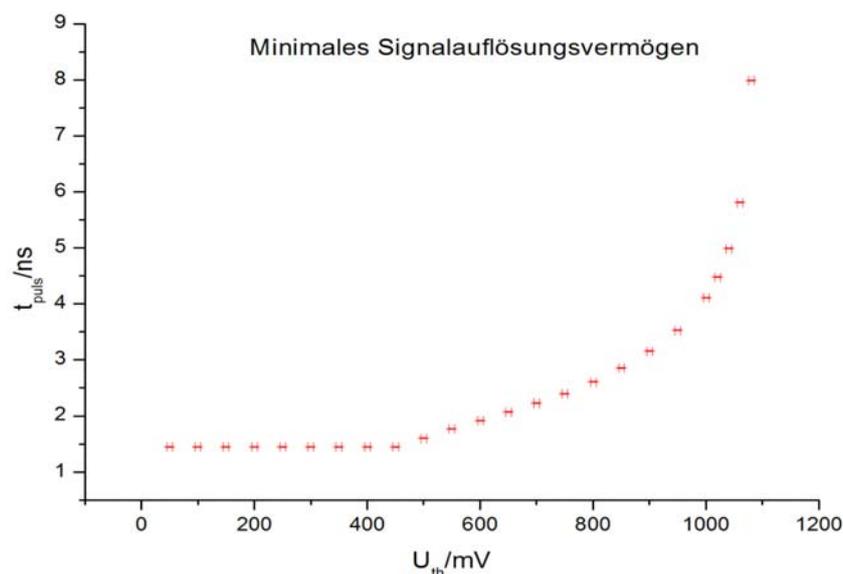


Abbildung 4.19: Minimal auflösbare Signalbreite

In Abbildung 4.19 ist die minimal auflösbare Signalbreite (eingestellte Signalbreite) in ns in Abhängigkeit der Referenzspannung in mV aufgetragen. Die Fehler der Referenzspannung ergeben sich aus Abschätzung zu 5 mV. Dafür wurde die Schwankung der Spannung

und die Genauigkeit der Bestimmung als Grundlage genutzt. Die Fehler der Signalbreite ergeben sich als die Auflösung der Breite, die am Generator eingestellt werden konnte. Die minimal einstellbare Signalbreite betrug 1,45 ns und die minimale Auflösung 0,01 ns, die auch als Fehler angenommen wurde. Daher konnte die Messung für Thresholdspannungen kleiner 500 mV nicht für Signalbreiten kleiner als diesen Wert gemacht werden und das Verhalten in diesem Bereich nicht genau untersucht werden. Die angegebenen Punkte verstehen sich für diesen Bereich also als obere Grenze und die realen Werte liegen aller Wahrscheinlichkeit nach unter 1,45 ns. Im späteren Verlauf lässt sich ein exponentielles Verhalten erkennen. Diese Abhängigkeit kann nicht nur aus der Anstiegszeit des Signals kommen. Folglich lässt sich beobachten, dass je näher das Signal an der Referenzspannung anliegt, desto länger muss es vorhanden sein, um erkannt zu werden. Dies muss für die Wahl der Thresholdspannung mit berücksichtigt werden, um kleine Signale nicht zu verlieren.

4.6.2 Der minimale Abstand zwischen zwei Pulsen

Um den minimalen Abstand zwischen zwei Pulsen zu bestimmen, wurde ein Experiment mit Rechteckpulsen durchgeführt. Dafür wurde mit dem Waveformgenerator ein Rechteckdoppelpuls erzeugt. Der Abstand zwischen zwei Doppelpulsen betrug 1 ms, die Höhe hinter dem Operationsverstärker 1100 mV, die Breite eines Pulses 50 ns. Es wurde eine Referenzspannung von 10 mV von außen an den Comparator angelegt, um Signale durch Rauschen zu unterdrücken. Dies ist der minimal einstellbare Wert für die DC-Quelle. Mit Hilfe des Oszilloskops wurde der Ausgang des Comparators überwacht. Es wurde solange der Abstand zwischen den Pulsen verringert, bis der Comparator nur noch ein langes Signal statt zwei kürzerer, unterbrochener Signale anzeigte.

