

Diplomarbeit

Entwicklung eines Beacons zur externen Zeitkalibration für das Auger Engineering Radio Array

Diplomand: Michael Konzack
Referent: Prof. Dr. J. Blümer
Korreferent: Prof. Dr. W. de Boer
Abgabe: August 2010

Kurzbeschreibung

Die Erforschung kosmischer Strahlung mit digitalen Radiointerferometern, wie sie bei LOPES durchgeführt wird, benötigt eine herausragende Zeitgenauigkeit (~ 1 ns) bei der Aufnahme der Daten. Um diese Zeitgenauigkeit zu gewährleisten und zu überwachen, wird bei LOPES ein Referenzsender, ein Beacon, eingesetzt. In Argentinien befindet sich, als Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums, das Auger Engineering Radio Array AERA im Aufbau. AERA wird mit bis zu 160 autonomen Antennenstationen auf einer Fläche von bis zu 20 km^2 errichtet. Um die erforderliche Zeitgenauigkeit auch bei AERA zu erreichen wird ebenfalls ein Beacon eingesetzt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Konzept des Beacons an die Bedingungen von AERA angepasst und umgesetzt. Diese Anpassungen betrafen sowohl den grundsätzlichen Aufbau und die Auswahl der Komponenten als auch die Implementierung von Software zur Steuerung und Überwachung des Beacons. Des Weiteren wurden im Rahmen der Analysesoftware des Pierre-Auger-Observatoriums „Offline“ die Softwaremodule zum zeitlichen Korrigieren der AERA-Daten entwickelt und mit Hilfe von Simulationen getestet.

Die grundsätzliche Funktionalität des Beacons wurde mit Testmessungen in Argentinien überprüft. Dazu wurde die Ausgangsleistung des Beacons gemessen und die Signalverluste im Kabel und der Antenne bestimmt. Außerdem wurde die empfangbare Leistung der Beaconsignale im AERA-Feld gemessen.

Der Beacon ist komplett installiert und so weit wie möglich getestet und kann mit der Inbetriebnahme von AERA genutzt werden.

Developing a Beacon for external time calibration of the Auger Engineering Radio Array

To study cosmic rays with digital radio interferometers like LOPES an excellent timing accuracy is required. To assure and monitor this timing accuracy, LOPES uses a constant wave reference transmitter called Beacon.

The Auger Engineering Radio Array AERA is an enhancement to the Pierre Auger Observatory and will consist of 160 autonomous antenna stations distributed over an area of 20 km². To achieve the necessary timing accuracy (~ 1 ns) with AERA a Beacon is used.

Adapting the concept of a Beacon to the requirements of AERA is the content of this diploma thesis. The adaptations contain the fundamental build-up and selection of components as well as the implementation of software to control and monitor the Beacon.

In addition, software modules which apply the timing correction to the data were implemented in the context of the Pierre Auger Observatory analysis software framework Offline.

Those correction modules have been tested by simulations. The basic functionality of the Beacon hardware was verified by test measurements in Argentina. The output power of the Beacon was measured and the return loss of the cable and the antenna was determined. Furthermore the received power of the Beacon signals at the AERA site was measured. The Beacon in Argentina is completely installed, tested as far as possible and ready for operation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kosmische Strahlung	5
2.1	Energiespektrum	5
2.2	Herkunft und Beschleunigungsmechanismen kosmischer Strahlung	7
2.3	Propagation	8
2.4	Ausgedehnte Luftschauer	9
2.4.1	Entstehung	9
2.4.2	Radioemission von Luftschauern	11
2.4.3	Geosynchrotronstrahlung	12
2.5	Experimente	13
2.5.1	KASCADE-Grande und LOPES	13
2.5.2	Pierre-Auger-Observatorium und AERA	16
3	Motivation und Grundlagen	21
3.1	Interferometrie	21
3.2	Notwendigkeit einer guten Zeitgenauigkeit	22
3.3	Zeitgenauigkeit bei LOPES	24
3.4	Zeitgenauigkeit bei AERA	26
3.5	Zeitkorrektur mit Hilfe des Beaconsignals	26
3.5.1	Referenzphasendifferenzen	30
3.6	Anforderungen an das Zeitkalibrationssystem bei AERA	32
4	Realisation des Beacons für AERA	33
4.1	Hardware	34
4.1.1	PC	34
4.1.2	Interfacekarte	35
4.1.3	Frequenzgenerator	36
4.1.4	Verstärker	38

4.1.5	Sendeantenne: SALLA	39
4.1.6	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	40
4.1.7	IP-Powerswitch	41
4.2	Beacon-Software	42
4.2.1	Konzept	42
4.2.2	Der Beacondaemon „Beacond“	43
4.2.2.1	Netzwerkschnittstelle (Kommandostruktur)	45
4.2.2.2	Schnittstelle zur Elektronik	47
4.2.2.3	Schnittstelle zu den Logfiles	49
4.2.2.4	Schnittstelle zur GUI und zur MySQL Datenbank	50
4.2.2.5	Kalibration der Leistungsmessung	50
4.3	Offline	52
4.3.1	Beacon-Zeitkalibrationsmodul in Offline	53
4.3.2	Berechnung der Referenzphasendifferenzen	54
5	Aufbau des Beacons und Testmessungen in Argentinien	59
5.1	Aufbau	59
5.2	Testmessungen	59
5.2.1	Messung der Ausgangsleistung am Verstärker	60
5.2.2	Messung der Reflexions- und Leitungsverluste	62
5.2.3	Messung der empfangbaren Leistung im AERA Feld	64
5.2.4	Messung des Frequenzspektrums an der CRS	68
6	Ausblick	73
6.1	Einfluss der Zeitkorrektur auf die Rekonstruktion	73
6.2	Simulation der Zeitkorrektur mit Offline	76
6.3	Überwachung von AERA mit dem Beacon	79
7	Zusammenfassung	81
A	Technische Daten	83
B	Wichtige Dateien der Beacon-Software	85
	Literaturverzeichnis	89

1 Einleitung

Das Interesse an kosmischer Strahlung hat in den letzten Jahren immer mehr zugenommen. Die Herkunft, Propagation und Beschleunigungsmechanismen dieser hochenergetischen kosmischen Teilchen waren lange Zeit und sind zum Teil immer noch ungelöste Fragen der Astrophysik. Um diese Probleme zu lösen, werden Experimente mit kombinierten Detektoren und verschiedenen Detektortechniken benötigt. Eine relativ neue, vielversprechende Detektortechnik ist die Messung von Radioemissionen in den von kosmischer Strahlung erzeugten Luftschauern. Diese Technik erreicht eine hohe Präzision bei der Richtungsrekonstruktion, kann Rückschlüsse auf die Primärenergie ziehen und ermöglicht eine Datenaufnahme rund um die Uhr.

Askaryan sagte bereits 1962 voraus, dass ausgedehnte Luftschauer kohärente Radioemissionen erzeugen [1]. 1965 wurden von Jelley et al. [2] die ersten Radioemissionen durch Luftschauer entdeckt und in den späten sechziger Jahren im Bereich von 2 MHz bis 520 MHz bestätigt. Aufgrund von technischen Problemen und dem Erfolg anderer Detektionstechniken, wie zum Beispiel Fluoreszenzteleskopen, wurde es in den folgenden Jahren ruhiger in diesem Forschungsgebiet. Erst durch die Entwicklung von schnellen Breitband-ADCs (Analog Digital Converter) und durch Fortschritte in der Digitaltechnik wurde es möglich, die Daten digital zu verarbeiten.

Neue Experimente wie LOFAR (**L**ow **F**requency **A**rray) wurden in den 90ern vornehmlich für astronomische Zwecke geplant, um im Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 240 MHz Radioquellen zu beobachten. Für die Beobachtungsstrategien wird bei LOFAR zwischen zwei Frequenzbereichen unterschieden. Im höheren Frequenzbereich werden einzelne Teile des Himmels nach einem bestimmten Muster beobachtet, indem die einzelnen Antennen zu einem virtuellen Teleskop kombiniert werden. Im niedrigen Frequenzbereich kann LOFAR einen großen Teil des Himmels auf einmal beobachten und sucht dabei nach so genannten „Transients“, flüchtigen Erscheinungen, die zum Beispiel durch Gamma-Ray-Burst oder

Sonneneruptionen zustande kommen.

Eine weitere Quelle dieser Transients ist die Radioemission von Luftschauern, die durch kosmische Strahlung ausgelöst werden. Dadurch ist es möglich, die Eigenschaften kosmischer Strahlung mit Radioteleskopen zu untersuchen [3]. Als Test für die Funktionstüchtigkeit dieses Konzeptes wurde innerhalb des KASCADE-Feldes [4] LOPES (**LO**FAR **P**rototype **S**tation) errichtet. Diese Standortwahl erlaubt es, die Radiotechnik in einem gut verstandenen Luftschauerexperiment zu testen und zu kalibrieren. Außerdem werden mit LOPES technische Entwicklungen vorangetrieben, wie zum Beispiel Selbsttriggerung, Tests verschiedener Antennentypen, Entwicklung von Kalibrationsmethoden oder der Beacon zur Verbesserung der relativen Zeitgenauigkeit.

Bei der Beobachtung kosmischer Strahlung über die Radioemission von Luftschauern werden die Signale der einzelnen LOPES-Antennen interferometrisch kombiniert, um die Auflösung des Experiments zu verbessern. Bei diesem Vorgehen ist es wichtig eine hervorragende relative Zeitgenauigkeit zu haben, da diese direkten Einfluss darauf hat wie gut LOPES auf die Quelle der Radioemission fokussiert werden kann. Somit beeinflusst sie alle daraus resultierenden Analyseergebnisse, wie zum Beispiel die Ankunftsrichtung des kosmischen Teilchens und die Detektionseffizienz. Um die erforderliche Zeitgenauigkeit zu erreichen, werden bei LOPES verschiedene Kalibrationsschritte durchgeführt. In Abständen von einem halben bis einem Jahr wird die Signallaufzeit aller Kanäle gemessen und in einer Kalibrationstabelle festgehalten, anhand derer die Radiosignale der Antennen bei der Analyse später korrigiert werden. Durch Umwelteinflüsse wie zum Beispiel die Temperatur kommt es jedoch zu Veränderungen der Signallaufzeit, die korrigiert werden müssen. Dazu wird bei LOPES ein Beacon (vom englischen Beacon = Leuchtturm, Funkfeuer) eingesetzt. Dieser sendet ein Referenzsignal, mit dessen Hilfe die relative Zeitgenauigkeit von LOPES überwacht und verbessert wird.

AERA (**A**uger **E**ngineering **R**adio **A**rray) ist wie LOPES ein Experiment, das die Eigenschaften kosmischer Strahlung mit Hilfe der Radioemission von Luftschauern misst und wird am Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien aufgebaut. AERA benötigt wie LOPES eine hervorragende Zeitgenauigkeit. Diese bei AERA zu erreichen ist jedoch schwieriger, da AERA erheblich größer ist, jede Antennenstation mit einer eigenen Uhr ausgestattet ist und nicht eine zentrale Uhr für alle Stationen wie bei LOPES vorhanden ist.

Um dennoch die benötigte Präzision zu erreichen, wurde das Konzept des Bea-

cons von LOPES übernommen und für die Anforderungen von AERA angepasst und erweitert. Diese Anpassung umfassen unter anderem einen wesentlich komplexeren Struktur des Beacons als ferngesteuertes System mit Sicherungssystemen, eine wesentlich erhöhte Sendeleistung und einen robusteren Aufbau. Eine Erweiterung des Beaconkonzeptes ist die, den Beacon nicht nur zum Monitoring und Ausgleichen kleinerer Abweichungen der relativen Zeitgenauigkeit wie bei LOPES zu verwenden. Die zeitliche Korrektur der Daten anhand der Beaconsignale wird aufgrund der unzureichenden GPS-Zeitgenauigkeit zum Regelfall und ist für interferometrische Analysen notwendig. Dazu wurden entsprechende Module in der Analysesoftware implementiert und anhand von Simulationen getestet.

2 Kosmische Strahlung

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung geht zurück auf den österreichischen Physiker Victor F. Hess. Er unternahm Ballonflüge mit luftdicht verschlossenen Elektroskopen. Entgegen der Annahme, dass sich die Elektroskope langsamer entladen sollten, wenn sie weiter von der Erde mit ihren radioaktiven Zerfallsprozessen entfernt waren, stellte Hess fest, dass die Entladung sogar schneller erfolgte und führte diesen Effekt auf Höhenstrahlung zurück [5].

Diese ionisierende kosmische Strahlung besteht hauptsächlich aus Atomkernen von Wasserstoff bis Eisen und produziert in der Atmosphäre Sekundärstrahlung, die vorwiegend aus Elektronen und Myonen besteht. Der Anteil von γ -Photonen und Elektronen beträgt weniger als 1% der Primärteilchen. Die Energie einzelner Teilchen der kosmischen Strahlung variiert über viele Größenordnungen bis über 10^{20} eV und ist somit erheblich größer, als die Energien, welche mit Beschleunigern auf der Erde erreicht werden können.

2.1 Energiespektrum

Das Spektrum der kosmischen Strahlung umfasst viele Größenordnungen im Fluss und in der Energie. Bis zu einer Energie von circa 10^9 eV wird das Spektrum dominiert durch die Emission der Sonne, die es schafft, Teilchen auf bis zu 10^{10} eV zu beschleunigen. Teilchen höherer Energie haben ihren Ursprung außerhalb unseres Sonnensystems. Durch die interstellaren Magnetfelder und der Tatsache, dass der Großteil der kosmischen Strahlung aus geladenen Teilchen besteht, sind Teilchen bis zu einer Energie von circa 10^{18} eV an unsere Galaxie gebunden, da ihr Gyroradius kleiner als die Dimension unserer Galaxie ist. Erst bei höheren Energien und damit größeren Gyroradien kann man also davon ausgehen, dass ein Anteil der Strahlung extragalaktischen Ursprungs ist.

Der Fluss der kosmischen Strahlung ist bei den höchsten Energien sehr klein,

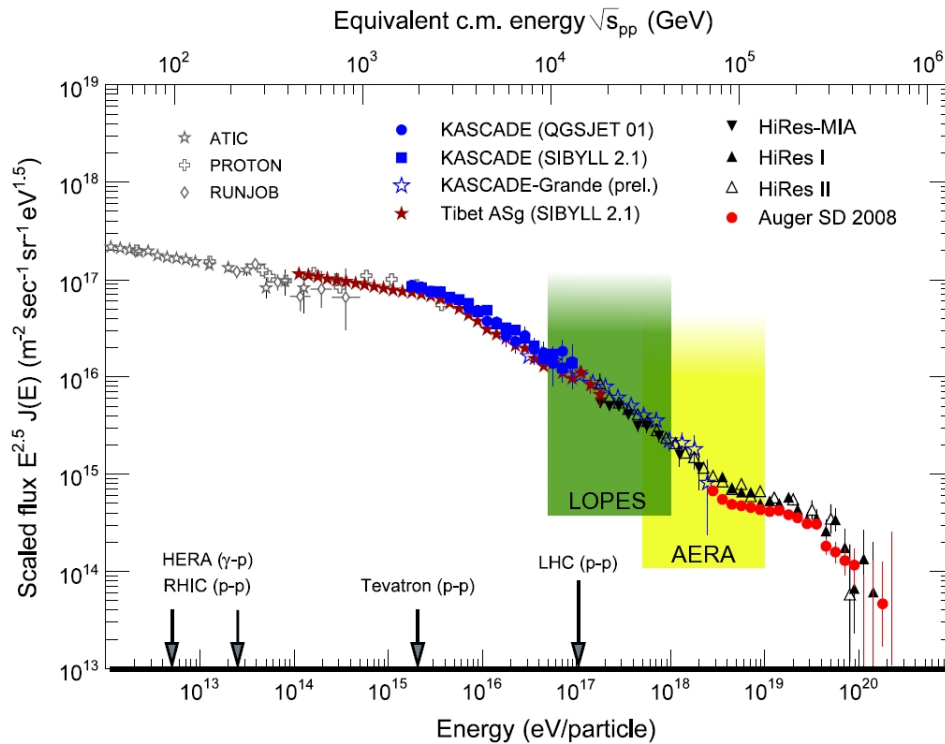


Abbildung 2.1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Um die Eigenschaften des Spektrums hervorzuheben ist es mit $E^{2.5}$ multipliziert.

so erwartet man bei 10^{20} eV nur noch wenige Teilchen pro Quadratkilometer in 1000 Jahren. Das Spektrum folgt weitgehend einem Potenzgesetz und der Fluss kann geschrieben werden als:

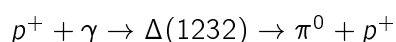
$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma}$$

Bis 10^{14} eV wurde das Spektrum und die Elementzusammensetzung mit Satelliten oder Zirkumpolarflügen von Ballons direkt gemessen. Bei höheren Energien ist der Fluss zu gering, um die Primärteilchen direkt zu messen und es kommen Bodendetektoren zum Einsatz, welche die Sekundärteilchen, die in Luftschauern erzeugt werden, nachweisen.

Das Energiespektrum weist einige Charakteristika auf. Im Bereich von GeV bis circa $3 \cdot 10^{15}$ eV fällt der Fluss mit dem Spektralindex $\gamma \simeq 2.7$ ab. Dieser Bereich lässt sich durch Fermibeschleunigung erster und zweiter Ordnung erklären (siehe 2.2). Bei $3 \cdot 10^{15}$ eV wird das Spektrum steiler und fällt mit $\gamma \simeq 3.1$ ab. Man vermutet hier einen Wechsel des Beschleunigungsmechanismus bzw. der Quel-

len. Dieser Knick wird als Knie bezeichnet. Im Bereich von $5 \cdot 10^{18}$ eV wird das Spektrum wieder flacher, dieser Punkt wird Knöchel genannt. Möglicherweise wird dieses Abflachen durch den Übergang von galaktischer zu extragalaktischer kosmischer Strahlung erzeugt. Dieser Bereich ist daher besonders interessant und liegt im Energiebereich der von den Radioexperimenten LOPES und AERA abgedeckt wird.

Ab circa $5 \cdot 10^{19}$ eV sollten Protonen ausreichend Energie haben, um inelastische Stöße mit Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung durchzuführen.



Dieser nach Greisen, Zatsepin und Kuz'min benannte GZK-Cutoff legt eine Grenze fest, wie weit die Quellen ultrahochenergetischer Teilchen von der Erde entfernt sein können, da durch diesen Effekt Protonen entsprechender Energie innerhalb weniger Mpc stark an Energie verlieren [6][7].

Auch für die anderen Komponenten der kosmischen Strahlung existieren ähnliche Prozesse, wie inverse Comptonstreuung von Elektronen am kosmischen Mikrowellenhintergrund, Photodissoziationsprozesse schwerer Kerne mit der Infrarot-hintergrundstrahlung oder Paarbildung von Photonen im interstellaren Medium.

2.2 Herkunft und Beschleunigungsmechanismen kosmischer Strahlung

Für die Beschleunigung der Teilchen gibt es zwei Erklärungsmodelle. Die Top-Down-Szenarien gehen davon aus, dass die höchst energetische kosmische Strahlung durch den Zerfall energiereicherer Teilchen entsteht. In diesem Fall würde man bei hohen Energien eine Zunahme des Photonenanteils erwarten, da dies ein bevorzugter Zerfallskanal wäre. Durch die Obergrenze des Photonenanteils, welche vom Pierre-Auger-Observatorium gesetzt wurde, kann man die meisten Top-Down-Modelle jedoch als widerlegt betrachten [8].

Als Gegensatz dazu gehen die Bottom-Up-Modelle von niederenergetischen Teilchen aus, die zu immer höheren Energien hin beschleunigt werden. Dazu muss ein effizienter Beschleunigungsmechanismus existieren.

Die meiste Materie im Universum befindet sich im Zustand eines Plasmas, welches leitfähig ist und worin folglich das E-Feld verschwindet. Somit ist lokal

keine Beschleunigung der Teilchen möglich. Auf größeren Skalen, wenn sich Systeme relativ zueinander bewegen, verschwindet das E-Feld global nicht und es besteht die Möglichkeit zur Teilchenbeschleunigung durch den Fermimechanismus 2. Ordnung. Dabei gewinnt ein geladenes Teilchen Energie, wenn es zum Beispiel an einer magnetisierten Wolke streut, wobei Wolke und Teilchen entgegengesetzte Geschwindigkeiten haben. Bei diesen Head-On-Collision gewinnt das Teilchen Energie. Wenn jedoch die Geschwindigkeiten in dieselbe Richtung zeigen, verliert das Teilchen bei dieser Overtaking-Collision Energie. Der Energiegewinn hängt quadratisch von der Geschwindigkeit β des Magnetfeldes ab, weswegen dieser Beschleunigungsmechanismus als Fermibeschleunigung 2. Ordnung bezeichnet wird. Insgesamt ist dieser Mechanismus aber nicht effizient genug, um das Spektrum der kosmischen Strahlung zu erklären.

Bei der Fermibeschleunigung 1. Ordnung werden die Teilchen an ausgedehnten Schockfronten beschleunigt. Diese Schockfronten können zum Beispiel bei Supernova-Explosionen erzeugt werden. Durch die Magnetfelder, welche durch das turbulente Plasma in der Schockfront erzeugt werden, besteht die Möglichkeit, dass das Teilchen die Schockfront mehrmals durchquert und bei jedem Überqueren Energie gewinnt. Bei diesem Mechanismus ist der Energiegewinn linear abhängig von der Geschwindigkeit der Schockfront und die Teilchen erreichen somit viel schneller höhere Energien.

2.3 Propagation

Der größte Anteil kosmischer Strahlung sind geladene Teilchen, die von galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern beeinflusst werden. Dabei besteht das Magnetfeld unserer Galaxie aus einem regulären und einem chaotischen Anteil [9]. Erst Teilchen mit einer Energie von mehr als 10^{18} eV haben einen Gyroradius von mehr als 30 kpc, welches circa dem Durchmesser der Galaxie entspricht, und können somit der Galaxie entfliehen. Die Propagation der Teilchen ist diffus und die mittlere freie Weglänge ist größer als die Galaxie, was zu Aufenthaltsdauern von mehr als 10^7 Jahren führt. Die Transportgleichung kosmischer Strahlung wird durch Modelle wie das Leaky-Box-Modell [10], bei dem man eine energieabhängige Fluchtwahrscheinlichkeit der Teilchen aus einem festen Volumen annimmt, vereinfacht beschrieben.

2.4 Ausgedehnte Luftschauder

2.4.1 Entstehung

Aufgrund des geringen Flusses der kosmischen Teilchen bei hohen Energien sind Messungen in diesem Bereich mit 'kleinflächigen' Ballon- oder Satellitenexperimenten mit ausreichender Statistik nicht möglich. Die Messungen im hochenergetischen Bereich sind folglich indirekt und basieren dabei auf Luftschaudern, welche durch Interaktion des Primärteilchens mit den Teilchen der Atmosphäre entstehen.

Die hochenergetischen kosmischen Teilchen wechselwirken hadronisch mit den Atomen und Molekülen der Atmosphäre bereits in den oberen Schichten der Atmosphäre. Dabei bildet sich eine Lawine von Sekundärteilchen, die sich mit relativistischer Geschwindigkeit durch die Atmosphäre bewegen. Diese Teilchen durchlaufen weitere Wechselwirkungen oder zerfallen in leichtere Teilchen. Es bildet sich eine gekrümmte Scheibe von wenigen Metern Dicke, in der sich die Teilchen befinden, welche ausgedehnte Luftschauder (Extensive Air Shower) genannt wird [11].

Die Zahl der entstehenden Teilchen hängt dabei von der Primärenergie ab. Sobald die Sekundärteilchen eine Schwellenenergie unterschreiten, dominiert die Absorption der Teilchen in der Atmosphäre und die Teilchenzahl nimmt exponentiell ab.

Die Teilchen des Luftschauders können in drei Komponenten aufgeteilt werden. Die elektromagnetische Komponente besteht zu 90% aus den leichtesten Teilchen des Schauders, Elektronen, Positronen und Photonen. In hadronischen Wechselwirkungen werden Mesonen produziert, die fast vollständig über folgende zwei Kanäle zerfallen:

$$\begin{aligned}\pi^0 &\rightarrow \gamma\gamma \\ \pi^\pm &\rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu\end{aligned}$$

Die zwei aus dem π^0 resultierenden Photonen produzieren via Paarbildung Elektron-Positronpaare.

$$\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$$

Diese wiederum können über Bremsstrahlung weitere Photonen produzieren.

$$e^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \gamma$$

Durch diese Prozesse entsteht eine Kaskade von Elektronen und Photonen bis die Energie unter einen kritischen Wert von circa 80 MeV fällt und Ionisationsverluste dominieren.

Die myonische Komponente entsteht aus geladenen Mesonen, die bei hadronischen Wechselwirkungen entstehen. Darunter sind schnell zerfallende Pionen und Kaonen.

$$\begin{aligned}\pi^{\pm} &\rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \\ K^{\pm} &\rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \\ &\rightarrow \pi^0 + \pi^{\pm} \\ &\rightarrow 3\pi^{\pm} \\ &\rightarrow \pi^0 + \mu^{\pm} + \nu_{\mu}\end{aligned}$$

Durch ihren kleinen Wirkungsquerschnitt und die relativistische Zeitdilatation erreichen die meisten Myonen den Boden. Sie werden kaum gestreut und erlauben somit Rückschlüsse auf die Schauerentwicklung. Lediglich ein geringer Teil der Myonen zerfällt und trägt zur elektromagnetischen Komponente bei. Die bei den Zerfällen entstehenden atmosphärischen Neutrinos können nicht im Schauer gemessen werden. Deren zenitwinkel-abhängige Beobachtung lieferte aber einen Beweis für die schon vorhergesagte Neutrinooszillation [12].

Die hadronische Komponente umfasst circa 1% der am Boden detektierten Teilchen. Durch ihren großen Impuls propagieren sie entlang der Schauerachse und sind so nur im Umkreis von wenigen zehn Metern von der Schauerachse zu messen. Da der Anfang des Schauers und seine Entwicklung stark von der hadronischen Komponente abhängen, führen kleine Abweichungen der Anfangsbedingungen zu ganz unterschiedlichen Schauern.

Es gibt verschiedene Effekte bei der Entwicklung eines Luftschauers die zu einer Emission führt mit der man den Schauer beobachten kann. Die Teilchen der elektromagnetischen Komponente ionisieren Stickstoffmoleküle, was zu einer Anregung der Moleküle führt. Beim Zurückfallen in den Grundzustand emittieren die Moleküle isotrop Fluoreszenzlicht, welches gemessen werden kann [13]. Dieser

Effekt wird bei den Experimenten HiRes und Auger genutzt und macht eine sehr exakte Energiebestimmung möglich. Ein weiterer Emissionsmechanismus ist der Cherenkoveffekt. Bewegt sich ein geladenes Teilchen in einem dielektrischen Medium schneller als die Phasengeschwindigkeit des Lichts in diesem Medium, so polarisiert es die umgebenden Atome kurzzeitig. Deren dadurch emittierte elektromagnetische Wellen interferieren in diesem Fall konstruktiv und nicht, wie bei einem langsamen Teilchen, destruktiv. Der Cherenkoveffekt dient Experimenten wie H.E.S.S. und MAGIC als Signal zum Nachweis von hochenergetischen Photonen.

