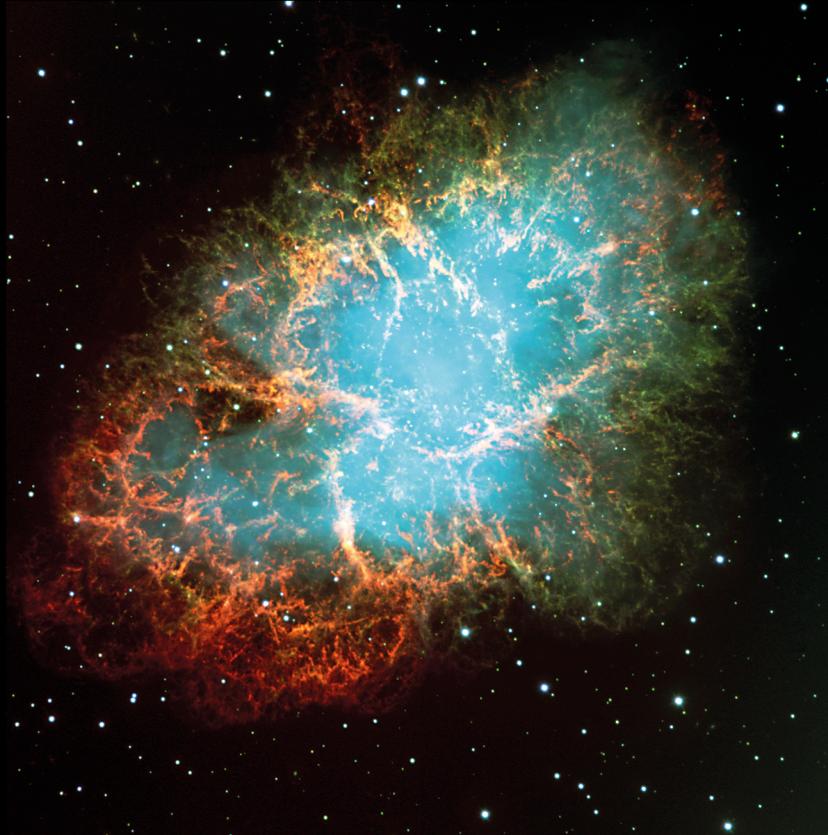


SYSTEMATISCHE UNTERSUCHUNGEN
ZUM POINTING-VERHALTEN
DES H.E.S. II TELESKOP-ARRAYS



BACHELORARBEIT AUS DER PHYSIK

VORGELEGT VON

DOMENICO TIZIANI

02.08.2013

FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG



BETREUER: PROF. DR. CHRISTOPHER VAN ELDIK

ZWEITKORREKTOR: PROF. DR. ULI KATZ

Systematische Untersuchungen zum Pointing-Verhalten des H.E.S.S. II Teleskop-Arrays

Domenico Tiziani

02.08.2013

Das Titelbild zeigt eine Aufnahme des Krebsnebels in Falschfarben, der ersten entdeckten Quelle hochenergetischer Gamma-Strahlung. Bildnachweis: ESO

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Kosmische Strahlung	1
1.2. Kosmische Gammastrahlung	1
1.3. Detektion kosmischer Gammastrahlung	2
1.4. Schauerbildung in der Erdatmosphäre	3
1.5. Cherenkov-Strahlung	4
1.6. Ziel der Arbeit	5
2. H.E.S.S.	6
2.1. Aufbau und Beobachtung	6
2.2. Koordinatensysteme	7
2.3. Triggersystem	8
2.4. Hillas-Analyse und Richtungsrekonstruktion	9
2.5. Pointing	10
3. Simulation	12
3.1. Konzept der Simulation	12
3.2. Eingabe der Simulationsparameter	13
3.3. Erzeugung der Schauer	14
3.4. Teleskope	14
3.5. Schauerdetektion	15
3.5.1. Geometrische Detektion	15
3.5.2. Lookup-Tabellen zur Detektionswahrscheinlichkeit	15
3.5.3. Detektionswahrscheinlichkeiten in der Simulation	18
3.5.4. Lookup-Tabellen für die Bildhelligkeit	18
3.5.5. Simulation von Bildhelligkeiten	20
3.6. Richtungsrekonstruktion	21
3.7. Speichern der Schauerparameter	21
4. Ergebnisse	22
4.1. Qualität der Simulation	22
4.2. Kameraverschiebungen	23
4.3. Verdrehung von Kameras	25
5. Zusammenfassung und Ausblick	29

A. Anhang	31
A.1. Projektionen der Schauerverteilungen auf die Deklinationsachse	31

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Das Potenzspektrum der kosmischen Strahlung	2
1.2.	Schematische Darstellung eines einfachen Schauermodells nach Heitler	3
1.3.	Schematische Darstellung des Detektionsmechanismus von Cherenkov-Teleskopen	4
2.1.	Foto des H.E.S.S.-Teleskop-Arrays	6
2.2.	Bilder eines Luftschauers in den Kameras von vier Teleskopen, Projektion der Schauerbilder in eine Kameraebene und Konstruktion des Schnittpunktes der Hauptachsen	9
2.3.	Darstellung der Hillas-Parameter	10
3.1.	(a): Auftreffpunkte von 10.000 mit r_{\max} gewürfelten Schauern im Ground-System bei einem Zenit-Winkel von 40° und einem Azimut-Winkel von 180° (Süden) (b): Energiespektrum von 10^6 simulierten Schauern mit $\gamma = 2$	15
3.2.	Verteilung der detektierten Schauer im TiltedSystem an denen CT1 beteiligt ist	16
3.3.	Verschiebung des Mittelwerts der Verteilung von CT1 detekterter Schauer im TiltedSystem	17
3.4.	Verteilungen der von CT1 und CT5 detektierten Schauer in Abhängigkeit von Energie und Abstand zum jeweiligen Mittelwert	18
3.5.	Detektionswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Energie und Abstand zum jeweiligen Mittelwert. (a): für CT1, (b): für CT5	19
3.6.	Bildhelligkeiten im TiltedSystem	19
3.7.	Durchschnittliche Bildhelligkeiten in Abhängigkeit von Energie und Abstand zu (a) CT1 und (b) CT5	20
4.1.	Multiplizitätsverteilung bei verschiedenen Simulationsmethoden	23
4.2.	Rekonstruktion einer simulierten Quelle an der Position des Aktiven Galaxiekerns PKS 2155–304 ohne Manipulation am Pointing	24
4.3.	Himmelkarten der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverschiebung	25
4.4.	Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverschiebung um $100''$, projiziert auf die Ra-Achse	26
4.5.	Himmelkarten der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kamerarotation	27
4.6.	Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverdrehung um 5° , projiziert auf die Ra-Achse	28

A.1. Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverschiebung um $100''$, projiziert auf die Dec-Achse	31
A.2. Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverdrehung um 5° , projiziert auf die Dec-Achse	32

Tabellenverzeichnis

3.1. Feste Parameter, die für alle Simulationen im Code enthalten sind	14
4.1. Standardabweichungen und Verschiebungen der Schwerpunkte der Verteilungen der rekonstruierten Schauerrichtungen bei unterschiedlichen Simulationen	26

Zusammenfassung

Das H.E.S.S.-Teleskop-Array ist ein Experiment zur Messung kosmischer Gammastrahlung, das bereits über 80 neue Quellen hochenergetischer Strahlung entdeckt hat. Wie bei allen Messinstrumenten ist es auch bei H.E.S.S. von großer Bedeutung, systematische Unsicherheiten genau zu kennen. Diese werden in der Regel mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen untersucht. Mit den so gewonnenen Informationen werden Pointingmodelle entwickelt, die es ermöglichen, die Ankunftsrichtung der Strahlung bis auf wenige Bogensekunden genau zu berechnen. In dieser Arbeit wird eine Simulation entwickelt, mit der es möglich ist, die Auswirkungen von Fehlkorrekturen im Pointingmodell auf einfache Weise zu untersuchen. Insbesondere werden hier die Einflüsse des neuen Teleskops des H.E.S.S. II Arrays, welches eine größere Spiegelfläche aufweist, näher betrachtet. Erste Ergebnisse zeigen, dass die beobachtete Quellgröße und Quellposition durch Fehlkorrekturen am großen Teleskop stärker beeinflusst werden, als durch Manipulationen an den kleineren Teleskopen des H.E.S.S. I Arrays.

Abstract

The H.E.S.S. telescopes are an experiment for measuring cosmic gamma-rays. They have already discovered more than 80 new sources of high energetic radiation. As in every measuring instrument it is very important to understand systematic uncertainties as good as possible. As a rule these are examined by analysing Monte Carlo simulations. With this information it is possible to develop pointing models that enable one to reconstruct the direction of the source with errors of a few arcseconds. In this thesis a simulation is developed in order to examine miss-corrections in the pointing model in an easy way. In particular it aims for understanding the influences of the new telescope of the H.E.S.S. II array with larger mirror size better. First results show that miss-corrections on the larger telescope have a bigger impact on the determination of source size and source position than manipulations on the smaller telescopes of the H.E.S.S. I array.

1. Einführung

Die Erforschung des Himmels reicht weit in der Geschichte der Zivilisation zurück. Schon immer übte der Nachthimmel auf die Menschen eine besondere Faszination aus. Ob nun aus kultischen Beweggründen, praktischen Interessen wie der Bestimmung der Jahreszeiten oder der geographischen Position, oder reinem wissenschaftlichen Interesse, wurden schon lange Aufzeichnungen des Himmels und der Gestirne gemacht. Seit der Erfindung des Teleskops im 17. Jahrhundert wurden die Geräte für astronomische Beobachtungen immer ausgefeilter. Man begann, nicht nur im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung zu messen, sondern auch Radiowellen, Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung.

1.1. Kosmische Strahlung

Eine wichtige Erkenntnis im Bereich der Astronomie war die Entdeckung der kosmischen Strahlung 1912 durch Victor Hess. Dabei handelt es sich um geladene Teilchen wie Protonen, Leptonen und schwere Kerne, die in kosmischen Prozessen auf hohe Energien beschleunigt werden (Klapdor-Kleingrothaus und Zuber, 1997). Quellen kosmischer Strahlung sind z. B. Aktive Galaxienkerne, Pulsarwindnebel und Supernovaüberreste. Der Teilchenfluss folgt dabei einem Potenzgesetz, sodass er bei hohen Energien stark abnimmt (s. Abb 1.1). Das Spektrum lässt sich gut beschreiben durch:

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

Dabei gilt bis etwa 10^{15} eV: $\gamma \approx 2,7$. Danach wird das Spektrum mit $\gamma \approx 3$ etwas steiler bis es ab ca. 10^{18} eV wieder flacher wird. Diese Knicke werden „Knie“ bzw. „Knöchel“ genannt. Die örtliche Verteilung der kosmischen Strahlung ist dabei im Wesentlichen isotrop, da die elektrisch geladenen Teilchen durch interstellare Magnetfelder stark abgelenkt werden. Aus ihrer Ankunftsrichtung auf der Erde können also keine Rückschlüsse auf ihren Entstehungsort gezogen werden.

1.2. Kosmische Gammastrahlung

Obwohl die Gammaastronomie Quellen kosmischer Strahlung untersucht, wird hier nicht direkt die kosmische Strahlung gemessen. Vielmehr nutzt man den Effekt, dass Teilchen kosmischer Strahlung nahe an ihrem Entstehungsort mit der Materie der Umgebung wechselwirken und so hochenergetische γ -Quanten entstehen. Die meisten Photonen entstehen dabei durch den Zerfall neutraler Pionen ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$). Andere Entstehungsmechanismen sind Bremsstrahlung, inverse Comptonstreuung und Synchrotronstrahlung.