Aufgrund des schon erklärten Verhaltens einer realen Signalquelle konnte kein perfekter Doppelrechteckpuls erzeugt werden. Vielmehr wurde ein Doppelpuls bestehend aus zwei Trapezpulsen erzeugt. Durch die Anstiegs- bzw. Abfallzeit war die Lücke zwischen den beiden Pulsen kein Rechteck, sondern vielmehr ein Dreieck. Daher werden hier für den minimalen Abstand auch zwei Angaben gemacht, die Zeit, die vergeht um von 90% des Signals auf 0 und dann wieder auf 90% des zweiten Signals zu kommen, und zum anderen die Zeit von 10% zu 10%. Aufgrund der Dreieckform ergibt sich, dass die 90 zu 90 Breite größer sein muss als die 10 zu 10 Breite. Wenn wir von einem echten, idealen Dreieck zwischen den Pulsen ausgehen, sollte sie genau neunmal so groß sein.

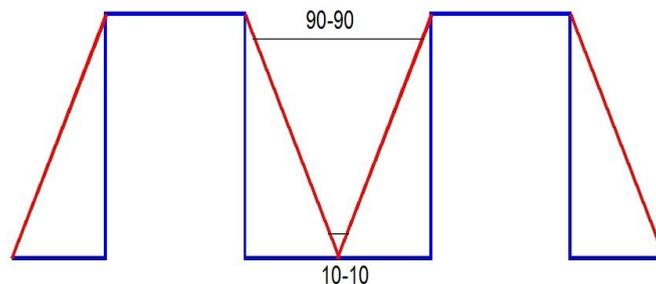


Abbildung 4.20: Vergleich eines idealen Doppelrechteckpulses mit einem oben erwähnten Doppeltrapezypuls

In Abbildung 4.20 ist der Vergleich eines Doppelrechteckpulses (blau) mit einem oben erwähnten Doppeltrapezypuls (rot) aufgetragen.

Es stellt sich heraus, dass der minimale Pulsabstand vor und hinter dem Verstärker etwa identisch ist, sodass seine Wirkung auf das hier untersuchte Signalverhalten als gering einzustufen ist. Es ergaben sich:

$$\Delta t_{90-90} = 16 \text{ ns} \quad (4.15)$$

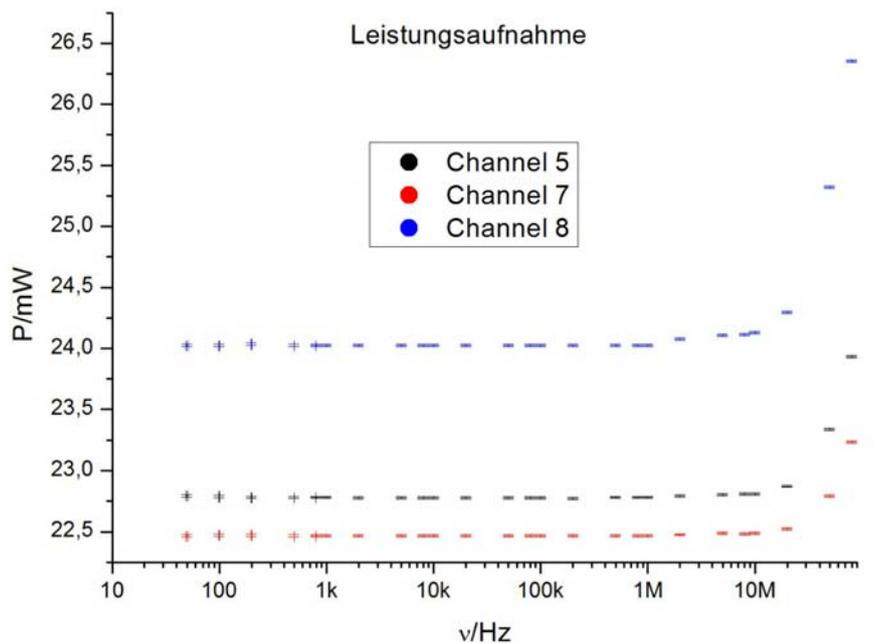
$$\Delta t_{10-10} = 6 \text{ ns} \quad (4.16)$$

Diese Pulsabstände erzeugten ein Signal hinter dem Comparator, dessen beide Pulse einen Abstand von 2,5 ns bzw. 1 ns hatten. Man erkennt, dass zwischen der Zeit von 90% auf 90% und der von 10% auf 10% nur ein Faktor drei liegt. Daraus lässt sich schließen, dass auch ein angenommener Doppeltrapezimpuls kein ideales Modell ist. Es sollte eher eine Art S-Linie sein. Diese würde den geringeren Faktor erklären und liegt näher an der Realität. Die Messung sollte auch noch einmal mit echten Myonensignalen wiederholt werden, da diese keine Rechtecke sondern ausgedehnte Signale sind, die sich überlagern. Daher ist für sie ein anderes Verhalten zu erwarten.

