Verbesserung des externen Triggers von AERA für ausgedehnte Luftschauer am Pierre-Auger-Observatorium

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

BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

im Studiengang Physik
der Bergischen Universität Wuppertal

Rukije Uzeiroska
1621133
Wuppertal, Dezember 2020

1. Gutachter Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert
2. Gutachter Priv.-Doz. Dr. Frank Ellinghaus

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation

Als kosmische Strahlung werden energiereiche Teilchen, welche durch den Weltraum propagieren, bezeichnet. Ein solches Teilchen kann beim Eindringen in die Erdatmosphäre mit dem Atomkern eines Luftmoleküls wechselwirken. Durch die Wechselwirkung wird eine Kaskade von Sekundärteilchen erzeugt, die als ausgedehnter Luftschauer bezeichnet wird. Ausgedehnte Luftschauer bestehen zum Großteil aus geladenen Teilchen, welche sich näherungsweise mit der Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Während der Propagation durch die Atmosphäre bewegen die Teilchen sich durch das Erdmagnetfeld. Demzufolge werden geladene Teilchen, insbesondere Elektronen und Positronen, abgelenkt, was zur Emission von Radiostrahlung führt.

Derartige Luftschauer können am Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien detektiert werden. Das Observatorium nimmt Daten von Luftschauern in verschiedenen Beobachtungskanälen auf. Dazu existieren diverse Detektorsysteme innerhalb des Observatoriums. Unter anderem gibt es einen Oberflächendetektor (SD, nach engl. Surface Detector) und einen Radiodetektor. Der Oberflächendetektor dient zur Detektion geladener Teilchen aus einem Luftschauer. Er umfasst eine Fläche von ungefähr $3000\,\text{km}^2$ und besteht aus 1660 einzelnen Messtationen. Radiostrahlung wird anhand des Radiodetektors, der auch als Auger Engineering Radio Array (AERA) bezeichnet wird, detektiert. AERA deckt eine Fläche von $17\,\text{km}^2$ des Oberflächendetektors ab und beinhaltet insgesamt 153 Antennen.

Alle Detektorsysteme des Pierre-Auger-Observatoriums generieren große Mengen an Daten. Um primär Daten zu speichern, die durch echte Luftschauer generiert werden, und den Untergrund zu unterdrücken, ist das gesamte Observatorium mit einem umfangreichen Triggersystem ausgestattet. Auch für AERA gibt es mehrere interne (durch AERA-Daten generierte) und externe (durch andere Detektorsysteme generierte) Trigger-Moden. Der am häufigsten verwendete Trigger von AERA ist der externe SD-Trigger, welcher auf Trigger-Daten des Oberflächendetektors basiert. Dieser ist in seinem aktuellen Zustand optimierungsfähig, da zu viele Ereignisse gespeichert werden, die für AERA nicht relevant sind. Zudem gibt es Fälle, in denen der externe SD-Trigger kein Trigger-Signal sendet, obwohl sinnvolle Radio-Signale von AERA detektiert werden können.

Das Ziel dieser Thesis ist es, den externen SD-Trigger im Hinblick auf die beiden genannten Aspekte zu verbessern. Dazu wird zunächst eine Methode zur Rekonstruktion eines Luftschauers auf Trigger-Ebene entwickelt und auf ihre Genauigkeit überprüft. Mithilfe dieser Methode werden dann Kandidaten für Trigger-Bedingungen aufgestellt. Diese werden auf ihre Effizienz zur Speicherung erwünschter Daten und ihr Potential zur Reduktion der totalen Datenrate hin untersucht. Zur Analyse werden Trigger- und Rekonstruktions-Daten, die am Pierre Auger-Observatorium aufgenommen wurden, verwendet.

2 Theoretischer Kontext

In diesem Kapitel wird die Erzeugung eines ausgedehnten Luftschauers durch kosmische Strahlung erläutert. Daraufhin werden sowohl die Entwicklung, als auch die Teilchenzusammensetzung eines solchen Schauers beschrieben. Unter anderem entsteht in einem Luftschauer elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von einigen MHz, was dem Radio-Bereich entspricht. Die Intensitätsverteilung dieser Radiostrahlung wird zum Abschluss des Kapitels diskutiert.

2.1 Ausgedehnte Luftschauer

Energiereiche Teilchen, welche durch den Weltraum propagieren, werden als kosmische Strahlung bezeichnet. Zum größten Teil handelt es sich um Atomkerne mit Energien von 10^9 eV bis zu über 10^{20} eV. Ein solches Teilchen kann durch die Wechselwirkung mit dem Atomkern eines Luftmoleküls eine Kaskade von Sekundärteilchen erzeugen. Dieses Phänomen wird als Luftschauer bezeichnet. Dabei wird das Teilchen, welches den Luftschauer erzeugt, als Primärteilchen bezeichnet. Die Entwicklung von Luftschauern sowie ihre Teilchenzusammensetzung ist in Abbildung 2.1 skizziert und wird im Folgenden erläutert [1].

2.1.1 Entwicklung eines Luftschauers

Wie zuvor erwähnt, wechselwirken Primärteilchen mit den Atomkernen von Luftmolekülen. Durch die Wechselwirkung der beiden Teilchen werden Sekundärteilchen erzeugt. Dabei wird die Energie des Primärteilchens unter den Sekundärteilchen aufgeteilt. Der auf ein Sekundärteilchen übertragene Impuls besitzt eine kleine transversale Komponente senkrecht zum Impuls des Primärteilchens. Die zur Propagationsrichtung des Primärteilchens parallele Komponente ist allerdings deutlich größer. Somit bildet sich zwischen der verlängerten Bahn des Primärenteilchens, welche als Schauerachse definiert wird, und der Bahn des Sekundärteilchens ein kleiner Öffnungswinkel. Anschließend können die Sekundärteilchen durch weitere Wechselwirkungen oder Zerfälle neue Teilchen erzeugen. Die Sekundärteilchen vervielfachen sich so lange bis ihre Energie für weitere Teilchenproduktionen nicht mehr ausreicht. Daraufhin finden nur noch niederenergetische Stöße und Zerfälle statt. Damit nimmt die Anzahl von Teilchen ab und der Schauer wird gestoppt.

Die dabei gebildete Teilchenfront propagiert näherungsweise mit Lichtgeschwindigkeit und kann bei ihrer Ankunft auf dem Boden eine Dicke von etwa 1 m besitzen. Die laterale Ausdehnung einer Teilchenfront kann von wenigen Metern bis zu Kilometern reichen. Wie groß sie tatsächlich wird, hängt von der Energie des Primärteilchens, der Höhe der Entstehung des Schauers und der Streuung der Sekundärteilchen ab. Mit zunehmender Entfernung von der Schauerachse nimmt die Teilchendichte in der Schauerfront ab. Die laterale Ausdehnung der Schauerfront nimmt hingegen wegen des stärkeren Einflusses von Transversalimpulsen und

Streueffekten zu. Der Auftreffpunkt der Schauerachse, stellt das Schauerzentrum dar. Die bisher beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 2.1 rechts skizziert [1].

2.1.2 Teilchenzusammensetzung eines Luftschauers

Bei der Bildung des ausgedehnten Luftschauers verändert sich unter anderem die Teilchenzusammensetzung. Hierbei unterscheidet man zwischen den hadronischen, myonischen und elektromagnetischen Komponenten (siehe Abbildung 2.1 links).

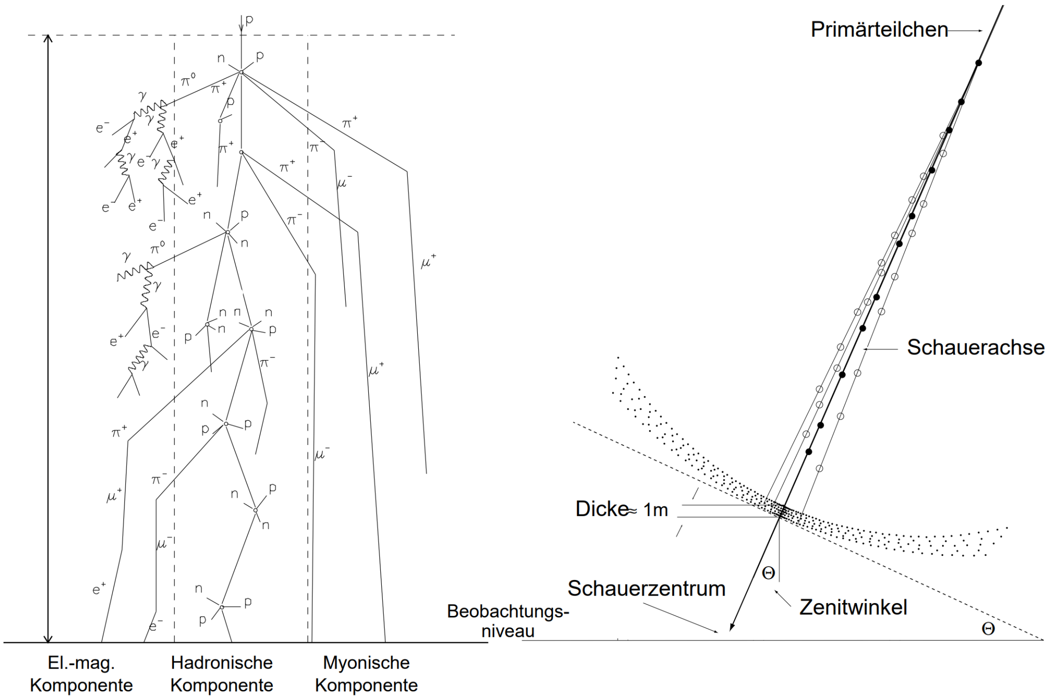

Abbildung 2.1: Dargestellt ist die Erzeugung eines Luftschauers durch ein Primärteilchen. Die linke Seite der Abbildung zeigt die in den einzelnen Komponenten eines Schauers am häufigsten auftretenden Teilchen. Auf der rechten Seite sind die Flugbahnen von Sekundärteilchen, der Zenitwinkel θ des Schauers, die Positionen der Schauerachse und die des Schauerzentrums skizziert. Außerdem sind die ungefähre Verteilung von Teilchen in der Schauerfront und die Verhältnisse ihrer Dicke skizziert [1].

Die hadronische Komponente eines Luftschauers besteht hauptsächlich aus Pionen, Kaonen, Protonen und Neutronen. Sie macht zwar nur 1 % der Teilchen aus, transportiert aber dennoch den größten Teil der Energie im Luftschauer. Damit ist sie von besonderer Bedeutung für die Entwicklung des Luftschauers. Die Teilchen der hadronischen Komponente sind für gewöhnlich dicht um die Schauerachse verteilt.

Die myonische Komponente macht etwa 5 % der Schauer Teilchen aus. Sie entsteht zum Großteil durch Zerfälle von Kaonen und Pionen. Da in der höheren Atmosphäre eine geringere Dichte vorhanden ist, ist die mittlere freie Weglänge hier ebenfalls größer. Somit haben beispielsweise Pionen mehr Zeit zum Zerfallen. Die Wahrscheinlichkeit für die Enstehung von Myonen ist somit in höherer Atmosphäre größer. Demzufolge entstehen Myonen relativ früh in der Schauerentwicklung und besitzen verhältnismäßig hohe Energien. Die hohe Energie und die große Masse eines Myons führen dazu, dass Effekte wie Bremsstrahlung und Mehrfachstreuung stark unterdrückt werden. Daher bewegt sich ein Myon nahezu geradlinig vom Entstehungsort zur Erdoberfläche und erreicht sie auch in den meisten Fällen. Da Myonen eine längere Strecke als die meisten Teilchen des Luftschauers zurücklegen, wirkt sich der Transversalimpuls länger auf die Flugbahn des Teilchens aus. Dadurch sind die Myonen weit um die Schauerachse verteilt.

Die elektromagnetische Komponente des Luftschauers besteht aus Elektronen, Positronen und Photonen. Sie ist mit 90 % die am stärksten vertretene Komponente des Luftschauers. Die elektromagnetische Komponente entsteht dadurch, dass beispielsweise neutrale Pionen in zwei Photonen, oder Kaonen und Pionen in Elektronen und Positronen zerfallen. In der Luft werden Paarerzeugung und Bremsstrahlung begünstigt, was zur starken Teilchenvervielfachung führt [1].

2.2 Laterale Energieverteilung der Radiostrahlung

Ausgedehnte Luftschauer bestehen zum Großteil aus geladenen Teilchen, welche sich näherungsweise mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Während der Propagation durch die Atmosphäre bewegen die Teilchen sich durch das Erdmagnetfeld, was insbesondere für Elektronen und Positronen zur Ablenkung und damit zur Emission von Radiostrahlung führt. Da der Brechungsindex der Erdatmosphäre ungleich 1 ist, entsteht eine Cherenkov-artige Komprimierung. Sie tritt innerhalb eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von ungefähr 1 ° um die Schauerachse auf [2].

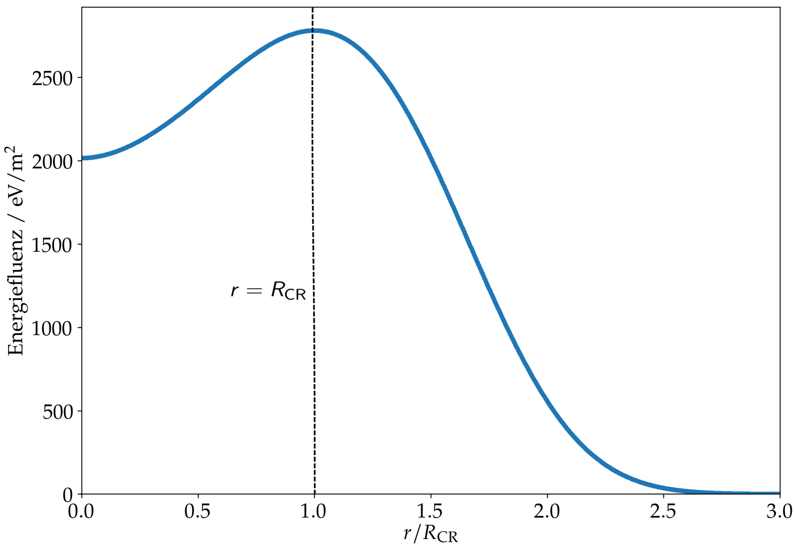

Abbildung 2.2: Dargestellt ist ein Fit an die laterale Energieverteilung der Radiostrahlung von 30 bis 80 MHz pro Quadratmeter eines gemessenen Luftschauers. Aufgetragen wurde die Energiefluenz gegen den Abstand r zur Schauerachse in Einheiten von Cherenkov-Radien R_{CR}. Die Energiefluenz ist bei $r = R_{CR}$ maximal [3].

Innerhalb dieses Kegels, kann die Energieverteilung der geomagnetischen Radiostrahlung pro Quadratmeter mit der in Abbildung 2.2 dargestellten Kurve beschrieben werden. Sie stellt einen Fit an die laterale Energieverteilung pro Quadratmeter eines echten Luftschauers dar. Der Abstand r ist in Einheiten von Cherenkov-Radien R_{CR} angegeben. Der Cherenkov-Radius ist als der Radius maximaler Energiefluenz definiert. In der Schauerebene ergibt sich folglich ein Ring mit dem Radius R_{CR}

$$R_{\mathrm{CR}}(\theta) = a \cdot e^{b \cdot \theta} + c\,. \tag{2.1}$$

Des Weiteren hängt der Cherenkov-Radius R_{CR} vom Zenitwinkel θ des Schauers ab. Gleichung 2.1 ist eine Parametrisierung von $R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ mit den Parametern a = 0,1 m, b = 6.2 und c = 110 m. Diese Parametrisierung wurde für simulierte Schauer mit Zenitwinkel $\theta > 60^\circ$ hergeleitet, wobei θ in Abbildung 2.2 in rad gemessen wird [4]. R_{CR} beträgt für die hier untersuchten Luftschauer ungefähr 200 m. Im Zuge dieser Thesis wird sie allerdings auch für $\theta \leq 60^\circ$ extrapoliert.

3 Experimenteller Kontext

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Detektoren des Pierre-Auger-Observatoriums erläutert. Daraufhin werden einige, für den weiteren Verlauf dieser Thesis wichtige, geometrische Zusammenhänge zwischen Luftschauern und der Detektorebene des Observatoriums erklärt. Anschließend wird die Funktion des externen SD-Triggers von AERA erklärt. Hierbei wird zusätzlich erläutert, wieso dieser in gewissen Bereichen optimierungsfähig ist.

3.1 Das Pierre-Auger-Observatorium

Das Pierre-Auger-Observatorium wurde nach dem französischen Physiker Pierre Auger benannt. Es befindet sich in Argentinien und ist für die Beobachtung von Teilchen im Energiebereich von 10^{17} eV bis 10^{20} eV ausgelegt. Luftschauer werden mithilfe der folgenden vier Detektorsystemen detektiert: dem Oberflächendetektor (SD, nach engl. Surface Detector), dem Fluoreszenzdetektor (FD), dem Radiodetektor (RD) und dem Myonendetektor (MD). Die Anordnung der Detektoren des Pierre-Auger-Observatoriums ist in Abbildung 3.1 graphisch dargestellt.

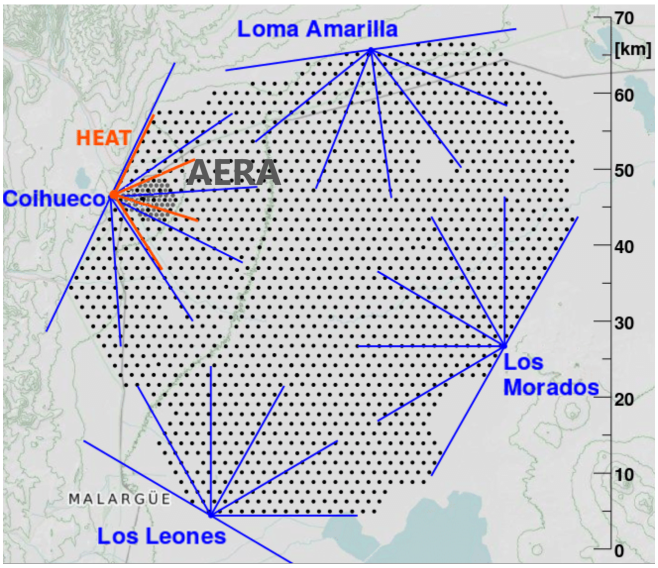

Abbildung 3.1: Dargestellt ist die Anordnung der Detektoren des Pierre-Auger-Observatoriums. Die SD-Stationen sind durch schwarze bzw. graue Punkte gekennzeichnet. Das 750 m SD-Feld, in dem auch AERA legt, ist anhand der größeren Punktedichte zu erkennen. Die blauen Punkte markieren die Standorte der 24 Teleskope, während der Standort der so genannten High Elevation Auger Telescopes (HEAT) in orange markiert ist. Anhand von blauen und orangen Linien sind die Sichtfelder der Teleskope skizziert[5].

Der Oberflächendetektor umfasst eine Fläche von $3000\,\mathrm{km}^2$. Er besteht aus 1660 einzelnen Messstationen, welche in einem hexagonalen Muster angeordnet sind. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Stationen beträgt 1500 m. Jede Station beinhaltet einen mit $12\,\mathrm{m}^3$ hochreinem Wasser gefüllten Tank. Sobald ein hochenergetisches Teilchen das Wasser in dem Tank durchquert, wird Cherenkov-Strahlung erzeugt. Diese wird durch drei Photomultiplier detektiert, welche an der Wasseroberfläche angebracht sind.

Das ganze Feld des Oberflächendetektors wird von 27 Teleskopen überblickt, die die Vermessung des longitudinalen Luftschauerprofils ermöglichen. Die Teleskope sind auf vier Standorte verteilt und bilden zusammen den Fluoreszenzdetektor, mit dem das Fluoreszenzlicht aus den Luftschauern detektiert wird. 24 der Teleskope detektieren den Winkelbereich von 0° bis 30° über dem Observatorium, während die restlichen drei den Winkelbereich von 30° bis 60° beobachten und als High Elevation Auger Telescopes (HEAT) bezeichnet werden.

Der Radiodetektor wird als Auger Engineering Radio Array (AERA) bezeichnet und deckt eine Fläche von $17\,\mathrm{km}^2$ des Oberflächendetektors ab. Zur Detektion des Radiosignals zwischen 30 und 80 MHz werden insgesamt 153 Antennen verwendet. Jede Station stellt eine Antenne zur Messung der Ost-West und der Nord-Süd Polarisation des elektrischen Feldes zur Verfügung. Im Bereich von AERA ist der Abstand zweier SD-Stationen auf 750 m verringert (SD-750), um mit der höheren Detektordichte die Energieschwelle auf 0,1 EeV zu erniedrigen.

Die Myonendetektorsysteme sind bisher nur an sieben SD-Stationen angebracht. Sie bestehen aus vergrabenen Szintillations-Teilchendetektoren, welche präzise Informationen über die myonische Komponente eines Luftschauers liefern sollen. In Zukunft soll ein Myonendetektorsystem an jeder Station des SD-750 Feldes angebracht werden [6].