2.4.2 Radioemission von Luftschauern

Luftschauer emittieren darüber hinaus auch Signale im Radiofrequenzbereich. Der wichtigste Emissionsmechanismus im Radiobereich ist der Geosynchrotron-effekt. Die Elektronen und Positronen werden durch die Wirkung der Lorentzkraft aufgrund des Erdmagnetfeldes abgelenkt und emittieren dabei Synchrotronstrahlung. Dieser Mechanismus wird im folgenden Kapitel näher erläutert. Es existieren aber auch weitere Effekte die zu Radioemission von Luftschauern führen wie Emission durch negativen Ladungsüberschuss und Emission durch einen bewegten Dipol der durch Ladungstrennung im Erdmagnetfeld entsteht. Der Beitrag der Cherenkov Strahlung zum Radiosignal ist sehr gering. Askaryan sagte aber einen Effekt voraus der zu Emission im Radiobereich führt. Die durch Paarproduktion entstehenden Elektron-Positron-Paare führen durch Anihilation der Positronen mit den Elektronen der Luftmoleküle zu einem negativen Ladungsüberschuss. Diese Ladungswolke bewegt sich mit über Lichtgeschwindigkeit durch die Luft und emittiert Cherenkovstrahlung die sich für Wellenlängen im Bereich der Dicke der Schauerfront und darüber kohärent überlagert [1][14]. Nachdem theoretische und praktische Vorarbeiten unter anderem von Askaryan und Jelley gemacht wurden [1][14][2], konnte H. R. Allan erstmals den Zusammenhang der Feldstärke ϵ mit verschiedenen Parametern eines Luftschauers in einer Formel beschreiben [15].

$$\epsilon = 20 \cdot \frac{E_p}{10^{17} \text{ eV}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \Theta \cdot \exp \left(-\frac{R_{sa}}{R_0(\nu, \Theta)} \right)$$

Die Feldstärke ϵ ist dabei abhängig von der Energie des Primärteilchens E_p , dem Winkel α zwischen Einfallsrichtung und Erdmagnetfeld, dem Abstand zur Schauerrachse R_{sa} und einem winkelabhängigem Skalenparameter R_0 . Ziel der bestehenden und zukünftigen Radioexperimente, wie AERA, ist es diesen Zusammenhang näher zu untersuchen.

2.4.3 Geosynchrotronstrahlung

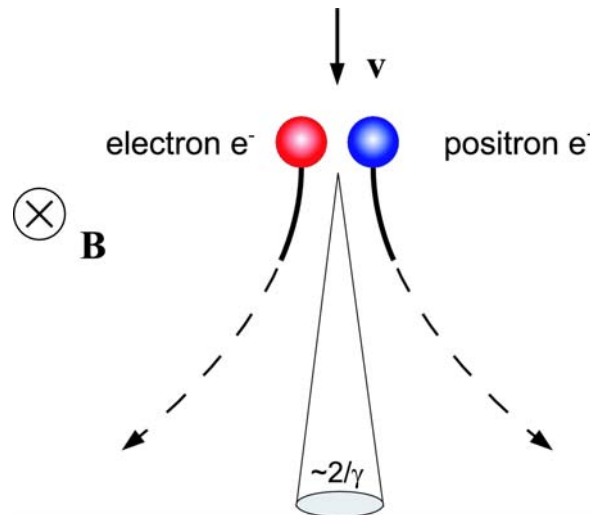


Abbildung 2.2: Geosynchrotronemission durch Abstrahlung im Erdmagnetfeld abgelenkter geladener Teilchen [16].

Das Erdmagnetfeld kann durch das Feld eines Stabmagneten genähert werden, wobei der magnetische Nordpol am geografischen Südpol liegt und umgekehrt. Die Stärke des Feldes liegt im Bereich von μT . Die geladenen Teilchen eines Schauers bewegen sich relativistisch mit der Geschwindigkeit v durch dieses Feld und erfahren eine Lorentzkraft.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Verschieden geladene Teilchen werden in unterschiedliche Richtungen abgelenkt. Die Beschleunigung eines geladenen Teilchens führt zur Emission elektromagnetischer Strahlung, insbesondere wenn sich dieses Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit bewegt. Die Emission erfolgt dabei senkrecht zur ablenkenden

Kraft in einem Kegel, der vom reziproken des Lorentzfaktors γ abhängt. Die Radiosignale werden kohärent emittiert, im Frequenzbereich in dem die Wellenlänge größer ist als die Dicke der Schauerfront, also etwa bis 100 MHz. Das Radiosignal eines Luftschauers kann dann als breitbandiger Radiopuls nachgewiesen werden. Simulationen dieses Mechanismus wurden erfolgreich durchgeführt [17][18].

2.5 Experimente

2.5.1 KASCADE-Grande und LOPES

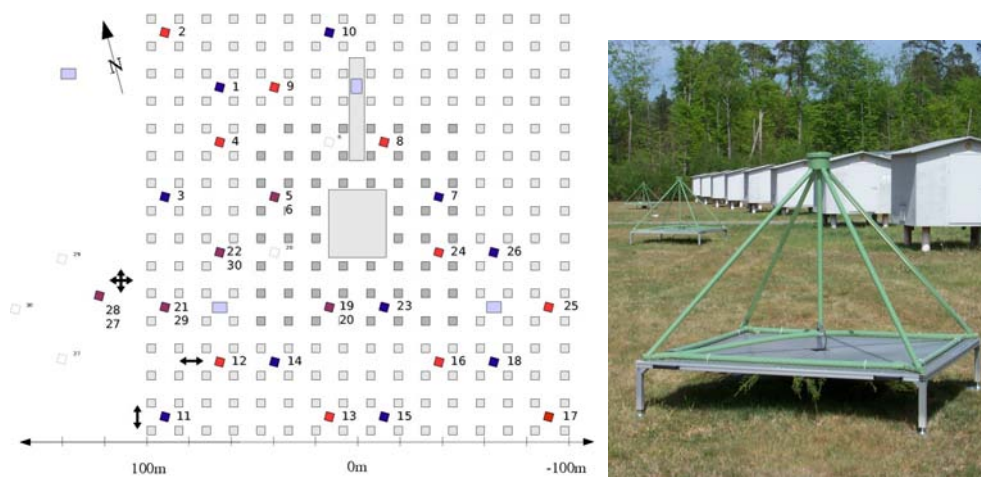


Abbildung 2.3: Links: Lageplan von LOPES mit 30 Antennen. Rechts: Eine der 30 LOPES-Antennen.

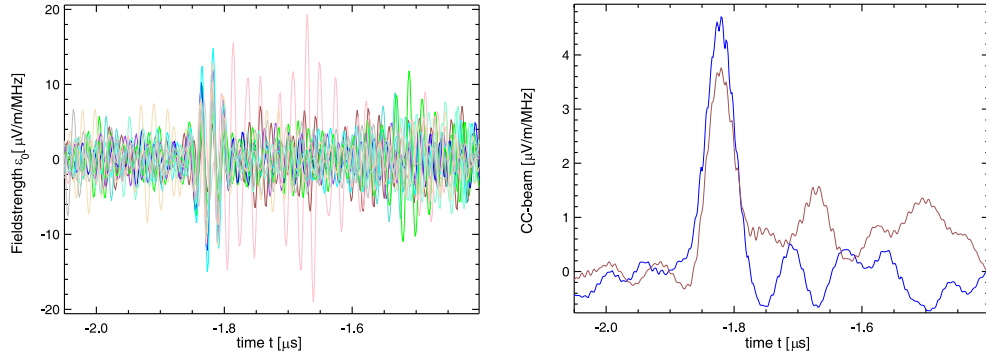
KASCADE (**K**arlsruhe **S**hower **C**ore and **A**rray **D**etector) [4] ist ein Luftschau-
erexperiment am Campus Nord des Karlsruher Instituts für Technologie. Es be-
steht aus 252 Detektorstationen die in regelmäßigen Abständen von 13 Me-
tern auf einer Fläche von 200 m × 200 m aufgebaut sind. Sie sind elektronisch
in 16 Clustern gruppiert und messen sowohl die elektromagnetische als auch
die myonische Komponente der Luftschauer. Zusätzlich existiert in der Mitte
des Feldes ein Zentraldetektor, welcher die hadronische Komponente misst und
mit einem Myon-Spurendetektor ausgestattet war. Die Erweiterung KASCADE-
Grande [19] von KASCADE besteht aus 37 Stationen die in Abständen von circa

130 m auf einer Fläche von 700 m × 700 m aufgestellt und mit Szintillatoren zur Teilchendetektion ausgestattet sind. Auch Grande ist elektronisch in Trigger-Cluster unterteilt. KASCADE wurde im Jahr 2009 offiziell beendet, dient aber weiter als Testeinrichtung und als Trigger für LOPES.

LOPES (**LO**FAR **P**rototype **S**tation) wurde gebaut, um für das im Aufbau befindliche Radioteleskop LOFAR (**Low Frequency Array**) die Machbarkeit des Radionachweises von Luftschauern zu zeigen. Der Aufbau begann im Jahr 2003 mit zehn „umgedreht v-förmigen“ Dipolantennen und wurde später auf 30 Antennen erweitert (siehe Abbildung 2.5.1) [20]. Die empfangene Bandbreite wird durch analoge Filter auf den effektiven Bereich von 43 MHz bis 74 MHz begrenzt. LOPES befindet sich innerhalb des KASCADE-Feldes am Karlsruher Institut für Technologie. Durch diese Standortwahl ist es möglich, ab einer Energie von $10^{16,5}$ eV simultan mit KASCADE und LOPES zu messen und so die Ergebnisse beider Technologien zu vergleichen. Ein weiterer Vorteil ist, dass KASCADE für LOPES einen Trigger bereitstellt. Die LOPES Datenerfassung wird ausgelöst sobald 10 der 16 Cluster von KASCADE getriggert werden. Ausserdem erhält LOPES einen Trigger von KASCADE-Grande, wenn dessen mittlere drei Trigger-Cluster getriggert werden. Die Spuren von 0,8 ms Länge werden mit 80 MHz Abtastrate in der zweiten Nyquist-Zone (40-80 MHz) aus den analogen Radiosignalen digitalisiert, die von der Antenne aufgefangen werden. Aus den Ringpuffern, in die diese Messdaten kontinuierlich geschrieben werden, werden dann Spuren mit 2^{16} Messpunkten ausgelesen.

Die Daten werden dann in der Auswertung einem „Hochtasten“ (engl.: Upsampling) unterzogen, bei dem Datenpunkte zwischen den eigentlichen Messpunkten berechnet werden. Dies ist nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem möglich, da die Abtastfrequenz mit 80 MHz größer als zwei mal die Bandbreite von 31 MHz ist. Anschließend werden Korrekturen der Dispersion und Verzögerung des Signals in der Signalkette vorgenommen sowie Richtungs- und Frequenzabhängigkeiten der Antenne berücksichtigt. Die relative Zeitgenauigkeit wird stark verbessert durch einen Beacon, der als Referenzantenne ein sinusförmiges Signal auf mehreren Frequenzen sendet. Dabei wird die Phasendifferenz der Beaconsignale zwischen den Antennen betrachtet und die relative Zeitgenauigkeit zwischen den Antenne so auf etwa 1 ns korrigiert.

Dank dieser ausgezeichneten relativen Zeitgenauigkeit kann mit LOPES Interferometrie betrieben werden. Dabei werden die Spuren der einzelnen Antennen entsprechend der Schauergeometrie, die von KASCADE übernommen wird, so



(a) Die Signale in den Spuren der einzelnen Antennen liegen nach dem Erzeugen des Beams übereinander, während das Rauschen vorher und nachher inkohärent bleibt.

(b) Der dazugehörige Cross-Correlation-Beam in blau und der Power-Beam in rot. Der Power-Beam ergibt sich aus der Wurzel der gemittelten Leistungen.

Abbildung 2.4: Beispielereignis: Das kohärente Signal bei etwa $-1,8 \mu\text{s}$ erzeugt im Cross-Correlation-Beam einen deutlichen Peak, der Power-Beam ist ein Maß für die Leistung zu einem Zeitpunkt und ist immer positiv.

verschoben, dass die Signale alle zeitlich aufeinander liegen. Dies führt zu einem Richtstrahl (beam) in Richtung der Schauerachse [21]. Die Daten können anschließend auf verschiedene Weise verknüpft werden. Beim Kreuzkorrelations-Richtstrahl (Cross-Correlation-Beam) wird jedes Signal einer Antenne mit dem Signal aller anderen Antennen multipliziert und diese Werte anschließend gemittelt. Die Antennen werden interferometrisch kombiniert. Der Vorteil des Cross-Correlation-Beams ist, dass kohärente Radiopulse immer ein positives Vorzeichen erzeugen, während inkohärente auch ein negatives Vorzeichen erzeugen können (siehe Abbildung 2.4). Bei dieser Kombination der Pulse der einzelnen Antennen wird das kohärente Signal erhöht und Störungen, die inkohärent sind, werden durch destruktive Interferenz verringert [21]. Dies führt zu einem besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis gegenüber der normalen Lateralverteilung mit zunehmender Anzahl an Antennen. Der Cross-Correlation-Beam berechnet sich wie folgt:

$$cc(t) = \pm \sqrt{\left| \frac{1}{N_P} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j>i}^N s_i(t) s_j(t) \right|},$$

wobei N_P die Anzahl einmaliger Antennenpaare ist, $s_i(t)$ und $s_j(t)$ die Signale der Antennen i und j zum Zeitpunkt t und $cc(t)$ das kombinierte Signal zum

Zeitpunkt t [22]. Des Weiteren gibt es noch den Power-Beam der sich als Wurzel der gemittelten Leistungen aller Antennen ergibt. Mit den von LOPES gewonnen Daten läßt sich dann die Energie und Richtung des Primärteilchens bestimmen und theoretisch auch eine Aussage über dessen Masse machen [23].

2.5.2 Pierre-Auger-Observatorium und AERA

Das Pierre-Auger-Observatorium [24][25] wurde gebaut um die Eigenschaften der kosmischen Strahlung bei höchsten Energien zu messen. Das Experiment soll das Spektrum der kosmischen Strahlung im Bereich der höchsten Energien mit bisher unerreichter Genauigkeit vermessen und so zum Beispiel dabei helfen, die Frage zu klären, ob bei $5 \cdot 10^{19}$ eV der GZK-Cutoff einsetzt. Die Daten von den unabhängigen Experimenten AGASA [26] und Fly's Eye [27] weichen in diesem Bereich auch aufgrund fehlender Statistik stark voneinander ab. Wegen Propagationseffekten sollten Teilchen höchster Energie aus der näheren Umgebung unserer Galaxie stammen und somit nur wenig abgelenkt sein. Sie sollten also noch Richtungsinformationen enthalten und so ihre Quelle über eine Anisotropie in der Ankunftsrichtung der höchst energetischen Teilchen zeigen [28].

Teilchen mit diesen Energien um 10^{20} eV sind sehr selten. Deshalb erstreckt sich das Pierre-Auger-Observatorium über eine Fläche von circa 3000 km^2 in Argentinien, in der Provinz Mendoza. Das Observatorium ist als Hybrid-Experiment konstruiert, d.h. es kombiniert verschiedene Detektionstechniken miteinander. Zum einen sind 1600 Wasser-Cerenkov-Detektoren (SD, Abbildung 2.5.2 links) in einem dreieckigen Raster mit einem Abstand von 1,5 km zueinander aufgestellt, zum anderen existieren vier Teleskopstationen (FD, Abbildung 2.5.2 rechts), die mit jeweils sechs Fluoreszenzteleskopen ausgerüstet sind (siehe Abbildung 2.5.2). Unterhalb der Teleskopstation Coihueco befindet sich das so genannte Infill-Array, auf dem Wasser-Cherenkov-Tanks in einem engeren Abstand zueinander stehen, um Teilchenschauer auch bei kleineren Energien zu messen. Überblickt wird dieser Bereich von der zusätzlichen Teleskopstation HEAT (**H**igh **E**levation **A**uger **T**elesopes), welche mit drei Fluoreszenzteleskopen ausgestattet ist. Das gesamte Observatorium befindet sich auf einer Hochebene, circa 1400 m über dem Meeresspiegel.

Als Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums befindet sich gerade AERA (**A**uger **E**ngineering **R**adio **A**rray) im Aufbau. Innerhalb des Infill-Arrays, also un-

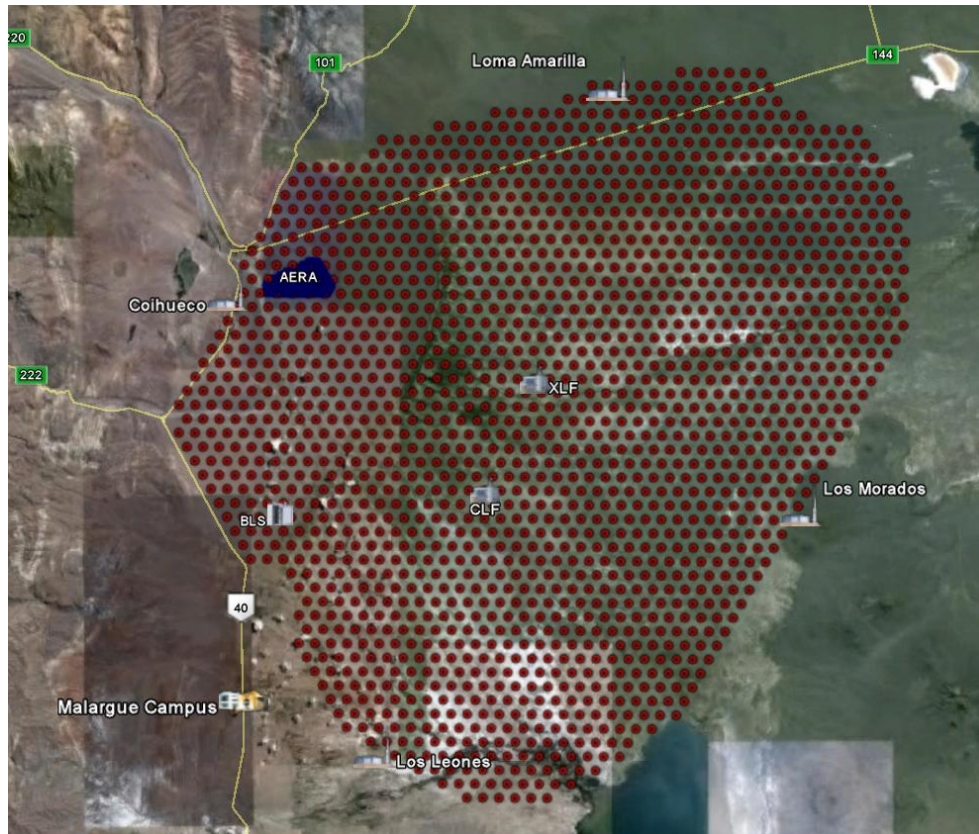


Abbildung 2.5: Übersichtskarte des Pierre-Auger-Observatoriums. Die 1600 Wasser-Cerenkov-Detektoren sind durch rote Punkte gekennzeichnet. Der blaue Bereich stellt die Fläche dar auf der die Radioerweiterung AERA gebaut wird [29].

terhalb der Teleskopstation Coihueco, werden dafür 150 Radioantennen und die CRS (**C**entral **R**adio **S**tation) aufgebaut. Die Errichtung geschieht in drei Phasen. Im ersten Abschnitt werden 24 Stationen mit 150 m Abstand zueinander aufgebaut, im zweiten 52 Stationen mit einem Abstand von 250 m und im dritten 85 Stationen mit einem Abstand von 380 m zueinander. Als Empfangsantennen befanden sich mehrere Antennentypen in der Erprobung, wie zum Beispiel ein „Butterfly-Dipol“, eine „Short Aperiodic Loaded Loop Antenne“ kurz SALLA oder eine „Logarithmic Periodic Dipole Antenne“ kurz LPDA [30].

Die Antenne ist ein sehr wichtiger Teil des Experiments, denn sie hat sowohl Einfluss auf den abgedeckten Bereich des Himmels, als auch auf den Frequenzbereich in dem gemessen werden kann. Wichtige Kriterien für die Auswahl einer Antenne sind unter anderen, mechanische Stabilität wegen Wind und UV-Strahlung



Abbildung 2.6: Links einer der 1600 SD-Tanks, rechts das FD-Gebäude Coihueco.

in der Pampa, aber auch wegen Beschädigung durch Tiere, sowie eine gute und von den Bodenverhältnissen möglichst unabhängige breitbandige Empfangscharakteristik. Für den Aufbau von Phase 1 haben sich LPDAs durchgesetzt mit einer hohen Sensitivität im Bereich von 35 MHz bis 80 MHz. Eine Antenne ist dabei aus zwei LPDAs aufgebaut die in einem 90° Winkel zueinander befestigt sind. Die einzelnen Dipole der LPDAs bestehen aus Kupferdrähten die mit einer UV-beständigen Hülle versehen sind. Die Elektronik besteht aus einem analogen Teil, der die LNAs (**L**ow **N**oise **A**mplifier) umfasst und einem digitalen Teil, der die Daten weiter verarbeitet und eine GPS-Uhr beinhaltet, die für die Zeitnahme verantwortlich ist. Der Übergang der Signale vom analogen in den digitalen Teil erfolgt über 12 Bit Analog-Digital-Wandler mit 160 MHz.

Für die Zeitauflösung des Experiments ist es sehr wichtig, dass die Signallaufzeit im analogen Teil der Elektronik bekannt und stabil ist. Alle Exemplare der analogen Elektronik müssen die Designspezifikation diesbezüglich einhalten um über das ganze Jahr hinweg und damit den ganzen Arbeitstemperaturbereich die benötigte Zeitgenauigkeit zu erreichen. Auch der digitale Teil der Elektronik hat einen Einfluss auf die Zeitgenauigkeit, so muss sichergestellt sein, dass die Clocks exakt genug arbeiten. Die komplette Elektronik wurde daraufhin entwickelt, möglichst wenig Strom zu verbrauchen, da die Antennenstationen mit Solarstrom und Batterien auskommen müssen. Das Solarenergiesystem ist so dimensioniert, dass es den Betrieb auch im Winter sicherstellt und im Falle von Schnee oder anderen Störungen der Sonneneinstrahlung mit Hilfe der Batterien die benötigte Energie von 10 W bis 20 W fünf Tage lang bereit stellen kann. Das Solarsystem muss so aufgebaut sein, dass es möglichst keine störenden elektromagnetischen Wellen

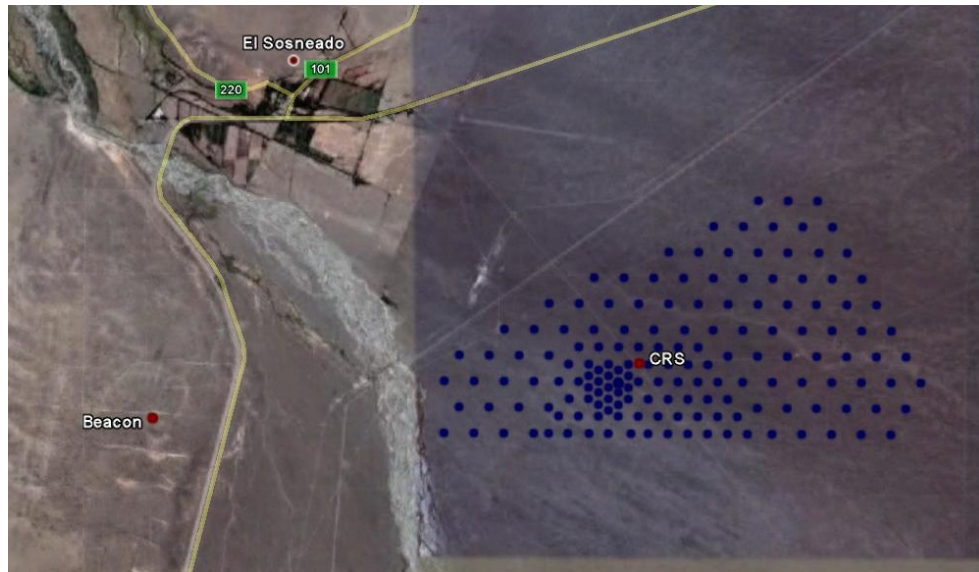


Abbildung 2.7: Übersichtskarte von AERA. Jeder blaue Punkt entspricht einer Radiostation [29].

aussendet um die Qualität der Daten von AERA nicht negativ zu beeinflussen. Die Kommunikation der Antennenstationen in den Ausbauphasen 2 und 3 wird über Funk bewerkstelligt werden. In der ersten Ausbaustufe sind die 24 Antennenstationen über Glasfaserkabel mit der CRS verbunden.

Eine Radiostation besteht also aus zwei LPDAs, die die Nord-Süd- und Ost-West-Polarisation getrennt aufnehmen, der Elektronik für die Kommunikation und Datenverarbeitung sowie Solarzellen und Batterien zur Energieversorgung. Gemessen wird im Band zwischen 30 MHz und 80 MHz, da bei großen Abständen vom Schauerzentrum niedrige Frequenzen dominieren sollten und man andererseits von starken Radiosendern unter 27 MHz und über 80 MHz eingeschränkt ist [31]. Als Prototyp-Experiment wurden zwei verschiedene Setups zur Messung von Radioemissionen aus Luftschauern an der BLS (**B**alloon **L**aunching **S**tation) [32] und der CLF (**C**entral **L**aser **F**acility) [33] aufgebaut. Diese Installationen dienten und dienen weiterhin zur technischen Entwicklung und als Testareal.

AERA hat die Ziele, das Verständnis der Radioemission von Luftschauern zu verbessern, zu erkunden was für Aussagen über physikalische Größen der Luftschauer mit Hilfe der Radiodetektion möglich sind und zusammen mit den anderen Auger-Komponenten den Übergangsbereich von galaktischer zu extragalak-

tischer kosmischer Strahlung mit bisher unerreichter Präzision zu untersuchen.

3 Motivation und Grundlagen

3.1 Interferometrie

Als Interferometrie bezeichnet man eine Messmethode, bei der Interferenz ausgenutzt wird, um Informationen über das Messobjekt zu gewinnen. Mit Hilfe eines Interferometers werden die vom Messobjekt ausgehenden Wellen überlagert und dadurch ein Interferogramm erzeugt. Die Wellen können direkt überlagert werden, wie bei einem Michelson-Morley-Interferometer, oder die Überlagerung kann nachträglich mit Hilfe von Computern erzeugt werden, wenn die vollständigen Welleninformationen wie Amplitude und Phase sowie eine genau Zeitinformation gespeichert werden können, wie zum Beispiel bei der Radioastronomie.

Bei der direkten Suche nach Gravitationswellen werden Michelson-Interferometer mit mehreren Kilometer langen Armen verwendet. Eine durchlaufende Gravitationswelle würde eine Änderung der Laufstrecke des Lichts verursachen und dadurch das Interferenzmuster ändern [34]. Bisher ist der direkte Nachweis von Gravitationswellen aber noch nicht gelungen.