4.7 Die Leistungsaufnahme

Der gesamte Aufbau des Myonenzählers wird durch Solarenergie, die mit Solar Paneels gewonnen wird, und einem Akku versorgt. Es existiert keine externe Stromversorgung via Kabel. Daher steht nur eine begrenzte Leistung zur Verfügung, um den Betrieb der Komponenten zu gewährleisten. Es muss deshalb bestimmt werden, wieviel Leistung ein Daughter Board aufnimmt.

Es wurden zwei verschiedene Messungen durchgeführt. Als Erstes wurde die Leistungsaufnahme des Operationsverstärkers für verschiedene Verstärkungsverhältnisse untersucht. Als Zweites wurde die Ruheleistungsaufnahme des gesamten Boards ermittelt.



positive Versorgungsleitung floss, gemessen. Die Leistungsaufnahme ergibt sich dann als Produkt aus beiden Größen. Die Fehler wurden auf Grund der Schwankungen der angezeigten Messergebnisse abgeschätzt.

Es ist zu erkennen, dass die Leistungsaufnahme für einen großen Frequenzbereich konstant ist. Ab etwa 10 MHz steigt die Kurve exponentiell an. Da die x-Achse logarithmisch ist, bedeutet dies, dass sich in diesem Bereich eine Abhängigkeit der Form $P \propto \nu^a$ zwischen Leistung und Frequenz ergibt, wobei $a > 0$ gilt. Es lässt sich weiterhin feststellen, dass für höhere Verstärkungen die Kurve höher verläuft, also die Leistungsaufnahme größer ist. Das Frequenzverhalten ist allerdings etwa gleich.

In Abbildung 4.22 ist die Leistungsaufnahme in mW in Abhängigkeit der Signalhöhe dargestellt. Sie wurde für drei verschiedene Verstärkungen mit einem 1 kHz Sinus als Eingang gemessen. Es wurde wieder eine Messung von Spannung und Strom in der positiven Versorgungsspannungsleitung unternommen. Die Fehler wurden abgeschätzt.

Es ist zu erkennen, dass alle drei Kanäle etwa die gleiche Leerlaufspannung aufweisen. Der Anstieg der Geraden, also die mehr benötigte Leistung pro 1 mV höherem Signal, ist von der Verstärkung abhängig und höher, je höher die Verstärkung ist. Dies muss bei der Wahl des richtigen Verstärkungsverhältnisses bedacht werden, da eine höhere Verstärkung bei gleichen Signalverläufen mehr Leistungsaufnahme bedeutet.

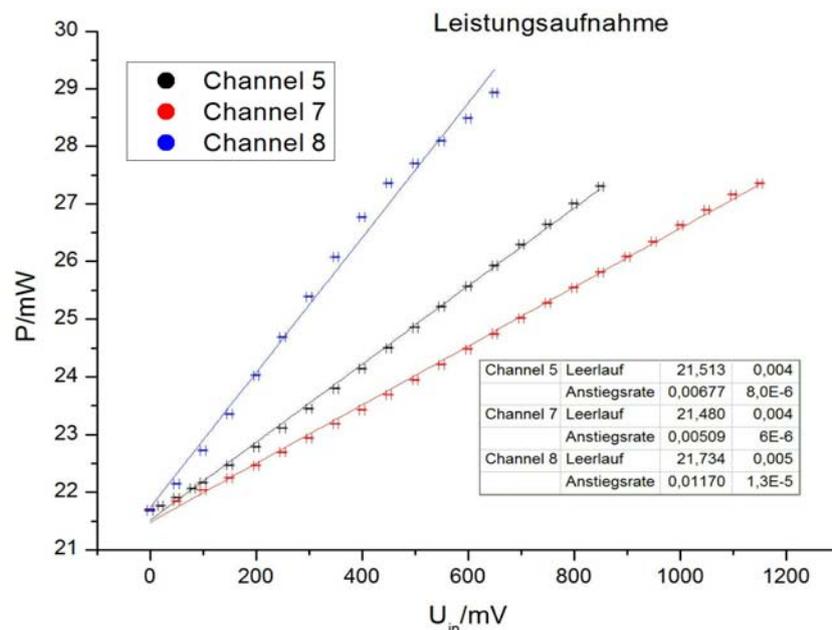


Abbildung 4.22: Leistungsaufnahme des Operationsverstärkers für verschiedene Verstärkungen in Abhängigkeit der Signalhöhe