3.2 Definitionen und geometrische Zusammenhänge

In Abbildung 3.2 sind die geometrischen Zusammenhänge eines ausgedehnten Luftschauers und der Ebene des Observatoriums dargestellt, in der die Detektorstationen liegen, der sogenannten Detektorebene. Es wird angenommen, dass die Basisvektoren des in der Skizze eingezeichneten Koordinatensystems wie folgt definiert sind:

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

Die Entwicklungsform eines ausgedehnten Luftschauers kann näherungsweise mit der Form eines Kegels verglichen werden. Somit ist der Querschnitt eines Schauers senkrecht zur Schauerachse kreisförmig und wird als Schauerebene bezeichnet. Die Richtung der Schauerachse ist durch den normierten Vektor $\vec{e}$ gegeben.

Der Öffnungswinkel θ zwischen $\vec{e}_3$ und dem Vektor $\vec{e}$ wird so definiert, dass er nur Werte zwischen 0° und 90° annimmt und kann mithilfe von Gleichung 3.2 berechnet werden.

Projiziert man den Vektor $\vec{e}$ in die xy-Ebene und berechnet den Winkel zwischen dieser Projektion und dem Vektor $\vec{e}_1$, so ergibt sich der Winkel φ. Der Winkel φ wird anhand von Gleichung 3.3 berechnet[1]. Außerdem ist φ in Richtung Osten gegen den Uhrzeigersinn definiert, d.h. für Norden gilt $\varphi = 90°$, für Osten $\varphi = 0°$, für Süden $\varphi = -90°$ und für Westen $\varphi = 180°$. Sowohl der Winkel θ als auch der Winkel φ sind in Abbildung 3.2 skizziert.

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{e}\cdot\vec{e}_3}{|\vec{e}|\cdot|\vec{e}_3|}\right) \tag{3.2}$$

$$\phi = \text{arctan2}(e_y, e_x) \tag{3.3}$$

Sobald die Vektoren $\vec{e}_3$ und $\vec{e}$ parallel sind, der Schauer also senkrecht von oben kommt, nimmt der Zenitwinkel θ einen Wert von $0°$ an. Dies ist genau dann der Fall, wenn die Detektorebene und die Schauerebene aus Abbildung 3.2 ebenfalls parallel sind. In diesem Fall erreichen die Teilchen der Schauerebene die Stationen in der Detektorebene ungefähr gleichzeitig. Ist die Schauerachse jedoch geneigt, so sind Teilchen der Schauerebene zu jedem Zeitpunkt unterschiedlich weit von der Detektorebene entfernt. Demzufolge ergeben sich Differenzen in den Ankunftszeiten bei verschiedenen Stationen. Der Minimalwert dieser Zeitdifferenz zwischen zwei SD-Stationen beträgt 0 ns und ist nach oben durch den Abstand dieser SD-Stationen begrenzt. Die Differenz wird maximal, wenn der Abstandsvektor zwischen den beiden SD-Stationen und die Schauerachse parallel zueinander sind.

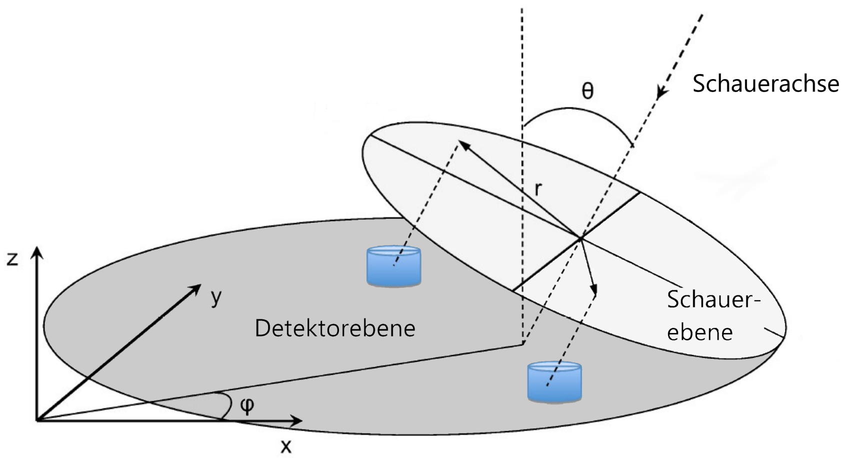

Abbildung 3.2: Dargestellt ist die Geometrie eines Luftschauers. Die graue Fläche kennzeichnet die Detektorebene des Pierre-Auger-Observatoriums, wobei die beiden blauen Zylinder zwei SD-Stationen darstellen. In weiß ist die Schauerebene markiert. Der Winkel θ ist der Öffnungswinkel zwischen der Schauerachse und dem Normalenvektor der Detektorebene. Wird die Schauerachse auf die xy-Ebene projiziert, so wird der Öffnungswinkel dieser Projektion und der x-Achse als φ bezeichnet [7].

Mehrere getriggerte Stationen werden als ein Ereignis bezeichnet. Das Muster dieser Stationen wird als Fußabdruck eines Schauers bezeichnet. Für kleine Winkel θ ist der Fußabdruck

[1]Die Funktion arctan2 sorgt dafür, dass φ an Stelle von Werten zwischen $0°$ und $360°$, Werte zwischen $\pm 180°$ annimmt.

eines Schauers näherungsweise kreisförmig. Je größer der Winkel θ wird, desto größer wird der Fußabdruck des Schauers, wobei die Form näherungsweise einer Ellipse entspricht. Das Schauerzentrum eines Ereignisses kann durch das sogenannte Baryzentrum angenähert werden.

$$B_x = \sum_{i=1}^{n} \frac{s_i \cdot d_{x,i}}{\sum\limits_{j=1}^{n} s_j}, \qquad B_y = \sum_{i=0}^{n} \frac{s_i \cdot d_{y,i}}{\sum\limits_{j=1}^{n} s_j}, \qquad B_z = \sum_{i=0}^{n} \frac{s_i \cdot d_{z,i}}{\sum\limits_{j=1}^{n} s_j} \tag{3.4}$$

Die drei Komponenten des Baryzentrums sind als das gewichtete Mittel der Ortsvektorkomponenten aller getriggertern Stationen definiert. Sie können anhand von Gleichung 3.4 berechnet werden. Dabei bezeichnet s die Signalstärke und (d_x, d_y, d_z) die Koordinaten einer SD-Station, welche das Ereignis detektiert hat.

3.3 Der externe SD-Trigger von AERA

Die Datennahme für AERA ist mit unterschiedlichen Trigger-Moden umgesetzt. Dabei gibt es sowohl interne Trigger, welche nur AERA Informationen verwenden, als auch externe, welche die Informationen anderer Detektorkomponenten verwenden. Der am häufigsten verwendete Trigger-Modus ist der externe SD-Trigger. Da der SD-Trigger als einziger für diese Thesis relevant ist, wird im Folgenden nur dieser behandelt.

Jeder Station des Auger-Observatoriums können eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) und x-, y- und z-Koordinaten zugeordnet werden. Sobald eine SD-Station ein Signal registriert hat, wird ein lokaler Trigger generiert und die Messdaten werden zwischengespeichert. Die ID der SD-Station und der Zeitstempel der Messung werden an das zentrale Datenerfassungssystem CDAS (Central Data Acquisition System) weitergeleitet.

Die Hauptrolle von CDAS ist die Steuerung der Auslese und die Organisation der Datenspeicherung. Zu diesem Zweck sammelt CDAS die Trigger-Informationen aller SD-Stationen und kombiniert sie anschließend miteinander zu einer Trigger-Entscheidung der nächsten Ebene. Dabei werden Ereignisse mit Signalen in mindestens drei örtlich benachbarten SD-Stationen selektiert. Nur für diese Ereignisse werden dann die vollen Messdaten der entsprechenden SD-Stationen angefragt und nach der Übermittlung an CDAS als Ereignis gespeichert.

Parallel dazu leitet CDAS in diesem Fall die IDs und Zeitstempel aller SD-Stationen eines Ereignisses zur Radiodatenerfassung weiter. Diese kann dann ihrerseits entscheiden, ob die Auslese von AERA für den Zeitpunkt des SD-Triggers ausgelöst wird. Die AERA-Stationen speichern Messdaten sieben Sekunden lang zwischen. CDAS benötigt bereits 2,5 s zur Weiterleitung der notwendigen Daten. Demzufolge muss die Entscheidung darüber, ob ein RD-Ereignis getriggert wird, sehr schnell gefällt werden [6]. Derzeit passiert das, wenn der kleinste Abstand z zwischen einer getriggerten SD-Station und einer AERA-Station kleiner als 5 km ist.

Aufgrund dieser Bedingung ist die Datenaufnahme sehr hoch. Demzufolge können die Daten nicht online zugänglich gemacht werden und die Festplatten stellen die einzige Zugriffsmöglichkeit dar. Die Reinheit der Daten, die gespeichert werden, und die Effizienz des Triggers sind zudem sehr gering. Nur etwa 10 von 8000 Ereignisse sind rekonstruierbare Luftschauer. Außerdem hat sich herausgestellt, dass doch nicht alle interessanten RD-Ereignisse getriggert werden können. Ein guter Hinweis auf Letzteres ist das in Abbildung 3.3 dargestellte Ereignis.

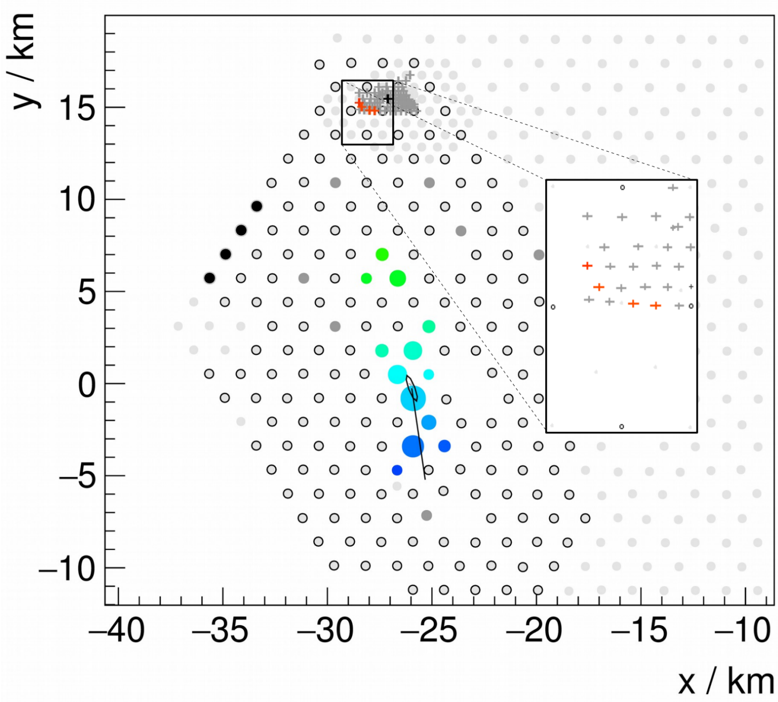

Abbildung 3.3: Dargestellt ist ein rekonstruiertes SD- und RD-Ereignis. Es sind die y- gegen die x-Koordinaten der Stationen aufgetragen. AERA ist anhand der größeren Punktedichte zu erkennen. Die SD-Stationen sind als graue Kreise und die AERA-Stationen als graue Plus-Zeichen markiert. Die AERA-Stationen, welche das Ereignis getriggert haben, wurden in rot eingezeichnet. Die getriggerten SD-Stationen sind in blau bzw. grün markiert. Die Größe der Kreise deutet auf die Stärke des gemessenen Signals und die Farbe auf den Zeitpunkt der Messung hin. Dabei steht dunkelblau für einen frühen und hellgrün für einen späten Zeitpunkt. Die Schauerachse ist als eine Linie abgebildet, welche am Auftreffpunkt auf dem Boden endet. Die Unsicherheit des Auftreffpunktes ist durch die Ellipse dargestellt. [8]

Zur Darstellung von Abbildung 3.3 wurde die vollständige SD- und RD- Rekonstruktion verwendet. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass das Schauerzentrum des dargestellten Ereignisses deutlich weiter als 5 km von AERA entfernt liegt. Da der Winkel $\theta = 82{,}8^\circ$ allerdings groß ist, hat das auf Abbildung 3.3 abgebildete Ereignis einen relativ großen und elliptisch geformten Fußabdruck. Somit erreicht der Fußabdruck AERA trotz der großen Entfernung zwischen Schauerzentrum und AERA. Wäre der Winkel θ des Ereignisses allerdings kleiner, so wäre der Fußabdruck ebenfalls deutlich kleiner und würde somit AERA nicht erreichen.

In dunkelgrau markierte SD-Stationen und in schwarz markierte AERA-Stationen haben das Ereignis ebenfalls getriggert. Sie wurden bei der Rekonstruktion des Ereignisses allerdings als Ausreißer erkannt und für weitere Ermittlungen nicht berücksichtigt. Die dazugehörigen SD-Stationen, welche AERA am nächsten sind, haben einen Abstand zu AERA, der unter 5 km liegt. Demzufolge wurde das Ereignis auch als RD-Ereignis gespeichert. Abbildung 3.3 zeigt aber, dass diese SD-Stationen das Ereignis möglicherweise nur zufällig triggerten. Somit wurde es auch nur zufällig als ein RD-Ereignis gespeichert. Das zeigt, dass auch in einer größeren Entfernung als 5 km brauchbare RD-Ereignisse auftreten können. Allerdings werden sie, aufgrund ihrer Entfernung vom Trigger, aussortiert und nicht gespeichert. Das macht den SD-Trigger von AERA ineffizient.

4 Die Online-Rekonstruktion einer Schauerachse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung einer für den externen SD-Trigger von AERA geeigneten Methode zur Rekonstruktion einer Schauerachse (Online-Rekonstruktionsmethode). Sie muss auf Trigger-Ebene stattfinden und verfügt demzufolge nur über die Ortskoordinaten und Zeitstempel der SD-Stationen eines Ereignisses. Hierbei soll die Rekonstruktionsgeschwindigkeit der Präzision der Ergebnisse vorgezogen werden. Eine möglichst schnelle Methode ist besonders wichtig, da, wie in Abschnitt 3.3 erläutert, dem Trigger nur wenige Sekunden zur Verfügung stehen. Die in der Auger-Analyse Software verwendete Methode (Offline-Rekonstruktionsmethode) ist darauf ausgelegt, möglichst präzise zu sein. Dabei spielt die Geschwindigkeit, mit der die Schauerrichtung rekonstruiert wird, keine besonders bedeutende Rolle. Sämtliche Parameter, wie zum Beispiel die Winkel θ und φ, werden hier durch einen Fit an alle zu dem Ereignis vorliegenden Rohdaten ermittelt. Da ein Fit unbestimmte Zeit beansprucht, würde die Zeit, welche einer Online-Rekonstruktion zur Verfügung steht, oft nicht ausreichen. Aus diesen Gründen ist die Offline-Rekonstuktionsmethode für die Anwendung im externen SD-Trigger von AERA nicht geeignet.

Zu diesem Zweck wird zunächst basierend auf den Informationen des SD-Triggers eine Vorgehensweise zur Berechnung der Schauerrichtung entwickelt. Als nächstes werden anhand der Schauerrichtung die Winkel θ und φ berechnet. Anschließen wird das Schauerzentrum ermittelt, um daraus den kürzesten Abstand r zwischen der Schauerachse und der nächsten AERA-Station berechnen zu können. Zum Schluss werden die Ergebnisse der Online- und der Offline-Rekonstruktionsmethode miteinander verglichen, um die Genauigkeit der neuen Vorgehensweise zu überprüfen.

4.1 Test-Daten

Zur Entwicklung der Online-Rekonstruktionsmethode werden gemessene Ereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter des Pierre-Auger-Observatoriums verwendet. Der Grund hierfür ist, dass sie leicht zugänglich sind und zusätzlich die Ergebnisse der Offline-Rekonstruktionsmethode enthalten. Somit konnte leicht überprüft werden, ob die Ergebnisse beider Methoden gut miteinander übereinstimmen.

Im öffentlichen Ereignis-Betrachter sind verschiedene Ereignisse vorzufinden. Zu jedem Ereignis liegen unter anderem sowohl eine Textdatei, als auch eine Tabelle vor (siehe Abbildung 4.1). In der Textdatei eines Ereignisses sind die IDs und die x-, y- und z-Koordinaten der SD-Stationen gespeichert, welche für die offline-Analyse verwendet wurden. Außerdem beinhalten diese Dateien Informationen wie Signalstärke und Zeitstempel der Messungen. Die Zeitstempel sind mit einer Genauigkeit von 1 ns angegeben.

Allgemeine Informationen	
Datum	10485600 / Tue Oct 26 17:39:16 2010
Anzahl Stationen	14
Energie	49.7 ± 1.9 EeV
Theta	40.2 ± 0.1 Grad
Phi	-139.2 ± 0.2 Grad
Krümmung	10.9 ± 0.5 km
Ostkoordinate des Auftreffortes	476053 ± 18 m
Nordkoordinate des Auftreffortes	6079248 ± 12 m
Reduziertes Chi^2	8.36

Abbildung 4.1: Dargestellt sind die Informationen des öffentlichen Ereignis-Betrachters zum Beispielerreignis 000010485600 [9].

In Abbildung 4.1 ist die Tabelle mit allgemeinen Informationen zu dem Beispielereignis 000010485600 dargestellt. Da die Winkel Theta und Phi offline ermittelt werden, werden sie als θ_{off} und φ_{off} bezeichnet. Aus θ_{off} und φ_{off} kann der normierte Richtungsvektor $\vec{e}_{\text{off}}$ des Schauers ermittelt werden. An dieser Stelle sind die Anzahl der Stationen n, θ_{off} und φ_{off} von besonderer Wichtigkeit. Alle anderen Informationen werden im weiteren Verlauf dieser Thesis nicht verwendet.

4.2 Rekonstruktion der Schauerrichtung

Für die Rekonstruktion der Schauerrichtung $\vec{e}$ stehen n Stationen mit den jeweiligen Ortsvektoren $\vec{d}_i$ zur Verfügung. Die Triggerzeiten t_i der SD-Stationen sind ebenfalls bekannt. Für die Schauerrichtung, die Orts- und Zeitinformationen zweier SD-Stationen i und j und die Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Schauerfront ergibt sich:

$$-v \cdot (t_i - t_j) = \vec{e} \cdot (\vec{d}_i - \vec{d}_j). \tag{4.1}$$

An dieser Stelle können i und j Werte zwischen 0 und $n-1$ annehmen. Da die Schauerrichtung $\vec{e}$ dreidimensional ist, beinhaltet sie drei Unbekannte: e_x, e_y und e_z. Um sie anhand eines Gleichungssystems eindeutig zu bestimmen, werden mindestens drei Gleichungen benötigt. Die erste Gleichung ergibt sich, indem man die Länge des Vektors $|\vec{e}| = 1$ festgelegt. Zwei weitere Bedingungen können anhand der Gleichung 4.1 gewonnen werden. Um damit zwei linear unabhängige Gleichungen aufstellen zu können, werden drei SD-Stationen benötigt. Die Ortsvektoren dieser Stationen werden als $\vec{d}_0$, $\vec{d}_1$, $\vec{d}_2$ und die Triggerzeiten als t_0, t_1, t_2 bezeichnet. In diesem Zusammenhang kann angenommen werden, dass $v \approx c$ gilt, wobei c für die Lichtgeschwindigkeit steht. Somit ergibt sich das folgende Gleichungssystem:

$$\text{I)} \quad 1 = e_x^2 + e_y^2 + e_z^2 \tag{4.2}$$

$$\text{II)} \quad -c(t_1 - t_0) = e_x \cdot (d_1 - d_0)_x + e_y \cdot (d_1 - d_0)_y + e_z \cdot (d_1 - d_0)_z \tag{4.3}$$

$$\text{III)} \quad -c(t_2 - t_0) = e_x \cdot (d_2 - d_0)_x + e_y \cdot (d_2 - d_0)_y + e_z \cdot (d_2 - d_0)_z \tag{4.4}$$

Der externe SD-Trigger von AERA erfordert mindestens drei SD-Stationen mit einem Signal. Für drei Stationen ergeben sich immer zwei Lösungen und zwar: $(e_x, e_y, |e_z|)$ und $(e_x, e_y, -|e_z|)$. Der Richtungsvektor $(e_x, e_y, |e_z|)$ zeigt von oben und $(e_x, e_y, -|e_z|)$ von unten auf das Pierre-Auger-Observatorium. Für weitere Berechnungen wird immer die Lösung $(e_x, e_y, |e_z|)$ verwendet, da keine Luftschauer von unten erwartet werden.

Falls aber mehr als drei SD-Stationen getriggert haben, gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese in Gruppen aus drei Stationen einzuordnen. Dabei ist die Reihenfolge der SD-Stationen in den Gruppen nicht von Bedeutung. Haben beispielsweise vier SD-Stationen mit den IDs 1,2,3 und 4 getriggert, so sind die Drei-Stationen-Kombinationen (1,2,3), (2,3,4), (1,3,4) und (1,2,4) möglich. Um einen Informationensverlust zu vermeiden, wird das Gleichungssystem für alle zugelassenen Drei-Stationen-Kombinationen N gelöst. Für n getriggerte Stationen erreicht man somit

$$N = \frac{n!}{(n-3)! \cdot 3!} \tag{4.5}$$

Kombinationsmöglichkeiten.

4.3 Festlegung einer eindeutigen Schauerrichtung

Das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1 wurde von 14 Stationen getriggert. Da jede Drei-Stationen-Kombination ein Ergebnis liefert, sollten für das o.g. Beispielereignis nach Gleichung 4.5 für die Schauerrichtung $\vec{e}$ 364 Ergebnisse existieren. In diesem Fall können jedoch nur 327 Schauerrichtungen tatsächlich rekonstruiert werden. Für einige Kombinationen ist keine Rekonstruktion einer Schauerrichtung möglich. Dies lässt sich wie folgt erklären.