Am Paranal-Observatorium im Norden Chiles befindet sich das VLTI (**V**ery **L**arge **T**elescope **I**nterferometer). Theoretisch können hier acht Teleskope kombiniert werden, vier große Teleskope mit 8,2 m Spiegeldurchmesser und vier Hilfsteleskope mit 1,8 m Spiegeldurchmesser. Einen wichtigen Teil des Systems bilden dabei die „delay lines“, welche die Laufzeiten des Lichts der, an verschiedenen Orten aufgestellten, Teleskope ausgleichen und somit direkte Interferenz ermöglichen. Genutzt wird das VLTI für räumlich höchstauflösende Spektroskopie im Infrarotbereich [35].

In der Radioastronomie benutzt man Interferometer aus Radioteleskopen, um mit hoher Auflösung Radioquellen im All wie zum Beispiel Quasare, zu beobachten. Das derzeit empfindlichste Radiointerferometer im Zentimeterwellenbereich ist das VLA (**V**ery **L**arge **A**rray) in den Vereinigten Staaten, welches aus 27

Radioteleskopen besteht, die jeweils einen Durchmesser von 25 m haben und verschiebbar in einer Y-Form aufgebaut sind. Durch diesen Aufbau kann die Basislinie zwischen 1 km und 36 km variiert werden.

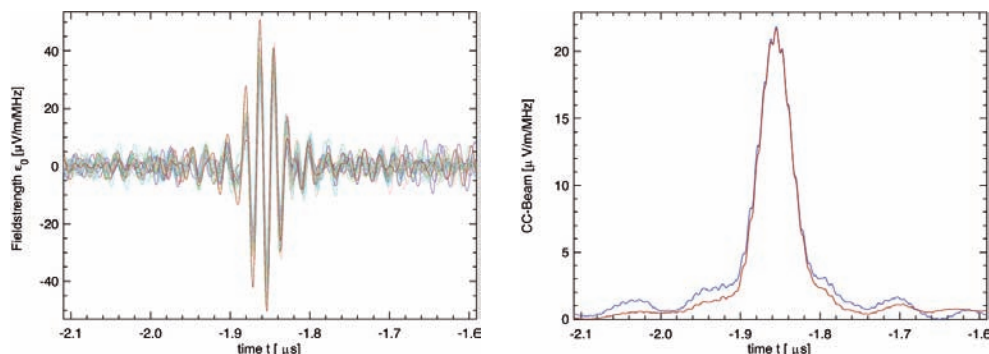
Bei der VLBI (**V**ery **L**ong **B**aseline **I**nterferometry) werden Radioteleskope auf verschiedenen Kontinenten auf ein Objekt gerichtet und die Signale zusammen mit einer sehr genauen Zeitinformation aufgenommen, die von einer lokalen Atomuhr stammt, welche an eine GPS-Uhr gekoppelt ist. Dadurch ist es möglich die Signale später zu kombinieren, indem man die verschiedenen Daten anhand ihrer Zeitinformationen und dem erwarteten Auftreten des Signals übereinanderlegt und im Bereich weniger Nanosekunden optimiert. So erhält man im Prinzip ein Interferometer mit einer Basislänge von vielen tausend Kilometern [36]. Diese Messungen sind wichtig für die Festlegung des astronomischen Koordinatensystems und für geodätische Untersuchungen.

Bei LOPES wurde das Konzept der Interferometrie, wie es in der Radioastronomie genutzt wird, erstmals auf Transients angewendet, um damit kosmische Strahlung zu untersuchen [3]. Mit LOPES und AERA wird Interferometrie im Radiofrequenzbereich betrieben und die Spuren, die von den einzelnen Antennen aufgenommen sind, werden anhand der mit aufgezeichneten Zeitinformation zeitlich zueinander ausgerichtet und kombiniert (siehe Kapitel 2.5.1).

3.2 Notwendigkeit einer guten Zeitgenauigkeit

Bei LOPES oder AERA werden die Daten der einzelnen Antennen bei der Analyse jeweils kombiniert, indem die aufgenommenen Spuren zeitlich zueinander ausgerichtet und dann verknüpft werden. Bei der interferometrischen Analyse der gemessenen Daten ist es notwendig, Kohärenzbedingungen zu erfüllen, das heißt je besser die zeitliche Kohärenz der Daten ist, desto vorteilhafter ist dies für die Analyseergebnisse. Im Falle von LOPES wird Interferometrie über den Cross-Correlation-Beam betrieben, wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben. Die Höhe und Form des resultierenden Cross-Correlation-Beams, wie er beispielhaft in Abbildung 3.1 zu sehen ist, ist als ein Maß für die Kohärenz des empfangenen Signals zu sehen. Ein Vorteil bei der Analyse über den Cross-Correlation-Beam ist, dass Signale, die auf Basis einer Antenne nicht zu sehen sind, da sie im Rauschen verschwinden, trotzdem durch ihre Kohärenz mit anderen Antennen zum Ergebnis beitragen.

Die benötigte relative Zeitgenauigkeit von 1 ns lässt sich berechnen, indem man



(a) Beispielereignis bei dem nach dem Beam-forming die Signale in den Spuren aller Antennen übereinander liegen.

(b) Der Cross-Correlation-Beam der sich aus dem Beispielereignis ergibt.

Abbildung 3.1: Ein Beispielereignis, bei dem das Signal der Radioemission von einem Luftschauer deutlich zu sehen ist, da es im Gegensatz zum Hintergrundrauschen, kohärent in allen Antennen zu sehen ist und der daraus resultierende Kreuzkorrelations-Beam.

zu den Daten jeder Antennenstation eine zusätzliche Zeitungenauigkeit addiert und die Analyse durchführt [37]. Dies wurde mit dem Beispielereignis zu sehen in Abbildung 3.1 durchgeführt, indem zu den Daten jeder Antennenstation eine zusätzliche Zeitungenauigkeit, die aus einer Gaussverteilung stammt, addiert und dannach erneut der Cross-Correlation-Beam errechnet wurde. Das Ergebnis in Abbildung 3.2 zeigt, dass schon geringe zusätzliche Zeitungenauigkeiten die Höhe des Cross-Correlation-Beams und somit auch andere Analyseergebnisse wie die Energierekonstruktion signifikant beeinflussen. Eine sehr gute Zeitgenauigkeit im Bereich von 1 ns ist aber nicht nur für Interferometrie nötig, sondern ist auch hilfreich, um anhand von Lateralverteilungen die Form der Radiowellenfront detailliert zu studieren. Dabei betrachtet man die Ankunftszeit des Pulses an den Antennen in Abhängigkeit des Abstandes vom Schauerzentrum um damit die Form der Schauerfront zu untersuchen, die Simulationen zufolge Rückschlüsse auf die Masse des Primärteilchens zulassen sollte. Verschiedene Emissionsmechanismen sagen unterschiedlich polarisierte Signale voraus. Die Unterscheidung von linear und zirkular polarisierten Signalen an jeder Antenne hängt ebenfalls stark von der relativen Zeitgenauigkeit ab [37]. Der Einfluss der zeitlichen Korrektur anhand des Beaconsignals ist in Kapitel 6.1 noch einmal analysiert.

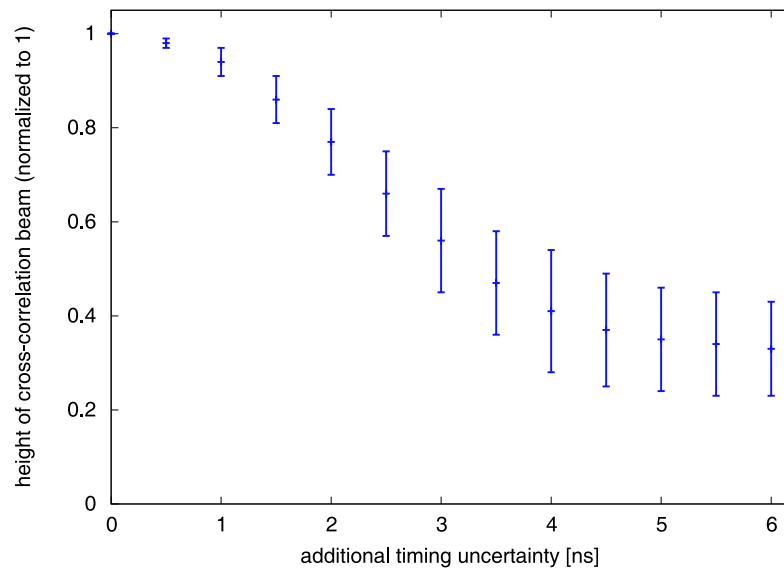


Abbildung 3.2: Abhängigkeit des Cross-Correlation-Beams von einer zusätzlichen Zeitungenauigkeit. Die x-Achse gibt die Breite der Gauss-Verteilung der zusätzlichen Zeitungenauigkeit an, die Fehlerbalken ergeben sich aus dem geometrischen Mittel von 100 Wiederholungen für jeden Punkt [37].

3.3 Zeitgenauigkeit bei LOPES

Um die benötigte Zeitgenauigkeit im Bereich von 1 ns zuverlässig zu erreichen, wird bei LOPES die relative Zeitgenauigkeit kalibriert und kontinuierlich überwacht. Die Kalibration besteht darin, dass man die Signallaufzeiten in der Elektronik jeder Antenne misst, um später die Daten damit korrigieren zu können. Um die Signallaufzeiten bzw. die relativen Signallaufzeiten zu einer Referenzantenne zu bestimmen, wurden zuerst Sonneneruptionen betrachtet. Während den Eruptionen ist die Sonne eine starke Quelle elektromagnetischer Wellen im Radiofrequenzbereich. Auf Grund der Entfernung von der Sonne zur Erde und deren Ausdehnung kann sie als Punktquelle betrachtet werden und als Kalibrationsquelle dienen [22]. Die erwarteten Zeitunterschiede im Auftreten des Signals einer Sonneneruption in verschiedenen Antennen können aufgrund der bekannten Geometrie berechnet werden und mit den gemessenen verglichen werden. Die relativen Signallaufzeiten ergeben sich dann aus dem Vergleich zu einer Referenzantenne. Anhand der so gewonnenen Kalibrationsdaten können für jedes Ereignis, das der Analyse zugeführt wird, die durch die Elektronik verursach-

ten Laufzeitunterschiede korrigiert werden. Bei dieser Methode ist man auf Sonneneruptionen und damit auf den Sonnenzyklus angewiesen und somit nicht sehr flexibel, was ein Nachteil bei Umbauten des Experiments oder dem Austausch defekter Teile und dadurch geänderten Signallaufzeiten ist. Um dieses Problem zu umgehen, wird die Kalibration inzwischen mit einem Pulsgenerator durchgeführt. Dabei wird durch einen künstlichen Trigger sowohl die Datennahme ausgelöst als auch der Puls des Pulsgenerators. Ein Vergleich der Zeitpunkte zu denen das Signal in den Spuren der verschiedenen Antennen auftaucht, liefert die relativen Laufzeitdifferenzen zu einer Referenzantenne [37].

LOPES verfügt über eine zentrale Uhr, die für alle Kanäle der Datenerfassung ein Zeitsignal liefert. Deshalb liegt die relative Zeitgenauigkeit zwischen den Antennen über kurze Zeiträume schon im Bereich von weniger als 1 ns und verschiebt sich im Laufe eines Jahres, zum Beispiel durch Temperaturänderungen und damit anderen Signallaufzeiten in den Kabeln und der Elektronik, um nicht mehr als etwa 2 ns.

Die Signallaufzeiten sind allerdings nicht konstant und können sich mit der Zeit leicht ändern. Grund dieser Änderungen sind unter anderem Temperaturschwankungen und Alterung der Elektronik. Bei der LOPES-DAQ hat es sich herausgestellt, dass es bei der Aufzeichnung zum Überspringen eines oder mehrere Samplingtakte (Samplingfrequenz 80 MHz) kommen kann und die Daten so um 12,5 ns oder ein Vielfaches davon verschoben sind. Um diese Verschiebungen zu entdecken wird eine fortlaufende Überwachung der Zeitgenauigkeit mit Hilfe eines Referenzsignals durchgeführt. Als Referenzsignale dienten zuerst die Trägerfrequenzen, bei 67,70 MHz und 67,92 MHz, des Fernsehsendeturms Raichberg der in Albstadt Onstmettingen, circa 120 km vom Antennenarray entfernt ist [22]. Aus der fixierten Geometrie von Sender und Antennenarray ergeben sich im Prinzip konstante Phasendifferenzen zwischen den LOPES-Antennen, die betrachtet werden, um die relative Zeitgenauigkeit zwischen den Antennen zu überwachen. Da beim Betrachten von nur einer Frequenz Mehrdeutigkeiten auftauchen, sobald Verschiebungen auftreten, die größer als die Periode des Referenzsignals sind, betrachtet man verschiedene Frequenzen und kann so größere Verschiebungen korrigieren. Aufgrund des Wechsels von analog-terrestrischem zu digital-terrestrischem Fernsehen wurde der Fernsehsender im Jahr 2007 abgeschaltet.

Als Ersatz wurde ein eigener Sender im KIT Campus Nord installiert. Dieses, „Beacon“ genannte System, ist circa 400 m von LOPES entfernt und besteht aus

einer Sendeantenne, die in Richtung LOPES ausgerichtet ist, einem Verstärker und einem Signalgenerator. Anfang 2008 wurde der Beacon in Betrieb genommen und sendet Referenzsignale auf den Frequenzen 63,5 MHz und 68,1 MHz. Seit Mai 2010 wird bei LOPES ein Prototyp des AERA-Frequenzgenerators genutzt, der im Rahmen dieser Diplomarbeit entstanden ist¹, um das Design und die Funktionalität des geplanten Frequenzgenerators zu testen.

3.4 Zeitgenauigkeit bei AERA

Bei AERA sind die Antennenstationen autark und jede mit einer eigenen GPS-Uhr ausgestattet. Mit diesem Aufbau erreicht man im besten Fall eine relative Zeitgenauigkeit von zwei Stationen zueinander von circa 2,3 ns was etwa 1,6 ns für eine Station entspricht [38]. Diese Werte wurden mit einem Prototypenaufbau an der BLS ermittelt und aufgrund der niedrigeren Taktfrequenz der AERA-Elektronik wird eine relative Zeitgenauigkeit zueinander im Bereich von 5 ns erwartet. Sind die Stationen weiter voneinander entfernt als bei diesen Testmessungen, ist zusätzlich damit zu rechnen, dass die relative Zeitgenauigkeit schlechter wird, da Effekte wie ein anderer Signalweg durch die Ionosphäre der GPS-Signale und ein unterschiedlicher Satz an GPS-Satelliten der Stationen einen negativen Einfluss haben sollten. Die relative Zeitgenauigkeit von AERA ist also weit entfernt von der Anforderung von 1 ns für Interferometrie, wie sie in Kapitel 3.2 begründet wurde.

Deshalb dient der Beacon bei AERA nicht nur der Überwachung der relativen Zeitgenauigkeit wie bei LOPES, sondern übernimmt eine neue Funktion, nämlich die Verbesserung der relativen Zeitgenauigkeit, dient also direkt zur Zeitkalibration des Experiments.

3.5 Zeitkorrektur mit Hilfe des Beaconsignals

Mit Hilfe des Beaconsignals kann nachträglich die Zeitinformation der gemessenen Ereignisse verbessert werden. Dabei wird mit einem Referenzsender, dem Beacon, ein sinusförmiges Signal gesendet, welches in allen Antennen deutlich als

¹Prototyp wurde in Zusammenarbeit mit Theresia Heintz entwickelt und gebaut und diente als Abschlussarbeit für die Ausbildung zur Elektronikerin am KIT.

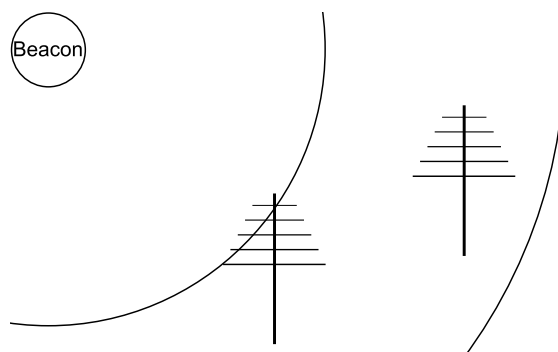
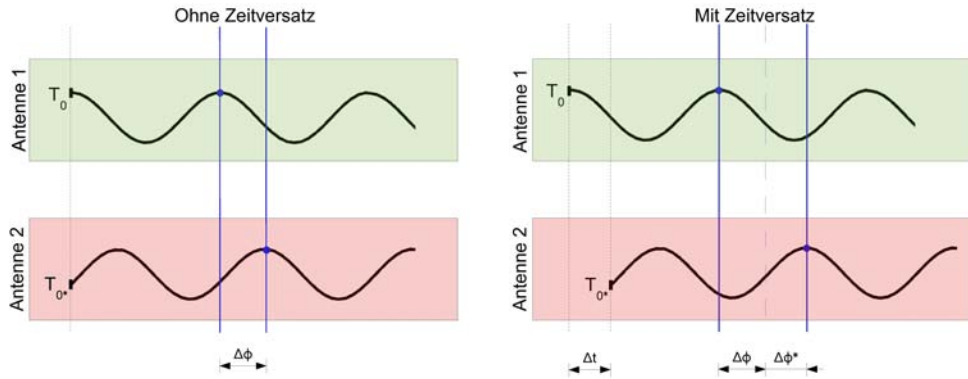


Abbildung 3.3: Die Antennen, also sowohl die Beaconantenne als auch die empfangenden Antennen, haben eine statische Positionierung und Orientierung zueinander und somit eine feste Phasenbeziehung. Die Wellenfronten des Beaconsignals sind als Kreise angedeutet.

Peak im Frequenzspektrum zu sehen ist. Wenn die Empfangsantennen und auch der Referenzsender statisch zueinander positioniert sind, dann erwartet man aufgrund der Geometrie konstante Phasendifferenzen des Referenzsignals zwischen den Antennen (siehe Abbildung 3.3).

Anhand dieser festen Phasenbeziehung lässt sich die relative Zeitgenauigkeit zwischen den Antennen erheblich verbessern, wobei sich die absolute Zeitgenauigkeit nicht ändert. Dieses Verfahren wird bei LOPES schon seit längerem angewendet, um die relative Zeitgenauigkeit von 1 ns zu gewährleisten, damit, wie in Kapitel 3.1 auch für andere Experimente beschrieben, die Daten der Antennen offline zur Interferenz gebracht werden können. Die Zeitkorrektur mit Hilfe des Beacons betrachtet, wie in Abbildung 3.4 vereinfacht dargestellt, die Phasendifferenzen, bzw. deren Abweichung von einer Referenz, die durch zusätzliche zeitliche Verschiebungen verursacht werden, und besteht aus folgenden Schritten. Es wird eine Antenne als Referenzantenne ausgewählt. Die Referenzphasen $\Delta\phi_{1,m}^{Ref}$ zwischen der Referenzantenne 1 und den Antennen m sind bekannt und konstant (siehe Kapitel 3.5.1), sofern sich keine Änderungen der Signallaufzeiten ergeben, wobei $\Delta\phi_{1,1}^{Ref} = 0$. Von den im zu korrigierenden Ereignis gemessenen Phasen ϕ_m werden die jeweiligen Referenzphasen subtrahiert und man erhält die Phase



(a) Zwischen beiden Antennen besteht kein Zeitversatz. Die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ ist nur gegeben durch die Positionierung der Antennen zueinander und zum Beaconsender.

(b) Zur Referenzphasendifferenz $\Delta\Phi$ addiert sich eine zusätzliche Phasendifferenz $\Delta\Phi^*$ durch den Zeitversatz Δt der Antennen zueinander.

Abbildung 3.4: Phasen von einer Referenzantenne (grün) und einer beliebigen anderen Antenne (rot).

$\tilde{\phi}_m$ einer Antenne m bezogen auf die Referenzantenne 1.

$$\phi_1 - \Delta\phi_{1,1}^{Ref} = \phi_1 - 0 = \tilde{\phi}_1$$

$$\phi_2 - \Delta\phi_{1,2}^{Ref} = \tilde{\phi}_2$$

$$\phi_3 - \Delta\phi_{1,3}^{Ref} = \tilde{\phi}_3$$

$\vdots$

$$\phi_m - \Delta\phi_{1,m}^{Ref} = \tilde{\phi}_m$$

Hat man diesen Schritt für alle Antennen durchgeführt, dann liegen alle Phasen $\tilde{\phi}_m$ in einem Bezug zueinander und zur Referenzantenne. Die Phase ϕ_m^{Shift} , um die eine Antenne m verschoben werden muss, um die Zeitkorrektur zu erreichen, ergibt sich nun aus der Differenz der an der Referenzantenne gemessenen Phase

ϕ_1 und der auf die Referenzantenne bezogenen Phase $\tilde{\phi}_m$.

$$\begin{aligned}\phi_1 - \tilde{\phi}_1 &= \phi_1^{Shift} = 0 \\ \phi_1 - \tilde{\phi}_2 &= \phi_2^{Shift} \\ \phi_1 - \tilde{\phi}_3 &= \phi_3^{Shift} \\ &\vdots \\ \phi_1 - \tilde{\phi}_m &= \phi_m^{Shift}\end{aligned}$$

Zusammen mit der Beaconfrequenz f^{Beacon} , für die diese Berechnungen durchgeführt wurden, lässt sich ein Zeitintervall t_m^{Shift} berechnen, um das die jeweilige Spur verschoben werden muss.

$$t_m^{Shift} = \frac{\phi_m^{Shift}}{2\pi f^{Beacon}}$$

Um die Verschiebung der Spur einer Antenne m durchzuführen, wird jedes Bin j im Frequenzspektrum mit einem komplexen Phasengradient multipliziert, der sich durch die zum Bin j gehörende Frequenz f_j und das Zeitintervall t_m^{Shift} ergibt.

$$\begin{aligned}a_j \cdot \exp i\phi_j^{Korr} &= a_j \cdot \exp \left(i\phi_j^{Orig} \right) \cdot \exp \left(-i\phi_j^{Shift} \right) \\ &= a_j \cdot \exp i \left(\phi_j^{Orig} - \phi_j^{Shift} \right) \\ &= a_j \cdot \exp i \left(\phi_j^{Orig} - 2\pi f_j t_m^{Shift} \right)\end{aligned}$$

Nach dieser Zeitkalibration ist das relative Timing zwischen allen Antennen einschließlich der Referenzantenne verbessert (siehe Kapitel 6.2). Sollte die Referenzantenne nicht unter den Antennen sein, mit denen ein Ereignis gemessen wurde, so kann man im letzten Schritt die Phase der Referenzantenne ϕ_1 gleich Null setzen. Damit ergeben sich die Korrekturphasen ϕ_m^{Shift} direkt aus den auf die Referenzantenne bezogenen Phasen $\tilde{\phi}_m$:

$$\begin{aligned}\phi_1 - \tilde{\phi}_2 &= \phi_2^{Shift} \\ \Rightarrow 0 - \tilde{\phi}_2 &= -\tilde{\phi}_2 = \phi_2^{Shift}\end{aligned}$$

Durch diese willkürliche Wahl der Phase der Referenzantenne ϕ_1 wird die absolute Zeitgenauigkeit um maximal

$$t = \frac{1}{\pi f_{Beacon}}$$

verschlechtert, die relative Zeitgenauigkeit kann aber trotzdem verbessert werden. Alternativ kann auch eine andere Referenzantenne herangezogen werden, für welche man aber die Referenzphasen erst berechnen oder diese zusätzlich zu denen der eigentlichen Referenzantenne speichern müsste.

Das Zeitintervall, um das korrigiert werden kann, ist begrenzt durch die Periodendauer T der Beaconfrequenz, da beim Überschreiten der Periodendauer die Korrektur nicht mehr eindeutig ist.

$$T = \frac{1}{f_{Beacon}}$$

Um größere Verschiebungen korrigieren zu können, nutzt man mehrere Beaconfrequenzen und kombiniert die Informationen. Damit läßt sich das korrigierbare Zeitintervall theoretisch auf die Schwebungsdauer $T_n^{Schwebung}$ der n Beaconfrequenzen vergrößern.

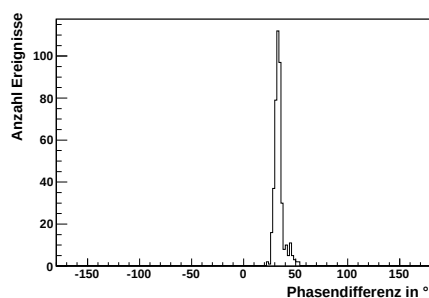
$$T_n^{Schwebung} = \frac{1}{f_n^{Schwebung}}$$

$$T_2^{Schwebung} = \frac{1}{|f_1^{Beacon} - f_2^{Beacon}|}$$

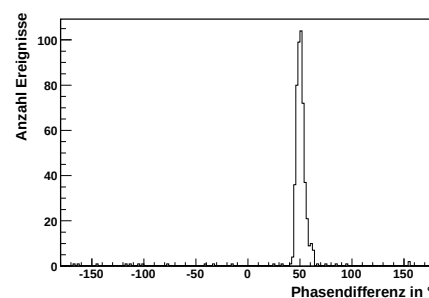
In der Praxis ist das korrigierbare Zeitintervall durch Messfehler der Phase deutlich geringer. Aber schon 2 oder 3 Periodendauern sind ausreichend für die erwartete GPS-Ungenauigkeit.

3.5.1 Referenzphasendifferenzen

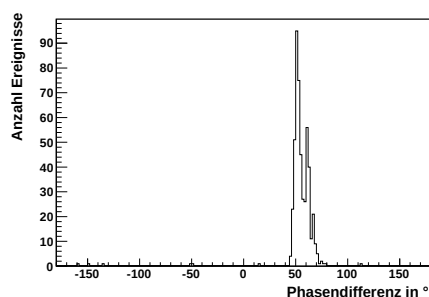
Um die Zeitkorrektur anhand der Beaconsignale durchzuführen, benötigt man die Phasendifferenzen zwischen den Antennen. Es hat sich gezeigt, dass die Phasendifferenzen über längere Zeiträume nicht konstant sind. Durch Umwelteinflüsse auf die Signalausbreitung und die Elektronik kann es zum Driften der Phasendifferenzen kommen. Außerdem ist die Messung der Phase des Beaconsignals mit Fehlern behaftet, die zum Beispiel durch Interferenzen mit dem Hintergrundrau-



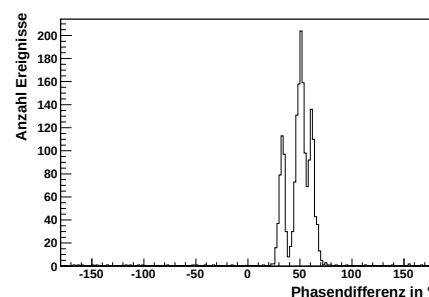
(a) Erstes Zeitintervall, der Mittelwert der Verteilung liegt bei $35,9^\circ$.



(b) Zweites Zeitintervall, der Mittelwert der Verteilung liegt bei $48,4^\circ$.