Mittelt man die Leerlaufleistungen der drei Kanäle, so erhält man:

$$P_{\text{Leerlauf}} = (21,576 \pm 0,004) \text{ mW} \quad (4.17)$$

Die Messung wurde für ein Board getätigt, auf dem zwei Verstärker und kein Comparator aufgelötet waren. Im Datenblatt des Verstärkers (AD8012) wird für einen Chip eine Leerlaufleistungsaufnahme von 9 mW angegeben. Für zwei ergibt sich damit 18 mW und somit in etwa der ermittelte Wert.

Zur Bestimmung der Ruheleistung eines gesamten Boards wurde das komplette Daughter Board verwendet, mit dem auch die vorherigen Messungen gemacht wurden. Hier wurde

nur die Leerlaufleistungsaufnahme bestimmt, da die Leistung, die im Betrieb mit Signalen gebraucht wird, von der Signalhöhe, der Signalform und der Referenzspannung abhängt und daher nicht sinnvoll zu bestimmen war, da diese Parameter noch nicht alle bekannt sind. Die Messung erfolgte in der positiven Versorgungsleitung. Die Fehler wurden für U und I abgeschätzt. Der Fehler der Leerlaufleistung ergibt sich durch Fehlerfortpflanzung. Es ergibt sich:

$$P_{\text{Leerlauf}} = (143,6 \pm 0,3) \text{ mW} \quad (4.18)$$

Im Datenblatt des Comparators (TLV 3502) wird eine maximale Ruheleistungsaufnahme von 27,5 mW angegeben. Für ein komplettes Board mit vier Operationsverstärkern und vier Comparatoren ergibt sich somit eine Leistungsaufnahme von:

$$P_{\text{Leerlauf}} = 146 \text{ mW} \quad (4.19)$$

Damit befindet sich die gemessene Leerlaufleistung genau im Bereich der theoretisch erwarteten.

Damit ist für einen kompletten Aufbau mit acht Daughter Boards eine Leistungsaufnahme von $P_{\text{Ges}}(1149 \pm 2) \text{ mW}$ zu erwarten. Die Messung sollte noch einmal wiederholt werden, sobald das dritte aktive Bauteil, der DAC, zur Verfügung steht.

4.8 Die erwartete Signalhöhe

Durchfliegt ein Myon den Szintillator, so werden in diesem Photonen erzeugt. Diese werden durch den PMT verstärkt und in ein Signal aus Elektronen umgewandelt. Diese werden über den Vorwiderstand R_2 abgeleitet und erzeugen einen Strom, der mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes und der Größe von R_2 in eine Spannung umgerechnet werden kann. Diese wird durch den Operationsverstärker verstärkt und auf den Comparator gegeben. Da der OpAmp bei etwa 2,5 V in Sättigung geht, ist die Signalhöhe nach dem Verstärker von Interesse, um unter der Sättigungsgrenze zu bleiben.

Die Ladung, die durch ein Myon erzeugt wird, ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Photonen (n), die ein Myon erzeugt, mal der Verstärkung des PMT (V), mal der elektrischen Ladung eines Elektrons.

$$Q = nVe \quad (4.20)$$

Nähert man den Puls, den ein Myon erzeugt durch ein Rechteck an, so erhält man den mittleren Strom, indem man die Ladung durch die Breite des Pulses teilt. Die Spannung, die dieser Strom als Eingang für den OpAmp erzeugt, ergibt sich als Produkt des Stromes mit dem Vorwiderstand. Da ein PMT Puls in etwa die Form eines Dreiecks mit sehr kurzer Anstiegszeit, einem sehr kurzen Plateau und hoher Abfallzeit aufweist, muss diese Spannung noch mit zwei multipliziert werden, um dieser Form gerecht zu werden und die maximale Pulshöhe zu erhalten.

$$U_{in} = 2R_2 \frac{nVe}{\Delta t} \quad (4.21)$$

Mit dem Verstärkungsverhältnis aus Gleichung 4.4 auf Seite 21 ergibt sich für die Signalhöhe nach dem Operationsverstärker:

$$U_{out} = 2R_1 \frac{nVe}{\Delta t} \quad (4.22)$$

Nimmt man die Anzahl der Photonen, die Verstärkung des PMT und die Zeit als konstant an, so erkennt man, dass die Signalhöhe nur durch die Wahl von R_1 verändert werden kann und vom Vorwiderstand völlig unabhängig ist.