Man betrachte zwei Stationen, die zu zwei Zeiten t_0 und t_1 getriggert wurden. Der Abstandsvektor zwischen beiden Stationen ist gegeben durch $\vec{d}_0 - \vec{d}_1$. Unter der Annahme, dass die beiden Stationen durch einen echten Luftschauer getriggert wurden, gibt es nach Abschnitt 3.2 eine obere Grenze für die Zeitdifferenz zwischen beiden Stationen. Diese ist gegeben durch $\Delta t_{\max} = c \cdot |\vec{d}_0 - \vec{d}_1|$ und wird genau dann gemessen, wenn die Schauerachse parallel zum Abstandsvektor der beiden Stationen ist. Sollte die Zeitdifferenz $|t_0 - t_1|$ der getriggerten Stationen nun aber größer sein als $\Delta t_{\max}$, so ist das obige Gleichungssystem nicht lösbar. Dies gilt unabhängig von der dritten Station, die zur Berechnung der Schauerrichtung verwendet wird. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass entweder die Näherung eines kegelförmigen Schauers, der sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, eine zu starke Vereinfachung war, oder die beiden Stationen nicht durch den gleichen Luftschauer getriggert wurden.

In dem folgenden Unterkapitel wird entschieden, wie aus der Menge der rekonstruierten Richtungsvektoren eine endgültige Richtung bestimmt wird. Eine der diskutierten Möglichkeiten ist, den Median $\vec{e}_{\mathrm{Median}}$ oder den Mittelwert $\vec{e}_{\mathrm{Mittel}}$ aller Richtungsvektoren $\vec{e}_i$ zu bilden. Daraus kann dann anschließend jeweils ein Zenit- und Azimutwinkel berechnet werden. Die zweite Möglichkeit ist, aus allen Vektoren $\vec{e}_i$ jeweils einen Winkel θ_i und φ_i zu bestimmen. Anschließend können die Mittelwerte oder Mediane zu θ_i und φ_i ermittelt werden.

4.3.1 Median und Mittelwert der Vektorkomponenten

Die verschiedenen Ergebnisse zu e_x, e_y und e_z für das Beispielereignis sind in Abbildung 4.2 in drei Histogrammen dargestellt. Wie aufgrund von Gleichung 4.2 erwartet, ist in Abbildung 4.2 deutlich zu erkennen, dass e_x, e_y und e_z nur Werte zwischen -1 und 1 annehmen. In allen drei Verteilungen treten einzelne Ausreißer auf, welche auf das zufällige Triggern einzelner SD-Stationen bei einem Ereignis zurückzuführen sind. Demzufolge ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ausreißers bei einem bestimmten e_x, e_y und e_z gleich groß.

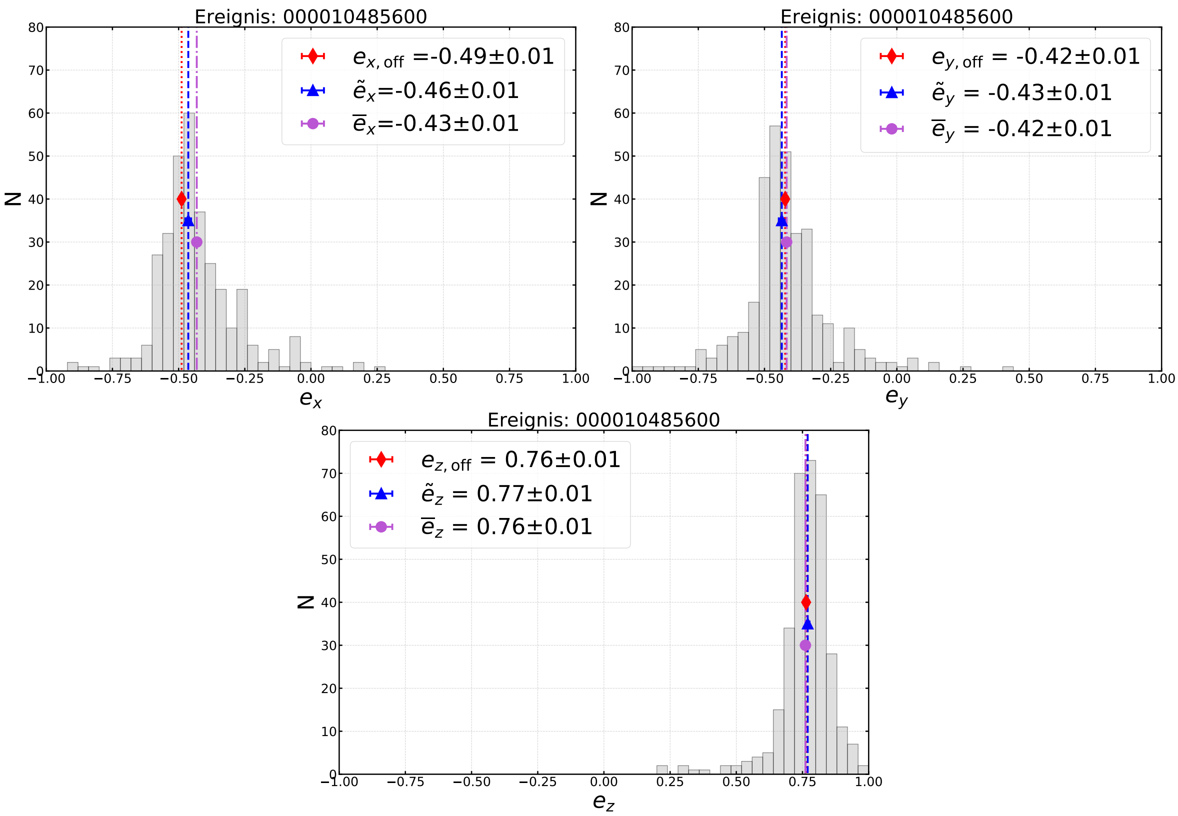

Abbildung 4.2: Dargestellt sind die Verteilungen der Vektorkomponenten e_x, e_y und e_z der Schauerrichtung $\vec{e}$ des Beispielereignisses 000010485600 für 327 drei-Stationen-Kombinationen N. Die Mediane $\tilde{e}_x$, $\tilde{e}_y$, $\tilde{e}_z$ und die Mittelwerte $\overline{e}_x$, $\overline{e}_y$, $\overline{e}_z$ der Verteilungen, sowie die dazugehörigen Standardfehler sind markiert. Außerdem sind die anhand von Fits gewonnenen Vektorkomponenten $e_{x,\mathrm{off}}$, $e_{y,\mathrm{off}}$ und $e_{z,\mathrm{off}}$ des Vektors e_{off} eingezeichnet.

Nun sollte betrachtet werden, ob der Mittelwert oder der Median sich bei der Bestimmung eines eindeutigen Vektors aus allen Vektoren $\vec{e}_i$ besser eignet. Die in Abbildung 4.2 markierten Werte für die beiden Größen liegen sehr nah an der jeweiligen Offline-Rekonstruktion. Außerdem ist zu erkennen, dass die Verteilung der Komponenten des Vektors $\vec{e}$ gaußähnlich sind. Da aber die x-Achse auf ein Intervall von -1 bis 1 eingeschränkt ist, liegen die Verteilungen nicht immer mittig und können weiter nach links oder rechts verschoben sein. Hat man eine Verteilung, die mittig auf der x-Achse liegt, so ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ausreißers links und rechts davon gleich groß. Demzufolge können sich diese bei einer Mittelwertberechnung näherungsweise ausgleichen. Hat man allerdings eine Verteilung, welche weit nach links oder rechts verschoben ist, ist das nicht mehr der Fall. Aufgrund dessen treten Ausreißer auf der einen Seite der Verteilung deutlich häufiger auf als auf der anderen. Sobald auf einer Seite der Verteilung mehr Ausreißer auftreten, wird der Mittelwert negativ beeinflusst. Aus diesem Grund sind die Mediane $\tilde{e}_x$, $\tilde{e}_y$, $\tilde{e}_z$ robuster gegenüber Ausreißern und damit für das weitere Vorgehen besser geeignet als die Mittelwerte $\overline{e}_x$, $\overline{e}_y$, $\overline{e}_z$.

Als Fehler der Mittelwerte und Mediane wurden die Standardfehler des Mittelwertes und die des Medians verwendet [10]. Der Vektor, welcher aus $\tilde{e}_x$, $\tilde{e}_y$ und $\tilde{e}_z$ gebildet wird, ist nicht zwingend normiert. Normiert man ihn, so erhält man einen Vektor der als $\vec{e}_{\text{Median}}$ bezeichnet wird. Daraus werden anschließend $\theta(\vec{e}_{\text{Median}}) = (39{,}5 \pm 0{,}6)^\circ$ und $\varphi(\vec{e}_{\text{Median}}) = (-136{,}0 \pm 1{,}0)^\circ$ berechnet. Die Fehler beider Winkel gehen aus einer Fehlerfortpflanzung hervor.

4.3.2 Mediane und Mittelwerte der Winkelverteilungen

Aus den verschiedenen Vektoren $\vec{e}_i$, deren Komponenten in Abbildung 4.2 dargestellt sind, können mithilfe der Gleichungen 3.2 und 3.3 die Winkel θ_i und φ_i bestimmt werden. Zur Veranschaulichung sind diese in Abbildung 4.3 in Form von Histogrammen dargestellt. Außerdem sind die Mediane $\tilde{\theta}$, $\tilde{\varphi}$ und die Mittelwerte $\overline{\theta}$, $\overline{\varphi}$ dargestellt. Die dazugehörigen Standardfehler werden erneut als Fehler angenommen. Um überprüfen zu können, ob die dabei hervorgehenden Winkeln $\overline{\theta}$ und $\overline{\varphi}$ bzw. $\tilde{\theta}$ und $\tilde{\varphi}$ den Winkeln θ_{off} und φ_{off} aus Abbildung 4.1 nahe kommen, sind diese ebenfalls eingezeichnet. Abbildung 4.3 zeigt zudem, dass sowohl θ als auch φ gaußähnlich sind.

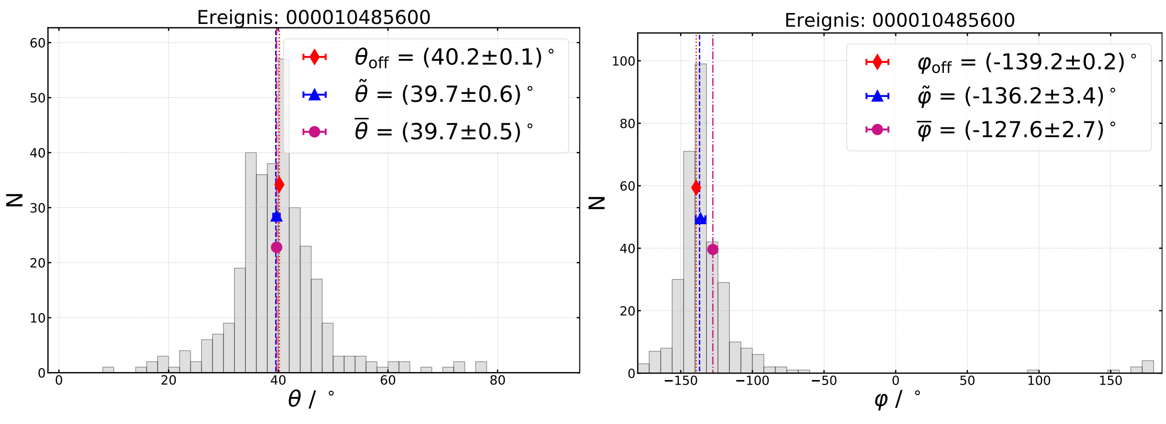

Abbildung 4.3: Dargestellt sind die Verteilungen der Winkel θ (links) und φ (rechts) für das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1. Die jeweiligen Winkel aus Abbildung 4.1, die Mittelwerte und die Mediane, sowie die dazugehörige Standardfehler sind ebenfalls eingezeichnet.

Dem linken Histogramm in Abbildung 4.3 ist zu entnehmen, dass die Winkel θ_i wie erwartet nur Werte zwischen 0° und 90° annehmen. Die Winkel $\overline{\theta}$ und $\tilde{\theta}$ stimmen sehr gut miteinander überein. Somit macht es an dieser Stelle keinen Unterschied, ob der Winkel $\overline{\theta}$ oder $\tilde{\theta}$ berechnet wird. Da aber die x-Achse hier ebenfalls auf ein bestimmtes Intervall festgelegt ist, kann das Problem mit den ungleich verteilten Ausreißern auf beiden Seiten der Verteilung erneut auftreten. Somit ist auch hier $\tilde{\theta}$ zuverlässiger als $\overline{\theta}$.

Auch die Winkel φ_i liegen im erwarteten Bereich. In diesem Fall liegen die Winkel φ_i zwischen $\pm 180°$. Das rechte Histogramm aus Abbildung 4.3 macht deutlich, dass der größte Teil der Winkel φ_i sich zwischen $-180°$ und $-50°$ befinden. Ein kleiner Teil der Winkel befindet sich allerdings etwa zwischen $90°$ und $180°$. Dieser Teil führt dazu, dass die Werte $\tilde{\varphi}$ und $\overline{\varphi}$ relativ zu φ_{off} verschoben sind.

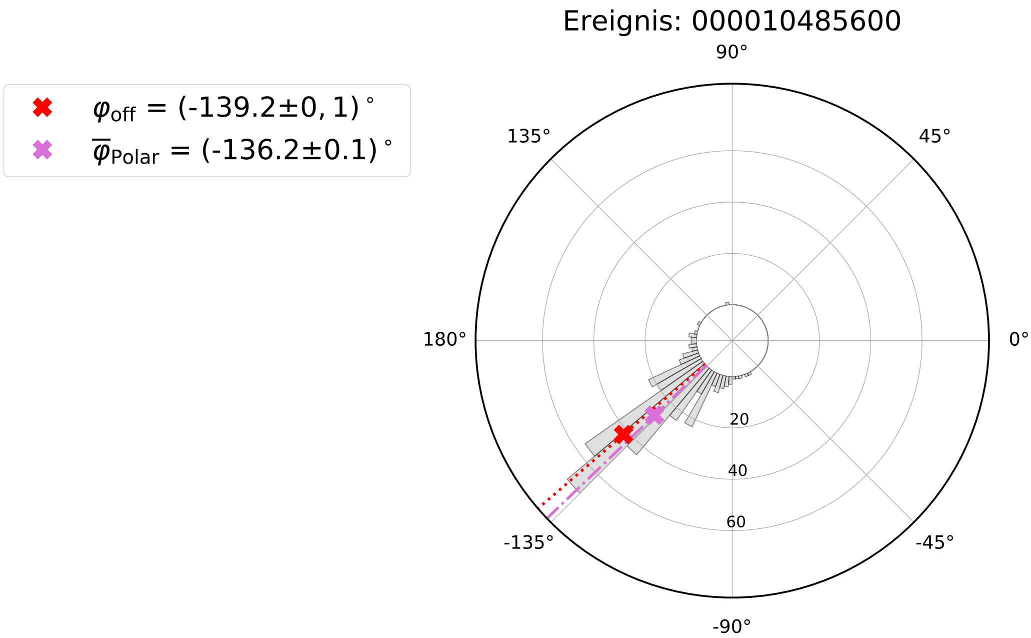

Abbildung 4.4: Dargestellt ist ein eindimensionales Polardiagramm der Verteilung des Winkels φ für das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1. Entlang des Kreises kann der Winkel und radial die Anzahl N, abgelesen werden. Eingezeichnet sind der Winkel φ_{off} aus Abbildung 4.1 und der aus Gleichung 4.6 hervorgehende Mittelwert $\overline{\varphi}_{\text{Polar}}$.

Wählt man eine Polardarstellung des rechten Histogramms aus Abbildung 4.3, so ergibt sich das Histogramm aus Abbildung 4.4. Dabei wird ersichtlich, dass es sich bei den Winkeln φ_i, welche sich ungefähr zwischen $150°$ und $180°$ befinden, nicht um Ausreißer handelt. Stattdessen handelt es sich um einen Sprung, welcher durch die Wahl des Bereiches der Skala auf der x-Achse verursacht wird. Demzufolge werden die Winkel φ_i auf beide Enden der Skala aufgeteilt, obwohl sie eigentlich zusammengehören. Um das Problem beheben zu können, muss in der Berechnung des Mittelwertes von φ und des Standardfehlers die Zirkularität des Winkels φ berücksichtigt werden. Die genannte Voraussetzung ist in Gleichung 4.6 und Gleichung 4.7 erfüllt [11]. Dabei stellt m die Anzahl der zu mittelnden Werte dar.

$$\overline{\varphi}_{\text{Polar}} = \operatorname{atan2}\left(\frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m}\sin(\varphi_i), \frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m}\cos(\varphi_i)\right) \tag{4.6}$$

$$\sigma(\overline{\varphi}_{\text{Polar}}) = \sqrt{-\ln\left(\frac{1}{m^2}\left[\left(\sum_{i=0}^{m}\sin(\varphi_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{m}\cos(\varphi_i)\right)^2\right]\right)} \tag{4.7}$$

Wendet man beide Gleichungen auf das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1 an, so ergibt sich $\overline{\varphi}_{\text{Polar}} = (-136 \pm 0{,}1)^\circ$. Abbildung 4.4 ist zu entnehmen, dass φ_{off} und $\overline{\varphi}_{\text{Polar}}$ gut miteinander übereinstimmen.

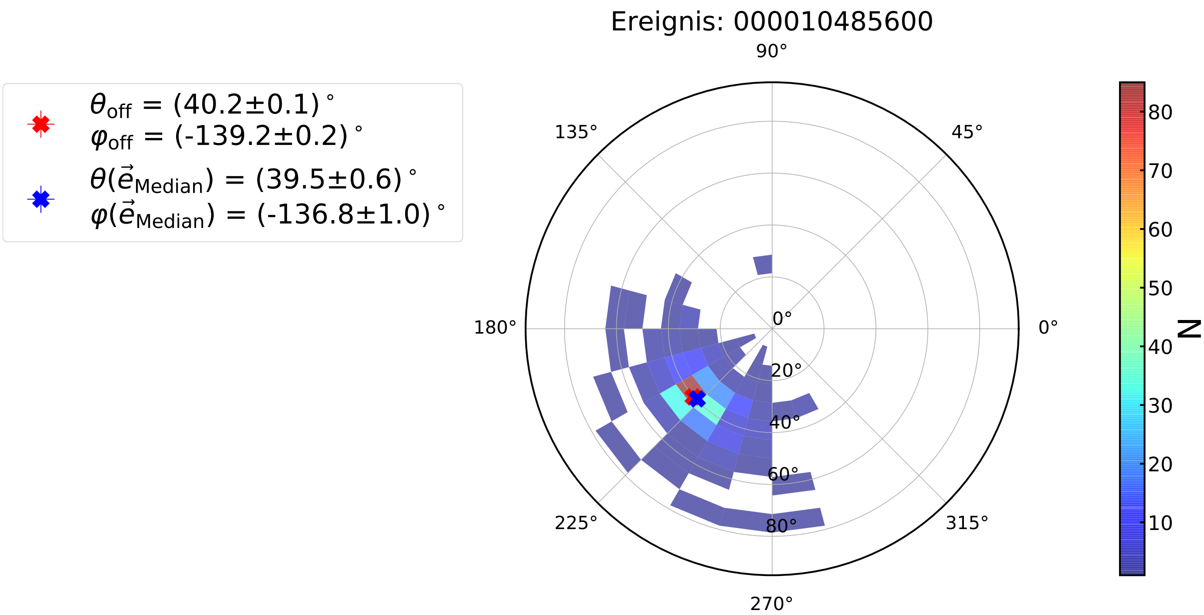

Abbildung 4.5: Dargestellt ist ein zweidimensionales Histogramm der Winkel θ und φ für das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1 in einer Polardarstellung. Entlang des Kreises können die Winkel φ_i und radial die Winkel θ_i abgelesen werden. Die Anzahl N der Winkel θ und φ können der Farbskala entnommen werden. Eingezeichnet sind die Punkte $(\theta_{\text{off}}, \varphi_{\text{off}})$ und $(\theta(\vec{e}_{\text{Median}}), \varphi(\vec{e}_{\text{Median}}))$.

In Abbildung 4.5 ist ein zweidimensionales Histogramm in einer Polardarstellung vorzufinden. Das Histogramm fasst alle Ergebnisse zu den Winkeln φ_i und θ_i des Beispielereignisses aus Abschnitt 4.1 zusammen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Punkte $(\theta_{\text{off}}, \varphi_{\text{off}})$ und $(\theta(\vec{e}_{\text{Median}}), \varphi(\vec{e}_{\text{Median}}))$ sehr gut miteinander übereinstimmen.