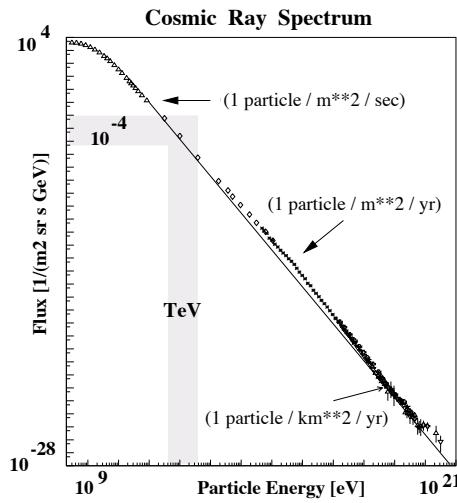


Abbildung 1.1.: Das Potenzspektrum der kosmischen Strahlung. Man erkennt das sog. Knie und den sog. Knöchel bei ca. 10^{15} eV bzw. bei 10^{18} eV. (Auger Collaboration, 1996)

Diese elektrisch neutralen Photonen propagieren dann durch den Raum und erfahren keine Ablenkung durch Magnetfelder. Sie zeigen also bei ihrer Ankunft auf der Erde auf ihren Entstehungsort – und damit einer Quelle kosmischer Strahlung – zurück.

1.3. Detektion kosmischer Gammastrahlung

Im Gegensatz zu Licht und Radiowellen, können hochenergetische γ -Quanten nicht direkt am Erdboden nachgewiesen werden, da sie bereits in großer Höhe mit Atomen der Erdatmosphäre wechselwirken. Ein Lösungsansatz ist daher der Einsatz von satellitengebundenen Detektoren außerhalb der Erdatmosphäre, wie es auch in der Röntgenastronomie und Ultraviolettastronomie üblich ist. Dadurch, dass die Nachweisflächen solcher Instrumente durch technische Realisierbarkeit stark begrenzt sind, sind so jedoch nur Energien bis ~ 100 GeV zugänglich. Bei höheren Energien ist der Fluss zu gering um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Bei der Abbildenden Luft-Cherenkov Technik nutzt man hingegen die Atmosphäre als Detektormedium für γ -Quanten: Wie im nächsten Abschnitt näher erklärt wird, entsteht beim Eintritt eines hochenergetischen Photons in die Erdatmosphäre ein ausgedehnter Teilchenschauer. Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeiten senden die Teilchen dieser Schauer Cherenkov-Photonen aus. Dieses Licht kann mit speziellen Instrumenten, den sogenannten Cherenkov-Teleskopen nachgewiesen werden.

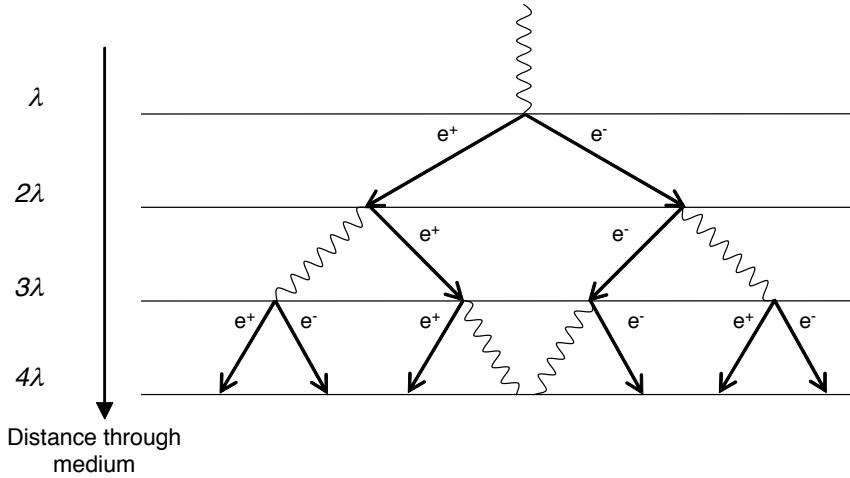


Abbildung 1.2.: Schematische Darstellung eines einfachen Schauermodells nach Heitler (1944). Die Anzahl an Photonen und Leptonen verdoppelt sich nach jeder Strahlungslänge λ (Lennarz, 2012).

1.4. Schauerbildung in der Erdatmosphäre

Tritt ein hochenergetisches Photon in die Erdatmosphäre ein, kommt es in Kernfeldern von Luatatomen zu Elektron-Positron-Paarerzeugung. Die so entstehenden Leptonen verlieren dann durch Bremsstrahlung an weiteren Atomkernen Energie und erzeugen so sekundäre γ -Quanten. Diese erzeugen daraufhin weitere Elektron-Positron-Paare usw. Es entsteht ein elektromagnetischer Schauer. Ein solcher Schauer wird in einem einfachen Modell von Heitler beschrieben (Gaisser, 1990). Dabei kommt es nach jeder Propagation um eine Strahlungslänge λ zu einer Verdopplung der Anzahl der Teilchen (s. Abb. 1.2). Die Anzahl der Teilchen nach einer Wegstrecke X durch die Erdatmosphäre ist somit

$$N(X) = 2^{X/\lambda}. \quad (1.2)$$

Die Energie E_0 des Primärteilchens verteilt sich dabei auf alle Schauerteilchen gleichmäßig, sodass die Energie pro Teilchen beschrieben wird durch:

$$E(X) = E_0/N(X) \quad (1.3)$$

Dieser Prozess setzt sich so lange fort, bis der Wirkungsquerschnitt für Ionisation und Absorption größer ist, als der für Elektron-Positron-Paarerzeugung bzw. Bremsstrahlung. An diesem Punkt X_{\max} haben die Teilchen eine kritische Energie E_c von ca. 84 MeV (Grupen, 1993) und es gilt:

$$N(X_{\max}) = E_0/E_c \quad (1.4)$$

Daraus erhält man:

$$X_{\max} = \lambda \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2} \quad (1.5)$$

Daran sieht man, dass die Höhe des Schauermaximums logarithmisch von der Energie des primären Photons abhängt. Aus Gleichung 1.4 liest man ab, dass $N_{\max} \propto E_0$. Dieser Zusammenhang ist wichtig, wenn man auf die Primärenergie eines Schauers zurück schließen will.

1.5. Cherenkov-Strahlung

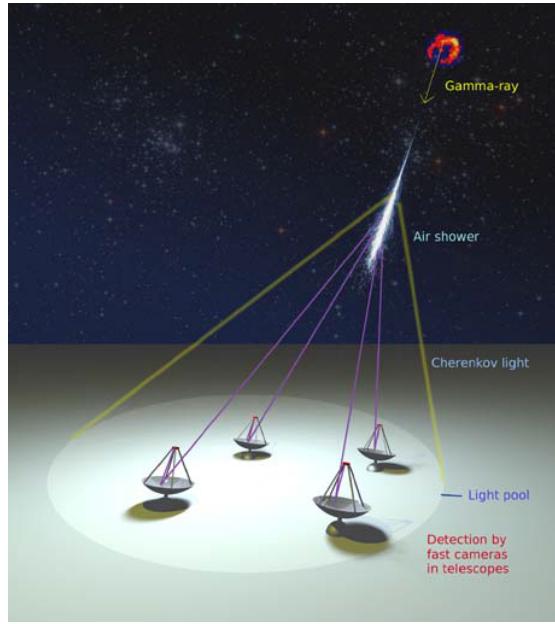


Abbildung 1.3.: Schematische Darstellung des Detektionsmechanismus von Cherenkov-Teleskopen (Völk und Bernlöhr, 2009).

Da sich die Teilchen im Schauer teilweise mit sehr hohen Geschwindigkeiten bewegen, strahlen sie Cherenkov-Licht ab. Cherenkov-Strahlung entsteht immer dann, wenn sich ein elektrisch geladenes Teilchen in einem Dielektrikum mit einer höheren Geschwindigkeit als der Lichtgeschwindigkeit im entsprechenden Material bewegt. Die im Medium induzierten Dipole emittieren dann durch die zeitliche Veränderung des Dipolfeldes elektromagnetische Strahlung. Bei Geschwindigkeiten unter der Lichtgeschwindigkeit im Material entsteht dagegen kein effektives Dipolmoment, da sich hier die angeregten Moleküle symmetrisch um das geladene Teilchen anordnen (Grupen, 1993). Cherenkov-Strahlung wird im gesamten Sichtbaren Spektrum erzeugt, hat ihr Maximum aber im blauen bis ultravioletten Bereich. Für den Cherenkov-Winkel θ , unter dem die Cherenkov-Photonen abgestrahlt werden gilt:

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.6)$$

mit n : Brechungsindex des Mediums, $\beta = \frac{v}{c} \sim 1$. Bei einem Cherenkov-Winkel von ca. 1° in Luft ergibt sich für einen Teilchenschauer ein Lichtkegel, der, bei einem typi-

schen Schauermaximum bei ca. 7 km, am Boden einen Radius von ungefähr 125 m hat (Völk und Bernlöhr, 2009). Durch dieses Licht kann der Teilchenschauer mit Cherenkov-Teleskopen, die sich innerhalb des Kegels befinden, detektiert werden (s. Abb. 1.3). Aus den aufgenommenen Bildern der Luftschauder lassen sich dann Rückschlüsse auf die Ankunftsrichtung und die Energie der primären Photonen ziehen. Die Cherenkov-Blitze sind jedoch so schwach und kurzlebig, dass hohe Anforderungen an solche Teleskope gestellt werden müssen. Es werden große Spiegelflächen benötigt, um das wenige Licht zu sammeln und auf eine Kamera zu fokussieren. Dabei gilt: je geringer die Primärenergie eines Schauers, desto geringer ist die Lichtausbeute und desto größere Spiegel werden für den Nachweis benötigt. Die Kameras von Cherenkov-Teleskopen werden typischerweise mit Photomultipliern verwirklicht, die eine fast rauschfreie Verstärkung und eine gute Zeitauflösung möglich machen. Ein großes Problem dieser Technik ist, dass man Cherenkov-Blitze nur bei ausreichender Dunkelheit und klaren Wetterverhältnissen beobachten kann. Dies stellt Anforderungen an den Standort und schränkt den Auslastungsgrad stark ein.

1.6. Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll nun die Rekonstruktion der detektierten Luftschauder näher untersucht werden. Dazu wird eine Simulation entwickelt, mit der es möglich ist, systematische Fehler bei der Richtungsrekonstruktion zu studieren. Solche Fehler entstehen zum Beispiel durch mechanische Verformungen oder Fehlausrichtungen der Teleskope. Die Simulation ist für das H.E.S.S. II Array ausgelegt, welches im folgenden Kapitel genauer vorgestellt wird. Im dritten Kapitel wird die Funktionsweise der Simulation dargestellt. Das vierte Kapitel widmet sich den Ergebnissen, die mit der Simulation erhalten wurden.

2. Das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)

2.1. Aufbau und Beobachtung



Abbildung 2.1.: Foto des H.E.S.S.-Teleskop-Arrays (H.E.S.S. Collaboration, 2013)

Das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S., s. Abb. 2.1) ist eines der erfolgreichsten Experimente zur Messung von kosmischer Gammastrahlung. Es befindet sich in den Khomas Highlands in Namibia auf 1800 m NN (Aharonian et al., 2006). Das System besteht aus fünf Cherenkov-Teleskopen. Vier kleinere mit je 108 m^2 Spiegelfläche sind auf den Ecken eines Quadrats mit 120 m Seitenlänge angeordnet. Diese Teleskope werden im Folgenden als CT1-CT4 (CT = Cherenkov-Telescope) bezeichnet. Sie wurden im Zeitraum von 2002 bis 2003 aufgebaut und bilden die erste Phase des Experiments. Die zweite Phase wurde durch ein zentrales Teleskop (CT5) mit größerer Spiegelfläche (614 m^2) eingeleitet, das 2012 in Betrieb genommen wurde. Die Teleskope sind als stabile Stahlkonstruktion realisiert und somit relativ stabil gegenüber Verformungen. Es wurde eine Alt-Az-Montierung gewählt. Die Spiegel der Teleskope sind aus einzelnen Facettenspiegeln zusammengesetzt, deren Ausrichtung einzeln ansteuerbar ist, um die Fokussierung in der Kameraebene zu optimieren. Dies wird mithilfe von CCD-Kameras überprüft (Cornils et al., 2003). Die Abbildungsfehler, die durch nicht perfekte Fokussie-

rung entstehen, werden durch die optische Punktauflösungsfunktion (PSF) beschrieben. Die Cherenkov-Kameras bestehen aus 960 (CT1-CT4) bzw. 2048 (CT5) hexagonal angeordneten Photomultipliern, von denen jeder einen Winkel von $0,16^\circ$ bzw. $0,067^\circ$ am Himmel abdeckt. Die Verwendung von Photomultipliern ermöglicht Belichtungszeiten von 16 ns.