(c) Drittes Zeitintervall, der Mittelwert der Verteilung liegt bei $54,3^\circ$.



(d) Phasendifferenzen über das gesamte Zeitintervall, der Mittelwert der Verteilung liegt bei $48,6^\circ$.

Abbildung 3.5: Histogramme der Phasendifferenzen von zwei LOPES-Antennen zueinander. Die Schaubilder (a), (b) und (c) bilden aufeinander folgende Zeiträume ab, welche in (d) alle zusammengefasst sind. Durch äußere Einflüsse driftet der Mittelwert der Verteilung mit der Zeit.

schen entstehen. Diese Effekte führen zu einer Verteilung der Phasendifferenzen, deren Mittelwert mit der Zeit driftet kann. In Abbildung 3.5 sind die Phasendifferenzen von zwei LOPES-Antennen zueinander aufgetragen, dabei wurden circa 1500 Ereignisse untersucht. Die Breite der Verteilung ist verursacht durch Störungen, wie Interferenzen mit dem Hintergrundrauschen. Die Schaubilder geben eine zeitliche Entwicklung wieder, die auch im Drift des Mittelwertes zu erkennen ist. Man macht die Annahme, dass der Mittelwert der Verteilung der korrekten Phasendifferenz entspricht. Da sich die Phasendifferenzen nur in dem Intervall $-\pi$ bis $+\pi$ befinden, kann es dazu kommen, dass sich die Verteilung über $-\pi$ oder $+\pi$ erstreckt und sich der arithmetische Mittelwert nicht mehr mit dem Mittelwert der Verteilung deckt und die Berechnung der Referenzphasendifferenz über einen Algorithmus, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, durchführen

muss.

Für AERA ist prinzipiell das gleiche Verfahren anzuwenden, aber die Radiostationen in Argentinien sind alle mit einer eigenen GPS-Uhr ausgestattet (im Gegensatz dazu werden alle LOPES Antennen von einer zentralen Uhr versorgt). Die relative Ungenauigkeit der GPS-Uhren zueinander von mehreren Nanosekunden führt zu einer erheblichen Verbreiterung der Verteilung der Phasendifferenzen bei AERA gegenüber LOPES.

3.6 Anforderungen an das Zeitkalibrationssystem bei AERA

Die Größe des Antennenfeldes, die Entfernung von der nächsten Stadt, bzw. dem zentralen Campus des Observatoriums in Malargüe, sowie die Wetter- und Klimaverhältnisse sorgen für einige zusätzliche Anforderungen an das AERA-Beacon-System in Argentinien.

In der ersten Ausbaustufe von AERA betragen die Entfernungen vom Beacon zu den Antennen bereits circa 5 km, in der dritten und letzten Ausbaustufe werden es bis zu 10 km werden.

Durch die Distanz zwischen Coihueco, dem Ort an dem der Beacon aufgebaut ist, und Malargüe ist es nicht einfach möglich, den Beacon manuell zu bedienen, weswegen angestrebt wurde, das System über das Internet vom zentralen Campus aus und auch aus Europa fernzusteuern. Um eine Steuerung des Beacons möglichst einfach und zuverlässig zu bewerkstelligen besteht er aus einem PC mit Netzwerkzugang, einer Interfacekarte die über USB angeschlossen ist, der Elektronik mit Frequenzgenerator, welche über die Interfacekarte gesteuert und überwacht wird und einem Verstärker, der die Sendeantenne speist. Der schematische Aufbau dieses Systems ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Äußere Einflüsse wie Wind, Staub und Hitze beeinflussen auch die Auswahl der Komponenten. Als Sendeantenne kommt, aufgrund ihrer mechanischen Stabilität und ihrer geringen Größe, eine SALLA (Small aperiodic loaded loop antenna) zum Einsatz.

Der PC ist ein passiv gekühltes System mit einer Solid State Disc, um auch hier die Ausfallwahrscheinlichkeit so gering wie möglich zu halten.

4 Realisation des Beacons für AERA

Um nach dem Aufbau der Radioerweiterung AERA (**A**uger **E**ngineering **R**adio **A**rray) des Pierre-Auger-Observatoriums in Argentinien auch interferometrisch messen zu können, besteht die Notwendigkeit für ein Zeitkalibrationssystem, um die benötigte relative Zeitgenauigkeit von etwa 1 ns zu erreichen. Dazu wird ein Beacon ähnlich wie bei LOPES verwendet. Die Ausmaße von AERA sowie die dortigen Gegebenheiten stellen dabei zusätzliche Anforderungen sowohl an die Hardware, als auch an die Software des Systems. Deswegen wurde zwar das Grundkonzept von LOPES übernommen, die einzelnen Komponenten wie auch der Gesamtaufbau aber angepasst und für den Einsatz in Argentinien weiterentwickelt. In Abbildung 4.1 ist der schematische Aufbau des Beacon-Systems gezeigt.

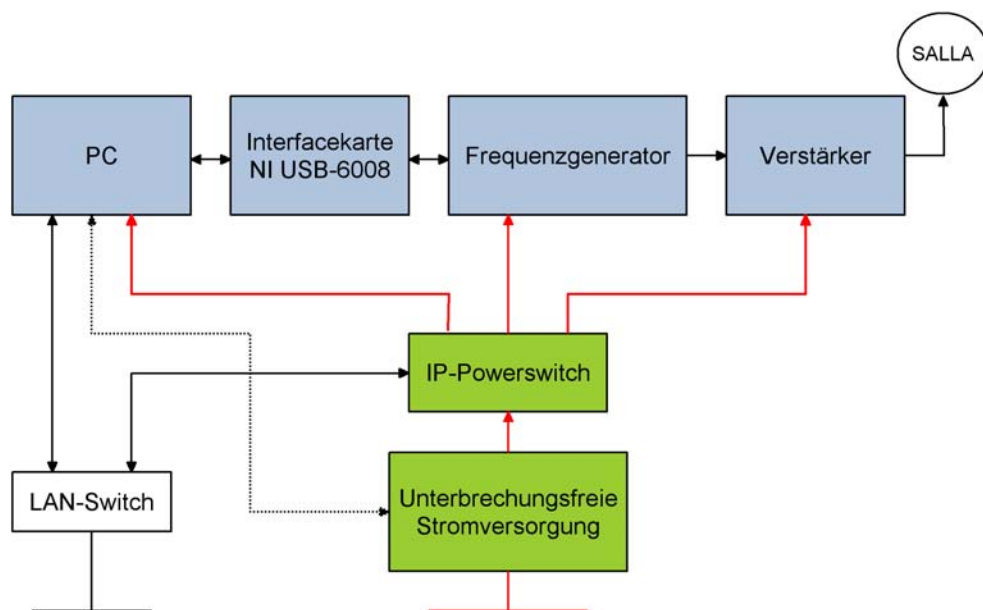


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des Beacons. Spannungsversorgungsleitungen sind rot dargestellt, Datenleitungen schwarz.

4.1 Hardware

4.1.1 PC



Abbildung 4.2: Computer für die Beaconsteuerung.

Der PC soll als Steuerung und Überwachung für den Sender dienen. Er soll ununterbrochen über mehrere Jahre laufen und ist deshalb lüfterlos und mit einer Solid State Disc ausgestattet und hat somit keine beweglichen Teile wie zum Beispiel Lüfter, die ausfallen können. Als Betriebssystem kommt die Linuxdistribution openSUSE 10.3 in der 32Bit Variante zum Einsatz. Um in AERA möglichst wenig unterschiedliche Hardware zu betreiben, ist der Beacon-PC identisch mit den PCs in der zentralen Radio-Station CRS, auf denen die DAQ-Software läuft.

Hersteller: Acrosser Technology Co. Ltd.

Typ: AR-ES5630FL

CPU: Intel Core 2 Duo

Chipsatz: Intel GME965 + Intel ICH8M

Arbeitsspeicher: 400/533/667 MHz 1 GB

Festplatte: 64 GB Solidstate

Leistungsaufnahme: 30 W

Maße(B × T × H): 251 mm × 165 mm × 67 mm

Betriebstemperatur: 0°C - 50°C

4.1.2 Interfacekarte



Abbildung 4.3: NI USB-6008 Interfacekarte zur Steuerung der Elektronik.

Die Interfacekarte ist für die Kommunikation zwischen Software und der Sendelelektronik zuständig. Die Steuerung der Elektronik erfolgt dabei über eine digitale Schnittstelle mit 12 Bit, während die Überwachung der vom Beacon ausgesendeten Leistung auch über analoge Eingänge der Interfacekarte stattfindet. Die Anforderung an die Samplerate sind für diesen Zweck nicht sehr hoch, so dass eine relativ einfache Interfacekarte den Anforderungen genügt. Ein wichtiges Kriterium ist die Unterstützung von C/C++ unter Linux, um die Entwicklung auf den Einsatz zugeschnittener Software zu ermöglichen. Die Wahl fiel auf eine Karte von National Instruments welche alle Anforderungen erfüllt und außerdem weit verbreitet ist und somit auch in Zukunft noch technische Unterstützung des Herstellers erhalten sollte.

Hersteller: National Instruments

Typ: NI USB-6008

Bus: USB

Digitale I/O: 12

Analoge Eingänge: 8

Analoge Ausgänge: 2

Max. Sampling Rate: 10 kS/s

Betriebstemperatur: 0°C - 55°C

4.1.3 Frequenzgenerator

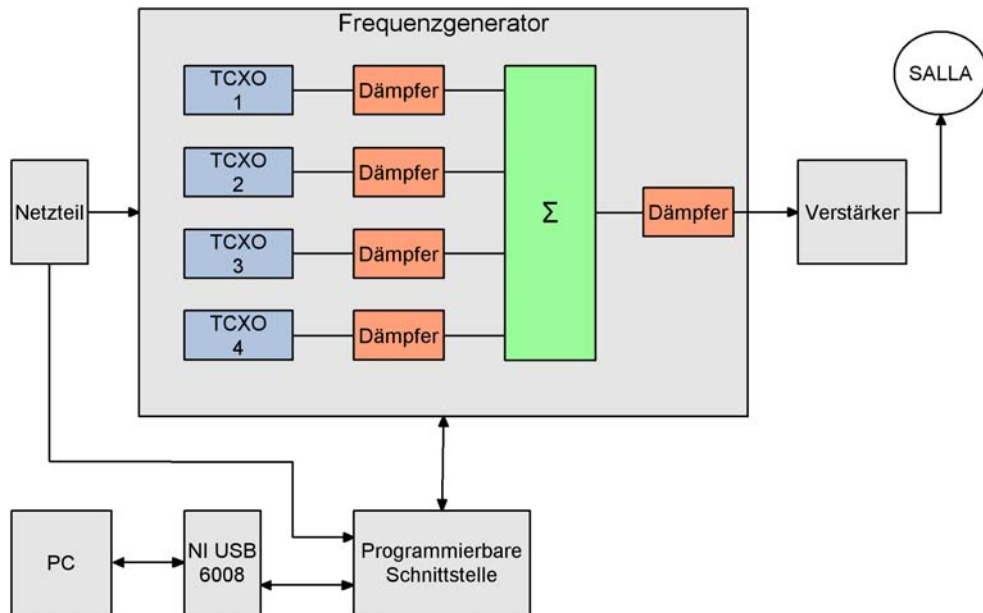


Abbildung 4.4: Blockschaltbild der Beaconelektronik. Nach jedem Quarzoszillator (TCXO), sowie nach dem Combiner, ist ein programmierbarer Dämpfer angebracht, der über die programmierbare Schnittstelle gesteuert wird.

Der Frequenzgenerator wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit am Institut für Experimentelle Kernphysik am Karlsruher Institut für Technologie als Weiterentwicklung des LOPES-Frequenzgenerators entwickelt und gebaut¹. Er umfasst sowohl einen Analog- als auch einen Digitalteil, den es bei LOPES nicht gibt. Der Analogteil besteht aus vier temperaturstabilisierten Quarzoszillatoren (TCXO), programmierbaren Dämpfern, über die die Leistung der jeweiligen Frequenz gesteuert wird, und einem Combiner zum Überlagern der Signale der einzelnen Oszillatoren. Die Oszillatoren besitzen eine Frequenzstabilität von besser als 10^{-6} pro Jahr. Zur Überwachung werden die Ausgangsleistungen nach allen vier Dämpfern und nach dem Combiner gemessen.

Im digitalen Teil der Elektronik befinden sich unter anderem die Register, in denen die Einstellungen für die programmierbaren Dämpfer gespeichert sind, eine

¹In Zusammenarbeit mit Horia Bozdog



Abbildung 4.5: Frequenzgenerator. In den vier grauen Boxen links befinden sich die Quarzoszillatoren, in der fünften grauen Box im Vordergrund befindet sich der Combiner.

Schaltung die als Schloss fungiert und nur nach dem Schreiben des korrekten Schlüsselwertes das Schreiben auf die Register zulässt, sowie eine Schaltung zum Wechseln zwischen lokaler und ferngesteuerter Steuerung des Frequenzgenerators.

Der Frequenzgenerator besitzt einige Sicherheitseinrichtungen um eine fehlerfreie und zuverlässige Funktion zu gewährleisten. Die Register für die programmierbaren Dämpfer können sowohl elektronisch über einen Computer gesetzt werden, als auch direkt mittels Schaltern auf einer Platine des Frequenzgenerators. Durch eine Schaltung ist es möglich, zwischen dieser lokal mit Schaltern gesetzten Einstellung und einer über einen Computer kontrollierten Einstellung zu wechseln. Im Falle eines Stromausfalls und auch bei jedem Einschalten des Frequenzgenerators beginnt dieser mit der lokalen Einstellung, die dann erst nach dem Umschalten auf ferngesteuerte Kontrolle über einen Computer geändert werden kann. Die lokale Einstellung ist dabei in der Testphase so eingerichtet, dass der Beacon aus ist. Dadurch wird nach einem Stromausfall eine definierte und vorhersehbare Einstellung gewährleistet.

Das Schreiben in ein Register eines Dämpfers, mittels Computer, ist nur eine bestimmte Zeit lang nach dem Schreiben eines Schlüssels in ein bestimmtes Register möglich. Durch diese Schlossschaltung wird verhindert, dass im Falle eines Stromausfalls oder anderer Störungen, bei denen das Verhalten der Interfacekarte nicht vorhersehbar ist, falsche Werte in die Register geschrieben werden.

Es wurden vier Frequenzen ausgewählt, die das ganze Frequenzspektrum von 30 MHz bis 80 MHz, das mit AERA gemessen wird, abdecken. Dabei wurde anhand von Spektren, die in Argentinien im AERA-Feld aufgenommen wurden, überprüft, dass sich keine Störquellen bei diesen Frequenzen befinden. Ein weiteres Auswahlkriterium ist durch den Ablauf der Analyse gegeben, denn nach der Fouriertransformation aus der Zeitdomäne in die Frequenzdomäne sollen die Beaconfrequenzen jeweils genau auf einem Bin im Frequenzspektrum liegen, um so ein optimales Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhalten und die durch den Beacon verursachten Peaks möglichst gut für die folgenden Analyseschritte im Rahmen der Unterdrückung schmalbandiger Störquellen korrigieren zu können. Die Anforderung an die Frequenzstabilität ist durch die benötigte Zeitgenauigkeit von 1 ns und die Ausdehnung des AERA-Feldes gegeben. Das Beaconsignal benötigt bei 6 km Abstand von der ersten bis zur letzten Antenne circa 20 μ s. Dies entspricht circa 1500 Perioden der höchsten Beaconfrequenz 71,191 MHz mit einer Periodendauer von 14 ns. Während dieser 1500 Perioden darf sich die Frequenz um höchstens 1 ns also $\frac{1}{14}$ der Periodendauer ändern. Daraus folgt eine Mindestgrenze für die Frequenzstabilität von 47 ppm, die vom Frequenzgenerator bei weitem übertroffen wird.

Frequenz 1: 37,793 MHz

Frequenz 2: 46,582 MHz

Frequenz 3: 58,887 MHz

Frequenz 4: 71,191 MHz

Frequenzstabilität: 10^{-6} pro Jahr

4.1.4 Verstärker

Die Ausgangsleistung des Frequenzgenerators ist viel zu schwach, um direkt die Sendeantenne versorgen zu können. Deswegen ist nach dem Frequenzgenerator ein Verstärker angebracht. Dieser erreicht eine Verstärkung des eingehenden Signals um 40 dB im Frequenzbereich von 5 Hz bis 500 Hz. Dabei darf eine Eingangsleistung von 0 dBm nicht überschritten werden, um den Verstärker nicht zu beschädigen.

Die maximale Ausgangsleistung von 5 W kann nur mit einer Frequenz bei linearer

Verstärkung erreicht werden. Bei Nutzung von n Frequenzen muss die Leistung der einzelnen Frequenzen nach folgender Formel ermittelt werden:

$$P_{max} = 5 \text{ W} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Aus diesen maximalen Eingangsleistungen ergeben sich die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Werte und Einstellungen.

Anzahl der Frequenzen	1	1	3	4
Maximale Eingangsleistung pro Frequenz	5 W	1,25 W	0,555 W	0,313 W
Am Frequenzgenerator jeweils einzustellende minimale Dämpfung in dB	0/0/0/0	4/4/4/5	8/8/8/9	10/10/10/11

Tabelle 4.1: Die maximale Eingangsleistung am Verstärker in Abhängigkeit von der Anzahl der Frequenzen und die dementsprechend am Frequenzgenerator einzustellenden Dämpfungen.

Hersteller: Mini-Circuits

Typ: ZHL-5W-1

Verstärkung: 40 dB

Frequenzbereich: 5 MHz - 500 MHz

Maximale Ausgangsleistung: 5 W

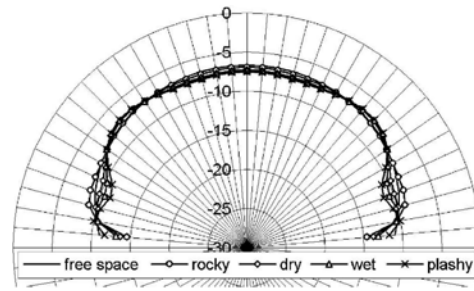
Maximale Eingangsleistung: 0 dBm

4.1.5 Sendeantenne: SALLA

Als Sendeantenne kommt eine SALLA (**S**hort **A**periodic **L**oaded **L**oop **A**ntenna) zum Einsatz [39]. Diese am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik am KIT entwickelte Antenne erfüllt gestellten die Anforderungen. Am Kommunikationsturm ist nur wenig Platz, weswegen die geringe Baugröße der SALLA von Vorteil ist. Trotz ihrer geringen Größe ist die SALLA breitbandig und die Beaconfrequenzen können so das ganze Frequenzband von AERA abdecken. Sie ist mechanisch stabil, denn die Antenne muss über mehrere Jahre an einer



(a) SALLA, montiert am Kommunikationsturm der Fluoreszenzteleskopstation Coihueco.



(b) Gainpattern der SALLA, simuliert für verschiedene Böden [39].

Abbildung 4.6: SALLA und simuliertes Gainpattern.

exponierten Stelle eines Kommunikationsturmes dem Wind und anderen Umwelteinflüssen trotzen. Diese Vorteile wiegen die Nachteile der SALLA, wie eine geringe Verstärkung von -10 dB und eine für diesen Zweck schlechte, weil breite Richtcharakteristik (siehe Abbildung 4.6) auf.

Durchmesser: 75 cm

4.1.6 Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Da es in Argentinien häufiger zu Stromausfällen kommt, ist der Beacon mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (UPS) ausgestattet. Die AERA-Antennenstationen und die CRS (**C**entral **R**adio **S**tation) sind mit Photovoltaikanlagen und Batterien ausgestattet, so dass sie völlig autark vom öffentlichen Stromnetz arbeiten. Die Datennahme erfolgt also kontinuierlich und ist nicht beeinflusst von einem Stromausfall in Coihueco. Für die Zeitkalibration der Daten wird das Beaconsignal ununterbrochen benötigt. Daher ist der Beacon mit einer UPS ausgestattet, um bei einem Stromausfall das Beaconsignal so lange wie möglich zu senden und damit möglichst zu verhindern, dass Daten ohne das Beaconreferenzsignal aufgenommen werden müssen.

Hersteller: Liebert

Typ: GXT2-1000VA

Leistung: 700 W 1000 VA

Batterie: $4 \times 12 \text{ V} \times 7 \text{ Ah}$

Autonomiezeit für den Beacon: circa 400 Min.

4.1.7 IP-Powerswitch



Abbildung 4.7: Ferngesteuerte Steckdosenleiste Liebert EPS-4.

Als zusätzliches Sicherheitselement wird die Stromversorgung der Komponenten nach der UPS über eine fernsteuerbare Verteilerdose geleitet. Mit diesem IP-Powerswitch ist es möglich über eine Netzwerkverbindung vom zentralen Campus in Malargüe oder von Karlsruhe aus die Spannungsversorgung einzelner, angeschlossener Komponenten aus- oder anzuschalten. Falls Probleme mit den Beaconkomponenten auftreten, zum Beispiel der PC abstürzt oder der Frequenzgenerator nicht mehr zu steuern sein sollte, können einzelne Komponenten abgeschaltet oder neu gestartet werden.

Hersteller: Leunig GmbH

Typ: EPS-4 D19

Netzwerkanschluss: RJ45

Protokolle: TCP/IP, HTTP

Eingangsspannung: 230 V / 50 Hz

Schaltstrom: max. 10 A

Betriebstemperatur: 0°C - 50°C

4.2 Beacon-Software

4.2.1 Konzept

Die Software für die AERA-DAQ besteht aus mehreren Teilen, wobei eine grafische Benutzerschnittstelle (GUI) als Ausgangspunkt für die Kontrolle von AERA dienen soll. Es gibt Benutzer mit verschiedenen Berechtigungen, so dass ein einfacher Benutzer AERA überwachen, oder ein Experte verschiedene Parameter einstellen kann. Die aktuellen Einstellungen von AERA, wie zum Beispiel der Status des Beacons werden aus einer MySQL-Datenbank gelesen und auf der GUI dargestellt. Die Kommunikation zwischen dem Beacon und GUI erfolgt in Richtung Beacon über eine direkte Netzwerkverbindung, über welche die GUI Kommandos an den Beacon schickt. Die GUI ist webbasiert mit PHP implementiert, was eine Kommunikation vom Beacon direkt zur GUI ausschließt. Deswegen erfolgt die Kommunikation vom Beacon zur GUI über eine MySQL-Datenbank, die von der Beaconsoftware periodisch oder nach dem Ausführen eines Kommandos aktualisiert wird und aus der die GUI die aktuellen Parameter liest. Die Interfacekarte (siehe Kapitel 4.1.2) bildet die Schnittstelle zum Frequenzgenerator, indem sie sowohl über ihre digitale Schnittstelle die Dämpfungen und andere Parameter schreibt und liest, als auch mittels ihrer analogen Schnittstelle die Ausgangsleistung nach den Dämpfungsgliedern misst. Die vierte Schnittstelle der Beaconsoftware bilden lokale Logfiles, in die die wichtigsten Ereignisse und Messwerte eingetragen werden. Eine Übersicht über die Schnittstellen bietet Abbildung 4.8.

Eine weitere Aufgabe der Beaconsoftware ist es, den Zugriff auf die Beaconelektronik zu kontrollieren, bzw. gleichzeitige Zugriffe zu verhindern. Den gestellten Anforderungen folgend ist die Beaconsoftware ein Programm, welches ständig im Hintergrund läuft, um auf Kommandos zu warten, bzw. die Protokollierung der Einstellungen und Messwerte durchzuführen. Solche Programme, die im Hintergrund laufen und bestimmte Dienste zur Verfügung stellen nennen sich

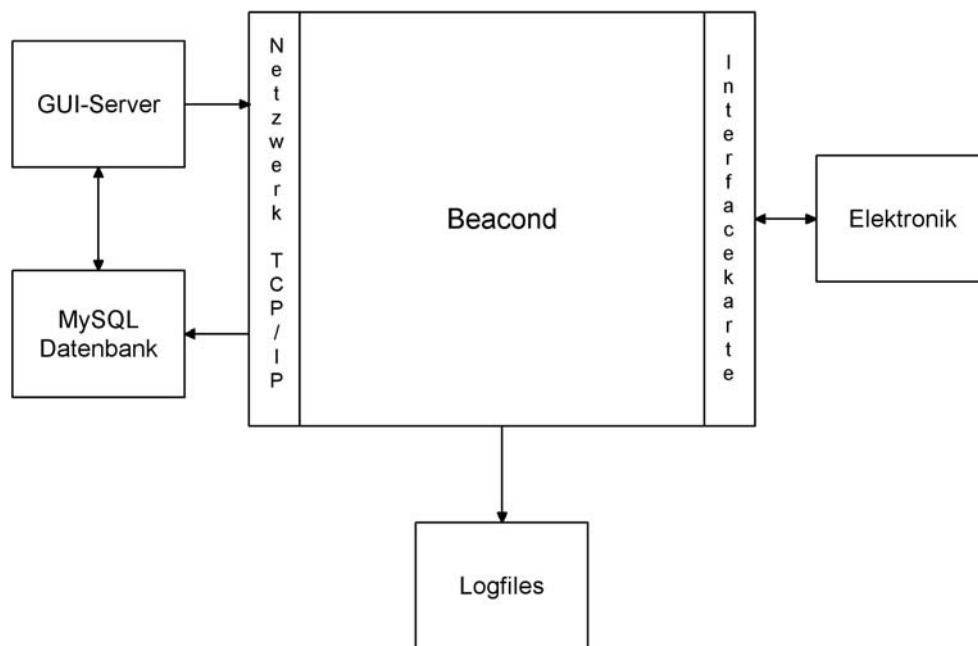


Abbildung 4.8: Die Schnittstellen der Beaconsoftware.

im Umfeld von UNIX „Daemon“, was zur Namensgebung „Beacond“ (**Beacon** **D**emon) geführt hat. Die wichtigsten Dateien der Software sind im Anhang B aufgelistet.

4.2.2 Der Beacondaemon „Beacond“

Durch die Verwendung der NI USB-6008-Karte von National Instruments ist die Verwendung von C als Programmiersprache festgelegt, da unter Linux nur ein C-API (Application Programming Interface) für diese Karte existiert. Die Kommandos zum Einstellen der Dämpfung der Elektronik werden von einem zweiten Program ‘be-client’ oder dem Grafischen User Interface kurz GUI erzeugt und an „Beacond“ über das Netzwerk gesendet. Diese Kommandos erreichen Beacond auf einem Socket, aus dem sie in einen Puffer geschrieben werden.