4.3.3 Vergleich der Methoden

Nachdem beide Vorgehensweisen vorgestellt wurden, muss festgelegt werden, welche für den externen SD-Trigger von AERA besser geeignet ist. Die erste Möglichkeit ist, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, zuerst einen Vektor $\vec{e}_{\text{Median}}$ zu bestimmen und daraus ein Winkel $\theta(\vec{e}_{\text{Median}})$ und ein Winkel $\varphi(\vec{e}_{\text{Median}})$ zu bestimmen. Bei der zweiten Möglichkeit werden aus allen Vektoren $\vec{e}_i$ jeweils ein Winkel θ_i und φ_i berechnet. Anschließend wird aus den Winkeln θ_i der Median $\tilde{\theta}$ und aus den Winkel φ_i der Mittelwert $\overline{\varphi}_{\text{Polar}}$ gebildet. Beide Vorgehensweisen wurden auf 15 Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter angewandt. Die dazugehörigen IDs und die offline ermittelten Winkel θ_{off} und φ_{off} sind in

Tabelle A.1 vorzufinden. Außerdem wurden die Winkel θ_{off} und φ_{off} und hier erzielten Ergebnisse in Abbildung 4.6 zusammengefasst.

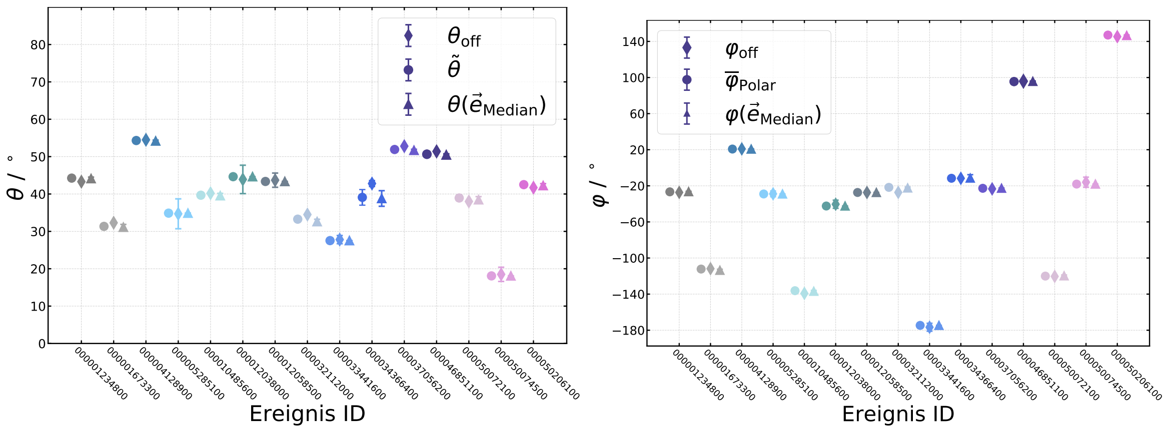

Abbildung 4.6: In beiden Abbildungen sind jeweils die Ergebnisse für die 15 Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter zusammengefasst. Aufgetragen sind die Winkel θ und φ gegen die Ereignis ID. Links sind θ_{off}, der Median $\tilde{\theta}$ und der aus $\vec{e}_{\text{Median}}$ berechnete Winkel $\theta(\vec{e}_{\text{Median}})$ dargestellt. Rechts sind die Winkel φ_{off}, der aus Gleichung 4.6 berechnete Mittelwert $\overline{\varphi}_{\text{Polar}}$ und der aus $\vec{e}_{\text{Median}}$ berechnete Winkel $\varphi(\vec{e}_{\text{Median}})$ zu sehen.

Vergleicht man die aus den beiden Vorgehensweisen hervorgehenden Ergebnisse jedes Ereignisses, so stellt man fest, dass beide Werte liefern, welche sehr nah beieinander liegen. Außerdem stimmen die Ergebnisse beider Methoden sehr gut mit den Winkeln θ_{off} und φ_{off} überein. Demzufolge kann nicht behauptet werden, dass eine der beiden Methoden präziser als die andere ist. Wird allerdings der Rechenaufwand in Betracht gezogen, so ist dieser bei den Winkeln $\theta(\vec{e}_{\text{Median}})$ und $\varphi(\vec{e}_{\text{Median}})$ deutlich geringer. Zur Bestimmung von $\theta(\vec{e}_{\text{Median}})$ und $\varphi(\vec{e}_{\text{Median}})$ wird jeweils eine Rechnung durchgeführt. Für $\tilde{\theta}$ und $\overline{\varphi}_{\text{Polar}}$ werden allerdings jeweils 364 Winkel θ_i bzw. φ_i berechnet, damit anschließend ein Median bzw. Mittelwert gebildet werden kann. Demzufolge werden für alle weitere Berechnungen $\theta(\vec{e}_{\text{Median}})$ und $\varphi(\vec{e}_{\text{Median}})$ verwendet.

4.4 Übereinstimmungen von $\theta_{\text{off}}/\varphi_{\text{off}}$ mit θ_i/φ_i

Wie in Abbildung 4.6 dargestellt, stimmen die Winkel θ_{off} und φ_{off} gut mit $\tilde{\theta}$ und $\overline{\varphi}_{\text{Polar}}$ überein. Eine genauere Quantifizierung der Übereinstimmung, soll aus Vergleichen des Vektors $\vec{e}_{\text{off}}$ mit allen Vektoren $\vec{e}_i$, hervorgehen. Dazu werden die Öffnungswinkel zwischen dem Vektor $\vec{e}_{\text{off}}$ und allen Vektoren $\vec{e}_i$ berechnet. Die Öffnungswinkel werden als γ_i bezeichnet.

Zunächst wird untersucht, welche Verteilung für den Winkel γ erwartet wird. Wie bereits gesehen ist sowohl θ als auch φ normalverteilt. Somit ist klar, dass $d\theta = \theta - \theta_{\text{off}}$ und $d\varphi = \varphi - \varphi\text{off}$ ebenfalls normalverteilt sind. In Abbildung 4.7 sind $d\theta$ und $d\varphi$ als Ausschnitt auf der Oberfläche einer Kugel skizziert. Der Skizze kann entnommen werden, dass für ausreichend kleine $d\theta$ und $d\varphi$, die von ihnen eingeschlossene Fläche auf der Kugeloberfläche näherungsweise Rechteckig ist. Der Winkel γ stellt die Diagonale des Rechtecks dar und damit auch Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks. Demzufolge gilt, dass γ durch $\sqrt{d\theta^2 + d\varphi^2}$ angenähert werden kann.

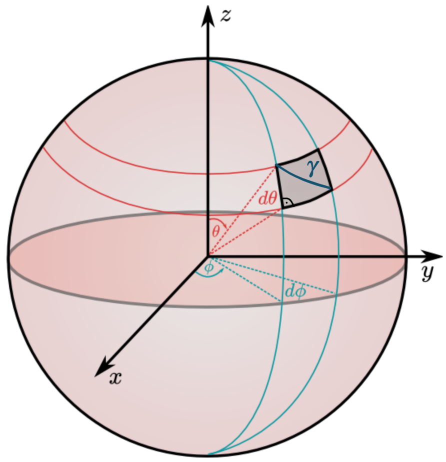

Abbildung 4.7: Dargestellt sind die Winkel $d\theta$ und $d\varphi$ als rechteckiger Ausschnitt auf der Oberfläche einer Einheitskugel. Die Länge der Diagonalen des Rechtecks stellt den Betrag des Winkels γ dar.

Im Allgemeinen ist eine Größe $C = \sqrt{A^2 + B^2}$ Rayleigh-verteilt, wenn die Größen A und B normalverteilt und unkorreliert sind. Das heißt, sofern $d\theta$ und $d\varphi$ unkorreliert sind, sollte γ für kleine Winkel einer Rayleigh-Verteilung folgen. Für die betrachteten Beispielereignisse ergibt sich ein Korrelationskoeffizient, der stets kleiner als 0,1 ist (siehe Tabelle A.1). Die Verteilung von γ sollte also durch eine Rayleigh-Verteilung beschrieben werden können [12].

$$N(\gamma) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\rho^2} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2\rho^2}}, & \text{wenn } x \geq 0 \\ 0, & \text{sonst } x < 0 \end{cases} \tag{4.8}$$

$$\mu = \rho \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \qquad \sigma = \rho \cdot \sqrt{\frac{4-\pi}{2}} \tag{4.9}$$

Die nicht normierte Dichtefunktion der Rayleigh-Verteilung ist durch Gleichung 4.8 gegeben. Die Fläche unter der Funktion wird als α bezeichnet. Außerdem ist ρ ein positiver Parameter. Zur Bestimmung des Erwartungswertes μ und der Standerdabweichung σ dieser Verteilung wird Gleichung 4.9 verwendet. Aufgrund der geringen Statistik kann die Rayleigh-Verteilung allerdings nicht mit der Methode der kleinsten Quadrate an den Winkel γ gefittet werden. Stattdessen wird die Maximum-Likelihood-Methode angewendet. Der Maximum-Likelihood-Schätzer für ρ ist gegeben durch:

$$\rho \approx \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m} \gamma_i} \quad . \tag{4.10}$$

In Abbildung 4.8 sind die Ergebnisse für das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Gleichung 4.8 nur bis ungefähr 12° eine gute Beschreibung für die Verteilung des Winkels γ liefert. Dieses Verhalten war zu erwarten, da die Beziehung des Winkels γ zu $d\theta$ und $d\varphi$ nur für ausreichend kleine Winkel γ hergeleitet wurde. Aufgrund dessen sind in der Berechnung des Maximum-Likelihood-Schätzers für ρ nur Winkel $\gamma_i < 12^\circ$ berücksichtigt. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des asymmetrischen Fehlers von dem Erwartungswert μ kann in [13] nachgelesen werden.

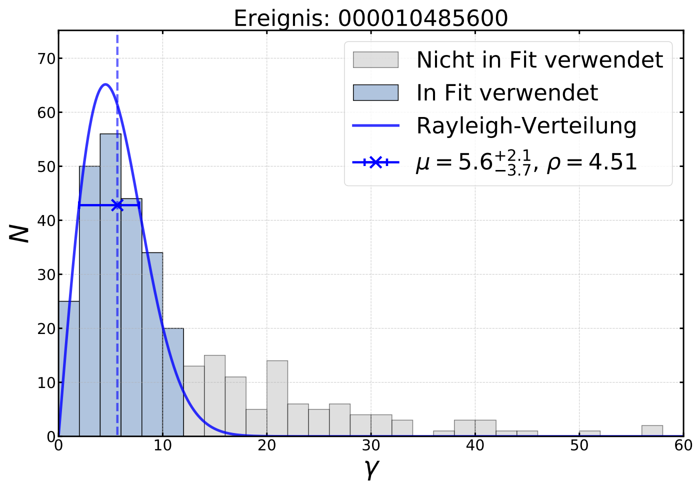

Abbildung 4.8: Dargestellt ist die Verteilung des Öffnungswinkels γ für das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1. An das Histogramm wurde eine Rayleigh-Verteilung mit der Maximum-Likelihood-Methode gefittet. Eingetragen sind der Erwartungswert μ und der Maximum-Likelihood-Schätzer ρ.

Die Berechnungen des Öffnungswinkel γ_i werden erneut für die 15 Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter durchgeführt. Abbildung 4.9 stellt eine Zusammenfassung der Ergebnissen der Erwartungswerte μ für alle 15 Ereignisse dar.

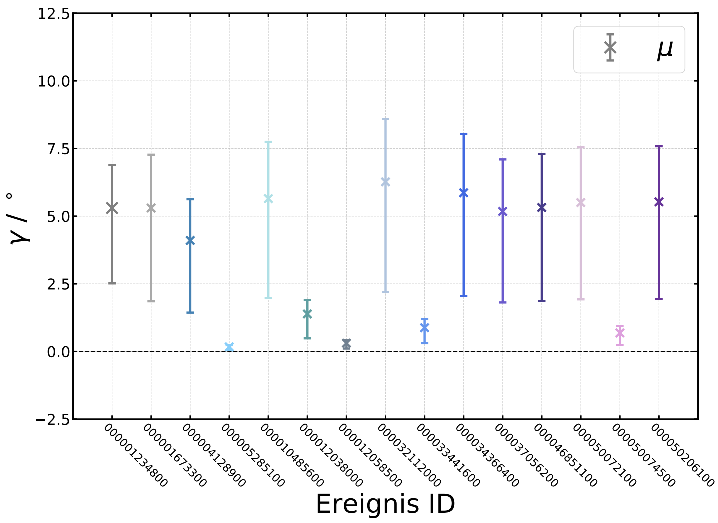

Abbildung 4.9: Dargestellt sind die Erwartungswerte μ der Rayleigh-Verteilung für die 15 Beispielereignisse aus dem öffentlichem Ereignis-Betrachter. Aufgetragen sind die Winkel γ gegen die Ereignis ID.

Der Übersicht lässt sich entnehmen, dass alle Erwartungswerte des Öffnungswinkels γ deutlich unter $\gamma = 10^\circ$ liegen. Demzufolge kann man sagen, dass die Online- und die Offline-Rekonstruktionsmethode relativ ähnliche Ergebnisse liefern. Zusammengefasst konnte gezeigt werden, dass eine schnelle und zuverlässige Methode zur Bestimmung des Richtungsvektors $\vec{e}$ eines Luftschauer gefunden wurde.

4.5 Rekonstruktion des Abstandes r

Eine weitere Information, welche zur Optimierung des externen AERA-Triggers notwendig ist, ist der kürzeste Abstand r zwischen der Schauerachse und AERA. Um r zu bestimmen, wird zunächst eine Schauerachse festgelegt, welche durch den Richtungsvektor des Schauers und das Schauerzentrum definiert ist. Als Richtungsvektor des Luftschauers wird der in Abschnitt 4.2 ermittelte Vektor $\vec{e}_{\text{Median}}$ verwendet. Das Schauerzentrum kann näherungsweise durch das Baryzentrum $\vec{B}$ nach Gleichung 3.4 bestimmt werden.

$$r_i(\vec{a}_i) = \frac{|(\vec{a}_i - \vec{B}) \times \vec{e}_{\text{Median}}|}{|\vec{e}_{\text{Median}}|} \tag{4.11}$$

Anschließend wird effektiv nur noch der Abstand zwischen einem Punkt und einer Geraden berechnet. Dazu werden die Abstände $r_i(\vec{a}_i)$ zwischen der Schauerachse und allen AERA-Stationen mit den Ortskoordinaten $\vec{a}_i$ ermittelt. Diese Berechnungen erfolgen nach Gleichung 4.11. Für mögliche Trigger-Bedingungen wird der kürzeste Abstand $r = \min(r_i)$ verwendet.

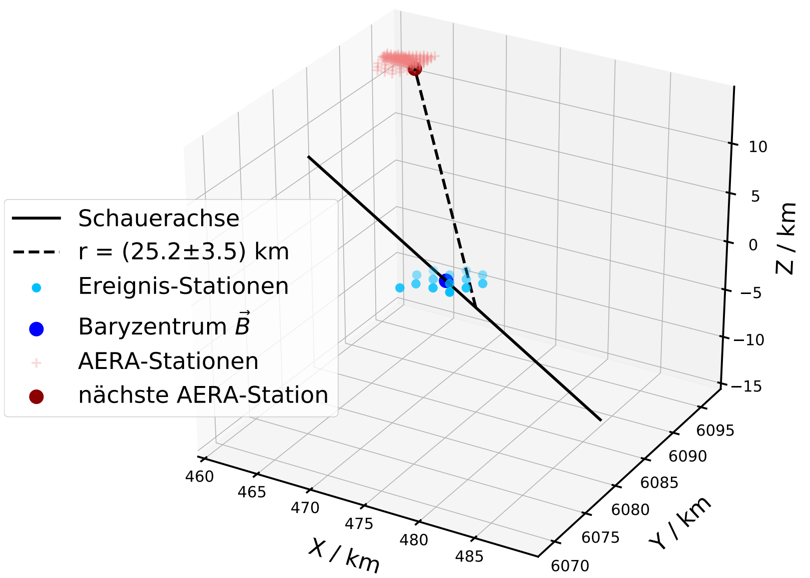

Abbildung 4.10: Die AERA-Stationen sind als hellrote Plus-Zeichen markiert. Die hellblauen Punkte sind die SD-Stationen, welche das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1 detektiert haben. Der dunkelblaue Punkt markiert das Baryzentrum $\vec{B}$ und der rote die an der Schauerachse am nächsten liegende AERA-Station. Die Schauerachse ist als eine durchgezogene Linie dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert den kürzesten Abstand r zwischen ihr und der nächsten AERA-Station.

Das Ergebnis für das Ereignis aus Abschnitt 4.1 ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Daten, welche im externen SD-Trigger von AERA ausgewertet werden, beinhalten keine Angabe der Signalstärke s. Daher sind die auftretenden Unterschiede der Abstände durch eine fehlende Angabe des Signals von besonderer Bedeutung. Um überprüfen zu können, wie groß die Auswirkungen auf den Abstand r sind, wird er auf zwei unterschiedliche Weisen berechnet. Beim ersten Mal wird der Abstand r exakt nach der wie bisher beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Anschließend wird das gemessen Signal vernachlässigt. Somit werden die s_i in Abbildung 4.10 für alle Stationen auf 1 gesetzt. Dabei erhalten wir den Abstand $r(s=1)$. Die beiden Abstände r und $r(s=1)$ werden für die 15 Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter berechnet. Die hieraus hervorgehenden Ergebnisse sind in Abbildung 4.11 zusammengefasst.

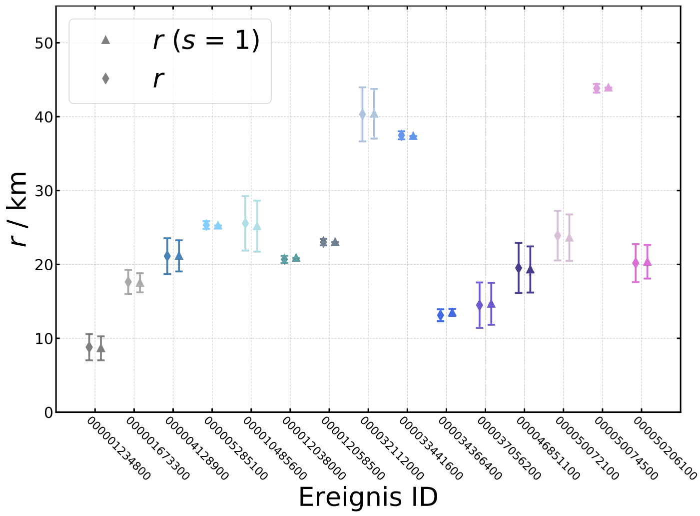

Abbildung 4.11: Dargestellt sind jeweils zwei Abstände r und $r(s=1)$ der 15 Ereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter. Aufgetragen sind die Abstände gegen die IDs Ereignisse.

Die in Abbildung 4.11 eingezeichneten Fehler ergeben sich durch die Fehlerfortpflanzung. Sie sind auf die Fehler von $\vec{e}_{\mathrm{Median}}$ und den Standardfehler von $\vec{B}$ zurückzuführen. Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass alle Abstände etwa zwischen 10 und 50 km liegen. Es ist daher davon auszugehen, dass keines der Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter von besonderer Relevanz für AERA ist, weil ihre Entfernung zu AERA sehr groß ist. Da die Ereignisse aus dem Ereignisbetrachter zufällig gewählt sind, war das Gegenteil auch nicht zu erwarten. Außerdem weichen die Abstände r und $r(s=1)$ kaum bis gar nicht voneinander ab. Daraus lässt sich schließen, dass die fehlenden Information des Triggersignals keine größeren Komplikationen verursachen sollten. Es sei jedoch angemerkt, dass dies noch anhand einer höheren Statistik überprüft werden muss.

Insgesamt konnte eine zuverlässige Methode zur Bestimmung der Winkel θ und φ und des Abstandes r gefunden werden. Eine Trigger-Bedingung basierend auf dieser Methode wird im Folgenden mit realen AERA-Ereignissen validiert.

5 Trigger-Bedingung

In diesem Kapitel werden 5528 reale Ereignisse anhand der entwickelten Online-Rekonstruktionsmethode untersucht. Das Ziel ist es, Trigger-Bedingungen für den externen SD-Trigger von AERA festzulegen. Die hier betrachteten Ereignisse könnten von Auger offline erfolgreich rekonstruiert werden. Rekonstruktionen aus SD- und RD-Daten sind an dieser Stelle von besonderer Bedeutung. Die neuen Trigger-Bedingungen sollen so festgelegt werden, dass möglichst alle relevanten Ereignisse gespeichert werden.

Die aus der Online-Rekonstruktionsmethode hervorgehenden Ergebnisse für die 5528 SD-Ereignisse werden mit den aus der Offline-Rekonstruktion von Auger hervorgehenden Ergebnissen verglichen. Die Vergleichsdaten sind in zwei Kategorien aufgeteilt. Die Ereignisse mit einem Winkel $\theta > 60^\circ$ wurden von Bjarni Pont [14] und $\theta \leq 60^\circ$ von Marvin Gottowik [3] offline rekonstruiert.

Für die Festlegung der Trigger-Bedingung wird als erstes anhand von Gleichung 2.1 abgeschätzt, ob der Radio-Fußabdruck hinreichend Groß ist, um von AERA erfasst zu werden. Die 5528 Ereignisse haben eine Zeitauflösung von 1 ns. Somit geschieht diese Abschätzung zuerst anhand von Berechnungen, für welche eine Zeitauflösung von 1 ns verwendet wird. Da jedoch dem externen SD-Trigger von AERA eine Zeitauflösung von 1 μs zur Verfügung steht, muss der Einfluss der reduzierten Zeitauflösung auf die Abschätzungen untersucht werden. Dazu werden alle Berechnungen auch für eine Zeitauflösung von 1 μs durchgeführt und erneut abgeschätzt.