Eine Quelle wird typischerweise über eine Zeit von 28 min beobachtet. Diese Zeit wird als „Run“ bezeichnet. Üblicherweise wird im sogenannten Wobble-Modus observiert. Das bedeutet, dass die Teleskope nicht direkt auf die Quelle gerichtet werden, sondern $0,5^\circ$ bis $1,5^\circ$ daneben. Zwischen den Runs wird dann zwischen einem Offset in positiver und negativer Rektaszension und Deklination variiert. Dies dient dazu, die quellfreie Seite des Sichtfeldes für Untergrundabschätzungen verfügbar zu machen.

Die gewonnenen Daten werden mithilfe der HAP (H.E.S.S. Analysis Pipeline) Software ausgewertet. Diese Software beinhaltet viele Funktionen zur Datenaufbereitung und Analyse. Unter anderem sind Koordinatentransformationen implementiert, die auch in der Simulation Anwendung finden, welche in dieser Arbeit verwendet wird.

2.2. Koordinatensysteme

Um die Positionen astronomischer Objekte beschreiben und diese in die Ebenen der Teleskopkameras transformieren zu können, werden spezielle Koordinatensysteme benötigt. Für H.E.S.S. sind dafür, wie für alle bodengebundenen Teleskope, sowohl Himmels- als auch Erdkoordinatensysteme wichtig. Da diese für die Untersuchung des Pointing-Verhaltens essentiell sind, soll eine Auswahl davon in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden. All diese Koordinatensysteme sind auch in der HAP-Software implementiert.

Altitude-Azimut-System

Das Altitude-Azimut-System ist ein erdgebundenes, polares Koordinatensystem zur Beschreibung der Position eines astronomischen Objekts, wie sie von einem bestimmten Punkt auf der Erde beobachtet werden kann. Die erste Komponente, die Altitude, gibt den Winkel an, unter dem das Objekt über dem Horizont erscheint. Dabei befindet sich bei einer Altitude von 0° der Horizont und bei 90° der Zenit. Den gedachten Kreis, der den Zenit und den nördlichsten und südlichsten Punkt am Horizont schneidet, nennt man lokaler Meridian. Das Azimut ist der Winkel, unter dem das Objekt in horizontaler Richtung vom lokalen Meridian erscheint. Dabei wird von Norden über Osten, Süden und Westen gemessen. (Gottwald, 2009) In diesem System wird üblicherweise die Ausrichtung der Teleskope angegeben. Positionen von astronomischen Objekten, die im Alt-Az-System angegeben werden, sind zeit- und ortsabhängig.

Rektaszension-Deklination-System

Dieses Koordinatensystem unterscheidet sich vom Altitude-Azimut-System nur durch die Wahl der Achsen. Jedoch sind diese hier so gewählt, dass sich astronomische Objekte in

diesem System zeit- und ortsunabhängig beschreiben lassen. Die Deklination entspricht dabei der Altitude. Jedoch beschreibt diese nicht den Winkel über dem Horizont sondern über dem Himmelsäquator, dem auf den Himmel projizierten Äquator der Erde. Die Rektaszension gibt den Winkel an, unter dem ein Objekt in horizontaler Richtung vom sog. Frühlingspunkt entfernt ist. Das ist der Punkt am Himmel, an dem die Sonnenbahn den Himmelsäquator am Frühlingsanfang schneidet.

GroundSystem

Beim GroundSystem handelt es sich um ein kartesisches Koordinatensystem. Der Ursprung liegt am Boden im Zentrum des H.E.S.S.-Arrays. Die x-Achse zeigt nach Norden, die y-Achse nach Westen und die z-Achse nach Oben. In diesem System werden zum Beispiel die Positionen der einzelnen Teleskope angegeben. CT5 befindet sich dabei im Ursprung des GroundSystems. Die vier anderen Teleskope sind jeweils 85 m in Ost-, Nord-, West, und Südrichtung vom Ursprung entfernt.

TiltedSystem

Das TiltedSystem hat den gleichen Ursprung wie das GroundSystem, jedoch sind seine Achsen so rotiert und gekippt (tilted), dass die x-y-Ebene senkrecht zur Ausrichtung der Teleskope ist. Die z-Achse zeigt also in Blickrichtung der Teleskope. Bei einer Ausrichtung auf Altitude 90° und Azimut 0° ist das TiltedSystem identisch zum GroundSystem. Richtet man dagegen das Array um 180° gedreht nach Süden aus, werden auch die Achsen um 180° gedreht, sodass die x-Achse nach Süden und die y-Achse nach Osten zeigt.

NominalSystem

Dieses zweidimensionale Koordinatensystem beschreibt Positionen in der Kameraebene eines Teleskops. Dabei wird eine idealisierte Brennweite von einem Meter angenommen. Der Ursprung entspricht dabei dem Durchstoßpunkt der optischen Achse des Teleskops mit der Kameraebene. Das NominalSystem wird dazu benutzt, die Bilder der beobachteten Schauer zu parametrisieren und deren Richtung zu rekonstruieren.

2.3. Triggersystem

Da man bei der Abbildenden Cherenkov-Technik nicht kontinuierlich Daten nehmen will, werden hier spezielle Triggersysteme eingesetzt, die dafür sorgen, dass nur Messdaten von geeigneten Signalen gespeichert werden und Untergrund durch Licht des Nachthimmels oder lokale Myonen frühzeitig aussortiert wird. Das Triggersystem von H.E.S.S. gliedert sich in drei Teile: Zuerst muss das Signal an einem Pixel mindestens vier Elektronen innerhalb von 1,5 ns an der Photokathode entsprechen. Dann müssen auf diese Weise drei Pixel innerhalb eines aus 64 Pixeln bestehenden Sektors in der Kamera getriggert werden. Auf diese Weise werden z. B. Photonen des Nachthimmels aussortiert. Zum Schluss

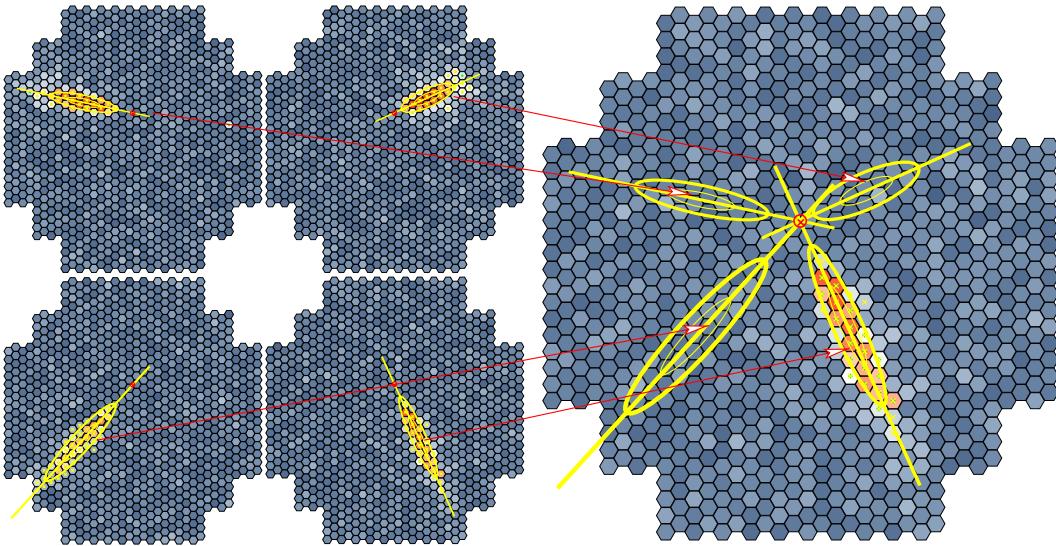


Abbildung 2.2.: Links: Bilder eines Luftschauers in den Kameras von vier Teleskopen. Hillas Ellipse und Hauptachse sind eingetragen. Rechts: Projektion der Schauerbilder in eine Kameraebene und Konstruktion des Schnittpunktes der Hauptachsen (Völk und Bernlöhr, 2009)

müssen mindestens zwei Teleskope innerhalb von 80 ns ein solches Ereignis detektieren. Dadurch verwirft man vor allem Ereignisse durch einzelne Myonen, die meistens nur von einem Teleskop detektiert werden. Während ein Teleskop auf die Triggerentscheidung wartet, werden die Signale der Photomultiplier in Ringspeichern zwischengespeichert. Dadurch wird die Totzeit des Detektors möglichst kurz gehalten ($446 \mu\text{m}$ für ausgelesene und $5,5 \mu\text{m}$ für nicht ausgelesene Events, Funk et al., 2004).

2.4. Hillas-Analyse und Richtungsrekonstruktion

Wie der Luftschauber eines Photons in den Kameras der H.E.S.S.-Teleskope erscheint ist in Abb. 2.2 dargestellt. Die klassische Methode, diese Bilder zu verarbeiten, ist die sogenannte Hillas-Analyse (Hillas, 1985). Der erste Schritt dabei ist das Bereinigen (Cleaning) des Bildes. Dabei werden Pixel verworfen, die weniger als fünf Photoelektronen detektiert haben oder die kein benachbartes Pixel mit mindestens 10 Photoelektronen haben. Das Cleaning ist wichtig, um Licht des Nachthimmels aus der weiteren Analyse auszuschließen. Anschließend werden für das Bild eines Schauers charakteristische Größen der Verteilung berechnet. Diese Parameter, die auch eine Ellipse beschreiben, werden Hillas-Parameter genannt. Dies sind Entfernung des Schwerpunktes vom Kamerazentrum, Winkel der großen Halbachse, Länge und Breite der Ellipse (s. Abb. 2.3). Die Position und Ausrichtung der Ellipsen wird für die Richtungsrekonstruktion verwendet: Der Punkt, an dem sich die Hauptachsen der Schauerbilder aller beteiligten Teleskope schneiden, gibt

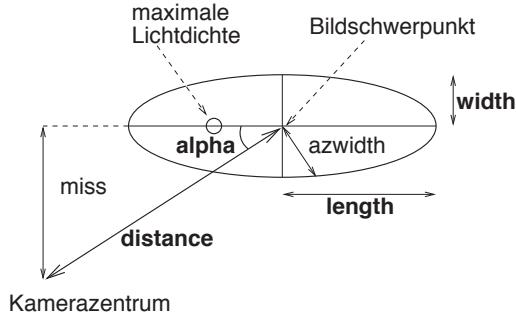


Abbildung 2.3.: Darstellung der Hillas-Parameter (Gillessen, 2004)

die Richtung an, aus der das Primärteilchen gekommen ist (Aharonian et al., 2006). Zur Berechnung des Schnittpunktes werden die Achsen aller Ellipsen paarweise geschnitten und mit dem Sinus des jeweiligen Winkels gewichtet aufaddiert. Dies sorgt dafür, dass Unsicherheiten durch sehr kleine Schnittwinkel das Ergebnis weniger stark beeinflussen. Außerdem geht auch die jeweilige Bildhelligkeit in die Gewichtung ein. Dies bringt den Vorteil, dass Bilder, in denen ein Schauer nur schlecht zu sehen ist, weniger stark in die Berechnung eingehen. Insgesamt berechnet sich der Schnittpunkt \vec{S} aus (Veh, 2013):

$$\vec{S} = \frac{\sum_{k>j} \vec{S}_{jk} \cdot \sin \alpha_{jk} \cdot \frac{1}{\frac{1}{A_j} + \frac{1}{A_k}}}{\sum_{k>j} \sin \alpha_{jk} \cdot \frac{1}{\frac{1}{A_j} + \frac{1}{A_k}}} \quad (2.1)$$

mit den einzelnen Schnittpunkten \vec{S}_{jk} mit den entsprechenden Schnittwinkeln α_{jk} und den jeweiligen Bildamplituden A_j und A_k . Der erhaltene Schnittpunkt wird dann aus der Kamera (NominalSystem) ins Ra-Dec-System transformiert. So erhält man die Richtung, aus der der Schauer und somit das primäre Photon gekommen ist. Die Energie des Schauers wird über die Bildhelligkeit der Schauerbilder berechnet. Da diese aber nicht nur von der Energie, sondern auch von der Entfernung des Core (Schnittpunkt der Schauer-Hauptachse mit dem Boden) vom jeweiligen Teleskop abhängt, wird auch dieser Abstand mit der errechneten Schauerrichtung bestimmt.