Beacond ist ein Prozess, der kontinuierlich läuft und in einer Endlosschleife periodisch kontrolliert, ob sich ein Client auf dem Socket, welcher mit Port 5064 verknüpft ist, verbunden hat. Falls keine Verbindung besteht, wird in bestimmten, im Konfigurationsfile festgelegten, Zeitabständen ein Logging, also ein Proto-

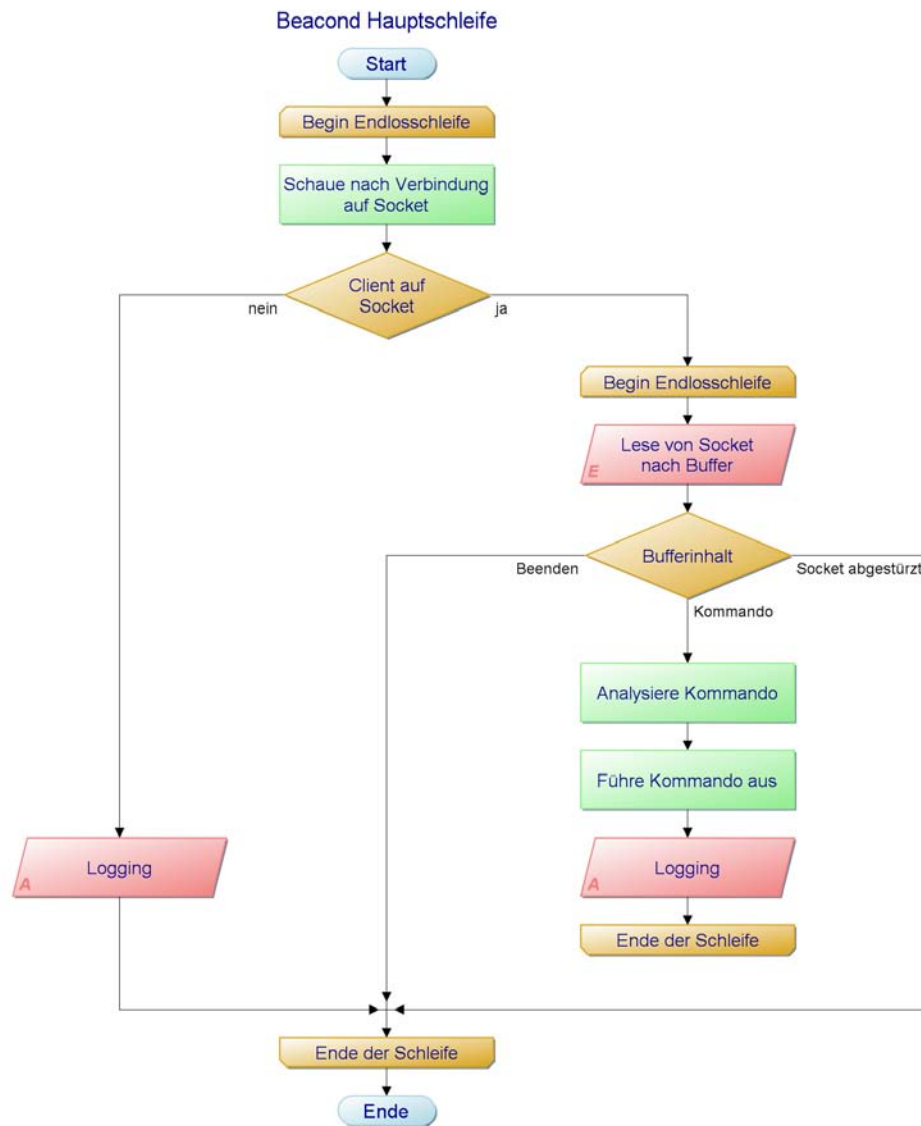


Abbildung 4.9: Vereinfachter Programmablaufplan der Hauptschleife von Beacond.

kollieren der Messwerte und Einstellungen der Beaconelektronik, durchgeführt. Besteht eine Verbindung, führt Beacond eine weitere Endlosschleife durch, in der es die ankommenden Daten am Socket ausliest und deren Bedeutung zufolge Aktionen durchführt. Dabei gibt es drei Möglichkeiten: erstens der Socket ist abgestürzt oder zweitens der Client hat die Verbindung beendet. In diesen Fällen wird die innere Endlosschleife verlassen und auf eine neue Verbindung gelauscht. Die dritte Möglichkeit ist, dass wirklich Nutzdaten am Socket ausgelesen wurden. Diese werden dann analysiert, ob sie der Kommandostruktur entsprechen und Sinn machen, d.h. die einzustellenden Werte innerhalb der Wertebereiche liegen. Wenn es ein korrektes Kommando ist, wird es gespeichert und einer weiteren Funktion zum Ausführen übergeben. Diese Funktion bewirkt dann letztendlich das Setzen von Parametern in der Elektronik des Beacons. Nach dem Ausführen des Kommandos wird überprüft, ob das Zeitintervall zum letzten Logging überschritten ist und es demzufolge durchgeführt werden soll oder nicht. Nun kann ein neues Kommando vom Socket eingelesen werden und die Schleife wiederholt sich, bis der Client die Verbindung beendet oder diese abbricht (siehe Abbildung 4.9).

4.2.2.1 Netzwerkschnittstelle (Kommandostruktur)

Die Netzwerkschnittstelle ist durch einen TCP/IP Socket realisiert, der auf Port 5064 lauscht. Verbindungen sind aus beliebigen IP-Bereichen möglich. Über diese Schnittstelle empfängt und sendet Beacond Daten, falls der verbundene Client das Austauschen von Daten in beide Richtungen unterstützt. Die Hauptaufgabe der Schnittstelle ist aber das Empfangen von Kommandos zur Steuerung der Elektronik. Die Nachrichtenstruktur, die dafür verwendet wird, wurde von der DAQ-Gruppe (AERA-Subtask 5) festgelegt, wonach eine Nachricht aus 16-Bit Blöcken besteht, beginnend mit 2 Byte für die Länge der Nachricht, dann 2 Byte für die Kommandonummer und schließlich die Nutzdaten der Nachricht. Diesem Design folgend baut sich auch die Kommandostruktur von Beacond auf. Die Kommandos für das Setzen eines Dämpfers, das An- und Ausschalten einer Frequenz und das Umschalten von lokaler zu Fernsteuerung sind durchnummeriert. Die Nutzdaten dieser Kommandos umfassen darüber hinaus die Adresse, also zum Beispiel 2 für die zweite Frequenz (46,582 MHz), und einen Wert, der gesetzt werden soll, also zum Beispiel 10 für eine Dämpfung von 10 dB. Außerdem

gibt es noch zwei weitere Kommandos, die Beacon dazu veranlassen, die analoge oder digitale Schnittstelle zur Elektronik auszulesen und die entsprechenden Werte über den Socket an den Client zurückzuschicken. Alle Kommandos mit ihren Wertebereichen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Länge	Befehl	Nutzdaten	Bedeutung
4	450	Adresse(1-4, 7) + Wert(0-31)	Setze Dämpfung in [dB]
4	451	Adresse(1-4) + Wert(1/0)	Schalte Frequenz ein/aus
4	452	Adresse(5) + Wert(1/0)	Setze Steuerungsmodus remote/local
2	460	Leer	Erfrage Dämpfung
2	461	Leer	Erfrage Leistung

Tabelle 4.2: Gültige Kommandos zur Kommunikation mit Beacon

Die Kommandos zum Setzen einer Dämpfung, Aus- und Einschalten einer Frequenz und zum Wechseln des Kontrollmodus bewirken im Endeffekt alle einen Schreibvorgang auf ein bestimmtes Register des Frequenzgenerators. Die GUI benutzt eine Schnittstellenbibliothek gemeinsam mit den anderen Softwarekomponenten der DAQ. Da der Beacon nur einfache Kommandos empfängt, besitzt er eine eigene Implementierung mit geringerem Umfang. Die DAQ-Schnittstellenbibliothek führt dazu, dass die Datenstruktur, die wirklich gesendet wird etwas anders aussieht als erwähnt. So werden die ersten zwei Byte mit der Längenangabe verdoppelt und die Daten werden in Host-Byte-Order, in diesem Fall (Tabelle 4.3) Little-Endian, übertragen.

Länge	Länge	Befehl	Adresse	Wert	Bedeutung
04 00	04 00	c3 01	04 00	01 00	Schalte Frequenz 4 ein
04 00	04 00	c3 01	01 00	00 00	Schalte Frequenz 1 aus
04 00	04 00	c2 01	02 00	0a 00	Setze Dämpfung 10 bei Frequenz 2
04 00	04 00	00 00	05 00	00 00	Schalte auf Remote-Steuerung
02 00	02 00	cc 01			Erfrage Dämpfung

Tabelle 4.3: Kommandos wie sie am Socket von Beacon ankommen. Links sind die 10 Byte Daten der TCP-Pakete in 2 Byte Blöcken als Hexdump in Little-Endian Reihenfolge, rechts die Bedeutung des Kommandos aufgelistet.

4.2.2.2 Schnittstelle zur Elektronik

Die Interfacekarte besitzt zwei digitale Ports, von denen einer mit 8 Ein-/Ausgängen, also 8 Bit, der andere mit 4 Ein-/Ausgängen, also 4 Bit, ausgestattet ist. Außerdem besitzt die Karte 8 analoge Eingänge zur Messung von Spannungen bis 10 V.

Der erste digitale 4-Bit-Port dient der Adressierung und enthält das Write-Bit, welches einen Schreibvorgang in ein Register der Elektronik auslöst. Der digitale 8-Bit-Port beinhaltet in fünf Bit den einzustellenden Wert und im sechsten Bit das on/off-Bit für die Frequenzen (siehe Tabelle 4.4).

Im Frequenzgenerator sind sieben Adressen vergeben, die mit diesen Komman-

Port	Funktion	Kanal	Bedeutung
1	Adresse	P1.0	Adressbit 1
1	Adresse	P1.1	Adressbit 2
1	Adresse	P1.2	Adressbit 3
1	Adresse	P1.3	Write-Bit
0	Wert	P0.0	Datenbit 1
0	Wert	P0.1	Datenbit 2
0	Wert	P0.2	Datenbit 3
0	Wert	P0.3	Datenbit 4
0	Wert	P0.4	Datenbit 5
0	Wert	P0.5	on/off-Bit
0	Wert	P0.6	leer
0	Wert	P0.7	leer

Tabelle 4.4: Belegung der digitalen Ein-/Ausgänge der Interfacekarte

dos angesprochen werden können. Die vier programmierbaren Dämpfer, die nach den Quarzoszillatoren angebracht sind, sind auf den Adressen von 1 bis 4 erreichbar, der programmierbare Dämpfer nach dem Combiner ist auf Adresse 7, auf Adresse 6 liegt eine Schaltung, die als Schloss fungiert, um versehentliche Änderungen der Einstellungen zu verhindern und auf Adresse 5 liegt eine Schaltung die zwischen dem lokalen und dem ferngesteuertem Betriebsmodus umschaltet.

Ein Schreibvorgang auf ein Register des Frequenzgenerators umfasst mehrere Schritte. Zuerst wird die Adresse auf Port 1 aufgelegt, d.h. an die einzelnen Kanäle werden gemäß ihrer Bedeutung die entsprechenden elektrischen Poten-

Adresse	Belegung
0	leer
1	Dämpfer Frequenz 1
2	Dämpfer Frequenz 2
3	Dämpfer Frequenz 3
4	Dämpfer Frequenz 4
5	Schaltung für Betriebsmodus
6	Schloss
7	Dämpfer Combiner

Tabelle 4.5: Elektronikinterne Adressen

tiale angelegt. Ebenso werden auf Port 2 die in das Register zu übertragenden Daten aufgelegt. Nun wird das Write-Bit (siehe Tabelle 4.4), also dessen elektrisches Potential, auf 1 und dann wieder auf 0 gesetzt, um die Belegung von Port 0 in das Register zu übernehmen.

Dieser beschriebene Schreibvorgang läuft zweimal für die Änderung einer Einstellung ab. Der erste Durchlauf schreibt einen Schlüsselwert nach Adresse, also Register 6 (siehe Tabelle 4.5), um die anderen Register zum Schreiben freizugeben. Nun wird innerhalb von circa 400 ms im zweiten Durchlauf der neue Wert in das Zielregister geschrieben, bevor die Register wieder durch das Schloss gesperrt sind. In Tabelle 4.6 ist in den einzelnen Schritten noch einmal ein Setzen

Schritt	Port 1				Port 0							
	1.3	1.2	1.1	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
3	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
4	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
7	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
8	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0

Tabelle 4.6: Ablauf zum Setzen einer Dämpfung von 10 dB für den Dämpfer von Frequenz 3. In den Schritten 1 bis 4 wird in das Register des Schlosses der Schlüsselwert 197 geschrieben. Danach wird in den Schritten 5 bis 8 die Dämpfung in das Register von Frequenz 3 geschrieben. In den Schritten 3 und 7 wird das Write-Bit auf 1 gesetzt um die Werte in die Zielregister zu übernehmen.

einer Dämpfung aufgeführt.

Die Interfacekarte besitzt 8 analoge Eingänge von denen fünf wie in Tabelle 4.7 beschrieben mit dem Frequenzgenerator verbunden sind. Diese sind Verbunden mit Schaltungen die nach den Dämpfern über große Widerstände ($\approx 15\text{ k}\Omega$) das Signal abgreifen und eine zur Leistung der Frequenz proportionale Spannung ausgeben. Damit kann die Ausgangsleistung der Frequenzen und des gesamten Systems abgeschätzt werden. Die Spannungen werden in Volt gemessen und instantan, den Kalibrationsmessungen folgend, in eine Leistung in dBm umgerechnet (siehe Abschnitt 4.2.2.5).

Kanal	Belegung
AI0	Spannung nach dem Combiner
AI1	Spannung Frequenz 1
AI2	Spannung Frequenz 2
AI3	Spannung Frequenz 3
AI4	Spannung Frequenz 4

Tabelle 4.7: Belegung der analogen Eingänge der Interfacekarte

4.2.2.3 Schnittstelle zu den Logfiles

Es existieren zwei Logfiles für den Beacon. Das erste ist eine einfache Textdatei, deren Name und Pfad in der Beacond-Konfigurationsdatei eingestellt werden kann. In diese werden in regelmäßigen Abständen die gemessenen Werte der Einstellungen des Frequenzgenerators gespeichert. Die Informationen in dieser Datei sind fast die gleichen wie in der MySQL Datenbank, dadurch sind die Daten redundant für den Falle eines Verbindungsverlustes zur MySQL-Datenbank.

Für Fehlermeldungen von Beacond, die zum Beispiel durch abgebrochene Verbindungen mit der Datenbank oder dem GUI-Server zustande kommen könnten gibt es ein zweites Logfile. Dieses wird über den Syslogdaemon und Logrotate von Unix verwaltet, das heißt, es wird automatisch bei einer bestimmten Dateigröße eine neue Datei angelegt und die alte archiviert, so wie es zum Beispiel bei der Unix-Systemlogdatei `/var/log/messages` der Fall ist. Die nötigen Einstellungen für diese Funktionalität werden auf dem Betriebssystem des Beaconcomputers in den Dateien `/etc/syslog-ng/syslog-ng.conf` und `/etc/logrotate.d/syslog` getätigt. Durch diese Implementierung ist eine zu-

verlässige Führung des Logs sichergestellt. Darüber hinaus ist für einen nicht mit der Beaconsoftware vertrauten Anwender eine Logdatei `/var/log/beacond`, die ähnlich der bekannten `/var/log/messages` ist, einfach zu finden und zu verstehen.

4.2.2.4 Schnittstelle zur GUI und zur MySQL Datenbank

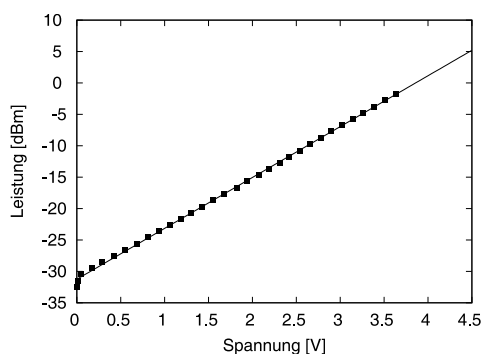
Die Steuerung des Beacons geschieht über ein PHP basiertes Webinterface, welches von einem Server in der CRS bereitgestellt wird. Man kann diesen Server über einen normalen Browser kontaktieren und sich als Benutzer oder Experte anmelden. Ein „Experte“ hat Zugriff auf alle Einstellungsmöglichkeiten des Beacons, kann also den Beacon oder einzelne Frequenzen an- und ausschalten oder die Einstellung der verschiedenen Dämpfer ändern und die Einstellungen überwachen. Ein normaler Benutzer kann die Beaconeinstellungen nur überwachen und bekommt die gemessene Leistung sowie die Dämpfereinstellungen angezeigt. Eine dritte Autorisationsebene ist für Messschichtpersonal gedacht; dieses kann den Beacon überwachen und den kompletten Beacon an- und ausschalten, aber nicht die Einstellungen der Dämpfer oder die Anzahl der Frequenzen ändern.

Die Daten zur Überwachung liest der Server aus einer MySQL-Datenbank. In diese Datenbank schreibt Beacond periodisch die gemessenen und am Frequenzgenerator eingestellten Werte. Außerdem wird die Datenbank nach jeder Änderung der Einstellungen von Beacond aktualisiert. In der Datenbankstruktur ist eine Tabelle für den Beacon angelegt in welcher durch jede Aktualisierung eine neue Zeile hinzugefügt wird. Jede Aktualisierung umfasst dabei den kompletten Satz an Daten über den Beacon, also die Einstellung aller fünf Dämpfer, die gemessene Leistung nach allen fünf Dämpfern, ob der Frequenzgenerator im lokal oder ferngesteuertem Zustand ist, sowie Datum und Zeit der Aktualisierung.

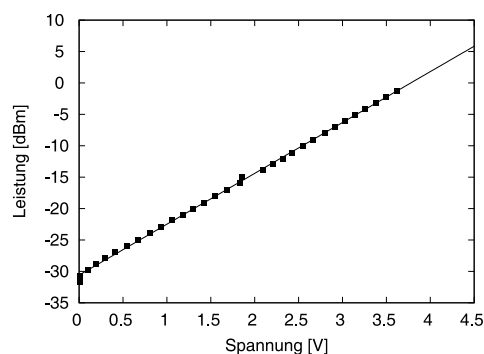
Die Kommandos zum Ändern der Einstellungen des Frequenzgenerators sendet der Server, auf dem das Webinterface läuft, direkt via TCP/IP an den Beaconcomputer, wie in Abbildung 4.8 dargestellt.

4.2.2.5 Kalibration der Leistungsmessung

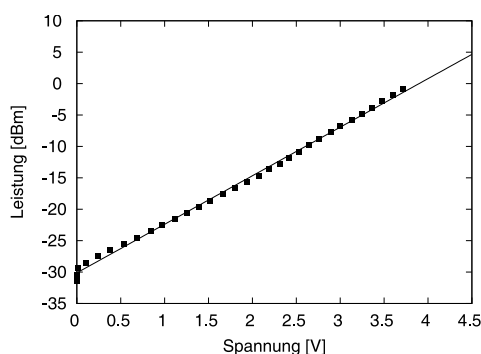
Die Überwachung der Einstellung der Beaconelektronik geschieht auf zwei Wege. Zum einen werden die digitalen Register der Elektronik, welche für die einge-



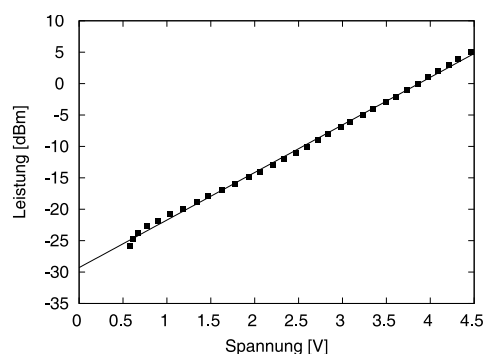
(a) Leistungskalibrationskurve für die Frequenz 37,793 MHz.



(b) Leistungskalibrationskurve für die Frequenz 46,582 MHz.



(c) Leistungskalibrationskurve für die Frequenz 58,887 MHz.



(d) Leistungskalibrationskurve für die Frequenz 71,191 MHz.

Abbildung 4.10: Kalibrationskurven zur Eichung der Leistungsmessung über die analogen Eingänge der Interfacekarte. Die Ausgangsleistungen der Oszillatoren sind nicht gleich, wodurch Unterschiede in der erreichbaren Minimalleistung entstehen, die die Verschiebung in Abbildung (d) erklären.

stellte Dämpfung verantwortlich sind, ausgelesen. Zum anderen wird über einen großen Widerstand (circa $15\text{ k}\Omega$) das Signal nach jedem Dämpfer des Frequenzgenerators abgegriffen und in einen logarithmischen Verstärker geleitet. Die Ausgangsspannung des Verstärkers wird nach einem zusätzlichen linearen Verstärker mit den analogen Eingängen der Interfacekarte gemessen. Die so gemessene Spannung ist proportional zum Effektivwert der Leistung des Signals.

Zur Kalibration wurde die Ausgangsspannung, die später von der Interfacekarte aufgenommen wird, in Abhängigkeit der Leistung gemessen. Die Leistung wurde dazu mit einem Spektrumanalyser ermittelt und die Dämpfer manuell auf die möglichen Einstellungen gesetzt. An die so gewonnenen Kalibrationspunkte wurde eine lineare Funktion angepasst, mit welcher in der Software einer gemessenen

Spannung schließlich eine Leistung zugeordnet wird (siehe Abbildung 4.10). Zu erkennen ist, dass bei geringen eingestellten Dämpfungen, also großen Leistungen, die lineare Anpassung recht gut passt. Bei hohen Dämpfungen, also geringen Leistungen, weichen die Datenpunkte von den angepassten Geraden recht deutlich ab. Im Bereich der maximalen Dämpfung, also geringsten Leistung, sind die aus der Spannung ermittelten Leistungswerte daher nicht mehr sehr verlässlich und es ist auch nicht zu erkennen, ob eine sehr hohe Dämpfung eingestellt ist, oder ob die Frequenz abgeschaltet ist.

Dieses Verhalten macht die Überwachung der Sendeleistung des Beacons für die verschiedenen Frequenzen über das Messen der Spannungen nicht sehr zuverlässig im Bereich hoher Dämpfungen. Dies legt nahe, die daraus ermittelten Leistungswerte eher als grobe Abschätzung zu sehen. Erst durch Betrachten beider Überwachungsmechanismen, also Auslesen der Dämpfung aus den Registern und Messen der Spannung, erhält man einen zuverlässigen Überblick über den aktuellen Zustand des Beacons.

4.3 Offline

Offline ist die Analysesoftware des Pierre-Auger-Experiments. Offline besteht aus drei Teilen: einer Detektorbeschreibung um Zugriff auf Konfigurationsdaten der Detektoren zu gewähren, einer Ereignisstruktur, welche Ereignisinformationen aus gemessenen, simulierten und rekonstruierten Ereignissen beinhaltet, sowie einer Sammlung von Analysemodulen [40]. Durch diesen modularen Aufbau können einfach und schnell verschiedene Modulsequenzen ausgeführt werden, um so verschiedene Analysen durchzuführen. AERA als Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums benutzt als Standard-Analysesoftware ebenfalls Offline und fügte die für die Radioanalyse benötigten Komponenten hinzu. Diese Komponenten umfassen alle drei Teile von Offline, also die Detektorbeschreibung des Radioaufbaus, die Ereignisstruktur der Radioereignisse und Analysemodule für die Radiodaten [41].

Der zum Beacon gehörende Teil von Offline umfasst zwei Teile. Zum einen existiert ein Modul „RdChannelBeaconTimingCalibrator“, welches in der Analyse benutzt wird, um die Zeitkorrektur eines Kanals durchzuführen und somit die für Interferometrie benötigte relative Zeitgenauigkeit zu erreichen. Zum anderen existiert eine Anwendung mit der die Referenzphasendifferenzen berechnet und

in eine Datenbank, auf die das Analysemodul zugreift, eingetragen werden.

4.3.1 Beacon-Zeitkalibrationsmodul in Offline

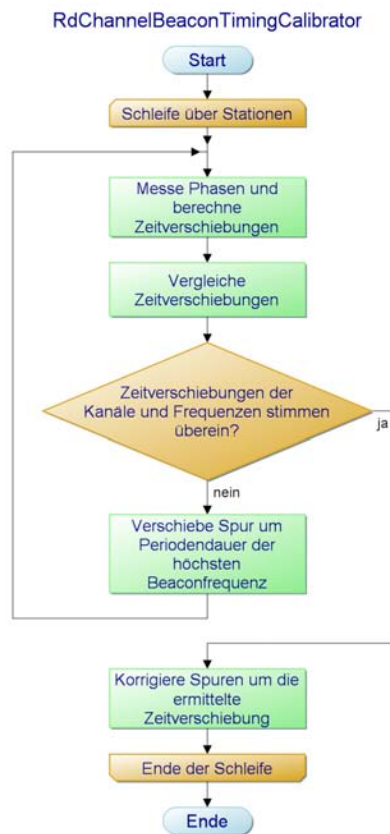


Abbildung 4.11: Vereinfachter Programmablaufplan des Moduls zum Korrigieren der relativen Zeitgenauigkeit anhand der Beaconsignale.

Das Modul zur Verbesserung der relativen Zeitgenauigkeit mit Hilfe der Phasen der Beaconsignale heißt „RdChannelBeaconTimingCalibrator“. Der Anfang RdChannel kennzeichnet das Modul dabei als Radiomodul, welches auf Kanalebene arbeitet. Das Modul führt die in Kapitel 3.5 beschriebenen Schritte aus. Die Kanäle einer Station greifen auf die selbe Uhr zurück, sie haben also keine relative Zeitverschiebung zueinander. Deswegen wird bei der Korrektur immer jede Station einzeln betrachtet. Für alle Kanäle und alle Beaconfrequenzen dieser

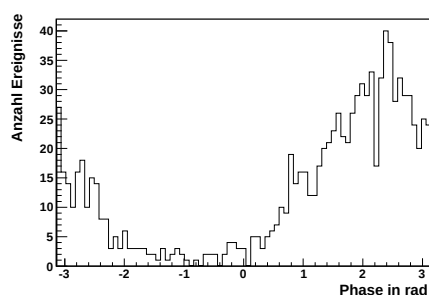
Station werden die Zeitverschiebungen anhand der Referenzphasendifferenzen berechnet. Anschließend werden die ermittelten Zeitverschiebungen miteinander verglichen. Da keine Zeitverschiebung zwischen den Kanälen einer Station vorhanden sein sollte, müssen die Zeitverschiebungen, die für die verschiedenen Kanäle und Beaconfrequenzen ermittelt wurden, innerhalb der Messgenauigkeit gleich sein. Daher wird überprüft, ob die Beträge der Differenzen der Verschiebungen in einer Epsilon-Umgebung, also einem durch Epsilon begrenzten Bereich um Null herum, liegen. Falls die Verschiebungen dieses Kriterium erfüllen, werden die Spuren der Kanäle entsprechend verschoben und es wird die nächste Station betrachtet. Sollten die Verschiebungen das Epsilon-Kriterium nicht erfüllen, so kann dies dadurch zustande kommen, dass die benötigte Zeitverschiebung größer ist als die Periodenlänge einer oder mehrerer Beaconfrequenzen. Durch Verschieben der Spuren um eine ganze Periodendauer der höchsten Beaconfrequenz und erneutes Durchführen der vorangegangenen Schritte wird in diesem Fall versucht, schrittweise die korrekte Zeitverschiebung der Antennenstation herauszufinden. Wenn die Verschiebung um mehrere Perioden vorwärts und rückwärts nicht zum Erfüllen des Epsilon-Kriteriums führt, wird die Zeitkorrektur der Station nicht durchgeführt. Werden mehr als zwei Beaconfrequenzen genutzt, kann das Modul eventuell später verbessert werden, indem die Frequenzen mit wenig Rauschen zur Korrektur ausgesucht werden. Die verrauschten Frequenzen werden dann nicht mehr betrachtet und könnten so nicht mehr zum Scheitern der Korrektur führen.