5.1 Trigger-Studien zum Winkel θ und Abstand r

Für die 5528 SD-Ereignisse werden der Winkel $\theta = \theta_{\text{Median}}$ und der Abstand r berechnet. Wie in Abschnitt 2.2 gezeigt, wird die Radio-Emission nahezu ausschließlich in einem Radius $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ emittiert. Außerhalb von drei Cherenkov-Radien gibt es so gut wie kein messbares Signal. Daher wird im Folgenden $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ als Trigger-Bedingung untersucht. Dazu ist die Kurve $r = 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ zusammen mit den Ergebnissen für θ und r aller Ereignisse links in Abbildung 5.1 dargestellt.

Dieser Darstellung kann entnommen werden, dass die Mehrheit der SD-Ereignisse Ergebnisse liefern, bei denen sich das Baryzentrum innerhalb $3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ befindet, so dass die Ereignisse getriggert werden. Bei 87 davon ist das jedoch nicht der Fall. Verwendet man $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ als eine Trigger-Bedingung, so werden alle oberhalb der Kurve liegenden SD-Ereignisse nicht als RD-Ereignisse gespeichert. Da allerdings bekannt ist, dass es sich hierbei um rekonstruierbare SD- und RD-Ereignisse handelt, ist es erwünscht, alle davon zu behalten. Vier zufällig ausgewählte Ereignisse mit $r \geq 3 \cdot R_{\text{CR}}$, welche in Abbildung 5.1 rot markiert sind, werden genauer untersucht.

Die rechte Seite von Abbildung 5.1 zeigt eins der auswählten Ereignisse. Darstellungen der anderen drei Ereignissen sind in Abbildung A.2 vorzufinden. Die vier SD-Ereignisse weisen allesamt das gleiche Problem auf. Eine Gruppe von vielen getriggerten SD-Stationen liegt in einem sehr kleinem Bereich in unmittelbare Nähe zu AERA. Die übrigen getriggerten SD-Stationen sind nahezu über die gesamte Oberfläche des Auger-Observatoriums gestreut. Somit ist davon auszugehen, dass es sich dabei um SD-Stationen handelt, welche zufällig getriggert haben. Sie üben einen starken Einfluss auf das Baryzentrum $\vec{B}$ aus, da dieses sich aus den Mittelwerten der Ortskoordinaten $(\overline{d}_x, \overline{d}_y, \overline{d}_z)$ aller getriggerten SD-Stationen zusammensetzt. Wie bereits erwähnt, stehen dem SD-Trigger für AERA allerdings keine Informationen über die Signalstärke s der getriggerten SD-Stationen zur Verfügung. Somit ist eine sinnvolle Selektion von SD-Stationen, welche nicht nur durch Rauschen getriggert wurden, nicht möglich. Das Problem kann aber behoben werden, indem der Median der Ortskoordinaten ermittelt wird, da dieser robuster gegenüber Ausreißern ist. Somit erhält man das neue Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}} = (\tilde{d}_x, \tilde{d}_y, \tilde{d}_z)$. Der rechten Darstellung aus Abbildung 5.1 ist zu entnehmen, dass $\vec{B}_{\text{Median}}$ den Mittelpunkt des Fußabdrucks des Luftschauers besser beschreibt.

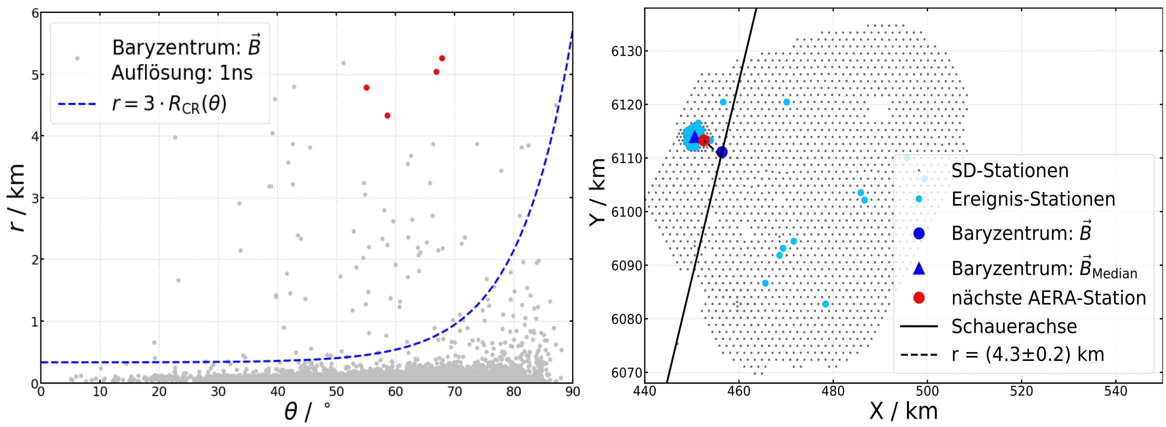

Abbildung 5.1: Links ist der rekonstruierte Abstand r gegen den rekonstruierten Winkel θ für die 5528 SD-Ereignisse aufgetragen. Es wurde eine Zeitauflösung von 1 ns und das Baryzentrum $\vec{B}$ verwendet. Die Kurve aus Gleichung 2.1 ist für $3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ eingezeichnet. Die in rot markierten Ereignisse werden näher Untersucht. Eins davon ist in der rechten Abbildung dargestellt. Die Baryzentren $\vec{B} = (\overline{d}_x, \overline{d}_y, \overline{d}_z)$ und $\vec{B}_{\text{Median}} = (\tilde{d}_x, \tilde{d}_y, \tilde{d}_z)$ sind in blau markiert.

Der Winkel θ und der Abstand r werden erneut für alle 5528 SD-Ereigniss berechnet. Dabei wird $\vec{B}_{\text{Median}}$ statt $\vec{B}$ zur Berechnung des Abstandes r verwendet. Die hierbei hervorgehenden Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 zusammengefasst. Die in rot markierten und 85 weitere Ereignisse, welche vorher oberhalb der Kurve lagen, befinden sich jetzt unterhalb dieser. Das deutet darauf hin, dass nicht nur die vier genauer untersuchten Ereignisse das Problem der zufällig getriggerten SD-Stationen aufweisen. Die Ergebnisse bestätigen, dass $r \leq 3 \cdot R_{\text{CR}}$ eine sehr gute Trigger-Bedingung darstellt.

Nun werden die zwei Ereignisse, welche die Trigger-Bedingung noch nicht erfüllen, genauer betrachtet. In Abbildung 5.2 sind diese als A und B bezeichnet. Um die genauere Betrachtung der beiden Ereignissen zu ermöglichen, sind beide in Abbildung 5.3 einzeln dargestellt.

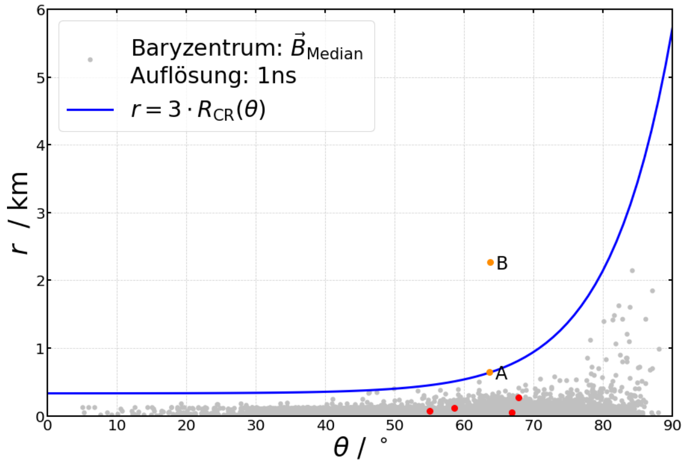

Abbildung 5.2: Aufgetragen sind der rekonstruierte Abstand r gegen den rekonstruierten Winkel θ für die 5528 SD-Ereignisse. Es wurde eine Zeitauflösung von 1 ns und als Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}}$ verwendet. Die Kurve aus Gleichung 2.1 ist für $3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ eingezeichnet. Die in rot markierten Ereignisse wurden zuvor näher untersucht. Die orangen Punkte werden ebenfalls genauer betrachtet.

Für das Ereignis A sieht man, dass dieses am Rand des Pierre-Auger-Observatoriums liegt. Demzufolge ist zu vermuten, dass nur ein Teil des Fußabdrucks des Luftschauers auf das Auger-Observatorium aufgetroffen ist. Aufgrund der fehlenden Informationen kann das Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}}$ nicht präziser bestimmt werden, was sich auf den Abstand r auswirkt. Bezüglich des Ereignisses B sind allerdings in Abbildung 5.3 keine Besonderheiten feststellbar.

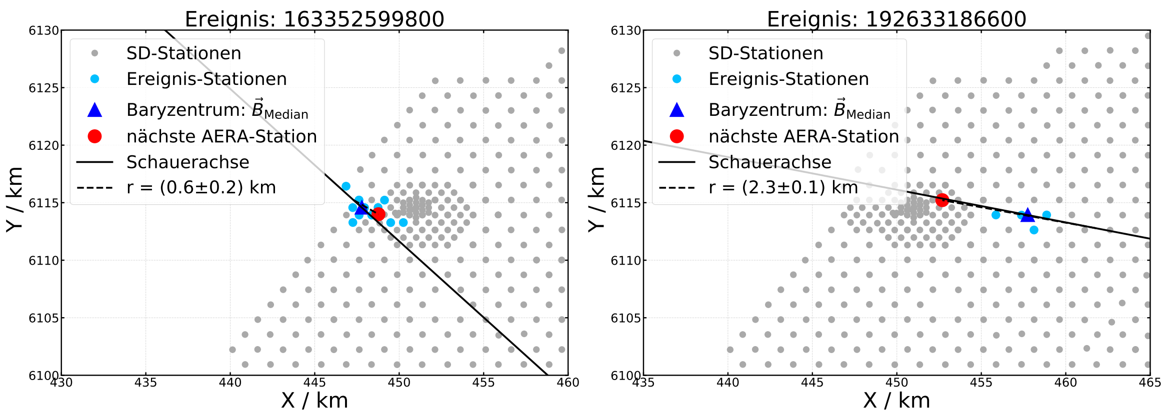

Abbildung 5.3: Dargestellt sind die in Abbildung 5.2 in orange markierten Ereignisse A (links) und B (rechts). Die SD-Stationen des Pierre-Auger-Observatoriums sind in Form von grauen Punkten eingezeichnet. Die hellblauen Punkte sind die SD-Stationen, welche das Beispielereignis aus Abschnitt 4.1 detektiert haben. Der dunkelblaue Punkt markiert das Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}}$ und der rote die der Schauerachse am nächsten liegende AERA-Station. Die Schauerachse ist als eine durchgezogene Linie dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert den kürzesten Abstand r zwischen ihr und der nächsten AERA-Station.

In Abbildung 5.4 sind die aus der Offline-Rekonstruktion hervorgehenden, vollständigen SD- und RD-Rekonstruktionen für die Ereignisse A und B veranschaulicht. Aus Vergleichen der beiden Darstellungen zum Ereignis A geht hervor, dass dieses ursprünglich von 11 SD-Stationen getriggert wurde. Bei der Offline-Rekonstruktion des Ereignisses werden allerdings nur vier SD-Stationen verwendet. Dennoch stimmen die aus beiden Methoden hervorgehenden Baryzentren und Richtungen der Schauerachsen näherungsweise überein. Somit werden dieses und weitere am Auger-Rand liegende Ereignisse, welche abgeschnitten sind, möglicherweise von der hier betrachteten Trigger-Bedingung aussortiert.

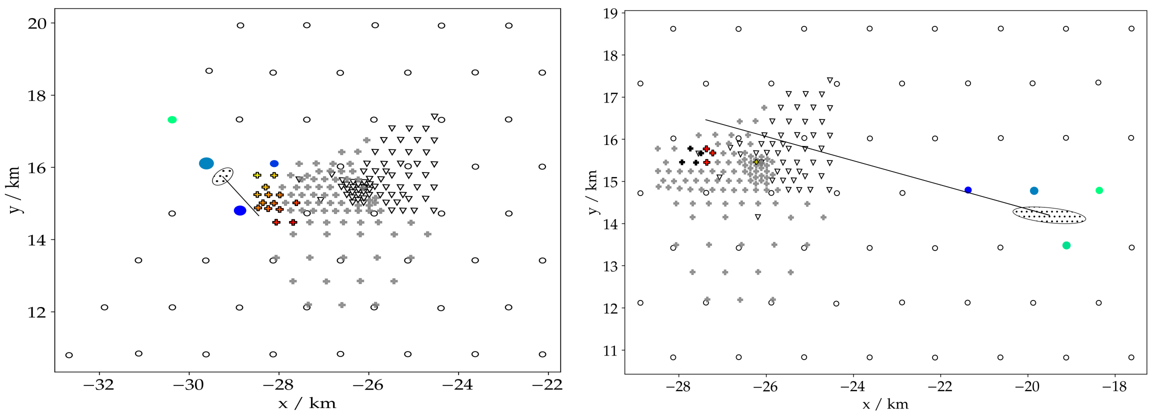

Abbildung 5.4: Links ist das Ereignis A und rechts das Ereignis B dargestellt. Es sind die y-gegen die x-Koordinaten der Stationen aufgetragen. Die SD-Stationen sind als graue Kreise und die RD-Stationen als graue Plus-Zeichen markiert. Die Dreiecke stellen RD-Stationen dar, welche zur Aufnahmezeit außer Betrieb waren. AERA ist anhand der größeren Stationsdichte zu erkennen. Die SD- und RD-Stationen, welche das Ereignis getriggert haben, sind farbig eingezeichnet. Die Größe der Kreise deutet auf die Stärke des gemessenen Signals und die Farbe auf den Zeitpunkt der Messung hin. Die Schauerachse ist als eine Linie abgebildet, welche am Auftreffpunkt auf dem Boden endet. Die Unsicherheit des Auftreffpunktes ist durch eine Ellipse dargestellt. [3]

Das offline rekonstruierte Ereignis B liefert die in Abbildung 5.4 rechts eingezeichnete Schauerachse. Es ist erkennbar, dass die auf die Detektorebene projizierte Schauerachse AERA schneidet. Die in unmittelbarer Nähe liegenden, funktionstüchtigen RD-Stationen detektieren das RD-Ereignis allerdings nicht. Stattdessen wird das RD-Ereignis von RD-Stationen registriert, welche weiter weg von der Schauerachse liegen. Außerdem gibt es zwischen den getriggerten RD-Stationen teils große Lücken. Somit liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um ein RD-Ereignis handelt, bei dem mehrere RD-Stationen Rauschen gemessen haben, das zufällig rekonstruiert werden kann. Demzufolge ist es von Vorteil, dass das RD-Ereigniss durch die neue Trigger-Bedingung aussortiert und nicht gespeichert wird. Somit eignet sich die Trigger-Bedingung optimal.

5.2 Effekte reduzierter Zeitauflösung

Zur Studie der Trigger-Bedingungen wurde die bestmögliche Zeitauflösung von 1 ns verwendet. Dem externen SD-Trigger von AERA steht allerdings nur eine Zeitauflösung von

$1\,\mu$s zur Verfügung. Zunächst werden die Effekte dieser reduzierten Zeitauflösung auf die einzelnen rekonstruierten Schauerparameter betrachtet. Dazu werden für alle Ereignisse die beiden Winkel und der Abstand neu ermittelt. Dabei bleibt die Vorgehensweise zur Rekonstruktion unverändert, allerdings werden alle Zeitangaben auf $1\,\mu$s gerundet. Insbesondere das rekonstruierte r wird näher untersucht. Schließlich werden die Gesamtauswirkungen auf die diskutierte Trigger-Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ analysiert.

5.2.1 Effekte reduzierter Zeitauflösung auf die online rekonstruierten Winkel

Zunächst werden die Effekte der reduzierten Zeitauflösung auf die Winkel θ und φ untersucht. Dazu werden die Ergebnisse für θ und $\theta_{\mu\mathrm{s}}$ bzw. φ und $\varphi_{\mu\mathrm{s}}$ sowohl miteinander, als auch mit den offline ermittelten Winkeln θ_{off} bzw. φ_{off} verglichen. Um die Vergleiche möglichst effizient zu realisieren, werden die Winkeldifferenzen $\Delta\theta_{\mathrm{ns}} = \theta_{\mathrm{ns}} - \theta_{\mathrm{off}}$, $\Delta\theta_{\mu\mathrm{s}} = \theta_{\mu\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{ns}}$ und $\Delta\theta = \theta_{\mu\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{off}}$ gebildet. Die dabei hervorgehenden Verteilungen sind in Abbildung 5.5 in Form von Histogrammen dargestellt. Die Gaußverteilung wurde mit der Methode der kleinsten Quadrate an die Histogramme gefittet. Die Erwartungswerte μ, die Standardabweichungen σ und das reduzierte χ^2/ndf der Verteilungen sind ebenfalls Abbildung 5.5 zu entnehmen.

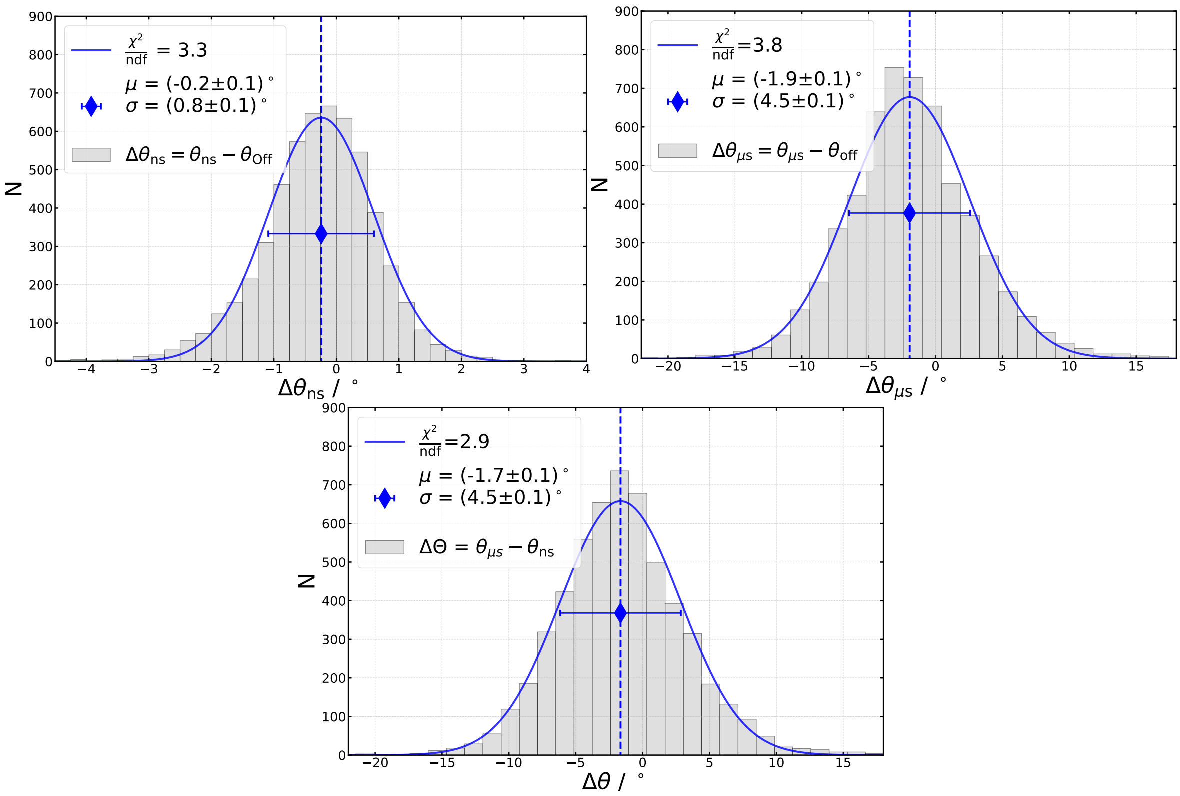

Abbildung 5.5: Dargestellt sind die Verteilungen der Winkeldifferenzen $\Delta\theta_{\mathrm{ns}} = \theta_{\mathrm{ns}} - \theta_{\mathrm{off}}$, $\Delta\theta_{\mu\mathrm{s}} = \theta_{\mu\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{ns}}$ und $\Delta\theta = \theta_{\mu\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{off}}$. Man beachte die unterschiedlichen Skalierungen der x-Achsen. An die Histogramme ist jeweils eine Gaußverteilung gefittet. Die dazugehörigen Erwartungswerte μ, die Standardabweichungen σ und reduzierten χ^2 der Verteilungen sind aufgetragen.

Die Abbildung zeigt, dass der Fit der Gaußverteilung in allen drei Fällen zutreffend ist. Außerdem sind alle drei Verteilungen leicht nach links verschoben, was den Erwartungswerten entnommen werden kann. Bei $\Delta\theta_{\mu s}$ und $\Delta\theta$ ist diese Verschiebung jedoch etwas stärker ausgeprägt als bei $\Delta\theta_{ns}$. Somit erwartet man, dass $\theta_{\mu s}$ tendenziell kleiner als θ_{ns} und θ_{off} ist. Der Cherenkov-Radius $3 \cdot R_{CR}$ ist für Winkel $\theta < 60°$ nahezu konstant. Ab etwa $60°$ steigt er jedoch exponentiell an. Verwendet man also den Cherenkov-Radius als Trigger-Bedingung, so sollte die Rechtsverschiebung des Winkels $\theta_{\mu s}$ keine Auswirkungen auf Ereignissen mit einem Winkel $\theta_{ns} < 60°$ haben. Bei Ereignisse mit einem größerem Winkel $\theta_{ns} > 60°$, könnte es jedoch dazu kommen, dass sie nicht getriggert werden.