2.5. Pointing

Pointing bezeichnet die Ausrichtung der Teleskope. Für eine exakte Richtungsrekonstruktion auf wenige Bogensekunden genau ist es wichtig, Abweichungen von der Sollposition genau zu kennen und so gering wie möglich zu halten. Solche Abweichungen entstehen z. B. durch kleine Fehler in der Nachführung oder durch mechanische Verformungen der Teleskope. Zur Pointingkorrektur gibt es daher verschiedene Modelle. Ein Modell, das in HAP benutzt wird, verwendet dazu eine Funktion, welche die Abweichung vom perfekten

Pointing für jede Position am Himmel liefert. Eine solche Funktion wird durch Fitten an Messdaten von speziellen Kalibrations-Runs für jedes Teleskop erstellt (Gillessen, 2004). Die Fehler, die bei diesen Pointingkorrekturen gemacht werden können, sollen in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

3. Simulation

Die Simulation, die in dieser Studie verwendet wird, erweitert eine Simulation zur Untersuchung von Fehlern in der Richtungsrekonstruktion des H.E.S.S. I Arrays um das 2012 in Betrieb genommene, fünfte Teleskop des H.E.S.S. II Arrays. Außerdem wird die verwendete Methode zur Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeiten weiterentwickelt, um Effekte, die durch die Verwendung unterschiedlicher Teleskoptypen entstehen, besser nachzubilden. Die ursprüngliche Simulation wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Veh, 2013) entwickelt. Dabei wird ein stark vereinfachtes Schauermodell und die Standardrekonstruktion zur Berechnung der Quellposition verwendet. Außerdem werden Rekonstruktionsfehler durch die Punktauflösungsfunktion der Teleskope nicht simuliert, um allein die Auswirkungen von Pointingfehlern ohne Verschmierung durch die PSF studieren zu können. Ziel dieser Studie ist es jetzt, zu verstehen, wie sich dieser Ansatz auf eine Anordnung von Teleskopen verschiedenen Typs anwenden lässt und wie stark sich der Einfluss eines systematischen Pointingfehlers von CT5 auswirkt. Es wird erwartet, dass Fehler im Pointing von CT5 einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Richtungsrekonstruktion haben, da das Teleskop aufgrund seiner größeren Spiegelfläche an der Rekonstruktion von mehr Ereignissen beteiligt ist, als es bei den kleineren Teleskopen der Fall ist. Außerdem sind bei CT5 die Bildamplituden im Mittel höher, was zu einer stärkeren Gewichtung der fehlerhaften Achsen führt.

Die Skripte für die Simulation wurden in der Programmierumgebung ROOT 5.28.00-2 erstellt, ein am CERN entwickeltes Datenanalyse-Programm, basierend auf C++. Die Analysen der H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen wurden mit der HEAD Version von HAP durchgeführt. Dies ist die Version, die stetig weiterentwickelt wird, und somit die Unterstützung des H.E.S.S. II Arrays beinhaltet.

3.1. Konzept der Simulation

Die Simulation ist so aufgebaut, dass sie die Untersuchung von Abbildungsfehlern durch Verschiebungen der Teleskope und Verdrehungen der Kameras mit möglichst geringem Rechen- und damit Zeitaufwand ermöglicht. Zuerst werden fünf virtuelle Teleskope angelegt. Anschließend werden isotrop über eine Fläche verteilte Schauer gewürfelt. Die zufällig gewählten Parameter sind dabei der Auftreffpunkt des Schauerzentrums im Tilted-System und die primäre Energie des erzeugenden Photons. Bei vorgegebener Quellrichtung sind die Schauer so eindeutig definiert. Die Schauersimulation ist also rein geometrisch und beinhaltet weder Effekte die durch die Atmosphäre noch durch endliche Pixelgrößen in den Cherenkov-Kameras entstehen. Der nächste Schritt ist die Überprüfung, welche Teleskope die einzelnen Schauer detektieren. Dazu wird zunächst überprüft, ob der

betreffende Schauer im Sichtfeld eines Teleskops ist. Dann wird eine Abhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit von Primärenergie und Distanz zwischen Schauerzentrum und Teleskop mithilfe von vorher aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen erzeugten Lookup-Tabellen simuliert. Anschließend wird noch die absolute Helligkeit des Schauerbildes in der Kamera mittels weiterer Lookup-Tabellen bestimmt und über H.E.S.S.-Standard-Cuts werden zu schwache Bilder aussortiert. Alle Schauer, die nach den genannten Regeln von mindestens zwei Teleskopen detektiert werden, werden in die Kameras der getriggerten Teleskope abgebildet, sodass danach die Richtungen der primären Photonen über die Standardrekonstruktion bestimmt werden können. Zum Schluss werden die Parameter und berechneten Werte aller simulierten Schauer in einer Datei gespeichert.

Die für diese Arbeit produzierten Lookup-Tabellen sind nur für einen Zenit-Winkel von 20° und einen Wobble-Offset von 0° gültig. Bei anderen Zenitwinkeln und Offsets treten Effekte durch die Erdatmosphäre bzw. durch Bevorzugen von Teleskopen in Offsetrichtung auf. Für diese Fälle müssten also noch weitere Lookup-Tabellen produziert werden. In der Simulation ist die Verwendung mehrerer Tabellen für verschiedene Zenitwinkel zwar schon vorgesehen, jedoch können diese noch nicht generiert werden, da die Monte-Carlo-Daten dazu im Moment noch nicht verfügbar sind. Aus diesem Grund werden in allen folgenden Simulationen Daten mit einem Zenitwinkel von 20° und 0° Offset verwendet.

In den nächsten Abschnitten sollen nun die einzelnen Schritte der Simulation näher betrachtet werden.

3.2. Eingabe der Simulationsparameter

Es gibt prinzipiell drei Möglichkeiten die Simulation zu starten. Bei der einfachsten Methode wird eine im Alt-Az-System feststehende Quelle simuliert. Als Parameter können hier Anzahl der simulierten Schauer sowie Quellposition und Teleskopausrichtung in Alt-Az Koordinaten angegeben werden. Dieser Modus wird vor allem verwendet, um die Qualität der Simulation bei perfektem Pointing mit H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen zu vergleichen. Mit der zweiten Methode kann eine Quelle simuliert werden, die sich über den Himmel bewegt. Dazu werden als Parameter die Dauer und Startzeit der Beobachtung, die Position der Quelle in Ra-Dec Koordinaten und die Anzahl der simulierten Schauer angegeben. Die Teleskopausrichtung wird automatisch $0,5^\circ$ von der Quellposition versetzt gewählt. Der dritten Methode werden als Parameter lediglich eine Runliste und die Anzahl der simulierten Schauer ergeben. Aus der Runliste werden dann alle relevanten Informationen automatisch ausgelesen.

Ferner existieren noch Werte, die fest in den Programmcode geschrieben werden. Dies sind der Spektralindex der Quelle, die untere Grenze des Energiespektrums, der Radius um das Arrayzentrum, innerhalb dessen Schauer erzeugt werden, die Höhe der Schauermaxima über dem Boden, die Teleskoppositionen und Pointingmanipulationswerte. Die Werte, die für alle Simulationen in dieser Arbeit verwendet wurden, können Tabelle 3.1 entnommen werden.

Parameter	Wert
γ	2
E_0	10 GeV
h_{\max}	8000 m
r_{\max}	1000 m
Teleskoppositionen CT1, ..., CT5 in m	$\begin{pmatrix} 0 \\ -85 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 85 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 85 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -85 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
Blickfeld CT1-CT4	4°
Blickfeld CT5	3, 2°
Kameraverschiebung	0" bzw. 100"
Kamerarotation	0° bzw. 5°

Tabelle 3.1.: Feste Parameter, die für alle Simulationen im Code enthalten sind

3.3. Erzeugung der Schauer

Da die genaue Form der Teilchenschauer für systematische Studien zur Richtungsrekonstruktion unwichtig ist, wird lediglich die Hauptachse der Schauer berechnet, und so sehr viel Rechenkapazität gegenüber vollständigen Monte-Carlo-Simulationen gespart. Dazu werden Punkte isotrop innerhalb eines Kreises mit sinnvoll gewähltem Radius im Tilted-System gewürfelt, also in der Ebene senkrecht zur Ausrichtung der Teleskope. Abhängig vom Zenitwinkel ergeben sich durch die Projektion in das GroundSystem Ellipsen auf dem Boden (s. Abb. 3.1(a)). Die Hauptachsen der Schauer ergeben sich dann aus diesen Auftreffpunkten, der vorgegebenen Quellposition und einer fest gewählten Höhe für die Maxima der Schauer. Die Energie der Schauer errechnet sich zu (Veh, 2013):

$$E = \left(\frac{1-x}{E_0^{\gamma-1}} \right)^{\frac{1}{-\gamma+1}} \quad (3.1)$$

Dabei ist x eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Zufallszahl. Der differentielle Photonenfluss dN/dE folgt damit einem Potenzgesetz mit Spektralindex γ ab einer Minimalenergie von E_0 (s. Abb. 3.1(b)).

3.4. Teleskope

Mit den angegebenen Teleskoppositionen und -ausrichtungen wird ein virtuelles Teleskop-Array erzeugt. Außerdem wird für jeden detektierten Schauer eine geeignete Transformation verwendet, mit deren Hilfe der simulierte Schauer in die Kameras der Teleskope abgebildet wird. Diese Transformationen wurden in Veh, 2013 unabhängig von der H.E.S.S.-Analysesoftware implementiert, um Manipulationen am Pointing einfacher durchführen zu können.

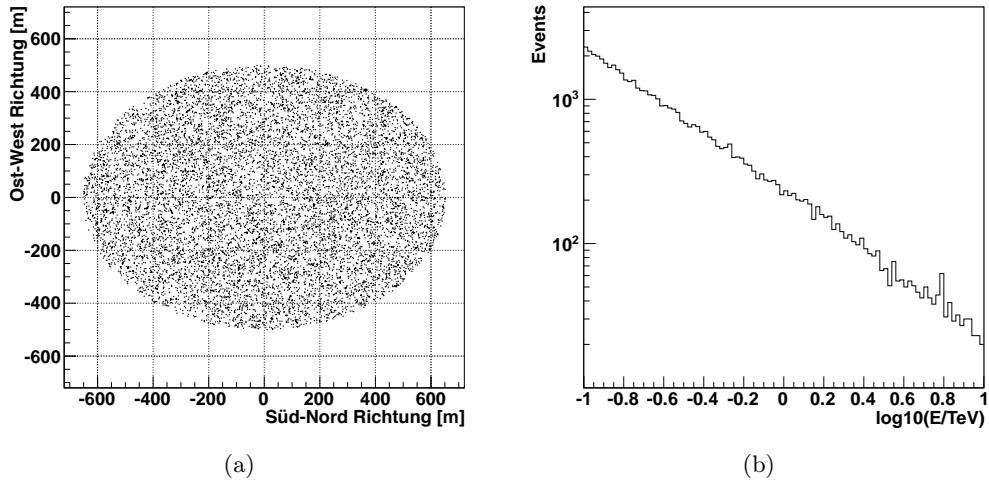


Abbildung 3.1.: (a): Auftreffpunkte von 10.000 mit r_{\max} gewürfelten Schauern im GroundSystem bei einem Zenit-Winkel von 40° und einem Azimut-Winkel von 180° (Süden)
 (b): Energiespektrum von 10^6 simulierten Schauern mit $\gamma = 2$

3.5. Schauerdetektion

Wie oben bereits erwähnt, wird in drei Schritten getestet, welche Teleskope einen bestimmten Schauer detektieren.

3.5.1. Geometrische Detektion

Im ersten Schritt wird der Winkel, unter dem sich das Maximum des Schauers im Bezug auf die Blickrichtung der Teleskope befindet, berechnet. Ist dieser Winkel größer als das dreifache Sichtfeld des jeweiligen Teleskops, wird der Schauer für dieses Teleskop aussortiert.