4.3.2 Berechnung der Referenzphasendifferenzen

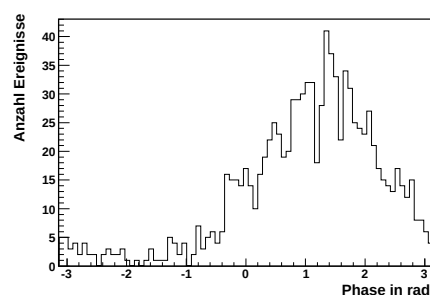
Um die Korrektur durchführen zu können, benötigt das Analysemodul Referenzphasendifferenzen. Diese Referenzphasendifferenzen werden als das Maximum der Verteilung über den Bereich von $-\pi$ bis $+\pi$ der Phasendifferenzen zwischen den Kanälen und einem Referenzkanal über viele Ereignisse berechnet.

Die Ereignisse die dabei verwendet werden sind alle Ereignisse, die in dem Zeitraum aufgenommen wurden für den die Referenzphasendifferenzen bestimmt werden sollen. Wie groß diese Zeiträume sind, das heißt über welche Zeiträume die Referenzphasendifferenzen stabil genug sind, wird sich erst nach Analysen mit von AERA gemessenen Daten zeigen.

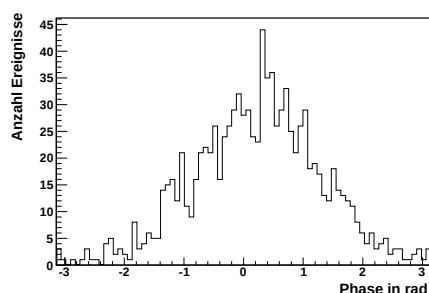
In einem ersten Schritt wird jedes Ereignis einzeln betrachtet. Im Frequenzspek-



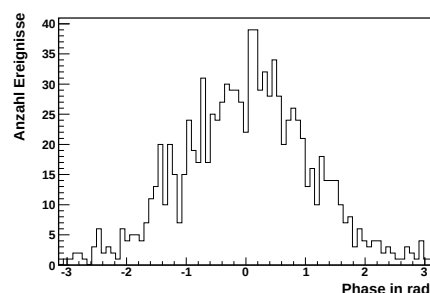
(a) Ausgangszustand der Verteilung der Referenzphasendifferenzen. Der Mittelwert beträgt 1,00.



(b) Nach der ersten Verschiebung um den zuvor berechneten Mittelwert. Der Mittelwert beträgt 1,02.



(c) Nach der zweiten Verschiebung um den Mittelwert der aus b) berechnet wurde. Der Mittelwert beträgt 0,226.



(d) Nach der letzten Verschiebung, der Mittelwert dieser Verteilung liegt nahe genug an 0. Der Mittelwert beträgt 0,025.

Abbildung 4.12: Verteilungen der Phasendifferenzen zwischen 2 Kanälen verschiedener Stationen während der Berechnung. Die Referenzphasendifferenz ergibt sich als Summe der Verschiebungen. Die verwendeten Ereignisse sind mit dem Simulationsmodul erstellt.

trum wird die Phase bei der Beaconfrequenz berechnet und in eine Datei geschrieben. Dies wird für alle Ereignisse und alle Beaconfrequenzen durchgeführt. Man erhält für jede Beaconfrequenz eine Datei, in der die Phase jedes Kanals für jedes Ereignis eingetragen ist. In einem zweiten Schritt werden die Dateien eingelesen und die Phasendifferenzen zu einer Referenzstation berechnet und intern in einem Vektor, also einer Art Liste mit verschieden vielen Elementen, für jeden Kanal gespeichert (siehe Abbildung 4.13). Da die Werte diskret im Bereich von $-\pi$ bis $+\pi$ verteilt sind, kann das Maximum der Verteilung nicht einfach bestimmt werden. Es wird als erster Ansatz der Mittelwert der Elemente bestimmt und dann alle Elemente um den Mittelwert verschoben, so dass der neue Mittelwert näher an Null heranrückt. Dieser Vorgang wird so oft wieder-

holt, bis sich der neue Mittelwert in einem sinnvollen Bereich um Null befindet. Die Größe dieses Bereiches hängt ab von der Messgenauigkeit und der Anzahl der Ereignisse ab. Das Finetuning dieses Parameters kann erst mit AERA-Daten gemacht werden. In Abbildung 4.12 ist der Ablauf einer solchen Berechnung anhand der Histogramme verfolgbar. Durch die 2π -Periodizität befindet sich ein Teil der gaußähnlichen Verteilung der Referenzphasendifferenzen auf der anderen Seite des Histogramms und der Mittelwert ist in diesem Fall nicht gleich dem häufigsten Wert. Die Referenzphasendifferenz ergibt sich dann als Summe aller Verschiebungen die durchgeführt wurden. Somit ergibt sich für jeden Kanal und jede Beaconfrequenz eine Differenzphase zu einem Referenzkanal. Diese Werte werden dann in eine Datenbank eingetragen, von wo aus sie für das Analysemodul verfügbar sind.

Bei dieser Implementierung ist die Wahl einer Referenzstation mit ihren beiden

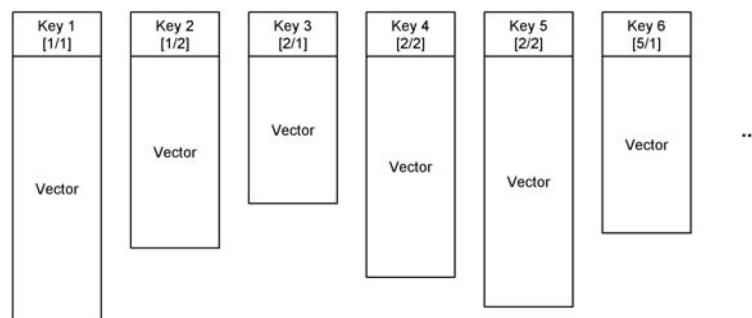


Abbildung 4.13: Die Phasendifferenzen der Ereignisse werden als Elemente eines Vektors gespeichert, dieser ist über die Nummer der Station und eines Kanals ([Station/Kanal]) diesem eindeutig zugeordnet.

Referenzkanälen besonders wichtig und eine mögliche Verbesserung ist die Speicherung der Phasendifferenzen aller sinnvollen Kanalkombinationen. Dies würde aber eine Vervielfachung der zu speichernden Daten und benötigten Rechenzeit bedeuten. Mit den ersten von AERA gemessenen Daten kann analysiert werden, ob sich dieser Aufwand lohnt. Außerdem werden die ersten Daten zeigen, in welchen Zeitabständen und für welche Zeiträume die Referenzphasendifferenzen berechnet werden müssen, beziehungsweise können, da die Schwankungen der Referenzphasendifferenzen nicht vorhersehbar sind.

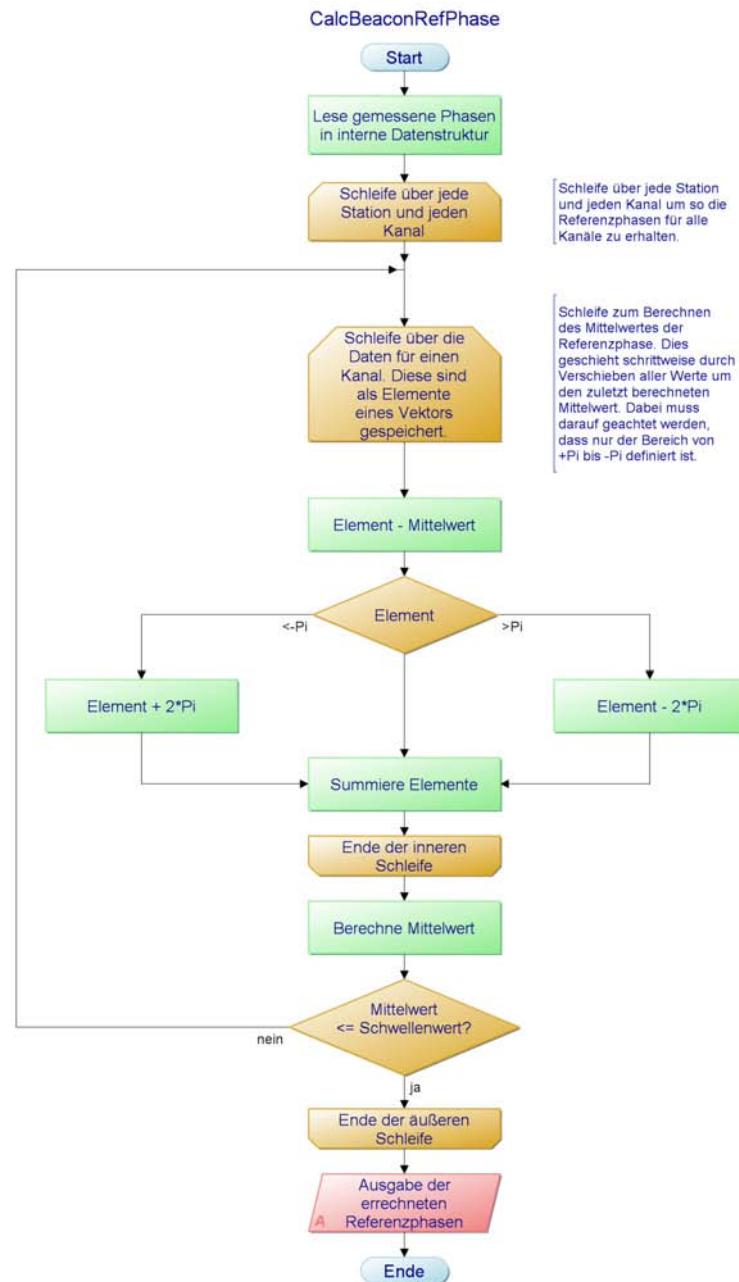


Abbildung 4.14: Vereinfachter Programmablaufplan der Anwendung zur Berechnung der Referenzphasendifferenzen.

5 Aufbau des Beacons und Testmessungen in Argentinien

5.1 Aufbau

Der Beacon, mit den Komponenten wie sie in Abbildung 4.1 dargestellt sind, wurde bei der Fluoreszenzteleskopstation Coihueco aufgebaut (siehe Abbildung 5.1). Die Emissionsantenne befindet sich am Kommunikationsturm in etwa sechs Meter Höhe, ausgerichtet auf das AERA Feld. Das Stahlrohr, an dem die Antenne angebracht ist, ragt circa zwei Meter aus dem Turm heraus, sodass die Abstrahlung der Beaconantenne möglichst wenig vom Metall des Turmes beeinflusst wird und die Beaconantenne die Kommunikationsantennen nicht stört. Die Antenne ist mit einem circa 50 m langen RG213 Kabel verbunden. Dieses läuft den Kommunikationsturm herunter in einen unterirdischen Kabelschacht und durch diesen bis ins Teleskopgebäude in den Computerraum, wo es an den Verstärker angeschlossen ist. Zum Schutz vor Blitzschäden ist die Abschirmung des Kabels mehrmals am Turm geerdet und am Eingang des Gebäudes mit einem Überspannungsschutz versehen. Der Computer zur Steuerung des Beacons und die Netzwerksteckdose sind an das lokale Netzwerk der Teleskopstation angeschlossen und über Internet vom zentralen Campus in Malargüe oder vom KIT in Karlsruhe aus zu erreichen.

5.2 Testmessungen

Um die Funktion und Sendeleistung des Beaconsystems nach der Installation zu überprüfen, wurden verschiedene Testmessungen durchgeführt. Der Verstärker wurde direkt an einen Spectrumanalyser angeschlossen, um die Funktion von Frequenzgenerator und Verstärker zu überprüfen und die maximale Sende-



(a) Fluoreszenzdetektorstation Coihueco mit Kommunikationsturm.



(b) Montierte Beacon-Sendeantenne (SALLA) am Kommunikationsturm von Coihueco.



(c) Blick vom Rand des AERA-Feldes Richtung Coihueco und Beacon. Die Teleskopstationen Coihueco und HEAT sind links oben im Bild am Hang zu erkennen.

Abbildung 5.1: Die Sendeantenne des Beacons ist in circa sechs Meter Höhe am Kommunikationsturm von Coihueco angebracht und in Richtung des AERA-Feldes ausgerichtet.

leistung herauszufinden. Die Reflexionsverluste des Kabels vom Verstärker und zur Sendeantenne wurden gemessen. Und schließlich wurden im AERA-Feld an verschiedenen Positionen mit dem Spectrumanalyser und einer SALLA (siehe Kapitel 4.1.5) als Empfangsantenne, Messungen der empfangbaren Leistung der Beaconsignale durchgeführt.

5.2.1 Messung der Ausgangsleistung am Verstärker

Nach dem Aufbau musste die fehlerfreie Funktion des Frequenzgenerators und des Verstärkers überprüft werden, um Schäden, die durch den Transport entste-

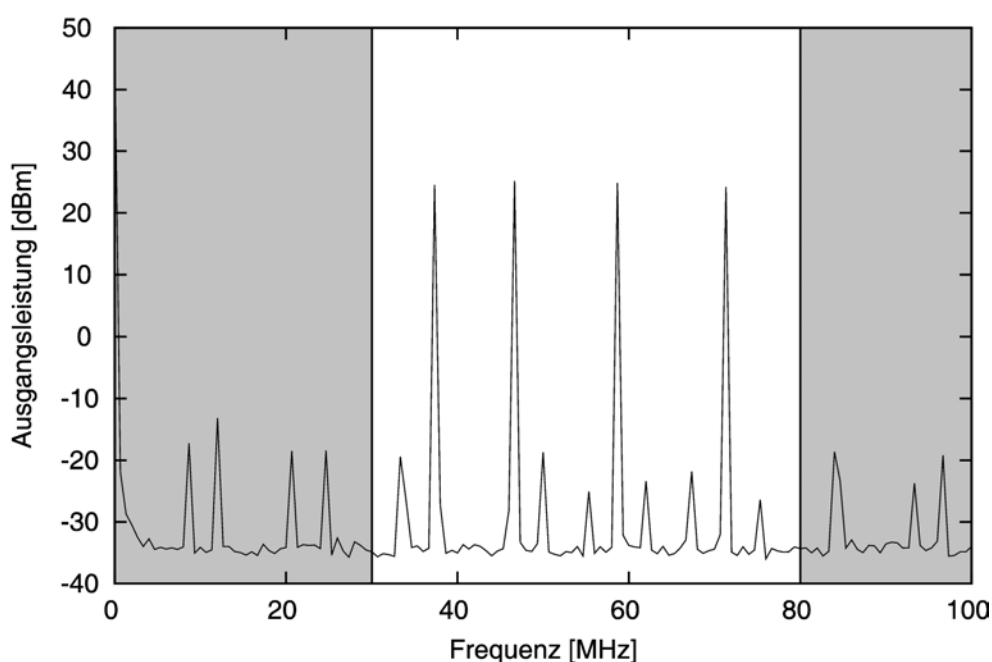


Abbildung 5.2: Frequenzspektrum des Beacons nach dem Verstärker, mit 10 dB eingestellter Dämpfung für die ersten drei Frequenzen und 11 dB für die vierte Frequenz. Der grau schattierte Bereich liegt ausserhalb des AERA-Frequenzbereichs.

hen könnten, oder Fehler beim Aufbau, auszuschließen. Dazu wurde der Ausgang des Verstärkers über zwei Dämpfer direkt an den Spectrumanalyser angeschlossen. Die zwei 10-dB-Dämpfer dienten dazu, die zulässige Eingangsleistung des Spectrumanalysers nicht zu überschreiten. Das resultierende Spektrum, korrigiert um die zwei zusätzlichen Dämpfer, ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Die Dämpfereinstellung des Frequenzgenerators war dabei 10 dB für die Frequenzen 37,793 MHz, 46,582 MHz und 58,887 MHz und 11 dB für die Frequenz 71,191 MHz. Die Peaks dieser vier Frequenzen sind im Spektrum klar zu erkennen mit einer Höhe von 25 dBm. Sie haben eine Halbwertsbreite von 100 Hz die in dieser Messung mit einer Auflösung von 10 kHz des Spectrumanalysers aber nicht aufgelöst werden kann.

Die kleineren Peaks entstehen durch Intermodulation der Hauptfrequenzen. Verursacht werden diese hauptsächlich dadurch, dass die Verstärkung des Verstärkers bei zu hoher Eingangsleistung den linearen Bereich verläßt. Das hier abge-

bildete Spektrum mit den zugehörigen Dämpfereinstellungen stellt die maximale Ausgangsleistung mit vier angeschalteten Frequenzen dar. Die zusätzlichen Peaks sind hier unschädlich, das heißt sie sind zu schwach um Daten von AERA als Störsignale zu beeinflussen. Bei weiterer Steigerung der Leistung, also bei weniger Dämpfung im Frequenzgenerator, nimmt die Anzahl an Störpeaks und ihre Höhe zu. Durch Abschalten einer oder zweier Beaconfrequenzen sinkt die Eingangsleistung in den Verstärker und die Leistung der verbleibenden Frequenzen kann entsprechend um 3 dB pro abgeschalteter Frequenz gesteigert werden.

5.2.2 Messung der Reflexions- und Leitungsverluste

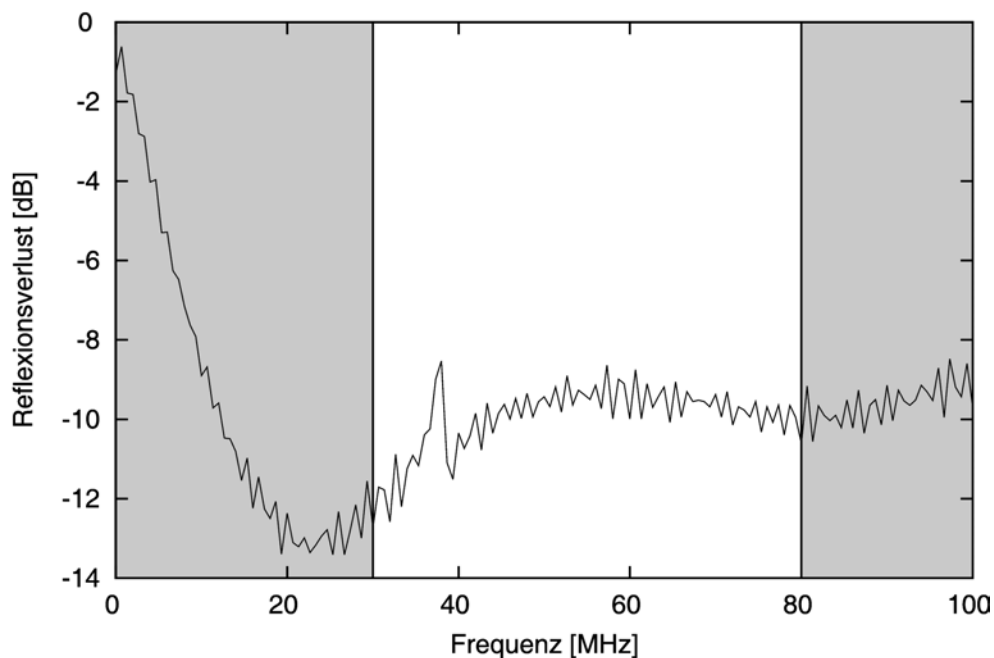


Abbildung 5.3: Reflexionsverlust von Antennenkabel und Antenne des AERA Beacons. Grau schattiert ist der Bereich außerhalb des AERA-Frequenzbandes.

Um die tatsächliche Sendeleistung des Beacons zu kennen, muss man wissen, welche Signalleistungsverluste im Kabel und in der Sendeantenne auftreten. Mit dem Spektrumanalyser wird dazu ein Signal in das Kabel zur Antenne eingespeist und dessen Leistung mit der Leistung des reflektierten Signals verglichen. Die

resultierende frequenzabhängige Kurve ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Im Frequenzbereich von AERA ist der Verlust relativ konstant bei -10 dB, wobei sich die Beaconfrequenz 37,793 MHz genau auf dem kleinen Peak befindet und der Abfall zu niedrigen Frequenzen daher keine Rolle spielt. Die Ursache dieses Peaks ist nicht Verstanden: die Messung wurde zwei mal durchgeführt und beide Male trat dieser Peak auf. Ein möglicher Grund dieses Peaks könnte in einer Resonanz liegen, die zum Beispiel in der Elektronik auftreten könnte, welche die Antenne zum Kabel hin einkoppelt. Eine weitere mögliche Ursache könnte das Messgerät sein, in diesem Fall der Spectrumanalyser mit speziellem Aufsatz.

Bei dieser Messung gibt es drei Anteile am Gesamtleistungsverlust. Zuerst wird das emittierte Testsignal im Kabel zur Antenne abgeschwächt, dann wird ein Teil der Leistung in die Antenne eingespeist, welcher in dieser Messung als Verlust anzusehen ist und schließlich wird der reflektierte Anteil nochmals im Kabel abgeschwächt. Die Reflexion der Antenne wurde in einer separaten Messung bestimmt [42]. Sie beträgt 30 % (1,5 dB), was bei dieser Messung einem Verlust von 70 % also -5 dB entspricht. Damit kann die Abschwächung des Kabels berechnet werden, denn somit ist klar, wie sich die -10 dB Gesamtverlust auf die verschiedenen Komponenten aufteilen.

$$L_{gesamt} = L_{Kabel} + L_{Antenne} + L_{Kabel}$$

$$-10 dB = -2,5 dB - 5 dB - 2,5 dB$$

Daraus folgt ein Verlust für das Beaconsignal von -4 dB, bis es in die Antenne eingespeist ist. Dieser ergibt sich aus -2,5 dB Verlust im Kabel und 30 % Reflektionsverlust, was 1,5 dB entspricht, an der Antenne. Die geringe Frequenzabhängigkeit wurde hierbei vernachlässigt. In der Antenne gehen 90 % der Leistung in den Widerstand und nur 10 % werden emittiert (siehe Abbildung 4.6(b)). Alles zusammen beträgt der Signalverlust vom Ausgang des Verstärkers bis zur Emission an der Antenne etwa -14 dB. Mit den Ausgangsleistungen am Verstärker von 25 dBm, wie in Kapitel 5.2.1 gemessen, ergibt sich demnach eine Sendeleistung pro Frequenz von 11 dBm was 12,5 mW entspricht.

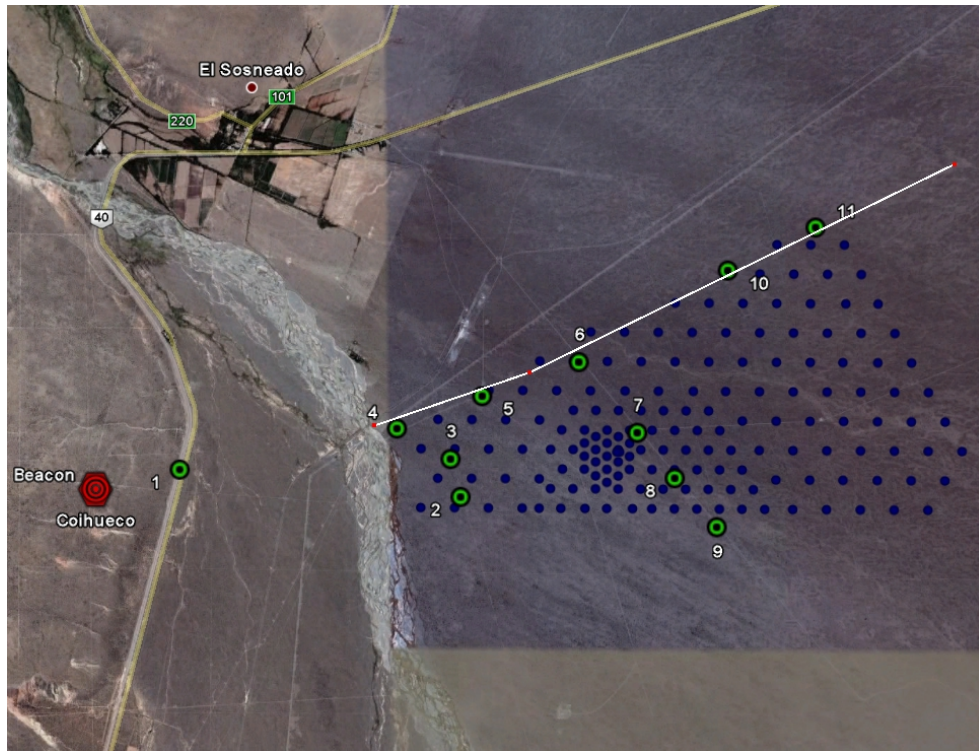
Vergleicht man die Sendeleistung des Beacons von insgesamt etwa 50 mW mit anderen Funkübertragungen, so erkennt man wie klein diese ist. W-Lan Geräte wie Accesspoints oder Laptops nutzen Sendeleistungen von 20 mW bis 40 mW bei einer Frequenz von 2,4 GHz. Handys dürfen mit Sendeleistungen bis zu 2 W bei 900 MHz funken, wobei die Sendeleistung so gering wie möglich gehalten wird

um die Akkulaufzeit zu verlängern. DVB-T Sender, die im Bereich von 470 MHz bis 790 MHz senden, besitzen effektive Strahlungsleistungen von bis zu 100 kW pro gesendetem Kanal und Langwellensender bei 0,15 MHz bis 0,29 MHz sogar bis zu 2000 kW.

5.2.3 Messung der empfangbaren Leistung im AERA Feld

Die Messung der empfangbaren Signalstärke der Beaconsignale im AERA-Feld erfolgte mit einer SALLA, befestigt an einem drei Meter langen Alustab und einem Spectrumanalyser. Das Messsystem im Einsatz ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Es wurden verschiedene Punkte im AERA-Feld angefahren, die mit einem normalen Auto erreichbar waren. Dort wurde die Empfangsantenne in Richtung des Beacons ausgerichtet, so dass die Peaks der Beaconfrequenzen maximal waren. Die Positionen wurden mit einem GPS-Gerät gemessen und darüber später die Entfernung zum Beacon berechnet. Die Messpunkte und ihre Position im AERA-Feld sind in Abbildung 5.4 zu sehen. Die Einstellung der Dämpfung des Beacons war 10 dB für die ersten drei Frequenzen, 37,793 MHz, 46,582 MHz und 58,887 MHz und 11 dBm für die vierte Frequenz 71,191 MHz, wie bei der Testmessung beschrieben in Kapitel 5.2.1. Die Sendeleistung pro Frequenz beträgt somit circa 12,5 mW.