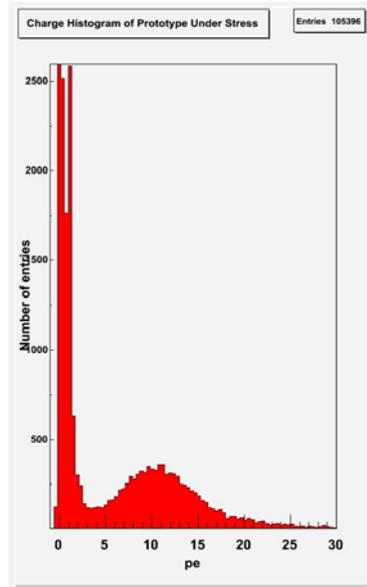


Abbildung 4.23: Gemessene Anzahl der durch ein Myon erzeugten Photonen für den für AMIGA geplanten Szintillator [Sidel]

Für den im Aufbau eingepflanzten Szintillator samt PMT wurde die Anzahl der erwarteten Photonen beim Durchdringen eines Myons bestimmt. Abbildung 4.23 zeigt ein Histogramm, in dem die Anzahl der gemessenen Photonen gegen die Häufigkeit des Auftretens dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass für die meisten Signale mit einem bis zwei Photonen zu rechnen ist. Diese Signale haben ihren Ursprung in Rauschen und sind Zufallssignale. Diese sollten nicht gezählt werden. Eine weitere Häufung tritt im Bereich von 10-15 Photonen auf, wobei die Verteilung Einträge bis zu 30 Photonen aufweist.

Im Datenblatt des Photomultipliers wird für eine Versorgungsspannung von 1 kV eine Verstärkung von 3×10^6 angegeben. Setzt man den Vorwiderstand auf die geplanten 180 Ω fest, da der Widerstand auf das Ausgangssignal nach dem Operationsverstärker keine Rolle spielt, und verwendet man die angegebenen Zahlen, so kann man die minimale und maximale Signalhöhe näherungsweise berechnen.

Aus Messungen von Manuel Platino sind die Parameter des Ausgangs des PMT bei 180 Ω Vorwiderstand bekannt. Er gibt eine Breite von (3-30) ns und eine Amplitude von (40-600) mV an.

Rechnet man mit einer Pulsbreite von etwa 10 ns und $n=20$ für die maximale Höhe und $n=1$ für die minimale (Rauschen), so erhält man:

$$U_{in,max} = 350 \text{ mV} \quad (4.23)$$

$$U_{in,min} = 20 \text{ mV} \quad (4.24)$$

Damit liegt die Rechnung etwa um den Faktor zwei niedriger als die gemessenen Amplituden. Dies kann am Einfluss der vereinfachenden Annahmen wie der Pulsform liegen. Für die weiteren Überlegungen werden die experimentell ermittelten Werte verwendet.

4.9 Das Übersprechverhalten

Um eine möglichst genaue Bestimmung der Anzahl der Myonen zu erreichen, muss verhindert werden, dass ein sehr hohes Signal in einem Kanal ein kleines Signal in einem Nachbarkanal erzeugt und somit doppelt gezählt wird. Dieses Übersprechen kann zustande kommen, wenn Signalleitungen nahe aneinander liegen und sich somit bei hohen Spannungen gegenseitig beeinflussen.

Würde das Übersprechen zu einem Signal in einem anderen Kanal führen, das höher als die Referenzspannung ist, so würde ein Myon in zwei Kanälen gezählt werden. Dieses Verhalten muss untersucht werden und gegebenenfalls Änderungen am Design vorgenommen werden.

Für die Messung wurde auf Kanal eins ein hohes Rechteckpulssignal gegeben und der Ausgang nach dem Comparator der anderen Kanäle mit dem Oszilloskop betrachtet. Sollte dort ein Puls zu erkennen sein, deutet dies auf ein Übersprechen hin. Laut Datenblatt darf an den Eingang des Operationsverstärkers eine maximale Spannung von 3,9 V angelegt werden. Um diesen nicht zu gefährden, wurde eine maximale Spannung von 3 V angelegt. Wenn bei dieser Spannung kein Übersprechen zu erkennen ist, sollte bei den erwarteten realen Signalhöhen von maximal 600 mV ein solches Verhalten auch nicht auftreten.