3.5.2. Lookup-Tabellen zur Detektionswahrscheinlichkeit

Für den nächsten Schritt werden vorher aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen produzierte, teleskopspezifische Lookup-Tabellen verwendet, die, abhängig von Position und Energie des Schauers, jeweils eine Wahrscheinlichkeit für die Teilnahme des Teleskops bei der Schauer-Detektion liefern. Die Wahrscheinlichkeit in jedem Energie- und Positions-Bin ergibt sich als Verhältnis zwischen Anzahl von detektierten Schauern aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen und Anzahl der tatsächlich gewürfelten Schauer in diesem Bereich. In Abb. 3.2 sind die Schauerverteilungen für zwei verschiedene Energieintervalle dargestellt. Da nur eine begrenzte Anzahl an Monte-Carlo-Daten zur Verfügung steht, ist die Statistik nicht ausreichend, um Detektionswahrscheinlichkeiten für jede Core-

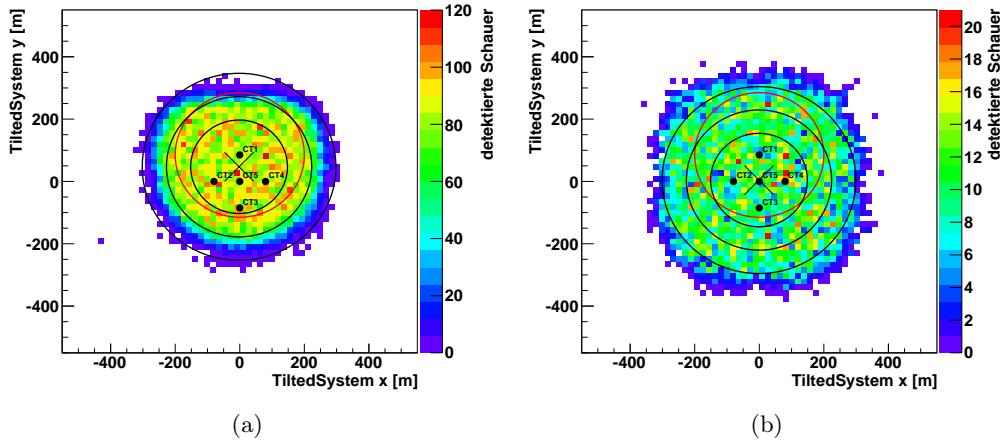


Abbildung 3.2.: Verteilung der detektierten Schauer im TiltedSystem an denen CT1 beteiligt ist. Erzeugt aus Monte-Carlo-Daten mit $5 \cdot 10^5$ simulierten Events, Zenit-Winkel: 20° , Azimut: 180° , Offset: 0° . (a): $E \in [631 \text{ GeV}; 955 \text{ GeV}]$ (b): $E \in [5,0 \text{ TeV}; 7,6 \text{ TeV}]$ Positionen der Teleskope sind markiert. Das X kennzeichnet die Position des Mittelwerts der Verteilung. Um diese Position sind konzentrische Kreise mit Radien 150, 225 und 300 m eingezeichnet. Der rote Kreis um CT1 hat einen Radius von 200 m.

Position im TiltedSystem zu berechnen. Um dieses Problem zu umgehen, wird in Veh, 2013 stattdessen nur der radiale Abstand zum jeweiligen Teleskop verwendet. Jedoch ist die Radialsymmetrie um die Teleskope aufgrund der verwendeten Daten, bei denen Schauer von mindestens zwei Teleskopen detektiert werden, gebrochen. Diese Symmetriebrechung wird durch die Einführung eines zentralen Teleskops von anderem Typ noch verstärkt. Daher wird in dieser Arbeit ein neuer Ansatz gewählt und die Abstände zum Schwerpunkt der jeweiligen Verteilung verwendet. Wie man in Abb. 3.2 erkennen kann, werden die Verteilungen durch Radialsymmetrie um den Schwerpunkt besser beschrieben als durch Radialsymmetrie um das Teleskop. Beim Betrachten verschiedener Energieintervalle stellt man fest, dass sich der Mittelwert bei steigenden Energien vom Array-Zentrum nach außen zum Teleskop und anschließend wieder zurück bewegt. Diese Verschiebung ist in Abb. 3.3 dargestellt. Die großen Sprünge bei niedrigen Energien entstehen durch schlechte Statistik, da im Bereich nahe der Energieschwelle insgesamt sehr wenige Schauer detektiert werden. Um die Verschiebung zwischen Array-Zentrum und Teleskop zu verstehen, muss man bedenken, dass die Daten aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen gewonnen wurden, bei denen nur Schauer gespeichert werden, die von mindestens zwei Teleskopen detektiert werden. Die zentrale Position der Mittelwerte bei niedrigen Energien entsteht dadurch, dass hier vor allem CT5 Schauer detektiert. Schauer mittlerer Energie werden dann von allen Teleskopen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit detektiert. Daher verschiebt sich hier der Mittelwert der Verteilung in Richtung des betrachteten Teleskops.

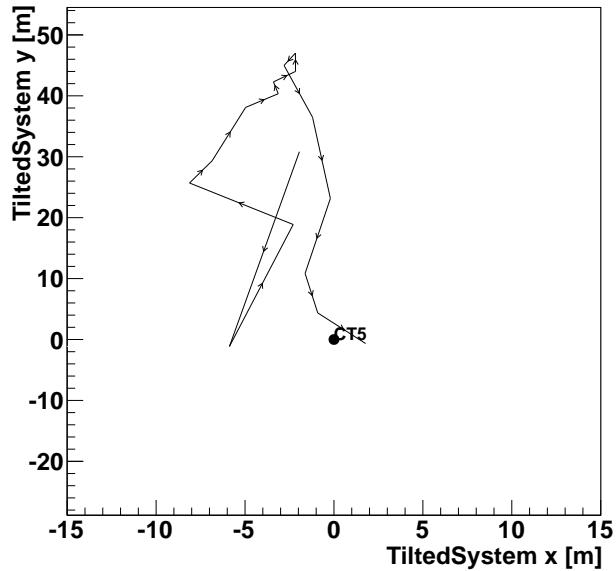


Abbildung 3.3.: Verschiebung des Mittelwerts der Verteilung von CT1 detekтирter Schauer im TiltedSystem. Die Pfeile zeigen die Richtung von niedrigen zu hohen Energien an. CT1 befindet sich außerhalb der Grafik bei (0; 85).

Da bei hohen Energien auch überwiegend hohe Multiplizitäten auftreten, wandert der Mittelpunkt hier wieder zurück ins Array-Zentrum.

Die Positionen der oben beschriebenen Schwerpunkte werden für jedes Teleskop in das GroundSystem transformiert und in separaten Histogrammen gespeichert. Die Transformation ins GroundSystem ist wichtig, weil die Detektionswahrscheinlichkeiten von der Position eines Schauers relativ zu denen der Teleskope abhängt, die Teleskop-Positionen aber im GroundSystem festgelegt sind. Anschließend werden alle Schauer, die vom jeweils betrachteten Teleskop detektiert wurden, abhängig von Primärenergie und Abstand zum entsprechenden Mittelpunkt in ein zweidimensionales Histogramm eingetragen. Zwei solcher Histogramme sind in Abb. 3.4 zu sehen.

Jetzt werden die Werte dieses Histogramms durch die Anzahl der erwarteten Schauer in jedem Bin geteilt. Diese ergibt sich aus der Anzahl der insgesamt simulierten Schauer in der Monte-Carlo-Simulation und dem Potenzspektrum der simulierten Quelle. Auch die größeren effektiven Flächen bei größeren Abständen werden bei der Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Das heißt, es wird ebenfalls durch die Flächen der Kreisringe geteilt, in denen die Core-Positionen der Schauer in einem Bin liegen und deren Flächen linear mit dem Radius wachsen. Auf diese Weise entsteht für jedes Teleskop ein weiteres Histogramm, das die Nachweiswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Abstand von Symmetriepunkt und Energie enthält. Zum Schluss werden all diese

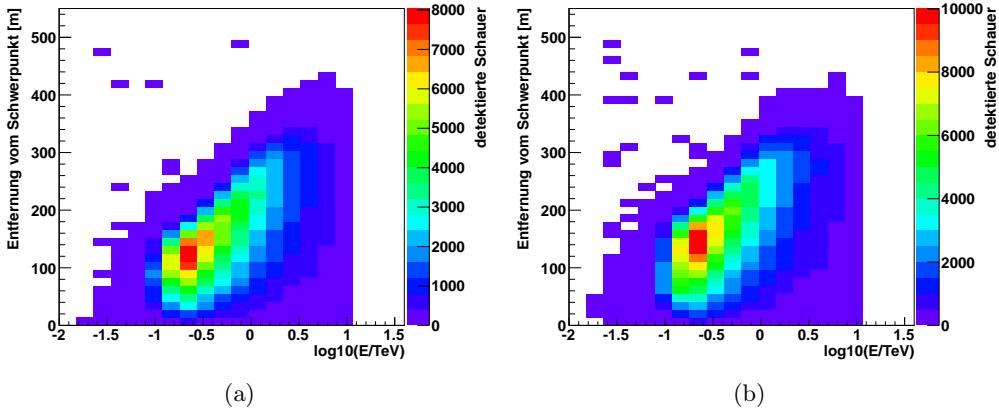


Abbildung 3.4.: Verteilungen der von (a): CT1, (b): CT5 detektierten Schauer in Abhängigkeit von Energie und Abstand zum jeweiligen Mittelwert. Erzeugt aus Monte-Carlo-Daten mit $5 \cdot 10^5$ simulierten Events, Zenit-Winkel: 20° , Azimut: 180° , Offset: 0° . Hier sind Sensitivitäten der Teleskope, effektive Flächen und Abfallen des Energiespektrums sichtbar. Ab 10 TeV sind keine Schauer mehr zu sehen, weil die verwendeten Monte-Carlo-Daten nur Schauer bis 10 TeV enthalten.

Histogramme auf ihr gemeinsames Maximum normiert, da die Verwendung der absoluten Detektionswahrscheinlichkeit keinen Vorteil bringen würde und die Simulation durch Aussortieren unnötig vieler Schauer ineffizienter machen würde. In Abb. 3.5 sind die fertigen Lookup-Tabellen für CT1 und CT5 dargestellt.

3.5.3. Detektionswahrscheinlichkeiten in der Simulation

Während der Simulation wird dann für einen Schauer mit gegebener Energie die entsprechende Mittelwert-Position im GroundSystem aus den gespeicherten Histogrammen gelesen und wieder ins TiltedSystem transformiert. Zu dieser Position wird dann der Abstand des Schauerauftreffpunkts im TiltedSystem berechnet und die Detektionswahrscheinlichkeit der passenden Lookup-Tabelle entnommen. Die erhaltenen Wahrscheinlichkeiten werden anschließend für alle Teleskope mit einer gemeinsamen, gleichmäßig zwischen 0 und 1 verteilten Zufallszahl verglichen. Alle Schauer, bei denen die Zufallszahl größer als die Detektionswahrscheinlichkeit ist, werden für das entsprechende Teleskop aussortiert.