Die gemessenen Werte, wie sie in Tabelle 5.1 angegeben sind, sind mit großen Messunsicherheiten belegt. Die Ausrichtung der Antenne sollte zwar einen Einfluss auf die empfangene Leistung haben, bei Versuchen in denen wir die Antenne um 90° gedreht haben, war dieser zum Teil nicht oder nur sehr schwach messbar. Dies könnte eventuell ein Störeffekt der Stromleitung sein, die entlang der nördlichen Grenze des AERA-Feldes verläuft und somit ganz in der Nähe einiger Messpunkte. Deswegen wurden die Messpunkte 4, 5 und 6 aus der weiteren Analyse ausgeschlossen, denn diese Punkte waren entweder direkt an der Stromleitung gelegen oder die Stromleitung war in direkter Sichtlinie zum Beacon. Die Art und Größe des Einflusses der Stromleitung ließ sich nicht ermitteln.



(a) Karte mit den Positionen der geplanten AERA Antennenstationen (blau) und den Positionen an denen Testmessungen durchgeführt wurden (grün). Die weiße Linie gibt den Verlauf der Stromleitung wieder.

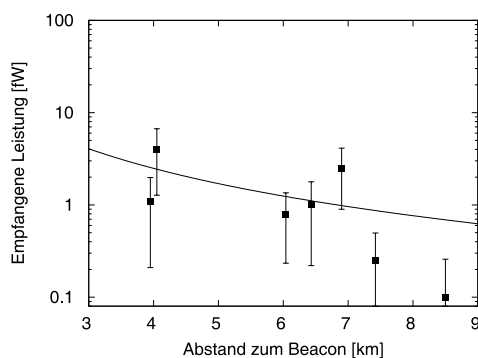


(b) An den Testpositionen wurde mit einer SALLA und einem Spectrumanalyser gemessen. Hier zu sehen ist die Testposition 5 mit der Stromleitung im Hintergrund.

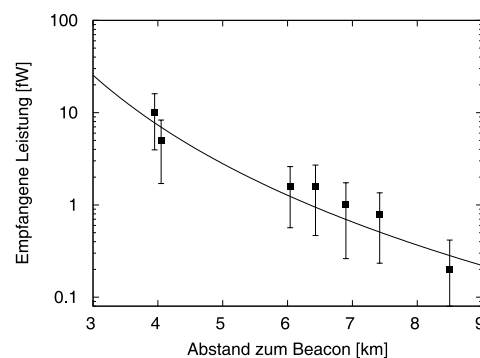
Abbildung 5.4: Karte der Testmessung im AERA Feld und die Testmessung an Testposition 5.

Die Ausrichtung der Antenne bei den Messungen geschah mit der Präzision, die per Peilung mit dem Auge in Richtung des Beacons, möglich ist. Ein weitere Unsicherheit bei den Messungen ist der interne Vorverstärker des Spektrumanalysers, der aber für alle Messpunkte der gleiche war und somit nur ein systematische Verschiebung aller Messungen verursachen sollte, was für die spätere Interpretation der Daten nicht maßgeblich ist. Die systematische Unsicherheit durch die begrenzte Auflösung des Spektrumanalysers kann gegen die viel größeren Effekte, wie die Ungenauigkeit bei der Ausrichtung der Antenne, vernachlässigt werden.

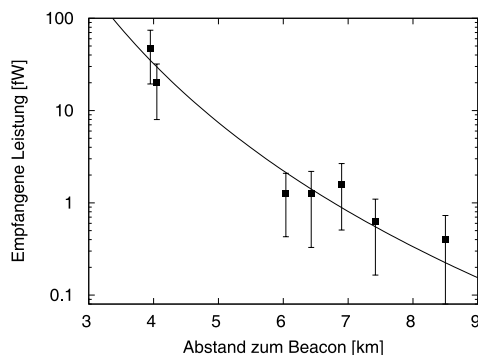
Messpunkt 1 diente als Test, ob der Beacon emittiert, lag nicht in direkter



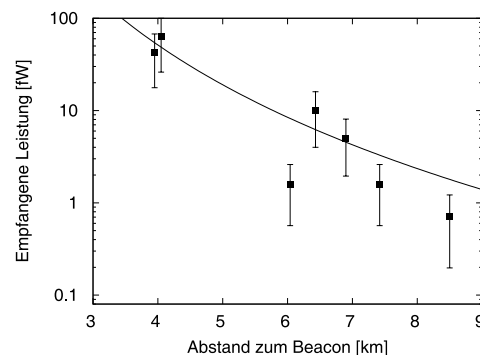
(a) Empfangene Leistung des Beaconsignals bei 37,793 MHz.



(b) Empfangene Leistung des Beaconsignals bei 46,582 MHz.



(c) Empfangene Leistung des Beaconsignals bei 58,887 MHz.



(d) Empfangene Leistung des Beaconsignals bei 71,191 MHz.

Abbildung 5.5: Empfangene Leistung des Beacon-Signals im AERA Feld. Die Fehlerbalken ergeben sich aus einer angenommenen Ableseungenauigkeit von 2dB und dem gemessenen Untergrundrauschen. Nicht berücksichtigt sind eventuelle systematische Fehler wie die Ausrichtung der Antenne.

Sichtlinie zur Emissionsantenne und wurde deshalb ebenfalls aus der weiteren

Nr.	Abstand [m]	Frequenz 1 [dBm]	Frequenz 2 [dBm]	Frequenz 3 [dBm]	Frequenz 4 [dBm]	Rauschen [dBm]
1	970	-111	-109	-103	-100	-124
2	1150	-114	-113	-107	-102	-124
3	3950	-120	-110	-103	-104	-126
4	3410	-115	-116	-116	-109	-124
5	4420	-123	-116	-114	-109	-130
6	5550	-118	-120	-122	-123	-130
7	6040	-121	-118	-119	-118	-130
8	6430	-120	-118	-119	-110	-127
9	6900	-116	-120	-118	-113	-128
10	7420	-126	-121	-122	-118	-130
11	8500	-130	-127	-124	-121	-130

Tabelle 5.1: Werte der Testmessung im AERA-Feld. Die Nummern stimmen mit denen in der Karte überein. Für die Auswertung wurde das Rauschen als Fehler betrachtet und eine Messungenauigkeit von 2 dB angenommen. Für die Entfernung beträgt der Fehler durch die GPS-Ungenauigkeit nur wenige Meter und wurde deshalb vernachlässigt.

Analyse ausgeschlossen.

Zum Abschätzen der empfangbaren und benötigten Sendeleistung wurde an die gemessene empfangene Leistung über dem Abstand zum Beacon ein Potenzgesetz angepasst:

$$P_{\text{empfangen}} = a \cdot r^x$$

Im freien Raum würde man aufgrund der Geometrie ein Verhalten wie $P_{\text{empfangen}} \propto r^{-2}$ erwarten, wenn sich die Welle kugelförmig ausbreitet. Bei früheren Testmessungen ist ein stärkeres Abfallen der Leistung mit einem Verhalten wie $P_{\text{empfangen}} \propto r^{-4}$ ermittelt worden [43]. Die Abweichung von der Proportionalität im Falle eines freien Raumes lässt sich durch Reflexion und Absorption des Signals am Boden erklären, die erwartet werden, da sich das Signal nahezu horizontal ausbreitet. Die ermittelten Exponenten für die Testmessung im Rahmen dieser Diplomarbeit sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die aus der Anpassung ermittelten Exponenten x schwanken sehr stark und sind mit statistischen Fehlern bis zu 75% behaftet. Tendenziell scheint die Leistung aber etwas stärker abzufallen als von früheren Testmessungen erwartet.

Betrachtet man das Rauschen als Verschiebung der Messwerte und zieht dieses

Frequenz	a	x
37,793 MHz	$26,5 \pm 51,2$	$-1,7 \pm 1,2$
46,582 MHz	$2946,2 \pm 6731,0$	$-4,3 \pm 1,6$
58,887 MHz	$298463 \pm 2,06 \cdot 10^6$	$-6,6 \pm 5,0$
71,191 MHz	$24551 \pm 5,44 \cdot 10^4$	$-4,5 \pm 1,6$

Tabelle 5.2: Werte der Anpassung der Messwerte an eine Exponentialfunktion $a \cdot r^x$ mit den dazugehörigen statistischen Abweichungen. Die Zugehörigen Kurven sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

folglich von den Messwerten ab, so erhält man mit einer analogen Analyse, dass das Verhalten der angepassten Funktionen sich kaum ändert.

5.2.4 Messung des Frequenzspektrums an der CRS

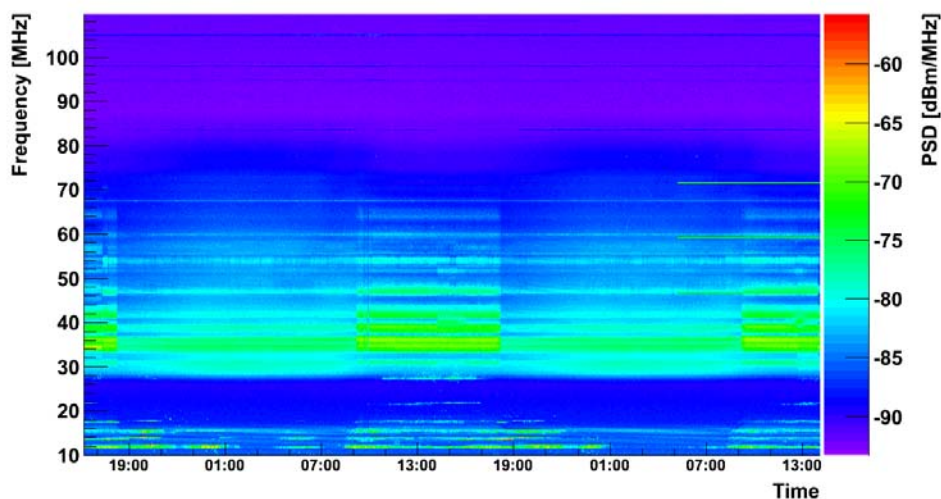


Abbildung 5.6: Dynamisches Spektrum aufgenommen an der CRS mit einer AERA-LPDA [44].

Wenige Wochen nach der Installation des Beacons wurden die ersten LPDAs für AERA aufgestellt. Eine der Antennen dient als Testantenne und ist nur wenige Meter entfernt von dem Container der CRS (Central Radio Station) aufgestellt. Mit dieser Antenne wurde von Stefan Fliescher und Klaus Weidenhaupt von der RWTH Aachen ein dynamisches Spektrum über 45 Stunden aufgenommen. In

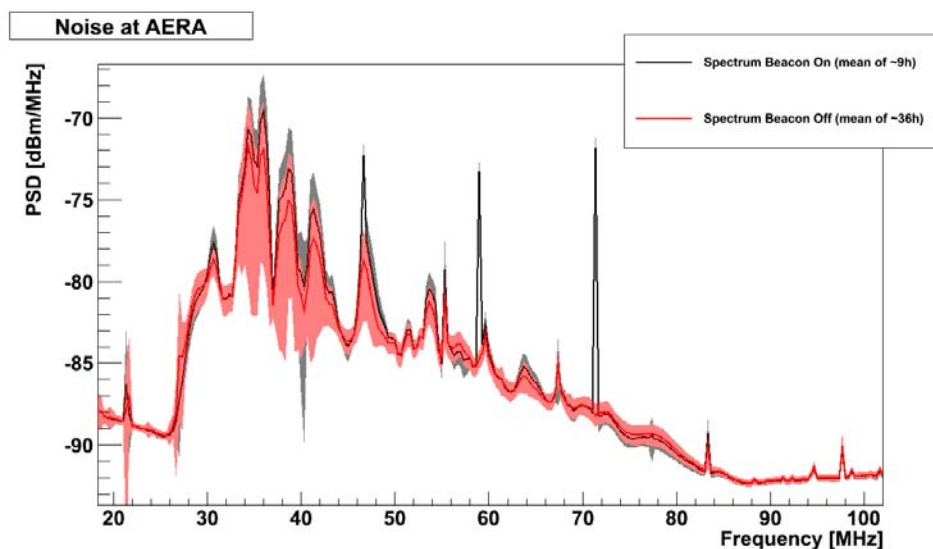


Abbildung 5.7: Gemittelttes Frequenzspektrum aufgenommen über 45 Stunden mit der Testantenne direkt an der zentralen Radiostation (CRS) [44].

Abbildung 5.6 ist die spektrale Leistungsdichte farbig codiert. Der Beacon wurde am zweiten Tag gegen 5 Uhr eingeschalten. Zu erkennen ist dies an der dort beginnenden dünnen grünen Linie die zur Beaconfrequenz 71,191 MHz gehört. Darunter befinden sich die gleichzeitig dazu startenden Linien für die Frequenzen 58,887 MHz und 46,582 MHz. Die Linie für die Beaconfrequenz 37,793 MHz ist nicht zu erkennen, da sie in einem Bereich liegt, indem das Rauschen mit ähnlicher Leistung auftritt wie das Beaconsignal. Zu erkennen ist ein periodisch auftretendes, breitbandiges Variieren der Leistung im unteren Frequenzbereich durch eine oder mehrere Störquellen. Diese Störquellen treten zwischen 9 Uhr und 18 Uhr Ortszeit auf, was in etwa dem dortigen Tag- Nachtzyklus entspricht. Als Ursache der Störung werden Arbeiten an der CRS oder die Solaranlage der CRS vermutet. Sollte die Ursache dieser Störung tatsächlich in der CRS bzw. deren Solaranlage liegen, so dürfte es kein Problem für die AERA-Antennenstationen darstellen, da diese weit genug entfernt stehen sollten. Um dies aber endgültig festzustellen sind weitere Messungen an den AERA-Antennen nötig.

In Abbildung 5.7 ist aus den selben Daten ein gemittelttes Frequenzspektrum erstellt worden. Das rote Spektrum entspricht dabei den 36 Stunden Messzeitraum, in dem der Beacon nicht eingeschaltet war. In schwarz ist das gemittelte Spektrum über die 9 Stunden, in denen alle 4 Frequenzen des Beacons einge-

schaltet waren, zu sehen. Die drei schwarzen Peaks, welche den Beaconfrequenzen 71,191 MHz, 58,887 MHz und 46,582 MHz entsprechen, heben sich deutlich vom Untergrund ab. Der Peak der Beaconfrequenz 37,793 MHz ist nicht vom starken Hintergrund in diesem Frequenzbereich zu unterscheiden. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der höchsten drei Beaconfrequenzen liegt bei 15 dB, 11 dB bzw. 6 dB. Für die niedrigste Beaconfrequenz ist kein signifikantes Signal zu erkennen. Die Sendeleistung aller Beaconfrequenzen ist folglich zu schwach um ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 20 dB [43] bei diesem starken Rauschuntergrund zu erreichen, wie es zur Zeitkorrektur benötigt wird.

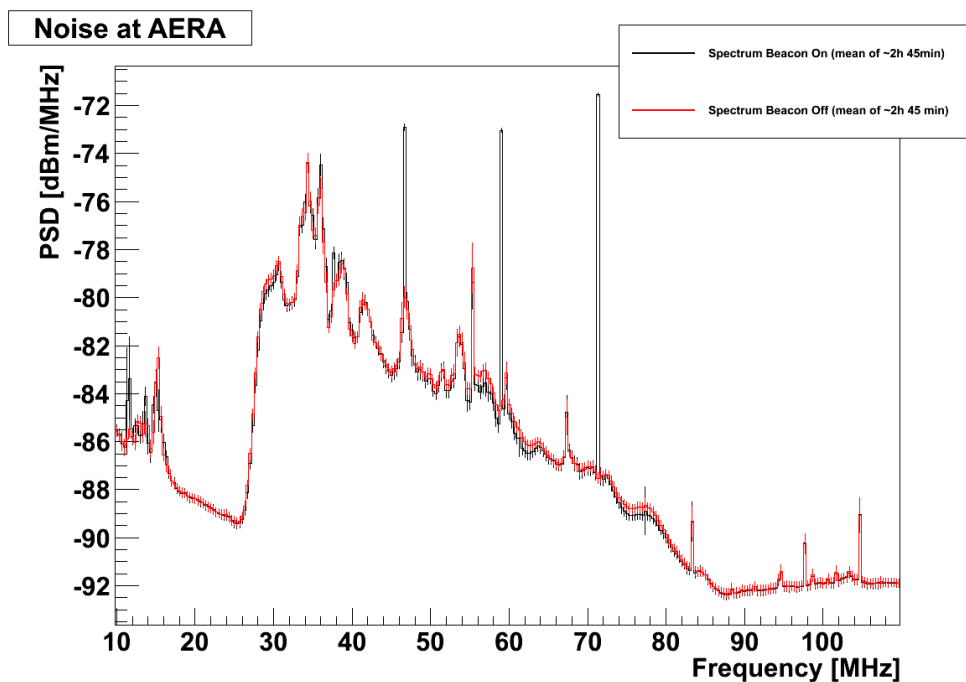


Abbildung 5.8: Gemitteltetes Frequenzspektrum über den Zeitraum in der Nacht in der der Beacon eingeschaltet wurde [44].

Betrachtet man nur den Zeitraum in der Nacht, als der Beacon eingeschaltet wurde und der Hintergrund nicht so stark ist, erhält man ein gemitteltetes Spektrum wie es in Abbildung 5.8 gezeigt ist. Die Peaks der Beaconfrequenzen sind in diesem Spektrum deutlich schmäler als die in Abbildung 5.7 dargezeigten. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis dieses Zeitabschnittes ist nicht wie erwartet besser, als im Spektrum über die komplette Zeit in der der Beacon eingeschaltet war,

lediglich geringe Verbesserungen im Bereich von 1 dB sind zu erkennen. Bei dieser Messung waren die niedrigsten drei Beaconfrequenzen mit 10 dB gedämpft und die höchste mit 11 dB, das heißt, der Beacon hat die maximale Leistung beim Verwenden von vier Frequenzen im linearen Verstärkerbereich emittiert. Durch Abschalten einer oder zweier Frequenzen könnten die verbleibenden Frequenzen mit mehr Leistung emittiert werden, was das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessern würde. Messungen zeigen aber, dass der zu erwartende Untergrund im AERA-Feld erheblich niedriger und homogener sein sollte, was eine Erhöhung der Sendeleistung eventuell überflüssig macht [45]. Erst weitere Messungen mit den AERA-Antennenstationen inklusive AERA-Elektronik und Datenerfassung, werden Aufschluss darüber geben können, ob die Sendeleistung des Beacons in der aktuellen Konfiguration ausreicht.

6 Ausblick

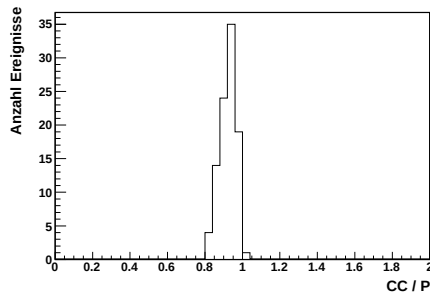
Durch Verzögerungen des Gesamtaufbaus bei AERA konnte der Einfluss der Zeitkorrektur durch den Beacon auf die Rekonstruktion von Luftschauern im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr getestet werden. Das Potential des Beacons bei AERA soll hier aber mit Hilfe von LOPES Daten und im nächsten Kapitel mit Hilfe von Simulationen diskutiert werden.

6.1 Einfluss der Zeitkorrektur auf die Rekonstruktion

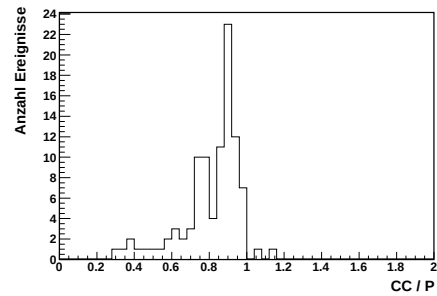
Den Einfluss der Zeitkorrektur kann man sehen, wenn man sich die Höhe des Cross-Correlation-Beams im Verhältnis zur Höhe des Power-Beams anschaut. Das Radiosignal eines Luftschauers zeigt sich als ein kohärentes Signal in den Daten und hebt sich dadurch vom inkohärenten Rauschen ab. Bei dem Signal eines Luftschauers sollte also der dominierende Anteil der Leistung im auf Kohärenz sensitiven Cross-Correlation-Beam sein. Demzufolge sollte der Cross-Correlation-Beam im Verhältnis zum Power-Beam, welcher die gemittelte Leistung, also auch den inkohärenten Teil darstellt, hoch, das heißt nahe 1 sein.

Eine schlechte Zeitgenauigkeit äußert sich, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, in teilweise verlorener Kohärenz und somit einem niedrigeren Cross-Correlation-Beam. Dies wird hier nun nicht nur, wie bereits geschehen, mit einzelnen Ereignissen, sondern auf statistischer Basis mit von LOPES aufgezeichneten Daten untersucht. Dazu wurden Ereignisse von LOPES betrachtet die von Februar 2008 bis September 2009 aufgenommen wurden. Zu dieser Zeit waren jeweils 10 Antennen in Nord-Süd-Polarisation, 10 Antennen in Ost-West-Polarisation und 5 Antennen in Nord-Süd- und Ost-West-Polarisation ausgerichtet. Die Ereignisse wurden von KASCADE getriggert und besitzen eine Energie von mindestens 10^{17} eV und eine gute KASCADE-Rekonstruktion. Verglichen wird ein Satz von Ereignissen die anhand des Beaconsignals zeitlich korrigiert wurden mit denselben

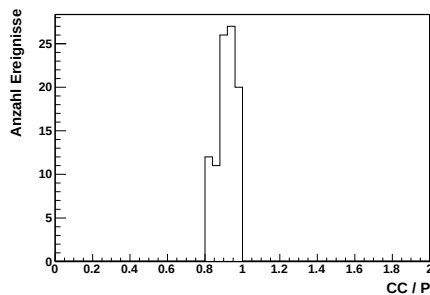
Ereignissen, bei denen die Zeitkorrektur nicht durchgeführt wurde. Die Verteilungen



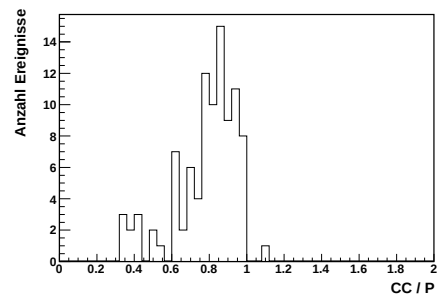
(a) Ost-West-Polarisation mit zeitlicher Korrektur anhand des Beaconsignals.



(b) Nord-Süd-Polarisation mit zeitlicher Korrektur anhand des Beaconsignals.



(c) Ost-West-Polarisation ohne zeitlicher Korrektur anhand des Beaconsignals.



(d) Nord-Süd-Polarisation ohne zeitlicher Korrektur anhand des Beaconsignals.

Abbildung 6.1: Verteilungen des Verhältnisses von Cross-Correlation-Beam zu Power-Beam von 96 von LOPES aufgenommenen Ereignissen in Nord-Süd- und Ost-West-Polarisation.

lungen in Abbildung 6.1 zeigen das Ergebnis dieser Analyse als Verhältnis vom Maximalwert des Cross-Correlation-Beams zum Maximalwert des Power-Beams in Ost-West- und Nord-Süd-Polarisation für 96 ausgesuchte Ereignisse die von LOPES aufgenommen wurden. Die Verteilungen der zeitlich korrigierten Daten liegen etwas näher an 1, die zeitliche Korrektur führt also tendenziell zu einer besseren Rekonstruktion der Daten. Die Verteilung der Nord-Süd-Polarisation ist wesentlich breiter. Dies kommt dadurch zustande, dass die Signalstärke in Nord-Süd-Polarisation in den meisten Fällen durch den Emissionsmechanismus bedingt viel schwächer ist als in der Ost-West-Polarisation und somit viel stärker vom Rauschen beeinflusst ist.

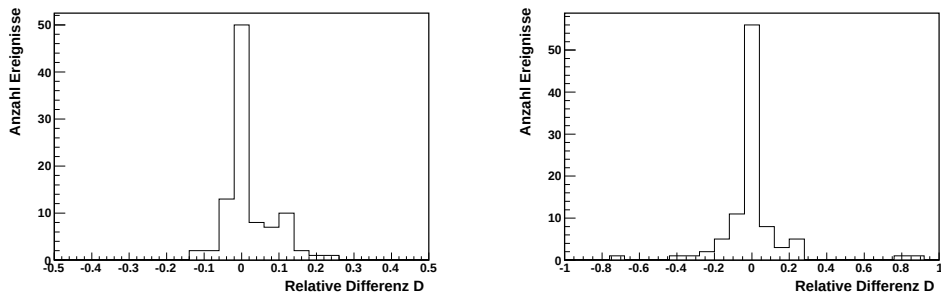
Anhand der relativ kleinen Unterschiede in den Verteilungen mit und ohne Zeitkorrektur, ist erkennbar, dass LOPES auch ohne zeitliche Korrektur mit dem

Beacon schon ein sehr gute Zeitgenauigkeit besitzt und die Beacon-Korrektur im wesentlichen nur zur Korrektur der Zeitsprünge (siehe Kapitel 3.3) benötigt wird. Bei AERA werden die Unterschiede zwischen korrigierten und nicht korrigierten Daten sehr viel größer sein.

Den Einfluss durch die Korrektur der Zeitgenauigkeit mit dem Beacon kann außerdem veranschaulicht werden, indem die relative Differenz des Cross-Correlation-Beams mit und ohne zeitliche Korrektur betrachtet wird.

$$D = \frac{CC_{Beacon} - CC_{ohne Beacon}}{CC_{ohne Beacon}}$$

Dabei erwartet man, dass der Cross-Correlation-Beam bei korrigierten Ereignis-



(a) Relative Differenz des Cross-Correlation-Beams in Ost-West-Polarisation.

(b) Relative Differenz des Cross-Correlation-Beams in Nord-Süd-Polarisation.

Abbildung 6.2: Relative Differenz der Höhe des Cross-Correlation-Beams mit und ohne zeitliche Korrektur über den Beacon für 96 von LOPES gemessenen Ereignissen.

nissen höher sein sollte als bei unkorrigierten und sich somit eine Verteilung zu positiven Werten ergibt. In Abbildung 6.2 sind die Verteilungen die sich für die 96 Ereignisse in Ost-West- und in Nord-Süd-Polarisation ergeben dargestellt. Zu erkennen ist ein deutlicher Peak bei 0. Dies bedeutet, dass in vielen Fällen die Beacon-Zeitkorrektur zu keiner Verbesserung der Rekonstruktion geführt hat. Einige wenige Ereignisse weisen mit Korrektur sogar eine geringere Höhe des Cross-Correlation-Beams auf als ohne Korrektur. Der Grund für eine solche Fehlkorrektur könnte ein zu schwaches Beaconsignal oder eine zu hoher Rauschhintergrund sein. Die Verteilung der Ost-West-Polarisation zeigt viele Ereignisse, die durch die Zeitkorrektur einen bis zu 20 % höheren Cross-Correlation-Beam haben. Bei diesen hat die zeitliche Korrektur die Qualität der Daten verbessert. Die Verteilung der Nord-Süd-Polarisation ist symmetrisch zu 0. Die Zeitkorrektur

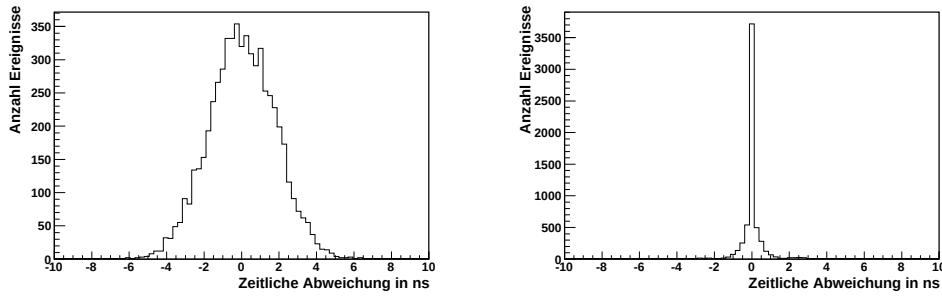
hat hier also netto keinen positiven Effekt auf die Daten. Dieses Verhalten ist wiederum auf die im Durchschnitt kleine Signalstärke in der Nord-Süd-Polarisation und dem somit großen Einfluss des Hintergrundrauschens zu zuweisen.