Für die Messung wurde erst keine Referenzspannung an die zu untersuchenden Kanäle angelegt. Es zeigte sich, dass bei einer Eingangsspannung von etwa 1,5-2 V auf diesen Kanälen ein Rauschen zu sehen war. Legte man die minimal mögliche Referenzspannung von 10 mV an, so war bis zu den maximal gemessenen 3 V kein Signal auf den anderen Kanälen zu erkennen.

Da wesentlich kleinere Signale erwartet werden, kann das Übersprechen bei einer intakten Karte ausgeschlossen werden. Es sollte bei den Messungen also keine Probleme mit mehrfach gezählten Myonen geben.

Kapitel 5

Diskussion der Ergebnisse

5.1 Ideales und reales Verhalten

Für die verbauten Widerstände R_1 und R_2 gibt die Firma jeweils einen relativen Fehler von 5% an. Diese Fehlerangaben sind 3σ -Angaben, es liegen also etwa 99% der Bauteile in diesem Bereich. Für die Widerstandsgrößen mit 1σ -Fehler ergibt sich damit:

$$R_1=(560\pm 9)\ \Omega \text{ und } R_2=(180\pm 3)\ \Omega$$

Mit Fehlerfortpflanzung ergibt sich damit für die theoretische Verstärkung ein relativer Fehler von rund 2% für 1σ und damit:

$$G = 3,11 \pm 0,07 \tag{5.1}$$

Im Vergleich mit den Werten aus Tabelle 4.1 auf Seite 26 lässt sich feststellen, dass alle gemessenen Widerstände und damit alle theoretischen Verstärkungen sowie alle ermittelten Verstärkungen in diesem Intervall liegen. Zusammen mit dem ermittelten Verhalten für die Ausgangsspannung kann gesagt werden, dass sich der Verstärker genau so verhält, wie man es von ihm erwartet hat. Damit scheint ein Fehlverhalten des Operationsverstärkers ausschließbar zu sein und sollte kein Problem für das Experiment darstellen.

Da nicht nur die Anzahl der Myonen, sondern auch deren Ankunftszeit bestimmt wird, muss hierbei auf die Settle Time geachtet werden. Wie in Abbildung 4.12 auf Seite 26 gezeigt, ergibt sich für einen realen Operationsverstärker im Gegensatz zu einem idealen eine gewisse Verzögerung zwischen Eintreffen des Signals am Eingang und dem Verlassen des OpAmp. Diese Zeit muss in die Rekonstruktion mit eingerechnet werden.

Das Übersprechverhalten des Daughter Boards ist zufriedenstellend. Für realistisch erwartete Signalhöhen ist kein störendes Übersprechen zu erwarten. Mit der Wahl der Referenzspannung größer als 0 V kann daher ein solcher Effekt vernachlässigt werden.

5.2 Das ideale Verstärkungsverhältnis

Für die Wahl des idealen Verstärkungsverhältnisses müssen mehrere, teilweise konträre, Bedingungen bedacht werden. Es gilt, einen Kompromiss zu finden, der alle benötigten Eigenschaften aufweist. Zu beachten sind:

Das Verstärkungsverhältnis muss so niedrig gewählt werden, dass die maximalen Pulse den Operationsverstärker nicht ständig in Sättigung bringen, damit dieser korrekt arbeiten kann. Nimmt man eine maximale Signalhöhe von 600 mV und eine Sättigungshöhe von 2500 mV an, so erhält man daraus:

$$G \leq \frac{2500}{600} = 4,1 \quad (5.2)$$

Setzt man zur Sicherheit etwas mehr Spielraum an, so sollte die Verstärkung kleiner als etwa 3,5 sein.

Das minimale Signal muss so stark verstärkt werden, dass es nicht nach dem Comparator verschwindet und somit das Myon für die Messung verloren geht. Betrachtet man rein diesen Sachverhalt, so sollte die Verstärkung so hoch wie möglich gewählt werden.

Die Leistungsaufnahme erhöht sich mit steigender Verstärkung. Da nur Energie aus einem Akku und Sonnenkollektoren zur Verfügung steht, sollte die Verstärkung so niedrig wie möglich gewählt werden, um Energie zu sparen.