3.5.4. Lookup-Tabellen für die Bildhelligkeit

Im letzten Schritt der Schauerdetektion wird die Bildhelligkeit in der Kamera der Teleskope berechnet und H.E.S.S.-Standard-Cuts von 80 Photoelektronen angewendet. Auch

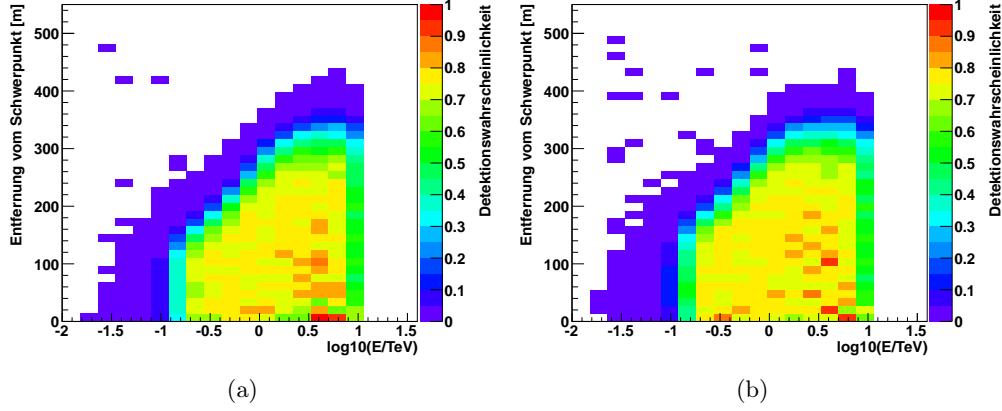


Abbildung 3.5.: Detektionswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Energie und Abstand zum jeweiligen Mittelwert. (a): für CT1, (b): für CT5

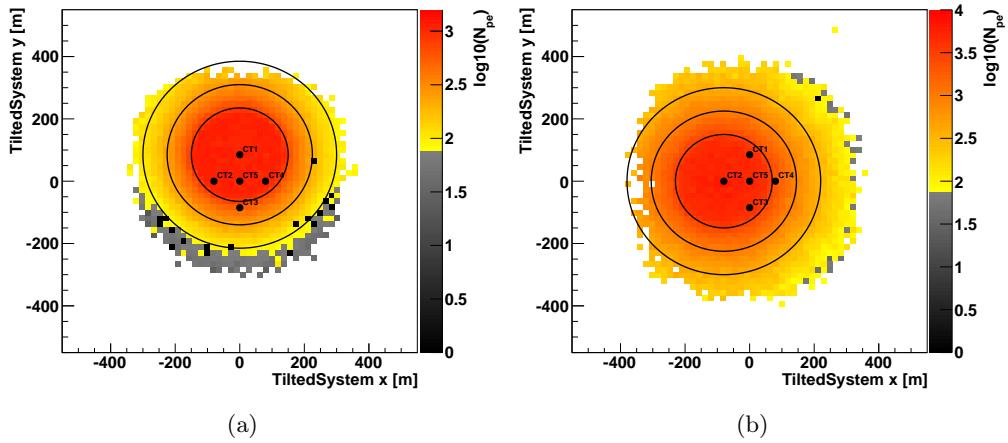


Abbildung 3.6.: Bildhelligkeiten im TiltedSystem für Schauer mit
 (a) $E \in [955 \text{ GeV}; 1,5 \text{ TeV}]$ für CT1 und (b) $E \in [3,3 \text{ TeV}; 5,0 \text{ TeV}]$
 für CT2. Erzeugt aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen mit $5 \cdot 10^5$ simulierten Events, Zenit-Winkel: 20° , Azimut: 180° , Offset: 0° . Um das jeweilige Teleskop sind konzentrische Kreise mit Radien 150, 225 und 300 m eingetragen. Graue Bins zeigen Werte an, die durch die verwendeten H.E.S.S.-Standard-Cuts aussortiert werden.

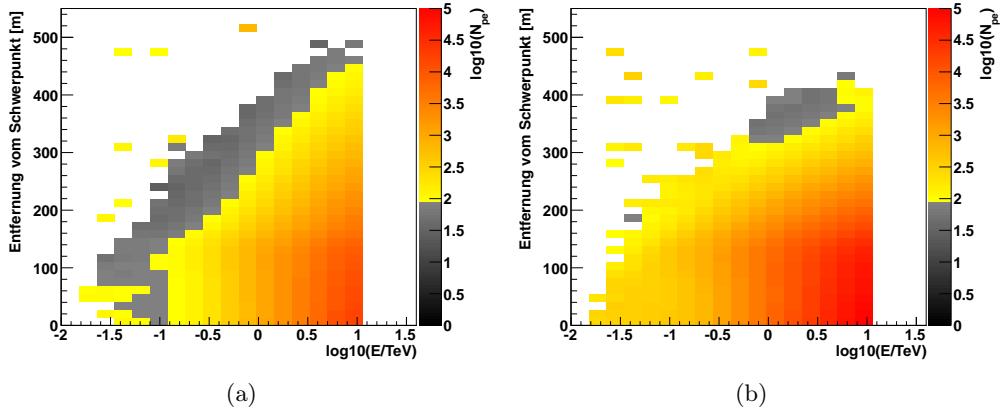


Abbildung 3.7.: Durchschnittliche Bildhelligkeiten in Abhängigkeit von Energie und Abstand zu (a) CT1 und (b) CT5. Graue Bins zeigen Werte an, die durch die verwendeten H.E.S.S.-Standard-Cuts aussortiert werden. Deutlich zu erkennen sind die niedrigere Energieschwelle und die insgesamt höheren Amplituden bei CT5, was auf die größere Spiegelfläche des Teleskops zurückzuführen ist.

hier werden wieder Lookup-Tabellen verwendet. In Abb. 3.6 sind die Verteilungen der Bildhelligkeiten für zwei Teleskope im TiltedSystem dargestellt (H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulation). Man erkennt eine deutliche Radialsymmetrie um das jeweilige Teleskop, was auch nicht verwunderlich ist, da die Bildhelligkeit, außer von der Energie und Projektionseffekten bei großen Zenitwinkeln, nur von der Entfernung des Schauers vom Teleskop abhängt. Diese Abhängigkeit wird bei der Erstellung der Lookup-Tabellen ausgenutzt, indem Bildhelligkeiten in den gleichen Energie- und Abstandsintervallen gemittelt werden. So entsteht für jedes Teleskop eine Tabelle, wie sie in Abb. 3.7 exemplarisch für CT1 und CT5 dargestellt sind.

3.5.5. Simulation von Bildhelligkeiten

In der Simulation werden mit den produzierten Lookup-Tabellen dann die Helligkeiten der Schauerbilder in den Kameras der Teleskope gewürfelt. Grundlage hierfür sind die zuvor gewürfelte Energie eines Schauers (vgl. Abschnitt 3.3) und seine Core-Position. Zusätzlich wird die gaußsche Verteilung der Werte innerhalb eines Bins ausgenutzt. Als Breite der Verteilung wird die Standardabweichung der Helligkeitsverteilung im Bin verwendet. Die ermittelten Werte werden anschließend mit den Standard-Cuts verglichen. Schauer, die zu dunkel sind und den H.E.S.S.-Standardcut von 80 Photoelektronen unterschreiten, werden aussortiert.

Für alle Schauer, die nach den oben erläuterten Kriterien von mindestens zwei Teleskopen detektiert werden, wird im weiteren Verlauf der Simulation die Einfallrichtung

rekonstruiert.

3.6. Richtungsrekonstruktion

Um die Einfallsrichtung eines detektierten Schauers zu bestimmen, wird dieser für jedes Teleskop, das ihn detektiert hat, in das NominalSystem transformiert. Anschließend werden alle transformierten Hauptachsen paarweise geschnitten, wodurch sich, abhängig von der Multiplizität n , $\frac{n(n-1)}{2}$ Schnittpunkte ergeben. Diese bis zu zehn Punkte werden dann, mit den Schnittwinkeln der zugehörigen Schauerachsen und den simulierten Helligkeiten der Schauerbilder gewichtet, gemittelt (vgl. Abschnitt 2.4).

3.7. Speichern der Schauerparameter

Zum Schluss der Simulation werden die Parameter wie Core-Position, Energie, rekonstruierte Richtung, Trigger-Pattern und Multiplizität für alle Schauer in einem ROOT-Tree gespeichert. Bei rekonstruierten Schauern werden zusätzlich noch die Positionen in den Nominal-Systemen der beteiligten Teleskope und die rekonstruierte Richtung gesichert.

4. Ergebnisse

4.1. Qualität der Simulation

Um zu überprüfen, wie gut die Simulation die Realität nachbildet, werden zuerst die Ergebnisse einer Simulation ohne Manipulation des Pointings mit Monte-Carlo-Daten verglichen. Allen folgenden Simulationen wird als Parameter eine Runliste übergeben, die 161 Runs beinhaltet. Es handelt sich dabei um Beobachtungen des Aktiven Galaxiekerns PKS 2155–304 mit einem Wobble-Offset von $0,5^\circ$ in negativer Dec-Richtung. Die Verwendung einer Runliste dient hier lediglich dazu, für die Simulation realistische Beobachtungsbedingungen mit einer im Alt-Az-System beweglichen Quelle zu erzeugen. Die Runliste wurde mit dem `findruns`-Tool der HAP-Software unter Verwendung des folgenden Kommandos erstellt:

```
findruns --selection spectral --first 20000 --output PKS2155_decminus  
--mintels 4 329.7166666667 -30.725555555556 0.2
```

Die Richtungsrekonstruktion hängt stark von der Multiplizität ab, also der Anzahl der Teleskope, von denen ein Schauer detektiert wird, da der Einfluss eines Teleskops mit Pointing-Fehler umso geringer wird, je mehr Teleskope ohne Pointing-Fehler an der Rekonstruktion teilnehmen. Deshalb soll hier zunächst die Verteilung der Multiplizitäten näher untersucht werden. In Abb. 4.1 ist diese für eine H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulation, für eine Simulation, bei der die Detektionswahrscheinlichkeiten als symmetrisch um das Teleskop angenommen werden und für eine Simulation mit symmetrisch um den jeweiligen Mittelwert berechneten Detektionswahrscheinlichkeiten dargestellt (vgl. Diskussion in Abschnitt 3.5.2). Man erkennt, dass die Simulation mit den Mittelwert-Symmetrien die Monte-Carlo-Ergebnisse deutlich besser reproduziert. Hier ist eine Multiplizität von fünf der wahrscheinlichste Wert, bei der Simulation mit den Teleskop-Symmetrien ist dies eine Multiplizität von drei. Jedoch sieht man auch, dass es trotz dieser Verbesserung nach wie vor große Unterschiede zur Monte-Carlo-Simulation gibt. Dies liegt vor allem daran, dass die Lookup-Tabellen für die Detektionswahrscheinlichkeiten aus rekonstruierten Monte-Carlo-Simulationen erzeugt wurden, die aufgrund der Trigger-Bedingung nur Multiplizitäten von zwei oder mehr beinhalten. Dadurch kommt es vor, dass einige Schauer (mit bestimmter Energie und Core-Position), die in der Simulation von zwei Teleskopen detektiert werden, in der Monte-Carlo-Simulation von mehr als zwei Teleskopen detektiert würden. Es kommt durchaus in der Simulation auch vor, dass, allein durch die Berechnung mit den Lookup-Tabellen, Schauer von nur einem Teleskop detektiert werden. Diese Events werden zwar nicht rekonstruiert, sie sind aber unsinnig, da die Tabellen ja nur Wahrscheinlichkeiten für Multiplizitäten ≥ 2 enthalten. Dieser Effekt

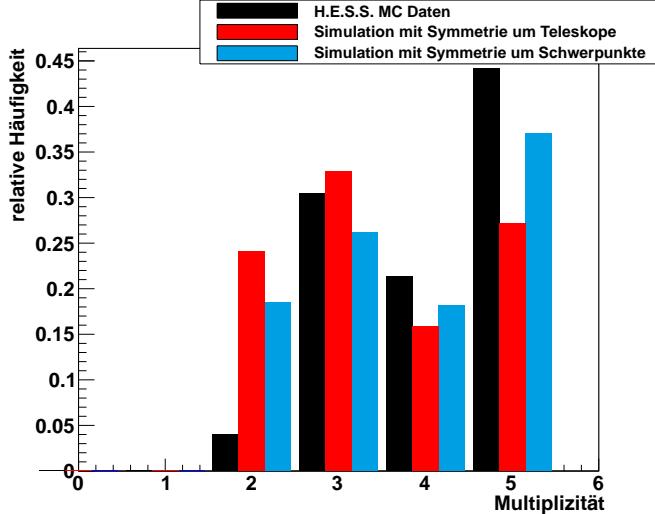


Abbildung 4.1.: Multiplizitätsverteilung bei verschiedenen Simulationsmethoden. schwarz: H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulation; rot: Simulation, bei der die Detektionswahrscheinlichkeiten als symmetrisch um das Teleskop angenommen werden; blau: Simulation mit symmetrisch um den jeweiligen Mittelwert berechneten Detektionswahrscheinlichkeiten

fällt bei höheren Multiplizitäten zwar immer weniger ins Gewicht, ist bei Multiplizität zwei aber noch deutlich zu sehen. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, wäre die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für einzelne Trigger-Pattern, d.h. welche Teleskope genau einen Schauer an einer bestimmten Position und mit einer bestimmten Energie detektieren. Für die Erstellung solcher Lookup-Tabellen wäre jedoch aus statistischen Gründen eine größere Menge an Monte-Carlo-Daten nötig, als sie momentan verfügbar ist.

Betrachtet man die Verteilung der rekonstruierten Richtungen für perfekt ausgerichtete Teleskop-Kameras (Abb. 4.2), stellt man fest, dass es nur Abweichungen von der simulierten Quelle gibt, die durch numerische Unsicherheiten entstehen. Dies wird bei unmanipuliertem Pointing natürlich erwartet und zeigt, dass die Rekonstruktion korrekt funktioniert.