Für die Verteilung $\Delta\theta_{ns}$ ist der Bereich, in dem die Werte von $\Delta\theta_{ns}$ streuen, klein. $\Delta\theta_{\mu s}$ ist jedoch deutlich breiter verteilt, was auf eine stärkere Streuung der Differenzen hinweist. Dieses Verhalten ist ein Resultat der reduzierten Zeitauflösung. Das Letztere wird anhand der Verteilung von $\Delta\theta$ bestätigt.

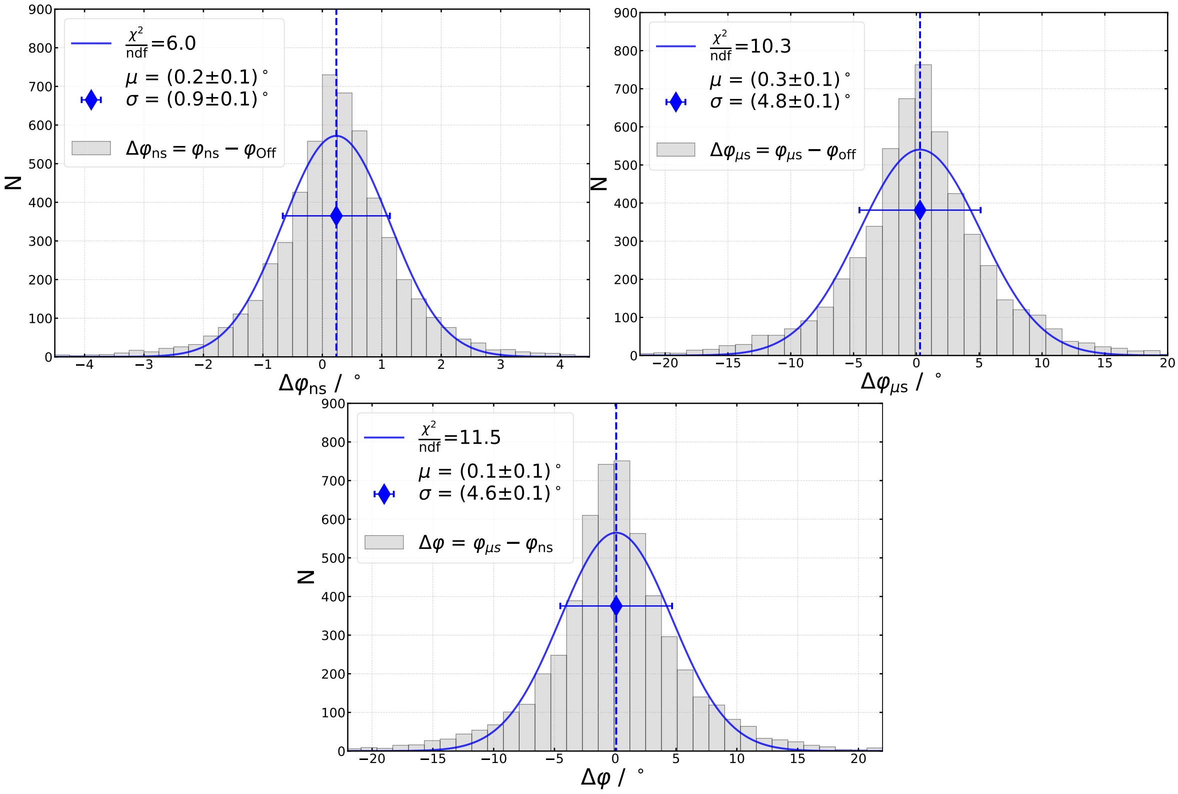

Abbildung 5.6: Dargestellt sind die Verteilungen der Winkeldifferenzen $\Delta\varphi_{ns} = \varphi_{ns} - \varphi_{off}$, $\Delta\varphi_{\mu s} = \varphi_{\mu s} - \varphi_{ns}$ und $\Delta\varphi = \varphi_{\mu s} - \varphi_{off}$. Man beachte die unterschiedlichen Skalierungen der x-Achsen. An die Histogramme ist die Gaußverteilung gefittet. Die dazugehörigen Erwartungswerte μ, die Standardabweichungen σ und reduzierten χ^2 der Verteilungen sind aufgetragen.

In Abbildung 5.6 sind die zu Abbildung 5.5 analogen Histogramme für $\Delta\varphi_{ns}$, $\Delta\varphi_{\mu s}$ und $\Delta\varphi$ dargestellt. Dem reduzierten χ^2 ist zu entnehmen, dass die Gaußverteilung dieses Mal eine weniger gute Beschreibung der Verteilungen darstellt. Genauer lassen sich nur die Maxima der Verteilungen nicht sonderlich gut anhand des Fits beschreiben. Außerdem sind alle drei

Verteilungen näherungsweise symmetrisch um 0° verteilt, was anhand der Erwartungswerte widergespiegelt wird. Die Breiten der unterschiedlichen Verteilungen verhalten sich allerdings analog zu den aus Abbildung 5.5.

Zusammenfassend wird erneut bestätigt, dass die neu entwickelte Methode zur Rekonstruktion von Ereignissen und die offline angewandte Methode relativ nah beieinander liegende Ergebnisse liefern. Eine reduzierte Zeitauflösung führt jedoch dazu, dass die Abweichungen der Ergebnisse beider Methoden stärker streuen.

5.2.2 Effekte reduzierter Zeitauflösung auf den online rekonstruierten Abstand

Nun wird untersucht, wie die reduzierte Zeitauflösung sich auf die berechneten Abstände r auswirkt. Dazu werden die obigen Vergleiche auch für r, $r_{\mu\mathrm{s}}$ und r_{off} durchgeführt. Zuerst muss jedoch der Abstand r_{off} ermittelt werden, da dieser nicht direkt aus der Offline-Analyse hervorgeht. Die Schauerrichtung $\vec{e}_{\mathrm{off}}$ ergibt sich aus den Winkeln θ_{off} und φ_{off}. Das Schauerzentrum $\vec{B}_{\mathrm{off}}$ ist direkt aus der Offline-Analyse bekannt. Zur Berechnung von $\vec{B}_{\mathrm{off}}$ wurden unter anderem die Signalstärken der SD-Stationen verwendet. Zudem wurden Stationen, die durch Rauschen getriggert wurden, erkannt und entfernt. Anschließend kann der Abstand r_{off} anhand von Gleichung 4.11 ermittelt werden.

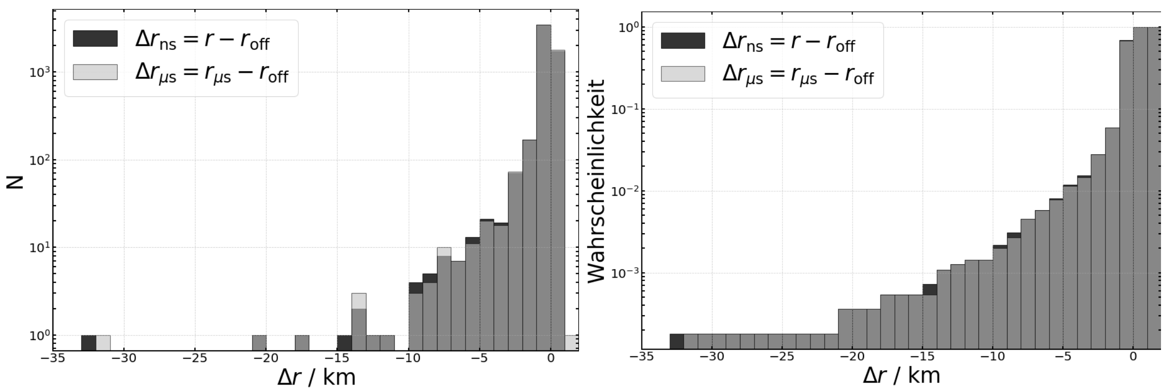

Abbildung 5.7: Links sind die Abstandsdifferenzen $\Delta r_{\mathrm{ns}} = r - r_{\mathrm{off}}$ und $\Delta r_{\mu\mathrm{s}} = r_{\mu\mathrm{s}} - r_{\mathrm{off}}$ dargestellt. Rechts sind beide Verteilungen normiert und kumulativ dargestellt. Man beachte die logarithmische Skalierung der y-Achsen.

In Abbildung 5.7 links sind die Verteilungen der Abstandsdifferenzen $\Delta r_{\mathrm{ns}} = r - r_{\mathrm{off}}$ und $\Delta r_{\mu\mathrm{s}} = r_{\mu\mathrm{s}} - r_{\mathrm{off}}$ dargestellt. Hierbei ist die logarithmische Skalierung der y-Achse zu beachten. Vergleicht man beide Histogramme miteinander, so stellt man fest, dass sie sich kaum voneinander unterscheiden. Somit hat die reduzierte Zeitauflösung nahezu keine Auswirkung auf den Abstand r.

Um die Verhältnisse der Einträge bei unterschiedlichen Abstandsdifferenzen Δr besser ablesen zu können, werden die Verteilungen Δr_{ns} und $\Delta r_{\mu\mathrm{s}}$ normiert und kumulativ dargestellt. Die dazugehörigen Histogramme sind in Abbildung 5.7 rechts dargestellt. Dieser Darstellung der Histogramme ist zu entnehmen, dass über 90 % der Einträge für die Abstanddifferenzen Δr zwischen ± 1 km liegen. Somit stimmen über 90 % der Ergebnisse der neuen Methode mit den Ergebnissen der Offline-Analyse gut überein. Nur weniger als 10 % der Ergebnisse weichen um mehr als 1 km voneinander ab. In diesen Fällen ist der Abstand Δr_{ns} bzw. $\Delta r_{\mu\mathrm{s}}$ nahezu immer negativ. Da zur Berechnung von r und $r_{\mu\mathrm{s}}$ die Größen $\vec{B}_{\mathrm{Median}}$, θ und φ verwendet wurden, muss dieses Verhalten auf mindestens eine davon zurückgeführt werden können.

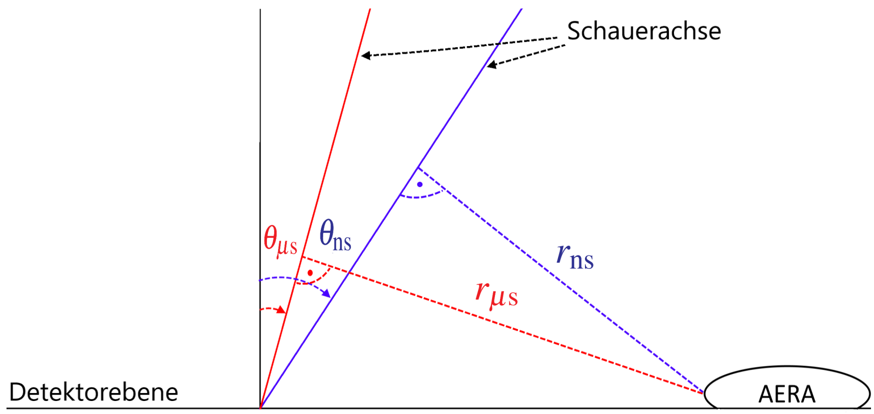

Abbildung 5.8: Skizziert sind AERA, die Detektorebene des Pierre-Auger-Observatoriums und die Normale dazu. Eine nach der Online-Rekonstruktionsmethode rekonstruierte Schauerachse ist zwei Mal eingezeichnet. Für die Rekonstruktion der Schauerachse mit dem Winkel θ_{ns} und den Abstand r_{ns} wurde eine Zeitauflösung von 1 ns verwendet. Die Schauerachse mit $\theta_{\mu\mathrm{s}}$ und $r_{\mu\mathrm{s}}$ geht aus der reduzierten Zeitauflösung von 1 μs hervor.

In Abbildung 5.5 rechts ist zu sehen, dass die Winkel $\theta_{\mu\mathrm{s}}$ ebenfalls tendenziell kleiner als θ_{off} sind. Wie in Abbildung 5.8 skizziert, sollte das jedoch lediglich dazu beitragen, dass $r_{\mu\mathrm{s}}$ größer als r_{off} ist. Somit kann der Winkel $\theta_{\mu\mathrm{s}}$ als Ursache dafür, dass $r_{\mu\mathrm{s}} < r_{\mathrm{off}}$ deutlich häufiger als $r_{\mu\mathrm{s}} > r_{\mathrm{off}}$ vorkommt, ausgeschlossen werden. Auch für φ in Abbildung 5.6 sind keine besonderen Auffälligkeiten feststellbar. Daher ist es durchaus möglich, dass dieses Verhalten von Δr auf Differenzen zwischen den nach der Online-Rekonstruktionsmethode und den offline ermittelten Schauerzentren zurückgeführt werden kann. Ein Mechanismus, der Unterschiede zwischen den online und den offline rekonstruierten Baryzentren hervorrufen kann, wird im Folgenden erläutert.

Die laterale Energieverteilung im Fußabdruck eines Luftschauers ist im Schauerzentrum maximal. Demzufolge ist die Signalstärke der getriggerten Stationen in diesem Bereich am höchsten. Mithilfe dieser Information wird das Schauerzentrum $\vec{B}_{\mathrm{off}}$ offline bestimmt. Für die Online-Rekonstruktionsmethode stehen die Signalstärken der getriggerten SD-Stationen jedoch nicht zur Verfügung. Demnach wird die Position des Schauerzentrums $\vec{B}_{\mathrm{Median}}$ durch den Median der Ortskoordinaten der getriggerten SD-Stationen angenähert.

Ein Luftschauer mit Winkel $\theta = 0^\circ$ besitzt einen kreisförmigen Fußabdruck. Das Schauerzentum und der Median der getriggerten SD-Stationen liegen dabei im Mittelpunkt des Kreises. Für einen größeren Winkel θ wird der Fußabdruck des Schauers ebenfalls größer und nimmt die Form einer Ellipse an. In Abbildung 5.9 ist unter anderem der elliptische Fußabdruck eines ausgedehnten Luftschauers mit einem großen Winkel θ dargestellt. In diesem Fall stimmen der Median $\vec{B}_{\text{Median}}$ und der Mittelpunkt M der Ellipse überein, da der Median allein durch die Anzahl und die Positionen der getriggerten SD-Stationen festgelegt ist. Das Schauerzentrum stimmt allerdings nicht mehr mit dem Mittelpunkt der Ellipse überein. Abbildung 5.9 veranschaulicht die Verschiebung von $\vec{B}_{\text{Median}}$ und dem Schauerzentrum relativ zueinander. Mit zunehmendem Winkel θ nimmt der Abstand zwischen den beiden weiter zu. Dieses Verhalten von θ und r wird in Abbildung 5.10 widergespiegelt.

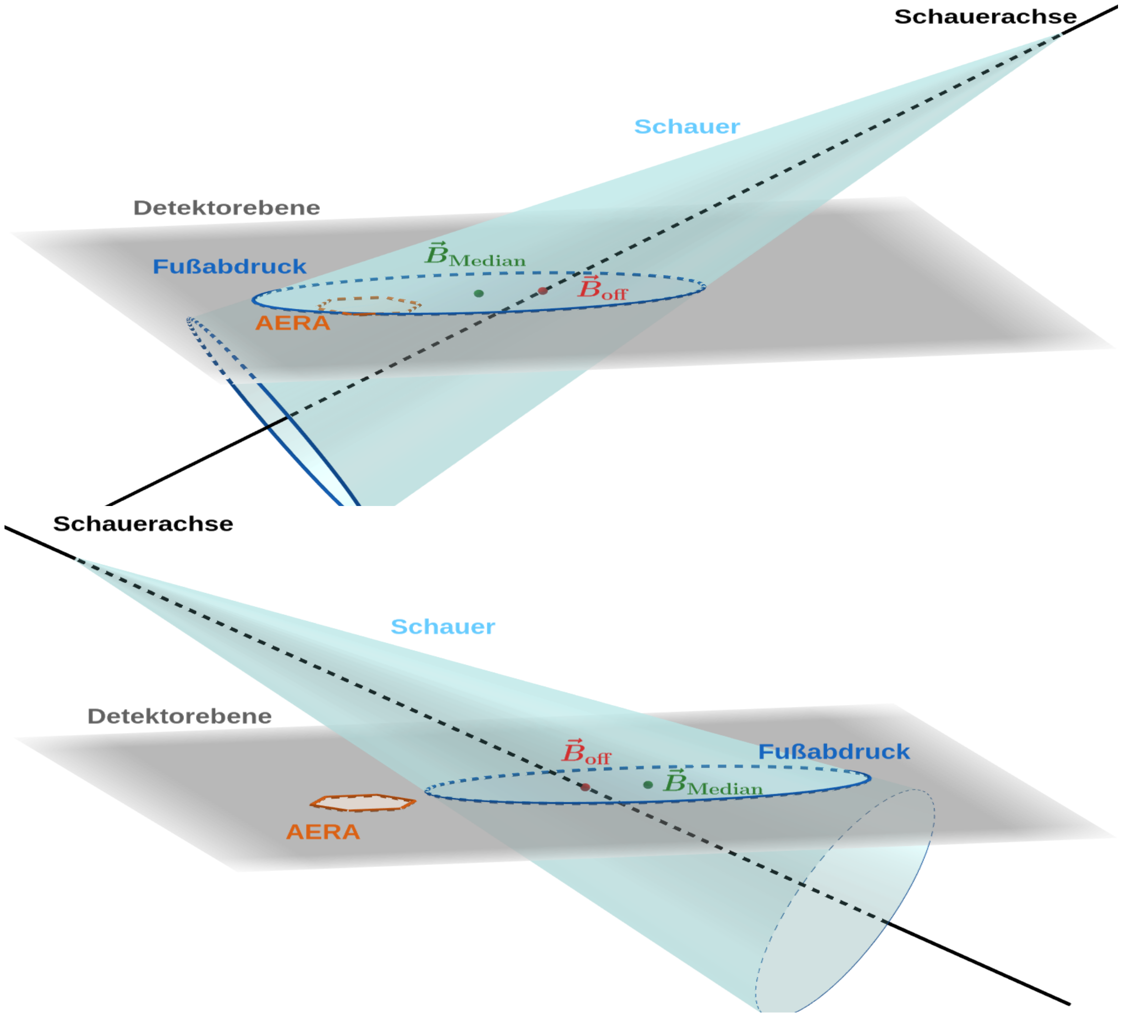

Abbildung 5.9: Skizziert sind die kegelähnliche Form eines Luftschauers und sein elliptischer Fussabdruck auf der Detektorebene. AERA und die aus der Online- und aus der Offline-Rekonstuktionsmethode hervorgehenden Schauerzentren $\vec{B}_{\text{Median}}$ und $\vec{B}_{\text{off}}$ sind ebenfalls eingezeichnet. In der oberen Darstellung breitet sich der Schauer in Richtung von AERA aus, in der unteren in die entgegengesetzte Richtung. Der Abstand zwischen AERA und $\vec{B}_{\text{off}}$ ist in beiden Skizzen gleich groß.

In Abbildung 5.10 ist die Zunahme der Abstandsdifferenzen mit größer werdendem Winkel θ bzw. $\theta_{\mu\text{s}}$ beider Verteilungen deutlich zu erkennen. Beiden Histogrammen kann entnommen werden, dass bis $\theta \approx 60^\circ$ durchgehend $|\Delta r| < 1\,\text{km}$ gilt. Sobald allerdings die 60° überschritten werden, nimmt Δr_{ns} bzw. $\Delta r_{\mu\text{s}}$ immer stärker ab. Damit ist der Mittelpunkt bzw. $\vec{B}_{\text{Median}}$ eines ellipsenförmigen Fußabdruckes für rekonstruierbare RD-Ereignisse im Allgemeinen näher an AERA als das Schauerzentrum $\vec{B}_{\text{off}}$. Das gilt genau dann, wenn die Seite der Ellipse mit der größeren Fläche, vom Schauerzentrum aus gesehen, in Richtung von AERA zeigt. Dies ist in der oberen Darstellung von Abbildung 5.9 skizziert.

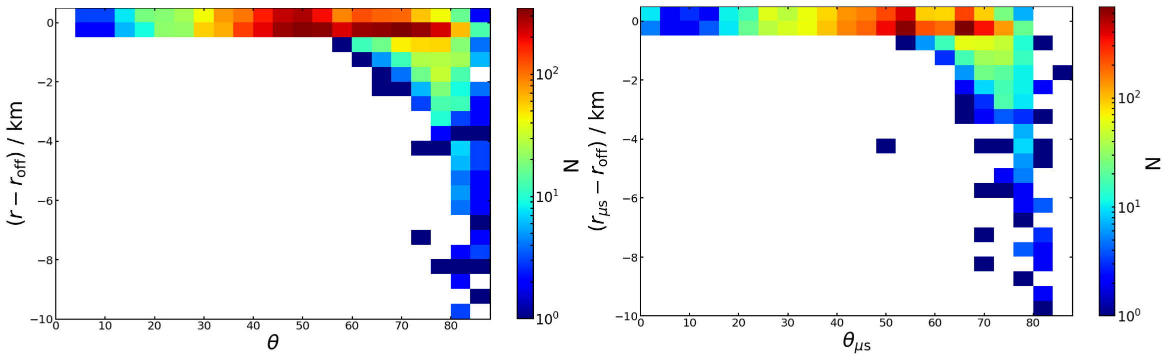

Abbildung 5.10: Links sind die Abstandsdifferenz Δr_{ns} und der Winkel θ in einem zweidimensionalen Histogramm dargestellt. Die Abstanddifferenz $\Delta r_{\mu\text{s}}$ und der Winkel $\theta_{\mu\text{s}}$ sind rechts veranschaulicht.