Die Bandbreite verringert sich mit steigender Verstärkung. Dadurch erhöht sich die Settle Time des Operationsverstärkers, und das Signal wird vom Comparator zeitlich später bestimmt. Dadurch kann das Signal beim Auslesen in einem späteren Bin detektiert werden und die Rekonstruktion verändern.

Umso höher die Verstärkung ist, desto höher ist das Signal, das am Comparator ankommt. Dadurch wirken sich statistische, von der Höhe konstante Störungen, wie die Schwankung der Referenzspannung oder ein gewisses Rauschen hinter dem Operationsverstärker, weniger stark aus und das Signal ist stabiler.

Bezieht man all diese Gesichtspunkte in die Entscheidung mit ein, so scheint das ideale Verstärkungsverhältnis etwa zwischen 2,5 und 3,5 zu liegen. Aus diesem Bereich sollte die Verstärkung gewählt werden, damit das Daughter Board ideal arbeitet.

5.3 Die ideale Referenzspannungshöhe

Die ideale Referenzspannungshöhe muss so gewählt werden, dass sie drei Gesichtspunkten genügt.

Der Threshold muss zum Ersten so hoch gewählt werden, dass es zu keinen Signalen durch das statistische Rauschen von Bauteilen oder Rauschen durch Störungen von außen (z.b. durch die HV Versorgung des PMT) kommt. Betrachtet man die Messung des Übersprechens, so ist festzustellen, dass das Rauschen ohne Signal kleiner als 10 mV ist. Über die Größe der Störungen von außen kann hier keine Aussage gemacht werden, da keine Messungen oder Erfahrungen für den Aufbau vorliegen. Des Weiteren muss der Threshold so hoch gewählt werden, dass keine Ereignisse durch das Rauschen des PMTs detektiert werden. In Abbildung 4.23 ist zu erkennen, dass ein Peak bei etwa 1-2 Photonen liegt, der auf ein Rauschen zurückzuführen ist. Das ergibt eine errechnete Signalhöhe von etwa 40 mV. Die Referenzspannung sollte also über diesem Wert liegen. Setzt man eine gewisse Sicherheit an, so sollte das Referenzsignal eine Höhe von mindestens 50 mV haben.

Zum Zweiten sollte der Threshold so niedrig gewählt werden, dass kleine, echte Signale nicht verloren gehen. Dafür muss zum Einen die minimale Signalhöhe berücksichtigt werden. Zum Anderen muss die Zeitauflösung beachtet werden. Hier zeigte sich, dass je näher die Referenzspannung an der Signalhöhe lag, desto länger musste der Puls über dem Threshold liegen. Dieses Verhalten hat eine exponentielle Form. Daher sollte der Threshold so niedrig wie möglich gewählt werden.

Zum Dritten muss beachtet werden, dass je höher die Referenzspannung gewählt wird, desto näher können zwei Pulse aneinander liegen und trotzdem noch als zwei separate Pulse erkannt werden. Wird rein dieser Sachverhalt betrachtet, so sollte die Referenz also so hoch wie möglich gewählt werden.

Unter Beachtung dieser drei Punkte sollte die Referenzspannung zu etwa 50-60 mV gewählt werden, um ein annähernd ideales Verhalten zu bekommen.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Verhalten des Daughter Boards der AMIGA Erweiterung verschiedensten Tests unterzogen. Es wurde festgestellt, dass der Operationsverstärker im geplanten Arbeitsbereich das gewünschte lineare Verhalten zeigt und das erwartete Verstärkungsverhältnis aufweist. Auch die Linearität des Comparators konnte erfolgreich untersucht werden. Eine Grenze für das minimale Auflösungsvermögen konnte bestimmt werden und das Verhalten bei hohen Frequenzen wurde untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass kein Übersprechen vorhanden ist, welches die Messungen stören könnte. Um die benötigte Gesamtleistung zu bestimmen, wurde ermittelt, wie viel Leistung ein Daughterboard im Ruhezustand verbraucht.

Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen kann die Konfiguration des Daughter Boards besser gewählt und die Funktionsweise des Boards besser verstanden werden. Die Arbeit leistet einen Beitrag dazu, dass das AMIGA Projekt so reibungslos wie möglich durchgeführt werden kann.