4.2. Kameraverschiebungen

Wird die Kamera eines Teleskops in der Kameraebene, d.h. senkrecht zur Beobachtungsrichtung verschoben, so entstehen Fehler bei der Richtungsrekonstruktion, da die Hillas-Ellipse dieses Teleskops im NominalSystem verschoben ist und dadurch der Schnittpunkt der Hauptachsen falsch berechnet wird (Veh, 2013). Um nun zu untersuchen, welche Auswirkungen das Verschieben einzelner Kameras auf die Richtungsrekonstruktion hat, werden dementsprechende Simulationen durchgeführt. Dazu wird ein Offset von 100 Bo-

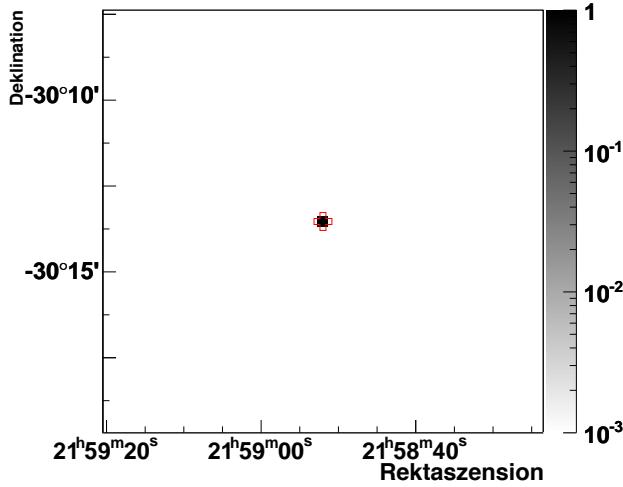


Abbildung 4.2.: Rekonstruktion einer simulierten Quelle an der Position des Aktiven Galaxiekerns PKS 2155–304 ohne Manipulation am Pointing. Das rote Kreuz markiert die Quellposition. Spektralindex: $\gamma = 2$.

gensekunden nach unten gewählt, d.h. in positiver x-Richtung im NominalSystem. Hier wird also ein zusätzliches Durchhängen der Kamera aufgrund der Schwerkraft simuliert. Dieser Offset wird nun einmal auf die Kamera von CT1 angewendet und einmal auf die von CT5. Zusätzlich wird simuliert, was passiert, wenn die Kamera von CT1 verschoben ist, CT5 aber nicht triggert, also auch nicht an der Detektion teilnimmt. Die Ergebnisse der Rekonstruktionen dieser drei Fälle sind in Abb. 4.3 in Form von Himmelskarten dargestellt. In Tabelle 4.1 können die zugehörigen Verschiebungen von der Quellposition und die Aufweitung in Ra- und Dec-Richtung abgelesen werden. Am Unterschied zwischen (a) und (c) erkennt man sehr gut, dass CT5 einen wesentlich größeren Einfluss auf die Richtungsrekonstruktion hat als die kleineren Teleskope. Die Aufweitung der Quelle ist in (c) deutlich größer als in (a). Dies liegt vor allem daran, dass CT5 aufgrund seiner höheren Nachweiseffizienz an viel mehr Ereignissen beteiligt ist als CT1. Außerdem geht die Hauptachse des Bildes des großen Teleskops aufgrund seiner Helligkeit stärker in die Berechnung des Schnittpunkts aller Hauptachsen ein, als die der anderen Teleskope. Dieser Effekt ist auch in Abb. 4.4 gut zu erkennen. Hier sind die Verteilungen auf die Rektaszensionsachse projiziert. (Projektionen auf die Deklinationsachse befinden sich in Anhang A.1.) Die blaue Kurve ist deutlich breiter als die schwarze und weist sogar ein zweites, lokales Maximum auf. Im Fall (b) sieht man, dass Rekonstruktionsfehler natürlich stärker werden, wenn ein korrekt ausgerichtetes Teleskop von der Rekonstruktion ausgeschlossen wird. Dieser Effekt ist aber nicht so stark wie der, wenn das Pointing von

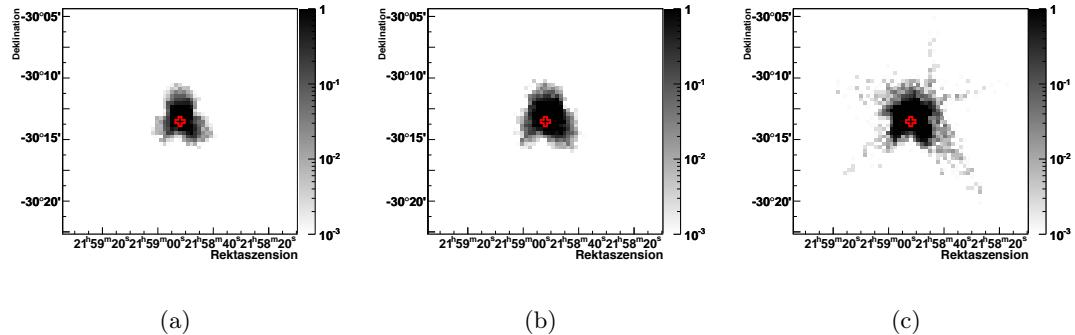


Abbildung 4.3.: Himmelskarten der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverschiebung. Das rote Kreuz markiert die simulierte Quellposition (von PKS 2155–304). Spektralindex: $\gamma = 2$. (a): Kamera von CT1 um $100''$ nach unten verschoben (b): Kamera von CT1 um $100''$ nach unten verschoben, CT5 nimmt nicht an der Detektion teil (c): Kamera von CT5 um $100''$ nach unten verschoben

CT5 manipuliert wird. Auch die Abweichung des Schwerpunkts von der Quellposition wird von Simulation (a) über (b) nach (c) stärker, wie man Tabelle 4.1 entnehmen kann.

4.3. Verdrehung von Kameras

Nach dem Verschieben von Kameras soll jetzt noch untersucht werden, welche Auswirkungen die Verdrehung einzelner Kameras auf die Richtungsrekonstruktion hat. Um die Effekte der Rotation deutlich sichtbar zu machen, wird ein Winkel von 5° verwendet. Auch hier werden wieder drei verschiedene Szenarien simuliert: In zwei davon wird die Kamera von CT1 um 5° verdreht. Einmal gehen Daten von CT5 in die Richtungsrekonstruktion ein (a) und einmal nicht (b). In der dritten Simulation ist nur die Kamera des großen Teleskops verdreht (c). Die so entstehenden Himmelskarten sind in Abb. 4.5 zu sehen. In Abb. 4.6 sind die Projektionen dieser Himmelskarten auf die Ra-Achse dargestellt. (Projektionen auf die Deklinationsachse befinden sich in Anhang A.1.) Die Zahlenwerte für Verschiebungen von der Quellposition und Standardabweichungen sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Auch hier ist eine gesteigerte Quellaufweitung von (a) nach (b) zu erkennen. Es fällt auch eine deutliche (bis $\sim 1'$) Abweichung des Schwerpunkts von der simulierten Quellrichtung auf. Bei Fall (c) sind Standardabweichung und Verschiebung zwar zum Teil kleiner als bei (b), jedoch ist hier das Maximum stärker verschmiert, wie in Abb. 4.6 gut zu sehen ist.

Simulation	Abweichung Ra	RMS Ra	Abweichung Dec	RMS Dec
CT1 verschoben	-7,2"	53"	10,4"	50"
CT1 verschoben, kein CT5	-10,8"	54"	17,3"	53"
CT5 verschoben	-14,4"	79"	23,4"	61"
CT1 verdreht	39,6"	74"	2,9"	85"
CT1 verdreht, kein CT5	54"	81"	4,0"	89"
CT5 verdreht	54"	80"	-0,72"	82"

Tabelle 4.1.: Standardabweichungen und Verschiebungen der Schwerpunkte der Verteilungen der rekonstruierten Schauerrichtungen bei unterschiedlichen Simulationen. Die Werte sind in Rektaszensions- und Deklinationsrichtung aufgeteilt.

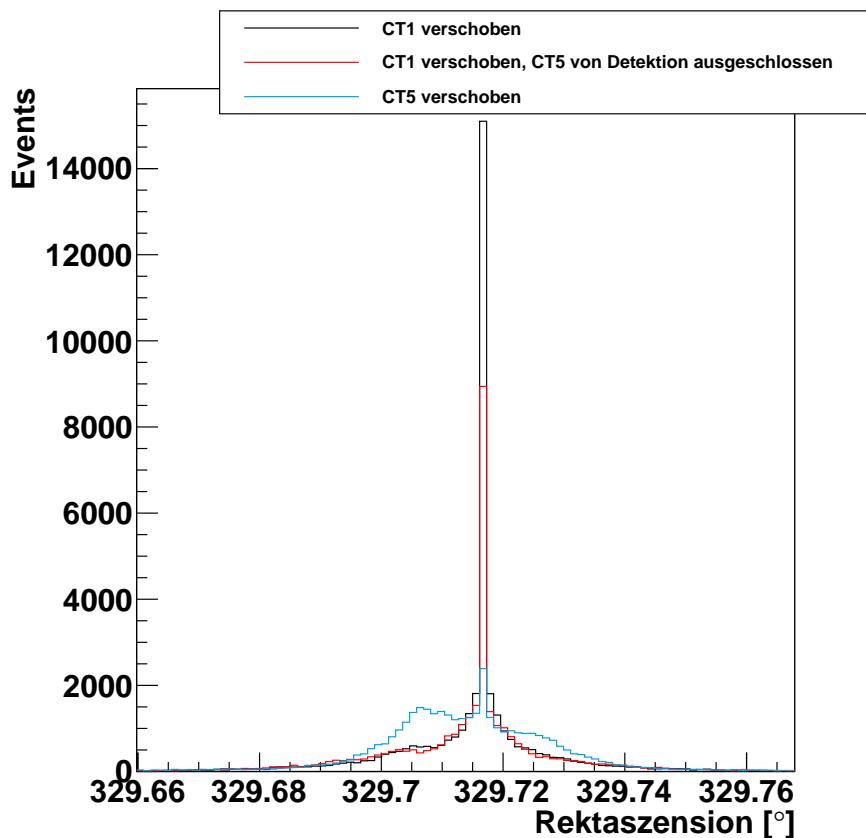


Abbildung 4.4.: Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverschiebung um 100", projiziert auf die Ra-Achse. Der Peak bei der simulierten Quellrichtung entsteht durch Events, an denen das verschobene Teleskop nicht teilnimmt.