Es ist zu erwarten, dass eine solche Analyse mit Daten von AERA wesentlich größere Effekte zeigen wird, da die Zeitgenauigkeit bei AERA ohne Beacon erheblich schlechter ist als jene von LOPES.

6.2 Simulation der Zeitkorrektur mit Offline

Da abzusehen war, dass sich der Aufbau von AERA verschiebt und somit keine Messdaten des Experiments für die Diplomarbeit zur Verfügung stehen, wurden Effekte der zu erwartenden Zeitkorrektur durch den Beacon mit Offline simuliert. Um die Softwaremodule, die für Offline implementiert wurden, zu testen und zu verbessern, wurde ein zusätzliches Offlinemodul „RdChannelBeaconSimulator“ entwickelt, mit welchem ein Beaconsignal simuliert werden kann. Als Ausgangsdaten dienen Ereignisse, die 2009 an einer Testinstallation in der Nähe der Balloon Launching Station (siehe Abbildung 2.5.2 aufgenommen wurden. Diese Daten umfassen drei Stationen, können mit Offline eingelesen werden und liefern einen realistischen Signalhintergrund. Das Simulationsmodul errechnet anhand einer fiktiven Beaconposition die Entfernungen von diesem zu den Stationen. Mit der errechneten Entfernung und den vom Benutzer eingestellten Beaconfrequenzen werden die Phasen des Beaconsignals an der jeweiligen Station berechnet. Die Phasen werden an dem zur Beaconfrequenz gehörenden Bereich des Frequenzspektrums komplex hinzu addiert. Das heißt, Amplitude und Phase der Beaconsignale im Frequenzspektrum ergeben sich als Summe des berechneten Beaconsignals und des Hintergrundrauschens.

Zusätzlich bietet das Simulationsmodul die Möglichkeit, die bei AERA erwartete Zeitunsicherheit durch die GPS-Uhren zu simulieren. Dazu wird, nachdem die Beaconsignale in die Daten geschrieben wurden, für jede Station mit einem Zufallsgenerator, der einer Gaußverteilung folgt, eine Zeitverschiebung errechnet und alle Kanäle der Station um diese verschoben. In Abbildung 6.3 ist die Verteilung der zeitlichen Abweichungen vom Ausgangszustand nach der Simulation der GPS induzierten Zeitunsicherheit dargestellt. Die so erzeugten Daten mit den simulierten Beaconsignalen und der simulierten Zeitungenauigkeit dienen als Ausgangspunkt für Tests der Module, die für die Korrektur der Zeitgenauigkeit



(a) Verteilung der Zeitverschiebungen nach simulierter relativer Zeitungenauigkeit durch GPS-Uhren.

(b) Verteilung der Zeitverschiebungen nach der Korrektur durch RdChannelBeaconTimingCalibrator.

Abbildung 6.3: Verteilungen der zeitlichen Abweichungen vor und nach der Korrektur anhand der Beaconsignale.

in der Analyse benutzt werden.

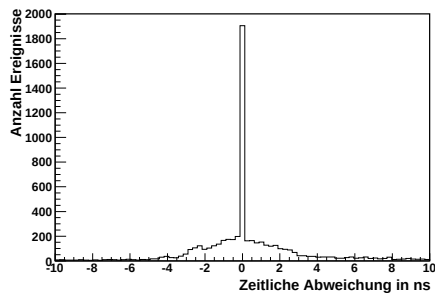
Zuerst wurden die Referenzphasen mit der dazu erstellten Anwendung errechnet. Mit 10000 Ereignissen die zuerst mit dem Simulationsmodul prozessiert wurden und danach mit der Analysesoftware zur Berechnung der Referenzphasen bearbeitet wurden, wurden die Referenzphasendifferenzen bestimmt. Dieses Vorgehen wurde mehrmals wiederholt, wobei die Breite der Gaußverteilung der zusätzlichen Zeitunsicherheit zwischen 0 ns und 5 ns variiert wurde. Die resultierenden Referenzphasendifferenzen zeigen dabei Abweichungen von maximal 0,01 bei 2,5 ns bis 0,1 bei 5 ns. Diese geringen Abweichungen sind dadurch zu erklären, dass die zusätzlichen Zeitunsicherheiten einer Gaußverteilung um Null folgen und sich somit bei der Mittelung über 10000 Ereignisse kompensieren.

Mit diesen Referenzphasendifferenzen kann nun das Offlinemodul RdChannelBeaconTimingCalibrator getestet werden, indem ein Datensatz prozessiert wird, wie er in 6.3a dargestellt ist. Die absolute zeitliche Abweichung der korrigierten Daten ist in Abbildung 6.3(b) dargestellt. Die Mittelwerte der beiden Verteilungen liegen fast exakt bei Null, das quadratische Mittel reduziert sich aber von 1,77 ns auf 0,03 ns.

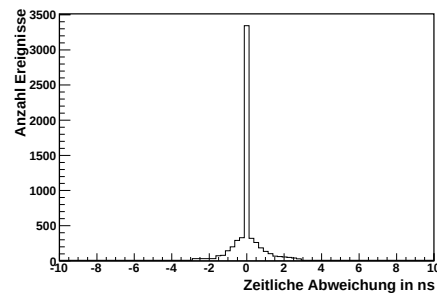
Einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Korrektur hat die Amplitude des an der Station empfangenen Beaconsignals, denn dessen Amplitude A_B und Phase ϕ_B addiert sich zur Amplitude A_N und Phase ϕ_N des Untergrundes.

$$Ae^{i\phi} = A_N e^{i\phi_N} + A_B e^{i\phi_B}$$

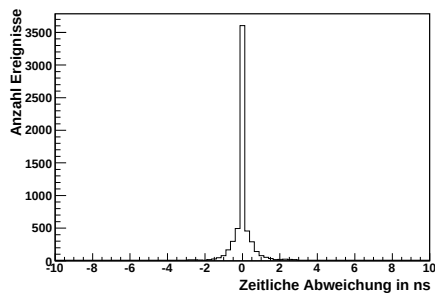
Je größer die Amplitude des Beaconsignals ist, desto kleiner ist der Einfluss



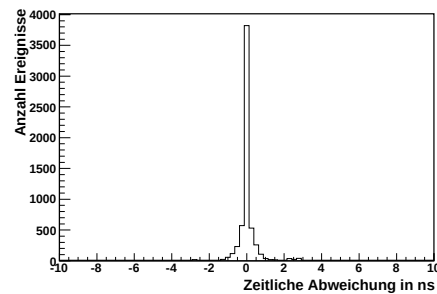
(a) Verteilung der Zeitverschiebungen nach Korrektur anhand eines Beaconsignals mit der Ausgangsamplitude 12000.



(b) Verteilung der Zeitverschiebungen nach Korrektur anhand eines Beaconsignals mit der Ausgangsamplitude 60000.



(c) Verteilung der Zeitverschiebungen nach Korrektur anhand eines Beaconsignals mit der Ausgangsamplitude 100000.



(d) Verteilung der Zeitverschiebungen nach Korrektur anhand eines Beaconsignals mit der Ausgangsamplitude 140000.

Abbildung 6.4: Verteilungen nach der Korrektur mit Offline, wobei die Beaconamplitude variiert wurde.

des Untergrundes auf die resultierende Phase. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde die zeitliche Korrektur an Daten mit simuliertem Beacon durchgeführt und die Amplitude des Beaconsignals dabei variiert. Die simulierte Amplitude des Beaconsignals an einer Station ergibt sich aus einer Ausgangsamplitude am Beacon, in willkürlichen Einheiten, die quadratisch mit dem Abstand vom Beacon abnimmt.

In den Abbildungen 6.4(a)-(d) sind die resultierenden Verteilungen dargestellt. Abbildung 6.4a zeigt die Verteilung der zeitlichen Abweichung nach der Korrektur, bei der das Beaconsignal an den Stationen mit einer Ausgangsamplitude von 12000 berechnet wurde. Zu erkennen ist, dass neben dem deutlichen Peak in der Mitte ein breiter Untergrund an Ereignissen von -5 ns bis +5 ns vorhanden

ist. Dieser kommt durch Daten zustande, die aufgrund eines zu geringen Beaconsignals und damit eines zu großen Einflusses des Rauschhintergrundes nicht korrigiert werden konnten. Diese Ereignisse haben das Epsilon-Kriterium (siehe Kapitel 4.3.1) von `RdChannelBeaconTimingCalibrator` nicht erfüllt und wurden deshalb nicht verändert, sind also unkorrigiert. In den Abbildungen 6.4(b)-(d) ist eine fünf bis zwölf mal so hohe Anfangsamplitude wie in Abbildung 6.4(a) verwendet worden. Zu erkennen ist, dass nicht korrigierbare Daten fast nicht mehr auftreten. Das Beaconsignal ist also stark genug gegenüber dem Hintergrundrauschen. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei Abbildung 6.4(b) beträgt circa 24 dB und das Quadratische Mittel der Verteilung ist 0,89. Mit den Simulationen wurde gezeigt, dass das Korrekturmodul `RdChannelBeaconTimingCalibrator` funktioniert und gut genug ist, um die benötigte Zeitgenauigkeit von 1 ns bei einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von circa 20 dB, wie es erwartet wurde [43], zu erreichen.

6.3 Überwachung von AERA mit dem Beacon

Wenn AERA mit den Messungen startet, kann der Beacon sofort genutzt werden. Zusätzlich zur Zeitkorrektur kann der Beacon eingesetzt werden um die Antennenstationen zu überwachen. Dabei wird die Phase der Beaconsignale als auch die Amplitude des empfangenen Signals genutzt. In den Frequenzspektren der Antennen werden an den erwarteten Stellen, also 37,793 MHz, 46,582 MHz, 58,887 MHz oder 71,191 MHz die Amplituden betrachtet. Durch den Beacon sollten dort Peaks sein. Deren Höhe kann, nachdem erste Daten gesammelt wurden, mit der erwarteten Höhe verglichen, oder einfach nur deren Signal-zu-Rausch-Verhältnis betrachtet werden. Durch diese Überwachung hat man die Möglichkeit, Fehler im analogen Teil der Elektronik der Antennenstationen aufzuspüren. Solche Fehler könnten zum Beispiel schlechte elektrische Kontakte oder defekte LNAs sein. Desweiteren können Phasendifferenzen zwischen verschiedenen Stationen überwacht werden. Durch Sprünge in diesen können zum Beispiel vertauschte Kabel nach Wartungsarbeiten aufgespürt werden. Bei LOPES wird eine Überwachung in dieser Form seit 2009 erfolgreich durchgeführt und hat maßgeblich dazu beigetragen Problemen schnell zu erkennen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein System zur externen zeitlichen Kalibrierung von AERA entwickelt, aufgebaut und getestet. Dabei wurde das Konzept eines Beacons, wie es bei LOPES schon in Betrieb ist, an die Anforderungen von AERA angepasst. Dazu wurde der Gesamtaufbau des Beacons um mehrere Komponenten erweitert, so dass der Beacon fernsteuerbar und ausfallsicher ist. Das System besteht aus einer Sendeantenne, einem Verstärker, einem Frequenzgenerator der von einem Computer über eine Schnittstellenkarte gesteuert werden kann und einer unterbrechungsfreien Stromversorgung. Der Beacon ist aufgebaut an der FD-Teleskopstation Coihueco, wobei die Elektronik im Gebäude untergebracht und mit der Sendeantenne am Kommunikationsturm über ein Kabel verbunden ist.

Für den Computer des AERA-Beacons, der zur Steuerung und Überwachung dient, wurde Software implementiert, welche diese Funktionen übernimmt und über eine Netzwerkverbindung nutzbar ist. Dadurch ist es möglich, die Einstellungen des Beacons, wie zum Beispiel die Sendeleistung einzelner Frequenzen, nicht nur vor Ort, sondern zum Beispiel auch vom KIT in Karlsruhe aus zu ändern.

Um die Zeitkorrektur der von AERA aufgenommenen Daten durchzuführen, wurde die Analysesoftware des Pierre-Auger-Observatoriums Offline erweitert. In einer speziellen Anwendung werden aus einem Satz von Ereignissen Referenzphasendifferenzen errechnet. Diese Informationen werden von einem weiteren Modul genutzt, um innerhalb eines Standard-Analyseablaufs die zeitliche Korrektur von Ereignissen durchzuführen.

Die Analysesoftware wurde mit Hilfe eines erstellten Simulationsmoduls für den Beacon getestet, da noch keine gemessenen Daten von AERA zur Verfügung standen. Es konnte gezeigt werden, dass die Zeitkorrektur mit dem Beacon und der Analysesoftware die benötigte relative Zeitgenauigkeit von etwa 1 ns erreichen kann.

Die Funktion des aufgebauten Beacons wurde mit einer Reihe von Testmessungen überprüft. Dazu wurden die Ausgangsleistung nach dem Verstärker und die Reflexions- und Leitungsverluste im Kabel und der Antenne gemessen. Daraus konnte die effektiv emittierte Leistung bestimmt werden. Außerdem wurde die empfangbare Leistung der Beaconsignale auf den verschiedenen Beaconfrequenzen im AERA Feld gemessen und eine Abhängigkeit zwischen empfangener Leistung und Abstand zum Beacon ermittelt.

Der AERA Beacon in Argentinien ist vollständig installiert. Die Funktion der Hardware wurde mit Testmessungen überprüft. Die Analysesoftware wurde anhand von Simulationen getestet und hat die benötigte Zeitgenauigkeit erreicht. Sobald AERA mit dem Messbetrieb beginnt, kann die Einstellung der Sendeleistung mit den ersten Daten getestet und die Beaconsignale in der Analyse und Rekonstruktion genutzt werden, um die Zeitgenauigkeit der aufgenommenen Daten zu verbessern und die Funktion der Antennenstationen zu überwachen.

A Technische Daten

Beaconkomponenten	Sendeantenne	SALLA 75 cm
	Verstärker	ZHL-5W-1
	Frequenzgenerator	Eigenentwicklung
	Interfacekarte	NI USB-6008
	Computer	AR-ES5630FL
	UPS	GXT2-1000VA
	Blitzschutz	NexTek SurgeGuard
Gesamtsystem	Leistungsaufnahme	ca. 100 W
	Sendeleistung bei 1,2,3 oder 4 genutzten Frequenzen	0,2 W / 0,05 W / 0,02 W / 0,01 W jeweils maximal pro Frequenz
Verstärker	Verstärkung	40 dB
	Frequenzbereich	5 MHz-500 MHz
	max. Ausgangsleistung	5 W
	max. Eingangsleistung	1 mW
	Leistungsaufnahme	ca. 70 W
Frequenzgenerator	Frequenz 1	37,793 MHz
	Frequenz 2	46,582 MHz
	Frequenz 3	58,887 MHz
	Frequenz 4	71,191 MHz
	Frequenzstabilität	10^{-6} pro Jahr
	max. Ausgangsleistung	1 mW
	Einstellmöglichkeiten	Frequenzen ein-/ausschalten Dämpfung pro Frequenz (0-31 dB) Dämpfung gesamt (0-31 dB)
UPS	Hersteller	Liebert
	Leistung	700 W 1000 VA
	Batterie	4 × 12 V × 7 Ah
	Autonomiezeit	ca. 400 Min.

Tabelle A.1: Zusammenfassung der technischen Daten der Komponenten.

B Wichtige Dateien der Beacon-Software

<code>/opt/beacon/beacond.c</code>	Haupt-Programmdatei für Beacond. Beinhaltet die in Abbildung 4.9 dargestellten Abläufe.
<code>/opt/beacon/include/beacond.h</code>	Beinhaltet Funktionen, die die analogen Schnittstellen der Interfacekarte auslesen und die Funktionen zum Schreiben und Lesen der digitalen Schnittstellen der Interfacekarte.
<code>/opt/beacon/beacond.ini</code>	Beinhaltet einige Einstellungsparameter für den Beacondaemon, wie den Port, das Zeitintervall, in dem das Logging durchgeführt wird und den Pfad zum entsprechenden Logfile.
<code>/var/log/beacond</code>	Logfile für alle Fehlermeldungen des Beacondaemons. Diese Datei wird über den Syslog-Daemon geschrieben.
<code>/usr/local/beacon/log/beacon</code>	Logdatei für die Einstellungen und Messwerte des Frequenzgenerators. Hier sind die Daten, die auch in die MySQL-Datenbank geschrieben, werden gesichert.

Tabelle B.1: Die wichtigsten Dateien des Beacondaemons auf dem Beacon-PC.

<code>/opt/beacon/scripts/ switch_amp_off.sh</code>	Bash-Skript, das den Verstärker über den IP-Powerswitch abschaltet.
<code>/opt/beacon/scripts/ switch_amp_on.sh</code>	Bash-Skript, das den Verstärker über den IP-Powerswitch anschaltet.
<code>/opt/beacon/scripts/ switch_electr_off.sh</code>	Bash-Skript, das den Frequenzgenerator über den IP-Powerswitch abschaltet.
<code>/opt/beacon/scripts/ switch_electr_on.sh</code>	Bash-Skript, das den Frequenzgenerator über den IP-Powerswitch anschaltet.
<code>/opt/beacon/scripts/ switch_beacon_off.sh</code>	Bash-Skript, das den Frequenzgenerator und den Verstärker über den IP-Powerswitch in der richtigen Reihenfolge abschaltet.
<code>/opt/beacon/scripts/ switch_beacon_on.sh</code>	Bash-Skript, das den Frequenzgenerator und den Verstärker über den IP-Powerswitch in der richtigen Reihenfolge anschaltet.

Tabelle B.2: Die wichtigsten Skripte zur Steuerung des Beacons auf dem Beacon-PC.

<code>RCalcRefPhases/ PhaseFinder.cc</code>	Quellcode für das Modul, welches die Phasen misst und in Textdateien abspeichert.
<code>RCalcRefPhases/ PhaseFinder.xml</code>	Beinhaltet Einstellungen zum Modul PhaseFinder.
<code>RCalcRefPhases/ CalcBeaconRefPhase.cc</code>	Quellcode für das Modul, welches die gemessenen Phasen aus einer Textdatei einliest und daraus die Referenzphasendifferenzen berechnet.
<code>RCalcRefPhases/ CalcBeaconRefPhase.xml</code>	Beinhaltet Einstellungen zum Modul CalcBeaconRefPhase.

Tabelle B.3: Die wichtigsten Dateien zur Berechnung der Referenzphasendifferenzen in der ExampleApplication RCalcRefPhases in Offline.

<code>RdChannelBeaconTimingCalibrator.cc</code>	Quellcode des Moduls für die Zeitkorrektur der Daten anhand der vorher ermittelten Referenzphasendifferenzen.
<code>RdChannelBeaconTimingCalibrator.xml</code>	Beinhaltet Einstellungen zum Modul <code>RdChannelBeaconTimingCalibrator</code> .
<code>RdChannelBeaconSimulator.cc</code>	Quellcode des Moduls zum Simulieren des Beaconsignals und der GPS-Zeitungenauigkeit in den Antennenstationen.
<code>RdChannelBeaconSimulator.xml</code>	Beinhaltet Einstellungen zum Modul <code>RdChannelBeaconTimingSimulator</code> .

Tabelle B.4: Die wichtigsten Dateien für die Anwendung der Beacon-Zeitkorrektur und die Simulation des Beaconsignals in Offline.

Literaturverzeichnis

- [1] G. A. Askaryan, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics 14 441, 1962.
- [2] J. V. Jelley et al. *Radio Pulses from Extensive Cosmic-Ray Air Showers*, Nature 205 327-328, 1965.
- [3] H. Falcke, P. Gorham *Detecting radio emission from cosmic ray air showers and neutrinos with a digital radio telescope*, Astroparticle Physics 19 477-494, 2003.
- [4] T. Antoni et al. *The Cosmic-Ray Experiment KASCADE*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 518, 2004.
- [5] V. F. Hess, Physikalische Zeitschrift 13 1084, 1912.
- [6] K. Greisen *End to the Cosmic-Ray Spectrum?*, Physical Review Letter 16 748-750, 1966.
- [7] G. T. Zatsepin, V. A. Kuz'min *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays*, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters 4 78-80, 1966.
- [8] D. V. Semikoz et al. *Constraints on top-down models for the origin of UHECRs from the Pierre Auger Observatory data*, ArXiv 0706.2960, 2007.
- [9] R. Beck, A. Brandenburg, D. Moss, A. Shukurov, D. Sokoloff, ARA&A 34, 1996.
- [10] T. Gaisser *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 1990.
- [11] P. Auger et al. *Extensive Cosmic-Ray Showers*, Reviews of Modern Physics 11 288, 1939.
- [12] The Super-Kamiokande Collaboration *Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos*, Phys. Rev. Lett. 81 1562-1567, 1998.

- [13] B. Keilhauer, J. Blümer, R. Engel, H. O. Klages *Impact of varying atmospheric profiles on extensive air shower observation: Fluorescence light emission and energy reconstruction*, Astroparticle Physics 25 259, 2006.
- [14] G. A. Askaryan , Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics 21 658, 1965.
- [15] H. R. Allan *Radio Emission from Extensive Air Showers*, Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics 10 171, 1971.
- [16] T. Huege www.timhuege.de/reas.
- [17] T. Huege *Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers*, Dissertation Universität Bonn, 2004.
- [18] T. Huege, H. Falcke *Radio emission from cosmic ray air showers: Simulation results and parametrization*, Astroparticle Physics 24 116, 2005.
- [19] G. Navarra et al. *KASCADE-Grande: a large acceptance, high-resolution cosmic-ray detector up to 10^{18} eV*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 513, 2003.
- [20] H. Falcke et al. *Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers*, Nature 435, 2005.
- [21] A. Horneffer *Measuring Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers with a Digital Radio Telescope*, Dissertation Universität Bonn, 2006.
- [22] S. Nehls *Calibrated Measurements of the Radio Emission of Cosmic Ray Air Showers*, Forschungszentrum Karlsruhe Wissenschaftliche Berichte FZKA 7440, 2008.
- [23] T. Huege, R. Ulrich, R. Engel *Dependence of geosynchrotron radio emission on the energy and depth of maximum of cosmic ray showers*, Astroparticle Physics 30 96-104, 2008.
- [24] J. Abraham et al. *Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 523 50-95, 2004.
- [25] I. Allekotte et al. *The surface detector system of the Pierre Auger Observatory*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 586 409-420, 2008.

- [26] N. Hayashida *Observation of a Very Energetic Cosmic Ray Well Beyond the Predicted 2.7K Cutoff in the Primary Energy Spectrum*, Physical Review Letter 71 3491-3494, 1994.
- [27] D. Bird *Detection of a Cosmic Ray with measured energy well beyond the expected spectral cutoff due to Cosmic Microwave Radiation*, The Astrophysical Journal 441 144-150, 1995.
- [28] The Pierre Auger Collaboration *Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects*, Science 9 938-943, 2007.
- [29] Google-Earth Grafik erstellt mit Hilfe von Google-Earth.
- [30] A. van den Berg for the Pierre Auger Collaboration. *Radio detection of cosmic rays at the southern Auger Observatory*, Proceedings of the 31st ICRC, 2009.
- [31] The AERA group *AERA proposal for the construction of the 20 km² Auger Engineering Radio Array at the Southern Auger Observatory*, GAP-Note 2009-172, 2009.
- [32] A. van den Berg et al. *First detection of radio signals from cosmic rays at the Pierre Auger Observatory*, GAP-Note 2007-065, 2007.
- [33] S. Acounis et al. *First detection of radio signals from cosmic ray air showers with a self triggered, fully autonomous system*, GAP-Note 2007-130, 2007.
- [34] J.L. Ju, D. G. Blair, C. Zhao *Detection of gravitational waves*, Reports on Progress in Physics 63, 2000.
- [35] G. Monnet *Overview of the VLT instrumentation*, SPIE-Proceedings Optical Astronomical Instrumentation, 1998.
- [36] W. Alef *A Review of VLBI Instrumentation*, Proceedings of the 7th European VLBI Network Symposium, 2004.
- [37] F. Schröder et al. *New method for the time calibration of an interferometric radio antenna array*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 615 277-284, 2010.
- [38] C. Timmermans, J. Kelley, F. Schröder *Radio beacon measurements and GPS-Timing*, GAP-Note 2009-071, 2009.
- [39] O. Krömer et al. *New Antenna for Radio Detection of UHECR*, Proceedings of the 31st ICRC, 2009.

- [40] S.Argiro, S. L. C. Barroso, J. Gonzalez et al. *The Offline software framework of the Pierre Auger Observatory*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 1485-1496, 2007.
- [41] S. Fliescher, D. Fraenkel, B. Fuchs, S. Grebe, T. Huege, M. Konzack, M. Melissas, P. Oliva, N. Palmieri, J. Rautenberg, A. Schmidt, H. Schoorlemmer, F. Schröder, A. Stutz, K. de Vries *The radio extension of Auger Offline*, GAP-Note 2010-056, 2010.
- [42] O. Krömer Private Kommunikation.
- [43] F. Schröder, H. Bozdog, O. Krömer *Test Measurements for the Time Calibration of AERA with a Beacon*, GAP-Note 2009-085, 2009.
- [44] S. Fliescher, K. Weidenhaupt Private Kommunikation.
- [45] D. Charrier et al. *Radio spectrum measurements at Auger*, GAP-Note 2010-004, 2010.

Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei allen bedanken, die mir während des Studiums und bei dieser Arbeit geholfen haben, insbesondere:

- Herrn Prof. Dr. J. Blümer für die Übernahme des Referats.
- Herrn Prof. Dr. W. de Boer für die Übernahme des Korreferats.
- Dr. Andreas Haungs für die Betreuung und die Bereitstellung dieses interessanten Themas.
- Frank Schröder für die große Hilfe beim Einarbeiten, Durchführen und Schreiben dieser Arbeit.
- Horia Bozdog für die tolle Zusammenarbeit, die Entwicklung und den Bau der Elektronik.
- Allen Karlsruher Kollegen für die Hilfsbereitschaft und die schöne Zeit.
- Der LOPES- und der Pierre-Auger-Kollaboration.
- Und natürlich meiner Familie, die mich immer unterstützt hat.

Vielen Dank!

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Diplomarbeit selbständig verfaßt, noch nicht anderweitig für andere Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Karlsruhe, den