Anfang des Jahres 2009 soll mit dem Bau der ersten Testzellen der Erweiterungen und bald darauf mit der ersten Datennahme begonnen werden. Mit diesen Daten soll es möglich sein, das zweite Knie und den Knöchel zu untersuchen und die Anzahl der Myonen als Größe zur Rekonstruktion der Schauer zu benutzen. Mit diesem neuen Wissen sollte es möglich sein, mehr über die chemische Zusammensetzung der Primärstrahlung zu erfahren und nach Anisotropien und damit Quellen der kosmischen Strahlung zu suchen. Dadurch kann das Verständnis der Mechanismen, die für die Entstehung der kosmischen Primärstrahlung zuständig sind, gefördert werden. Einen Beitrag dafür wird das hier untersuchte Daughter Board liefern.

In der Zukunft wird es weitere Experimente, wie das Auger Observatorium auf der Nordhalbkugel, geben, die diesen Verständnisprozess weiter vorantreiben und es ermöglichen sollten, noch mehr über das All und seine Mechanismen zu erfahren. Diese Experimente werden von den gewonnenen Daten von Auger South und AMIGA profitieren und diese nutzen, um effektiv zu arbeiten und neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Uwe Fröhlich für die gute Zusammenarbeit und die Anregungen und Unterstützung, die er mir zuteil werden lassen hat. Ihm gilt auch ein Dank für das Korrekturlesen dieser Arbeit und die Verbesserungsvorschläge, die er einbrachte.

Ein weiterer Dank gilt Prof. Dr. Ivor Fleck für die Möglichkeit, mit dieser Arbeit ein Teil von AMIGA zu sein. Ich danke ihm dafür, dass seine Tür immer offen stand, wenn ich Fragen oder Probleme hatte.

Für die Hilfe bei der Erstellung der Root-Software, mit der einige der benutzten Plots erstellt wurden, gilt mein Dank Marcus Rammes.

Ich möchte auch Prof. Dr. Peter Buchholz für seine konstruktive Kritik danken, die zur Verbesserung der Arbeit und damit der Ergebnisse führte.

Des Weiteren möchte ich Yury Kolotaev danken, der mir mit einfachen Tipps zur Seite stand, und so manche Messung erst möglich machte.

Zum Schluss möchte ich noch Alexander Pritzel und Anja Schuster für das Korrekturlesen meiner Arbeit und Geben wichtiger Tipps bei Formulierungsproblemen danken.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate und Ergebnisse Anderer kenntlich gemacht habe.

(Ort) (Datum)

(Unterschrift)

Literaturverzeichnis

- [Abr08] Abraham, Jorge Alberto et al.: *Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei*. *Astroparticle Physics* 29 S.188-204 2008
- [AN359] Demrow, Robert I.: *Settling Time of Operational Amplifiers*. Analog Device Application Note AN-359
<http://www.analog.com/UploadedFiles/Application_Notes/466359863287538299597392756AN359.pdf>
Stand: 11.06.2008
- [apcaug] <apcauger.in2p3.fr/Public/Presentation/index.php>
Stand: 11.06.2008
- [augde] <www.auger.de>
Stand: 11.06.2008
- [augorg] <www.auger.org>
Stand: 11.06.2008
- [Etc06] Etchegoyen, Alberto et al.: *Pierre Auger Enhancements: Transition from Galactic to Extragalactic Cosmic Ray Sources*. *AIP Conf.Proc.*917:210-218,2007
- [Etc07] Etchegoyen, Alberto et al.: *AMIGA, Auger Muons and Infill for the Ground Array*. ICRC'07 Mérida, México
- [Gru00] Grupen, Claus: *Astroteilchenphysik. Das Universum im Licht der kosmischen Strahlung*. 1.Auflage, Braunschweig/Wiesbaden, 2000
- [Hor89] Horowitz, Paul und Hill, Winfield: *The Art of Electronics*. 2nd Edition, Cambridge, 1989
- [Med07] Medina Tanco, Gustavo: *Astrophysics Motivation behind the Pierre Auger Southern Observatory Enhancements*. ICRC'07 Mérida, México
- [Roh87] Rohe, Karl-Heinz: *Elektronik für Physiker. Eine Einführung in analoge Grundschaltungen*. 3. durchgesehene Auflage Stuttgart 1987
- [Sci07] The Pierre Auger Collaboration: *Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects*. *Science* 09.09.2007
- [Sidel] Sidelnik, Ivan: Private Kommunikation