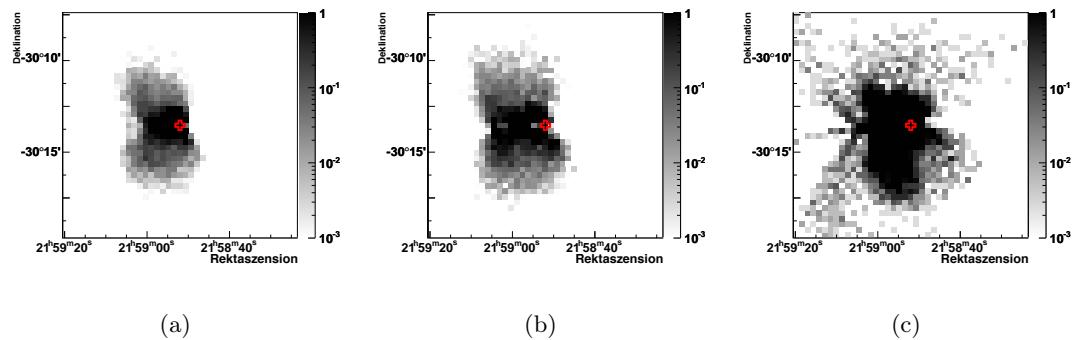


Abbildung 4.5.: Himmelskarten der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kamerarotation. Das rote Kreuz markiert die simulierte Quellposition. (von PKS 2155–304). Spektralindex: $\gamma = 2$. (a): Kamera von CT1 um 5° verdreht (b): Kamera von CT1 um 5° verdreht, CT5 nimmt nicht an der Detektion teil (c): Kamera von CT5 um 5° verdreht

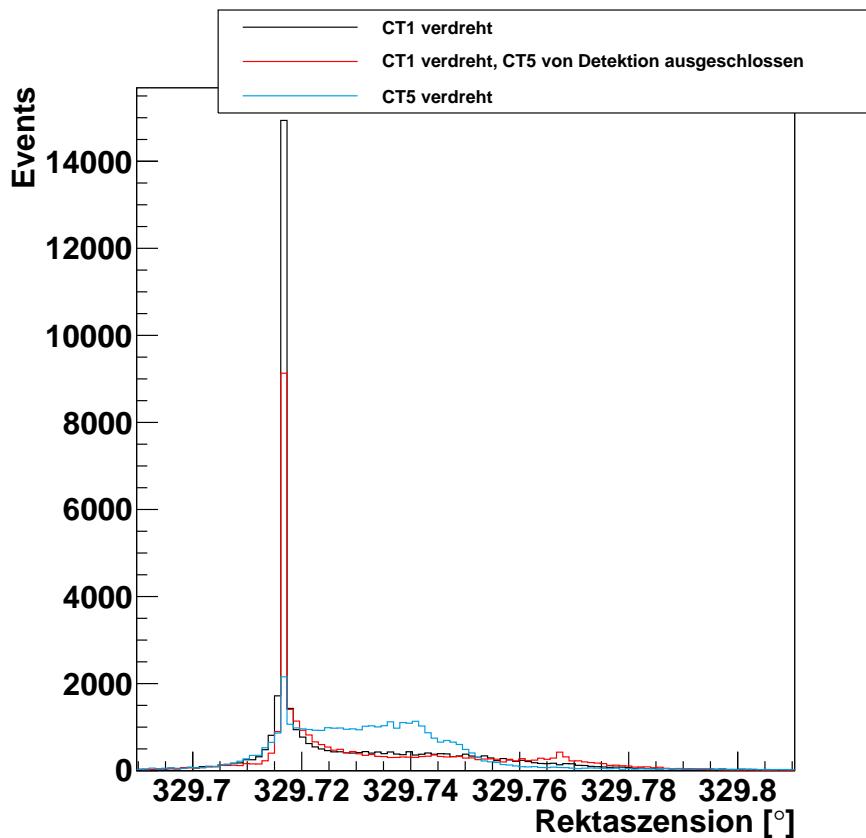


Abbildung 4.6.: Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverdrehung um 5° , projiziert auf die Ra-Achse. Der Peak bei der simulierten Quellrichtung entsteht durch Events, an denen das verdrehte Teleskop nicht teilnimmt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass sich die vereinfachte Schauersimulation und der Detektions- und Richtungsrekonstruktionsmechanismus aus der Arbeit von Veh, 2013 auch auf eine Teleskop-Anordnung mit verschiedenen Teleskoptypen übertragen lässt. Dabei sind jedoch weitere Anpassungen und genauere Analysen von bestehenden Monte-Carlo-Simulationen nötig. An dieser Stelle könnte die Simulation durch die Betrachtung einzelner TiggerPattern noch weiter verbessert werden. Dies würde den Rechenaufwand in der Simulation aber deutlich erhöhen. Außerdem sind die Monte-Carlo-Daten dafür im Moment noch nicht in ausreichendem Maße vorhanden. Mit der erweiterten Simulation wurden erste Untersuchungen zur Auswirkung von Pointingfehlern auf die Richtungsrekonstruktion durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass kleine Abweichungen im Pointing eines großen Teleskops einen stärkeren Einfluss auf die beobachtete Quellposition haben als bei einem kleinen. Systematische Studien dieses Verhaltens sind jedoch aufgrund von noch nicht vorhandenen Monte-Carlo-Daten weiterer Zenitwinkel und Wobble-Offsets und wegen der zeitlichen Begrenzung einer Bachelorarbeit zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Außerdem können die Ergebnisse der entwickelten Simulation mit Messdaten verglichen werden, sobald diese für das H.E.S.S. II Array vorliegen. Im Prinzip sollte es auch möglich sein, die entwickelte Simulation auch auf Cherenkov Telescope Array (CTA) anzuwenden, wo noch mehr verschiedene Teleskoptypen zu einer Anordnung zusammengeschlossen sind.

Literatur

- Aharonian, F. et al. (Okt. 2006). »Observations of the Crab nebula with HESS«. In: *Astronomy & Astrophysics* 457, S. 899–915. DOI: 10.1051/0004-6361:20065351. eprint: arXiv:astro-ph/0607333.
- Auger Collaboration (1996). *Pierre Auger Project Design Report*. Auger Collaboration.
- Cornils, R. et al. (Nov. 2003). »The optical system of the H.E.S.S. imaging atmospheric Cherenkov telescopes. Part II: mirror alignment and point spread function«. In: *Astroparticle Physics* 20, S. 129–143. DOI: 10.1016/S0927-6505(03)00172-5. eprint: arXiv:astro-ph/0308247.
- Funk, S. et al. (Nov. 2004). »The trigger system of the H.E.S.S. telescope array«. In: *Astroparticle Physics* 22, S. 285–296. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2004.08.001. eprint: arXiv:astro-ph/0408375.
- Gaisser, Thomas K. (1990). *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge: University Press.
- Gillessen, Stefan (Juli 2004). »Sub-Bogenminuten-genaue Positionen von TeV-Quellen mit H.E.S.S.« Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Gottwald, M. (2009). »Fundamentals of Astronomy«. In: *Handbook of Practical Astronomy*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Grupen, Claus (1993). *Teilchendetektoren*. Mannheim u. a.: BI-Wissenschaftsverlag.
- H.E.S.S. Collaboration (2013). *H.E.S.S. Website*. URL: <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>.
- Hillas, A. M. (Aug. 1985). »Cerenkov light images of EAS produced by primary gamma«. In: *International Cosmic Ray Conference*. Hrsg. von F. C. Jones. Bd. 3. International Cosmic Ray Conference, S. 445–448.
- Klapdor-Kleingrothaus, H. V. und K. Zuber (1997). *Teilchenastrophysik*. Stuttgart: Teubner.
- Lennarz, Dirk (Okt. 2012). »Transient Very-High-Energy Gamma-Ray Emission from Gamma-Ray Bursts and Supernovae with H.E.S.S.« Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Veh, J. (2013). »Studie der Pointing-Korrekturen von H.E.S.S. I«. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Völk, H. J. und K. Bernlöhr (Aug. 2009). »Imaging very high energy gamma-ray telescopes«. In: *Experimental Astronomy* 25, S. 173–191. DOI: 10.1007/s10686-009-9151-z. arXiv:0812.4198.

A. Anhang

A.1. Projektionen der Schauerverteilungen auf die Deklinationsachse

In diesem Abschnitt sind Projektionsplots auf die Deklinationsachse abgebildet, die in den Abschnitten 4.2 und 4.3 nicht gezeigt wurden.

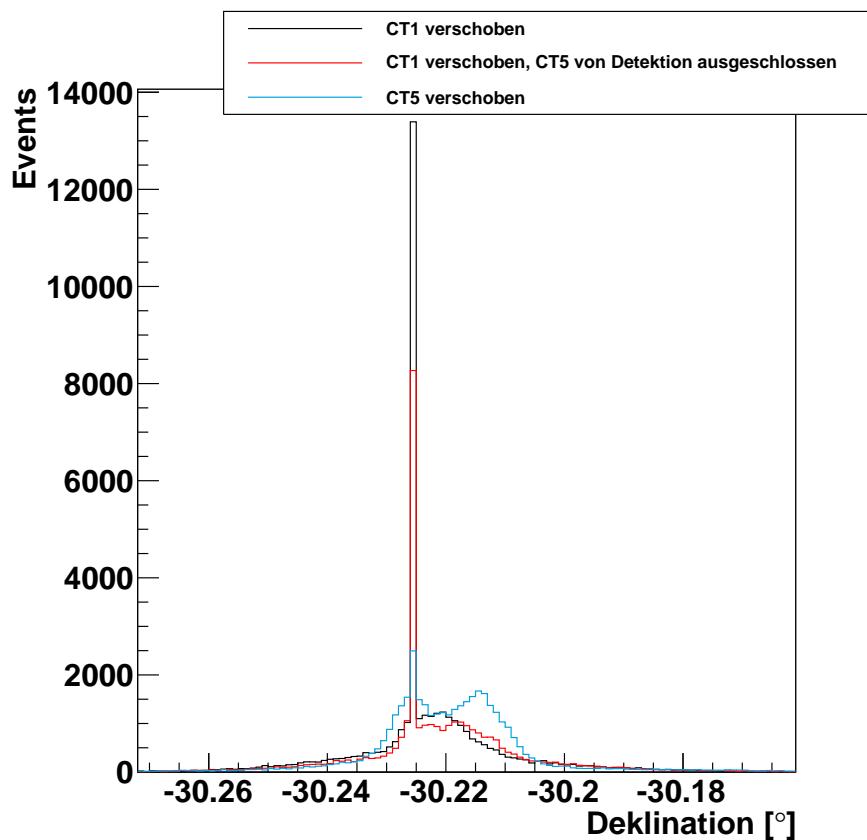


Abbildung A.1.: Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverschiebung um 100'', projiziert auf die Dec-Achse. Der Peak bei der simulierten Quellrichtung entsteht durch Events, an denen das verschobene Teleskop nicht teilnimmt.

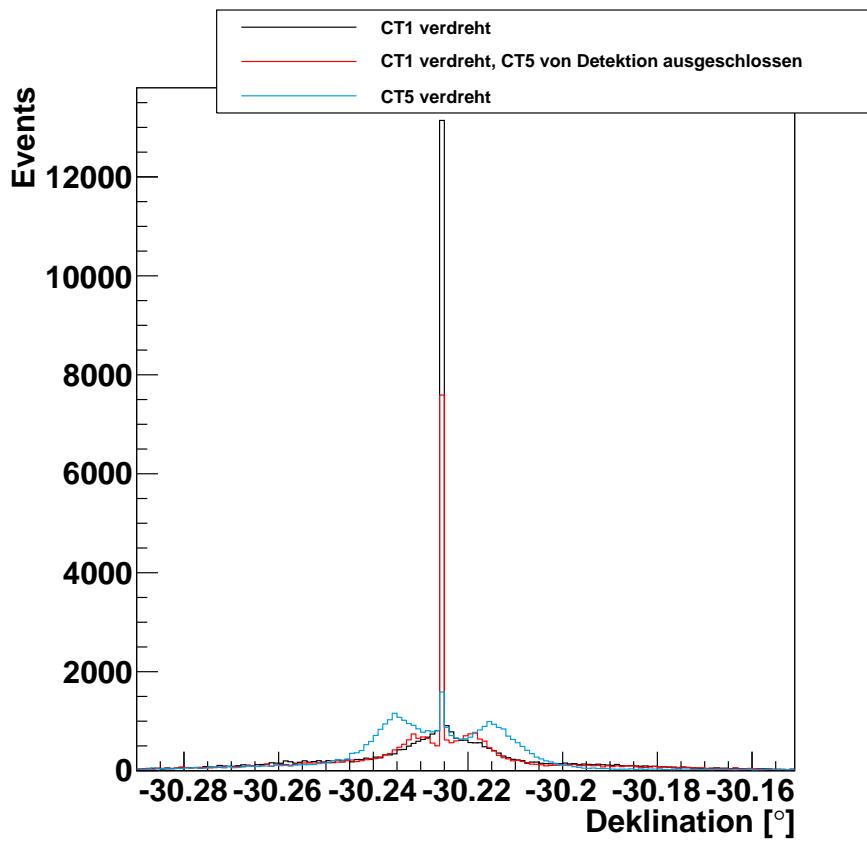


Abbildung A.2.: Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Kameraverdrehung um 5° , projiziert auf die Dec-Achse. Der Peak bei der simulierten Quellrichtung entsteht durch Events, an denen das verdrehte Teleskop nicht teilnimmt.

Danksagung

An dieser möchte ich mich noch bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt:

- Prof. Dr. Christopher van Eldik für die Ausschreibung dieser Bachelorarbeit und die gute Betreuung.
- Prof. Dr. Uli Katz für die Übernahme des Koreferats.
- Johannes Veh für die vielen konstruktiven Diskussionen zu meinem Arbeitsthema und für seine Zeit beim Korrekturlesen.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die Arbeit selbst verfasst habe und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Fürth, 02.08.2013

Domenico Tiziani