In der unteren Darstellung von Abbildung 5.9 ist skizziert, wie ein aus der entgegengesetzten Richtung einfallender Schauer sich verhält. Hier ist erkennbar, dass das Schauerzentrum $\vec{B}_{\text{off}}$ näher an AERA liegt als das rekonstruierte Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}}$. Bei gleich bleibendem Abstand zwischen Schauerzentrum $\vec{B}_{\text{off}}$ wird hier allerdings AERA nicht vom Schauerkegel getroffen. Dies ist auf die kleinere Ausdehnung des Fußabruckes in Richtung AERA vom Schauerzentrum aus zurückzuführen. Dadurch ergibt sich, dass es in solchen Fällen viel unwahrscheinlicher ist, dass der Fußabdruck AERA erreicht und das RD-Ereignis detektiert werden kann. Im Mittel sollte dieser Effekt also dazu führen, dass für große Winkel θ die Differenz Δr eher negativ wird.

Inwieweit dieser Effekt die Beobachtungen für Δr erklärt, bleibt in einer detaillierteren Analyse dieses Effektes zu bestimmen. Für die weitere Bestimmung und Analyse von geeigneten Trigger-Bedingungen für den externen SD-Trigger von AERA reicht die phänomenologische Beobachtung dieser Systematik aus. Da der online rekonstruierte Abstand $r_{\mu\text{s}}$ eher kleiner als r_{off} ist, sollte für eine Trigger-Bedingung wie $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ die Akzeptanz lediglich erhöht werden.

5.2.3 Konsequenzen für die Trigger-Bedingung

Bisher wurden die Effekte der reduzierten Zeitauflösung sowohl auf den Winkeln θ und φ, als auch auf den Abstand r untersucht. Nun können diese Effekte auch auf die angedachte Trigger-Bedingung $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ betrachtet werden. Dazu, werden alle Ergebnisse aus Abbildung 5.2 neu ermittelt. Die neuen Ergebnisse sind in Abbildung 5.11 zu sehen.

Abbildung 5.11 ist zu entnehmen, dass die reduzierte Zeitauflösung einige der Ergebnisse oberhalb von $3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta_{\mu\text{s}})$ verschoben hat. Somit sollte die Trigger-Bedingung angepasst werden, indem die Kurve der Trigger-Bedingung ebenfalls nach oben verschoben wird. Demzufolge wird $r < 5 \cdot R_{\text{CR}}(\theta_{\mu\text{s}})$ statt $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta_{\mu\text{s}})$ als Trigger-Bedingung festgelegt. Nun befinden sich insgesamt drei Ereignisse oberhalb der neuen Trigger-Bedingung. Eins davon ist das Ereignis B aus Abbildung 5.2. Die anderen zwei werden genauer analysiert.

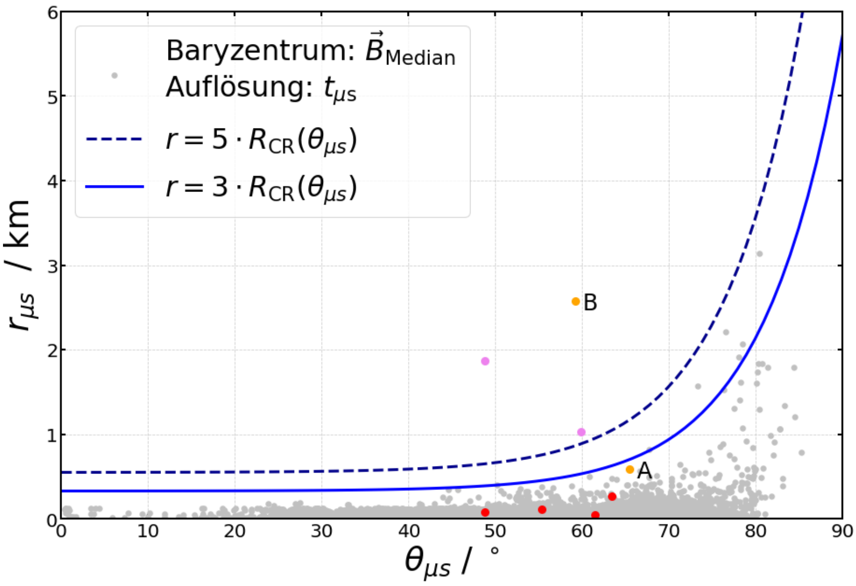

Abbildung 5.11: Aufgetragen sind der rekonstruierte Abstand $r_{\mu\mathrm{s}}$ gegen den rekonstruierten Winkel $\theta_{\mu\mathrm{s}}$ für die 5528 SD-Ereignisse. Es wurde eine Zeitauflösung von $1\,\mu$s und als Baryzentrum $\vec{B}_{\mathrm{Median}}$ verwendet. Die Kurven $r = 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ und $r = 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ sind eingezeichnet. Die in rot und orange markierten Ereignisse wurden im vorherigen Abschnitt näher Untersucht. Die violetten Punkte werden ebenfalls genauer betrachtet.

Beide Ereignisse weisen keine besonderen Auffälligkeiten auf. Die graphischen Darstellungen zur Rekonstruktion anhand der Informationen, welche dem SD-Trigger von AERA zur Verfügung stehen, sind im Anhand in Abbildung A.3 vorzufinden. Ebenfalls im Anhang in Abbildung A.4 sind die dazugehörigen offline durchgeführten SD- und RD-Rekonstruktionen veranschaulicht.

Verwendet man $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta_{\mu\mathrm{s}})$ als Trigger-Bedingung, so werden insgesamt 3 von den 5528 SD-Ereignisse nicht als RD-Ereignisse gespeichert. Unter Berücksichtigung, dass Ereignis B kein erwünschtes RD-Ereignis darstellt, ergibt sich eine Effizienz von etwa 99,96 %. Verwendet man jedoch $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta_{\mu\mathrm{s}})$ als Trigger-Bedingung, so bleibt die Effizienz mit ungefähr 99,87 % immer noch recht hoch. Somit stellt $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta_{\mu\mathrm{s}})$ eine Trigger-Bedingung dar, mit der nahezu alle rekonstruierbaren RD-Ereignisse getriggert werden.

Die in diesem Kapitel erfolgreich aufgestellte Trigger-Bedingungen für θ und r werden im nächsten Kapitel auf echte, von CDAS generierte Triggerdaten, angewandt.

6 Test der Trigger-Bedingungen

In diesem Kapitel werden 131 310 Ereignisse anhand der entwickelten Online-Rekonstruktionsmethode untersucht. Hierbei handelt es sich um Daten, welche von CDAS an die Radiodatenerfassung über einen Zeitraum von drei Wochen weitergeleitet wurden. Wie bereits erwähnt, beinhalten diese Daten nur die Ortskoordinaten und die Zeitstempel in 1 μs der SD-Stationen eines Ereignisses. Bei den zu untersuchenden SD-Ereignissen ist jedoch nicht bekannt, ob sie anhand der Offline-Rekonstruktionsmethode rekonstruierbar sind. Das gilt sowohl für die SD- als auch für die RD-Rekonstruktion.

Ungefähr 16 % aller Ereignisse werden nicht anhand der Online-Rekonstruktion rekonstruiert. Der Grund hierfür ist die Überschreitung des zulässigen Maximalbetrag der Zeitdifferenz zweier getriggerten SD-Stationen, welcher in Abschnitt 3.2 erläutert wurde. Im vorherigen Kapitel wurden nur Ereignisse untersucht, welche anhand der Offline-Analyse von Auger rekonstruierbar sind. Mit der Online-Rekonstruktionsmethode konnten 100 % davon rekonstruiert werden. Demzufolge ist davon auszugehen, dass die neue Methode in dieser Hinsicht sehr zuverlässig ist und es sich bei den 21 102 nicht rekonstruierbaren Ereignissen aus dem neuen Datensatz um Rauschen handelt. Außerdem wurden fast alle diesen Ereignisse von nur 3 oder 4 SD-Stationen getriggert, was ebenfalls dafür spricht. Die Gesamtzahl und die Anteile von rekonstruierbaren bzw. nicht rekonstruierbaren Ereignisse sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Eingetragen sind die Gesamtzahl der in diesem Kapitel zu untersuchenden Ereignisse sowie die Anzahl der davon online rekonstruierbaren und der nicht online rekonstruierbaren Ereignisse.

	Anzahl Ereignisse	Anteil an Gesamtereignissen
Gesamtzahl Ereignisse	131 310	100,00 %
rekonstruierbar	110 208	83,93 %
nicht rekonstruierbar	21 102	16,07 %

Im vorherigen Kapitel wurde eine Trigger-Bedingungen für die Abstände r und die Winkel θ bereits festgelegt. Nun wird im Folgenden nach einer Möglichkeit gesucht, eine Trigger-Bedingung für die Stationsanzahl n festzulegen. Anschließend wird untersucht, ob der neue Trigger die Anzahl der zu triggernden Ereignisse im Vergleich zum alten Trigger tatsächlich reduziert hat.

6.1 Trigger-Studien zur Stationsanzahl

Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, können für Ereignisse die von mehr als drei Stationen detektiert werden, mehrere Richtungsvektoren $\vec{e}_i$ ermittelt werden. Die Anzahl N der Vektoren kann mit Gleichung 4.5 ermittelt werden. Somit nimmt mit zunehmender Stationsanzahl n die Anzahl der Rechenschritte und damit auch der Rekonstruktionzeit deutlich zu. Da der externe SD-Trigger von AERA allerdings möglichst schnell entscheiden muss, ob ein Ereignis getriggert werden soll, muss die Rekonstruktionsdauer möglichst gering bleiben.

Demnach wird das Verhalten der Anzahl n von SD-Stationen pro rekonstruierbares SD-Ereignis genauer untersucht. Aus diesem Grund ist in dem linken Histogramm aus Abbildung 6.1 die Verteilung n für die nach der Online-Methode rekonstruierbaren SD-Ereignisse dargestellt. Rechts ist die gleiche Verteilung normiert und kumulativ veranschaulicht.

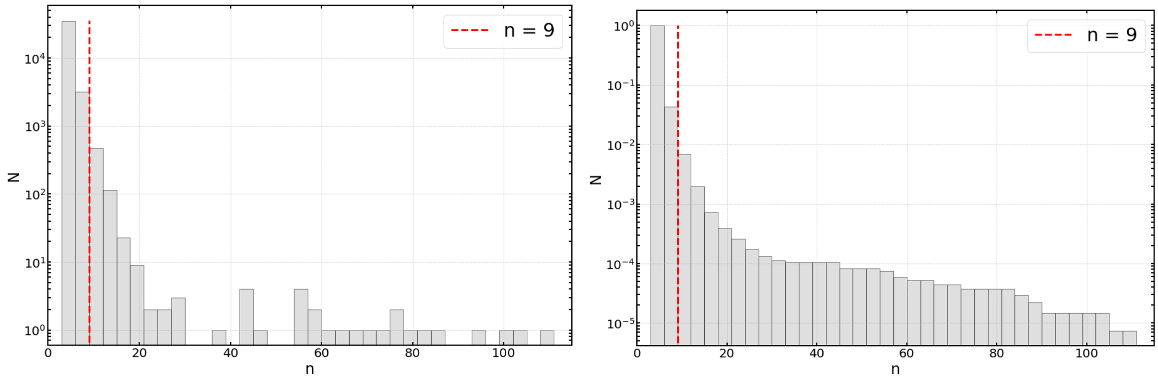

Abbildung 6.1: Links ist die Verteilung der Stationsanzahl n für die nach der Online-Methode rekonstruierbaren SD-Ereignisse dargestellt. Rechts ist die gleiche Verteilung normiert und kumulativ veranschaulicht. Die rote Linie markiert $n = 9$. Man beachte die logarithmische Skalierung der y-Achse.

Der normierten und der kumulativen Darstellung der Verteilung aus Abbildung 6.1 ist zu entnehmen, dass weniger als 1 % der Ereignisse von mehr als neun SD-Stationen getriggert werden. Somit kann dem externen SD-Trigger von AERA eine neue Trigger-Bedingung hinzugefügt werden. Wird ein Ereignis von mindestens drei oder höchstens neun SD-Stationen getriggert, so wird es auf die Trigger-Bedingung aus dem vorherigen Kapitel geprüft. Sobald ein Ereignis allerdings von mehr als neun SD-Stationen getriggert wird, wird es direkt gespeichert.

Tabelle 6.2: Aufgetragen sind die wichtigsten Ergebnisse aus den Untersuchungen der Trigger-Bedingung $n > 9$.

Ereignisse mit $n > 9$	Anzahl Ereignisse	Anteil an Gesamtereignissen
$r > 0$	610	0,46 %
$r > 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$	470	0,36 %
$r > 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$	450	0,34 %

Alle wichtigen Ergebnisse bezüglich der zusätzlichen Trigger-Bedingung mit n sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Außerdem sind in Abbildung 6.2 die Ergebnisse für r und θ aller rekonstruierbaren Ereignissen aus Tabelle 6.1 veranschaulicht. Um zu sehen, wie sich die Ereignisse mit $n > 9$ sich im Vergleich zu den Trigger-Bedingungen $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ und $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ verhalten, sind sie in der Abbildung hervorgehoben.

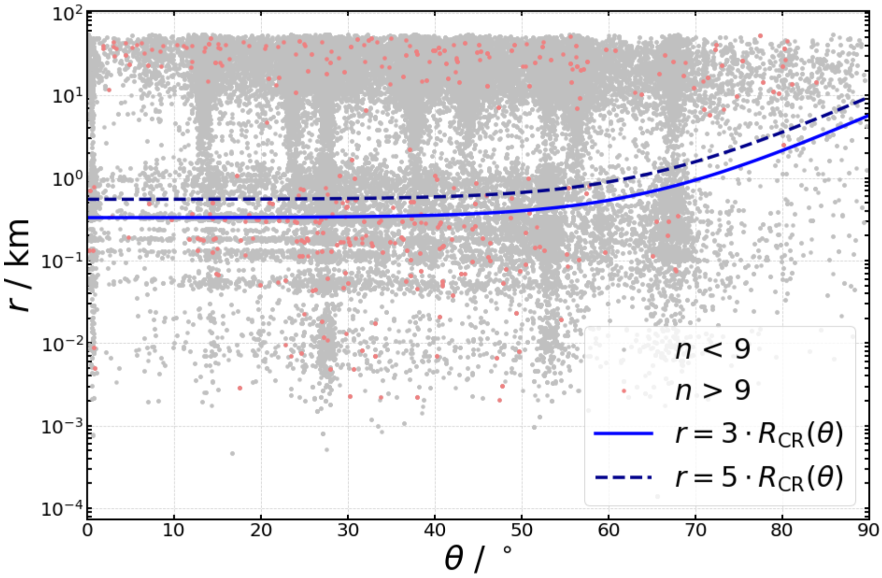

Abbildung 6.2: Dargestellt sind die Abstände r gegen die Winkel θ für alle nach der Online-Methode rekonstruierbaren SD-Ereignisse aus Tabelle 6.1. Es wurde eine Zeitauflösung von 1 μs und als Baryzentrum $\vec{B}_{\mathrm{Median}}$ verwendet. Die Kurven $r = 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ und $r = 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ sind eingezeichnet. Ereignisse mit $n > 9$ sind in rot markiert.

Es ist deutlich zu erkennen, dass nicht alle dieser Ereignisse oberhalb der Cherenkov-Kurven liegen. Das heißt, nicht alle Ereignisse, welche zu groß zum Rekonstruieren sind und demzufolge ohne weitere Überprüfung getriggert werden, sind unerwünscht. Der Anteil an Gesamtereignissen mit $n > 9$ liegt bei 0,46 %. Wählt man $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ als Trigger-Bedingung, so werden nur 0,36 % aller SD-Ereignisse als RD-Ereignisse getriggert, ohne dass sie detektierbar für AERA sind. Für $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ sinkt der prozentuale Anteil weiter auf 0,34 %.

Außerdem sind in Abbildung 6.2 einige Strukturen zu erkennen, welche Möglicherweise auf die reduzierte Zeitauflösung zurückgeführt werden können. Jedoch werden diese nicht näher Untersucht.

6.2 Vergleich der Trigger-Bedingungen

Bisher wurden die Trigger-Bedingungen auf maximale Akzeptanz von erwünschten Ereignissen optimiert. Als nächstes wird die aktuelle Trigger-Bedingung mit den beiden neuen Trigger-Bedingungen $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ und $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ verglichen. Die aktuelle Trigger-Bedingung ist dadurch gegeben, dass der Abstand z zwischen einer getriggerten SD-Station und einer AERA-Station kleiner als 5 km sein muss. Das Ziel ist, zu zeigen, dass die neuen Trigger-Bedingungen tatsächlich eine Reduzierung der zu triggernden Ereignisse ermöglichen. Dafür werden alle drei Trigger-Bedingungen auf den kompletten Datensatz angewendet.

Tabelle 6.3: Aufgetragen sind die wichtigsten Ergebnisse aus den Untersuchungen der Trigger-Bedingungen $z < 5\,\text{km}$, $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ und $r < 5 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$.

Trigger-Bedingung	Anzahl Ereignisse	Anteil an Gesamtereignissen
$z < 5\,\text{km}$	47 592	36,24 %
$r < 5 \cdot R_{CR}(\theta)$	27 850	21,21 %
$r < 3 \cdot R_{CR}(\theta)$	23 808	18,13 %

Für die Trigger-Bedingung $z < 5\,\text{km}$ ist offensichtlich keine Rekonstruktion der Schauerachse notwendig. Da hier jedoch keine Rekonstruktion der Schauerrichtung durchgeführt wird, ist ein Ausschließen der nicht rekonstruierbaren Ereignisse nicht möglich. Das führt dazu, dass unter anderem viele Ereignisse ohne messbare Radiosignale getriggert werden. Da aber für die Überprüfung der Trigger-Bedingungen $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ und $r < 5 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ die Rekonstruktion einer Schauerrichtung unvermeidbar ist, wird an dieser Stelle viel Untergrund aussortiert. Das macht sich an den Ergebnissen, zu denen die drei Trigger-Bedingungen führen, bemerkbar. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Anhand der Tabelle ist zu erkennen, dass die Anzahl der Ereignisse für $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ sich im Vergleich zu $z < 5\,\text{km}$ nahezu halbiert hat.

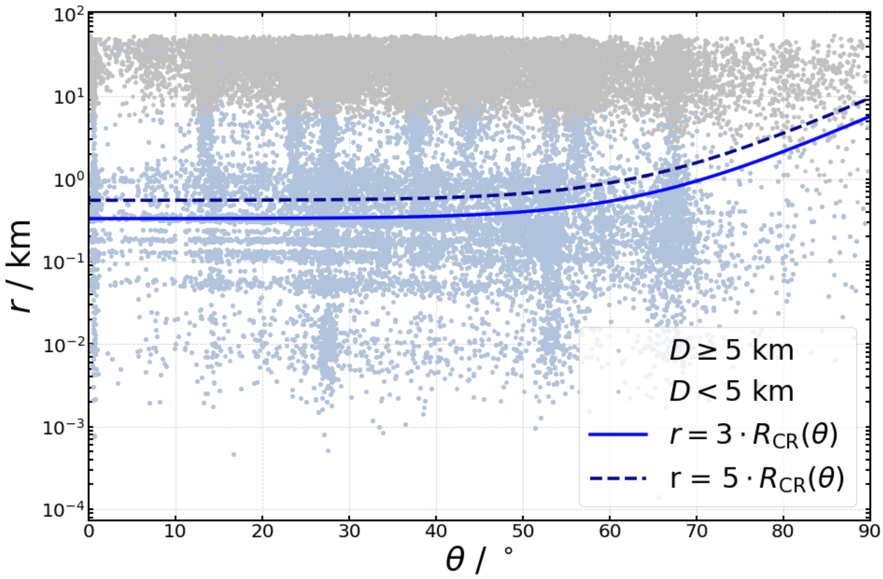

Abbildung 6.3: Aufgetragen sind der Abstand r gegen den Winkel θ für alle nach der Online-Methode rekonstruierbaren SD-Ereignisse aus Tabelle 6.1. Es wurde eine Zeitauflösung von $1\,\mu$s und als Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}}$ verwendet. Die Kurven $r = 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ und $r = 5 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ sind eingezeichnet. Ereignisse mit $z < 5\,\text{km}$ sind in hellblau markiert.

In Abbildung 6.3 sind alle anhand der neuen Online-Rekonstruktionsmethode rekonstruierten Ergebnisse für r und θ erneut veranschaulicht. Die Ergebnisse der Ereignisse, welche mit der Trigger-Bedingung $z < 5\,\text{km}$ getriggert werden, sind hervorgehoben. Außerdem sind die Trigger-Bedingungen $r < 3 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ und $r < 5 \cdot R_{\text{CR}}(\theta)$ eingezeichnet, um zu veranschaulichen, dass die Menge der getriggerten Ereignisse tatsächlich durch sie reduziert wird.

Die aktuelle Trigger-Bedingung triggert auch Ereignisse, deren Ergebnisse für den Abstand r und den Winkel θ deutlich über der Cherenkov-Kurve liegen. Demzufolge sind diese Ereignisse für AERA vermutlich nicht sichtbar. Zudem gibt es für $\theta > 80^\circ$ Ereignisse, die vom aktuellen Trigger nicht erkannt werden, obwohl sie für AERA detektierbar wären. Verwendet man die Trigger-Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$, so werden 62 Ereignisse getriggert, welche mit der Trigger-Bedingung $z < 5\,\mathrm{km}$ nicht getriggert werden können. Für $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ ergeben sich hingegen 105 Ereignisse.

Im vorherigen Kapitel wurde für die Trigger-Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ eine Akzeptanz von 99,87 % ermittelt. Für die Trigger-Bedingung $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$, war diese mit 99,96 % etwas geringer. Somit ergibt sich, dass die Trigger-Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ etwas weniger für AERA detektierbare RD-Ereignisse triggert als $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$. Allerdings ergeben die Ergebnisse aus Tabelle 6.3, dass für die Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ die totale Datenrate um 49,98 % reduziert werden kann. Für die Bedingung $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ beläuft sich diese Reduktion auf nur 41,48 %.

Unter Abwägung beider Faktoren wird schnell klar, dass die deutliche Verringerung der Datenrate die minimale Effizienzabnahme überwiegt. Somit kann abschließend festgestellt werden, dass die Trigger-Bedingung „$r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ oder $n > 9$“ den aussichtsreichsten Kandidaten für einen optimierten externen SD-Trigger von AERA darstellt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Thesis war, den externen SD-Trigger von AERA zu verbessern. Dazu sollte die Akzeptanz für Ereignisse mit verwendbarem Radiosignal erhöht und das Triggern von Rauschen möglichst reduziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde als erstes eine neue Methode zur Rekonstruktion der Schauerachse entwickelt. Hierbei wurde der Schwerpunkt auf die Geschwindigkeit und Robustheit der Rekonstruktion gelegt. Außerdem muss sie auf Trigger-Ebene stattfinden und verfügt demzufolge nur über die Ortskoordinaten und Zeitstempel der SD-Stationen eines Ereignisses. Die neue Rekonstruktionsmethode wird als Online-Rekonstruktionsmethode bezeichnet.

Zur Entwicklung der Online-Rekonstruktionsmethode wurden Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter verwendet. Als erstes wurden die Richtungsvektoren $\vec{e}_i$ für verschiedene drei-Stationen-Kombinationen eines Luftschauers anhand eines Gleichungssystems ermittelt. Für die Berechnungen des Zenitwinkels θ_{Median} und des Azimutwinkels $\varphi_{\mathrm{Median}}$ des Schauers, wurde, nach Vergleichen mit Alternativmethoden, der Median der Vektoren $\vec{e}_i$ eines Luftschauers verwendet. Um zu überprüfen, ob die aus der Online-Rekonstruktionsmethode und die aus der Offline-Analyse von Auger hervorgehenden Winkel gut übereinstimmen, wurden die Beispielereignisse verglichen. Außerdem wurde die Schauerrichtung der Offline-Rekonstruktionsmethode $\vec{e}_{\mathrm{off}}$ der Ereignisse mit den nach der neuen Methode ermittelten Richtungvektoren $\vec{e}_i$ verglichen. Dazu wurden alle Öffnungswinkel γ zwischen $\vec{e}_{\mathrm{off}}$ und $\vec{e}_i$ berechnet. Alle Öffnungswinkel γ lagen deutlich unter 10°. Somit liefernt die neu entwickelte Methode und die Offline-Rekonstruktionsmethode Ergebnisse, die sehr nah beieinander liegen. Für die Ermittlung des Schauerzentrums $\vec{B}$ wurde das gewichtete Mittel der Ortsvektorkoordinaten verwendet. Mithilfe des Schauerzentrums $\vec{B}$ und der Schauerrichtung $\vec{e}_{\mathrm{Median}}$ konnte die Schauerachse ermittelt werden. Anschließend wurde der kürzeste Abstand r zwischen der Schauerachse eines Luftschauer und der nächsten AERA-Station ermittelt.

Zur Aufstellung geeigneter Trigger-Bedingungen wurden 5528 rekonstruierbare SD- und RD-Ereignisse anhand der neuen Methode analysiert. Ziel war es, möglichst viele dieser Ereignisse als RD-Ereignisse zu triggern. Bei der Analyse wurde festgestellt, dass der Median $\vec{B}_{Median}$ der Ortskoordinaten eines Ereignisses sich zur Beschreibung des Schauerzentrums deutlich besser als ihr Mittelwert eignet.

Die Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$, wobei $R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ den Cherenkov-Radius darstellt, konnte als eine mögliche Trigger-Bedingungen identifiziert werden. Um Effekte einer reduzierten Zeitauflösung von $1\,\mu$s anstelle von 1 ns im Trigger zu kompensieren, wurde die Bedingung $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ ebenfalls untersucht. Für letztere Trigger-Bedingung ergab sich eine Effizienz von 99,96 %, für erstere eine etwas geringere Effizienz von 99,87 %.

Beide Triggerbedingungen wurden anhand von realen Trigger-Daten analysiert, welche von CDAS an die Radiodatenerfassung weitergeleitet wurden. Unter Berücksichtigung der limitierten Rechenzeit im Trigger wurden beide Trigger-Bedingungen ergänzt, sodass Ereignisse mit 9 oder mehr getriggerten SD-Stationen automatisch getriggert werden. Die Online-Rekonstruktionsmethode lieferte, dass 16,07 % der Ereignissen aus den Trigger-Daten nicht rekonstruierbar waren. Auf die rekonstruierbaren Ereignisse wurden die beiden genannten Trigger-Bedingungen angewandt. Die aktuelle Trigger-Bedingung des externen SD-Triggers von AERA, $z < 5\,\mathrm{km}$, wurde ebenfalls angewandt. Die getriggerten Ereignisse wurden für alle drei Trigger-Bedingungen miteinander verglichen. Es ergab sich, dass die Bedingung $r < 5 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ die Datenrate um 41,48 % im Vergleich zum aktuellen Trigger reduzieren konnte. Die Bedingung $r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ hingegen erreichte eine Reduktion der Datenrate von 49,98 %. Zudem wurden für beide Bedingungen Ereignisse mit höchstwahrscheinlich verwendbarem Radiosignal gespeichert, welche vom alten Trigger verworfen worden wären. Somit ließ sich feststellen, dass die Bedingung „$r < 3 \cdot R_{\mathrm{CR}}(\theta)$ oder $n > 9$“ die als Ziel gesetzten Vorgaben am ehesten erfüllt.

Eine mögliche Fortsetzung dieser Arbeit besteht darin, die obige, finale Trigger-Bedingung zu ergänzen, sodass die Datenrate weiter reduziert wird. Ein erstrebenswertes Ziel wäre die Reduktion auf 10 % der aktuellen Datenrate. Dazu könnten unter Umständen weitere Korrelationen zwischen den einzelnen Rekonstruktionsparametern θ, φ und r ausgenutzt werden. Ferner ist eine genaue Studie der nicht rekonstruierbaren Ereignisse aus dem SD-Trigger sinnvoll. Es gilt zu beantworten, ob diese Ereignisse tatsächlich durch Rauschen entstehen oder ob ein Anteil dieser Ereignisse durch Luftschauer mit verwendbarem Radiosignal erzeugt werden. Dazu ist allerdings eine umfangreiche Offline-Analyse von mehreren solcher Ereignisse notwendig. Schließlich kann auch das in Abschnitt 5.2.2 besprochene Phänomen von systematisch kleineren Abständen r in der Online-Rekonstruktionsmethode als in der Offline-Rekonstruktion für rekonstruierbare SD- und RD-Ereignisse näher analysiert werden. Insbesondere kann quantifiziert werden, inwieweit der Effekt der verschobene Baryzentren dafür verantwortlich ist.

A Anhang

Tabelle A.1: Dargestellt sind die IDs, die Winkel θ_{off} und φ_{off} zusammen mit ihren Unsicherheiten $\Delta\theta$ und $\Delta\varphi$ der 15 Beispielereignisse aus dem öffentlichen Ereignis-Betrachter des Pierre-Auger-Observatoriums, welche in Kapitel 4 verwendet werden. Zudem sind die Korrelationskoeffizienten von $d\theta$ und $d\varphi$ dargestellt. Für die Ereignisse, zu denen keine Korrelationskoeffizienten eingetragen sind, wurden nur jeweils drei Stationen getriggert. Somit kann nur ein Wert für θ bzw. φ rekonstruiert werden und Berechnungen von Varianzen und Kovarianzen sind nicht möglich.

ID	$\theta \pm \Delta\theta$ / °	$\varphi \pm \Delta\varphi$ / °	COR($d\theta$,$d\varphi$)
000001234800	43.3 ± 0.1	-27.3 ± 0.2	-0.09
000001673300	32.3 ± 0.2	-111.8 ± 0.4	-0.04
000004128900	54.5 ± 0.1	20.9 ± 0.2	0.03
000005285100	34.7 ± 4.0	-28.9 ± 3.2	-
000010485600	40.2 ± 0.1	-139.2 ± 0.2	0.09
000012038000	43.9 ± 3.8	-40.4 ± 4.5	-
000012058500	43.7 ± 1.9	-27.4 ± 1.9	-
000032112000	34.5 ± 0.2	-27.3 ± 0.4	0.10
000033441600	27.8 ± 1.1	-176.7 ± 4.4	-
000034366400	42.8 ± 0.8	-11.7 ± 1.3	0.08
000037056200	52.8 ± 0.1	-23.4 ± 0.2	-0.07
000046851100	51.4 ± 0.1	95.9 ± 0.2	0.02
000050072100	38.0 ± 0.2	-120.4 ± 0.3	-0.05
000050074500	18.5 ± 1.9	-16.0 ± 5.6	-
000050206100	41.7 ± 0.1	145.3 ± 0.2	0.04

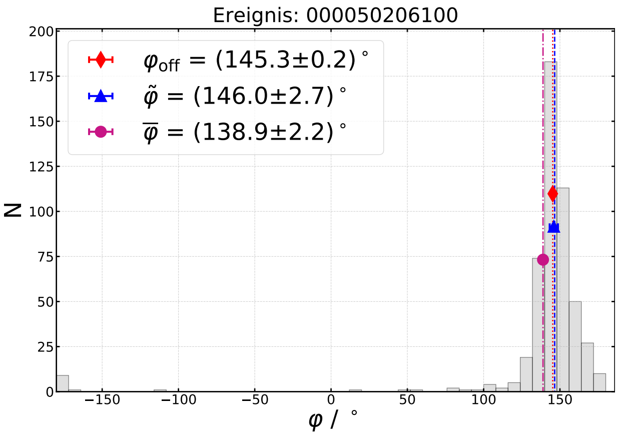

Abbildung A.1: Dargestellt ist die Verteilung des Winkels φ für das Ereignis 000050206100 aus Tabelle A.1. Der x-Achse kann der Winkel und der y-Achse die Anzahl N der Winkel φ entnommen werden. Eingezeichnet sind der Winkel φ_{off}, der Mittelwert $\overline{\varphi}$ und der aus $\vec{e}_{\text{Median}}$ hervorgehende Winkel $\tilde{\varphi}$.

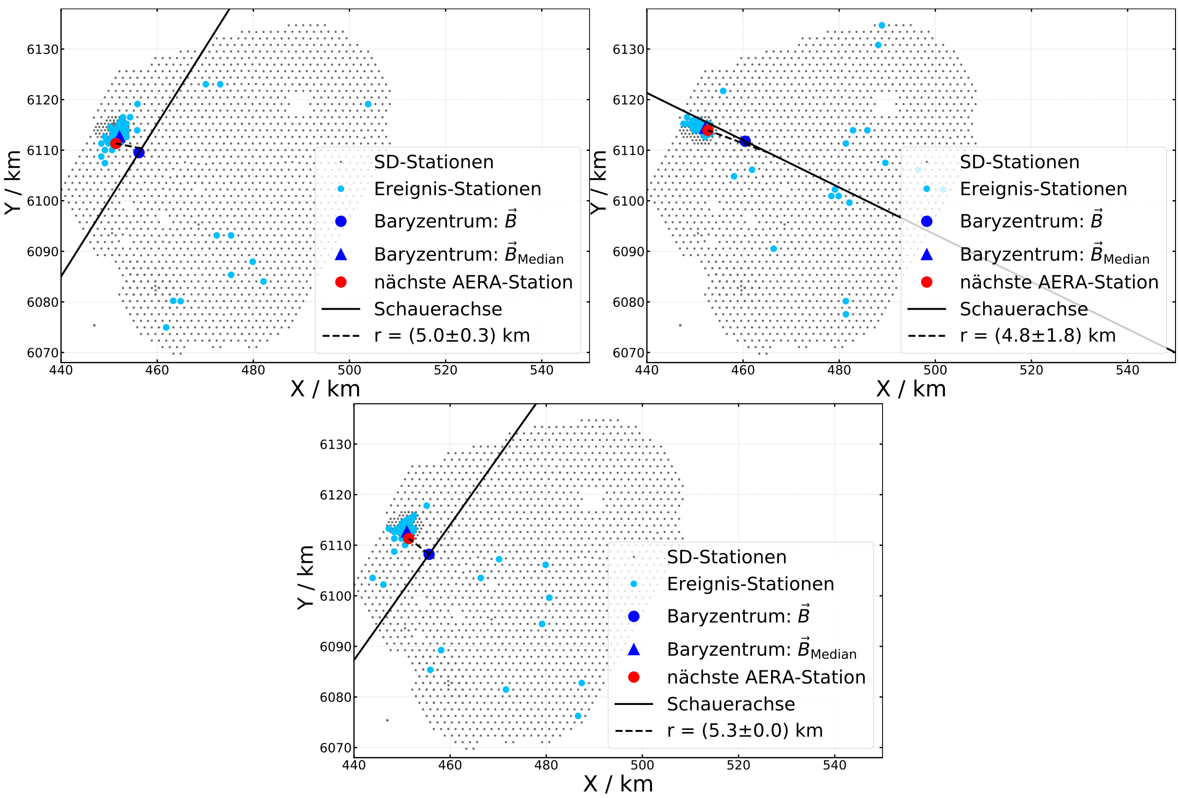

Abbildung A.2: Dargestellt sind drei der in Abbildung 5.1 links in rot markierten Ereignisse. Die SD-Stationen des Pierre-Auger-Observatoriums sind in Form von grauen Punkten markiert. Die dunkelblauen Markierungen stellen die Baryzentren $\vec{B}_{\text{Mittel}}$ und $\vec{B}_{\text{Median}}$ dar. Der rote Punkt, markiert die an der Schauerachse am nächsten liegende AERA-Station. Die Schauerachse ist als eine durchgezogene Linie dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert den kleinsten Abstand r zwischen ihr und der nächsten AERA-Station. Es sind die y- gegen die x-Koordinaten der Stationen aufgetragen.

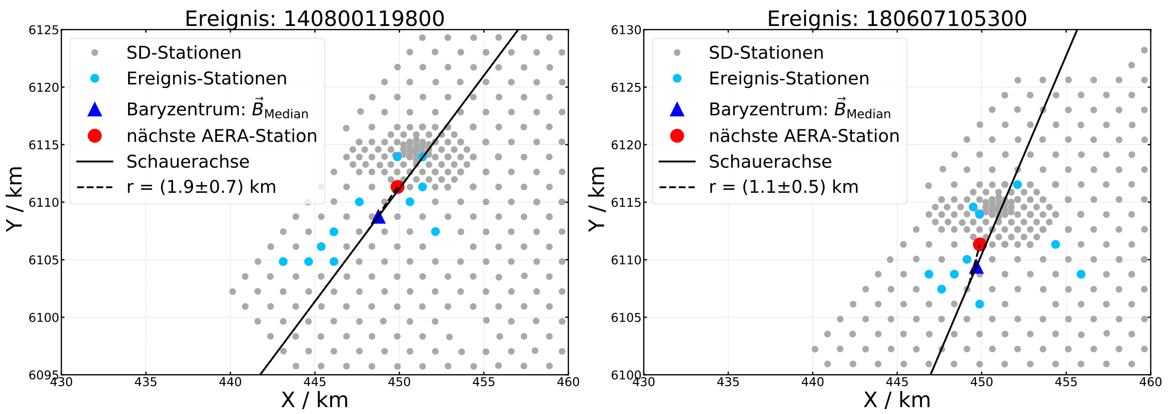

Abbildung A.3: Die in Abbildung 5.2 in violett markierten Ereignisse, sind analog zu Abbildung 4.10 dargestellt. Das Baryzentrum $\vec{B}_{\text{Median}} = (\tilde{d_x}, \tilde{d_y}, \tilde{d_z})$ ist in blau markiert.

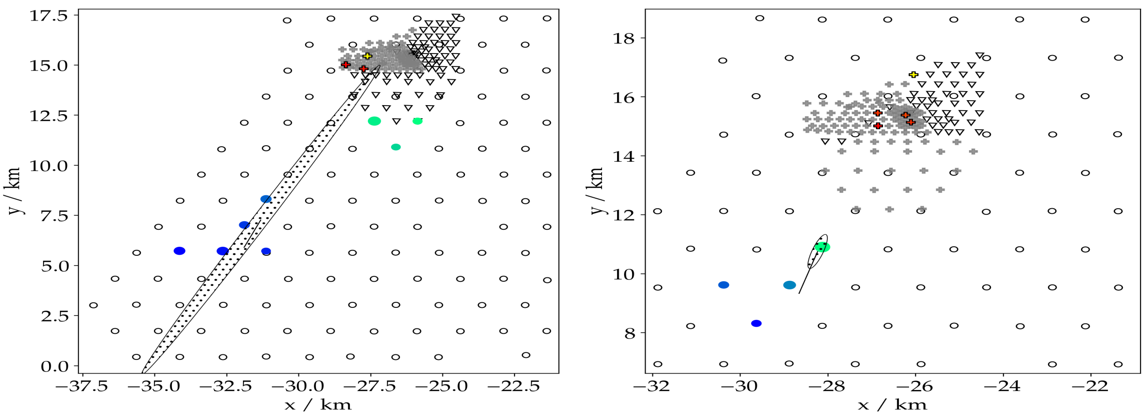

Abbildung A.4: Links ist das Ereignis 140800119800 und rechts das Ereignis 180607105300 dargestellt. Beide Abbildungen sind analog zu Abbildung 5.4 aufgebaut [3].

Literaturverzeichnis

[1] T. Schmidt. “Untersuchung der Lateralverteilung ausgedehnter Luftschauer anhand von Hybrid- und Oberflächendetektor-Daten des Pierre-Auger-Observatoriums”. 51.53.01; LK 02; Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7231 (Juni 2006) Diplomarbeit, Universität Karlsruhe 2006. Magisterarb. 2006. DOI: 10.5445/IR/200065287.

[2] Tim Huege. “Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era”. In: *Physics Reports* 620 (März 2016), S. 1–52. ISSN: 0370-1573. DOI: 10.1016/j.physrep.2016.02.001. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.02.001.

[3] Marvin Gottowik. Thesis in Vorbereitung. Diss. Bergische Universität Wuppertal, 2020.

[4] Felix Schlüter. private communication.

[5] Dariusz Góra. “The Pierre Auger Observatory: Review of Latest Results and Perspectives”. In: *Universe* 4.11 (Nov. 2018), S. 128. ISSN: 2218-1997. DOI: 10.3390/universe4110128. URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe%22=4110128.

[6] Alexander Aab u. a. “The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory”. In: *Nucl. Instrum. Meth. A* 798 (2015), S. 172–213. DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.058. arXiv: 1502.01323 [astro-ph.IM].

[7] A. Aab u. a. “Azimuthal asymmetry in the risetime of the surface detector signals of the Pierre Auger Observatory”. In: *Physical Review D* 93.7 (Apr. 2016). ISSN: 2470-0029. DOI: 10.1103/physrevd.93.072006. URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.072006.

[8] Alexander Aab u. a. “Observation of inclined EeV air showers with the radio detector of the Pierre Auger Observatory”. In: *JCAP* 10 (2018), S. 026. DOI: 10.1088/1475-7516/2018/10/026. arXiv: 1806.05386 [astro-ph.IM].

[9] “Öffentlicher Ereignis-Betrachter des Pierre-Auger-Observatoriums”. In: (). URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.02.001.

[10] D. Williams. *Weighing the Odds. Cambridge University Press*. 2001. ISBN: 052100618X.

[11] S. Rao Jammalamadaka und SenGupta. *Topics in Circular Statistics*. 2001. ISBN: 981-02-3778-2.

[12] Alfred Schulze Edgar Dietrich. *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. Carl Hanser Verlag, 2009. ISBN: 978-3-446-41525-6.

[13] T. Ullrich und Z. Xu. “Treatment of Errors in Efficiency Calculations”. In: (2008). URL: http://th-www.if.uj.edu.pl/~erichter/dydaktyka/Dydaktyka2011/LAB-2011/0701199v1.pdf.

[14] Pont Bjarni. Thesis in Vorbereitung. Diss. Radboud University Nijmegen, Netherlands, 2020.