

# STUDIE DER POINTING-KORREKTUREN VON H.E.S.S. I



MASTERARBEIT AUS DER PHYSIK

VORGELEGT VON

JOHANNES VEH

12.06.2013

FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG



BETREUER: PROF. DR. CHRISTOPHER VAN ELDIK  
ZWEITKOREKTOR: PROF. DR. ULI KATZ



Das Titelbild zeigt ein nachbearbeitetes Foto des H.E.S.S.-Experiments. Zu sehen ist eines der vier kleinen Teleskope. In gelb ist ein Teilchenschauer dargestellt und sein Cherenkovlichtkegel in hellblau. ©H.E.S.S. Collaboration Fabio Acero und Henning Gast



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung <math>\gamma</math>-Astronomie</b>	<b>1</b>
1.1. Geschichte der Astronomie . . . . .	1
1.2. $\gamma$ -Strahlungsquellen . . . . .	3
1.2.1. Quellen von TeV- $\gamma$ -Strahlung . . . . .	3
1.2.2. Supernovaüberreste . . . . .	3
1.2.3. Pulsarwindnebel . . . . .	3
1.2.4. Aktive Galaxienkerne . . . . .	4
1.3. Physikalische Prozesse . . . . .	5
1.4. Der Cherenkov-Mechanismus . . . . .	5
1.5. Anforderungen . . . . .	7
1.6. Ziel der Studie . . . . .	8
<b>2. H.E.S.S.</b>	<b>9</b>
2.1. Aufbau und Funktionsweise . . . . .	9
2.2. Koordinatensysteme . . . . .	11
2.2.1. Rektaszension-Deklination-System . . . . .	11
2.2.2. Altitude-Azimut-System . . . . .	12
2.2.3. Groundsystem . . . . .	12
2.2.4. TiltedTelescopeSystem . . . . .	12
2.2.5. Nominalsystem . . . . .	13
2.3. Trigger und Kameraauslese . . . . .	14
2.4. Hillas-Analyse . . . . .	14
2.5. Richtungsrekonstruktion . . . . .	15
2.5.1. Pointing bei H.E.S.S. . . . . .	16
2.5.2. Fehler der Rekonstruktion . . . . .	17
2.6. Untergrund . . . . .	17
2.6.1. Myonen . . . . .	18
2.6.2. Hadronen . . . . .	18
2.6.3. Elektronen . . . . .	19
2.6.4. Untergrundsubtraktion . . . . .	19
<b>3. Software und Simulation</b>	<b>21</b>
3.1. H.E.S.S. Analysis Pipeline (HAP) . . . . .	21
3.2. Konzept der Simulation . . . . .	21
3.3. Lookup-Tabellen . . . . .	22
3.4. Simulationen . . . . .	22
3.4.1. Informationseingabe . . . . .	23
3.4.2. Schauersimulation . . . . .	23
3.4.3. Teleskop-Setup . . . . .	25
3.4.4. Schauerdetektion . . . . .	26
3.4.5. Schauerrekonstruktion . . . . .	27
3.4.6. Speichern . . . . .	27

## *Inhaltsverzeichnis*

<b>4. Ergebnisse</b>	<b>29</b>
4.1. Performance der Simulation . . . . .	29
4.2. Verschieben von Kameras . . . . .	33
4.3. Kamerarotation . . . . .	34
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>41</b>
<b>Referenzen</b>	<b>43</b>
<b>Anhang</b>	<b>44</b>
A.1. Schauerverteilung der geometrischen Rekonstruktion . . . . .	45
A.2. Schauerverteilung der Lookupsimulation . . . . .	48
A.3. Schauerverteilung im Groundsystem für H.E.S.S.-Monte-Carlo Daten . . . . .	51
A.4. Runlisten . . . . .	53
<b>Danksagung</b>	<b>54</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Transparenz der Erdatmosphäre für elektromagnetische Strahlung . . . . .	2
1.2. Spektrum der elektromagnetischen Strahlung . . . . .	2
1.3. VHE- $\gamma$ -Himmelskarte . . . . .	3
1.4. H.E.S.S. Aufnahme des Supernovaüberrests RX J1713.7–3946 . . . . .	4
1.5. Erste Aufnahme des Krebsnebels mit H.E.S.S. . . . .	5
1.6. Heitler-Model eines elektromagnetischen Schauer . . . . .	6
1.7. Beispiel der Entwicklung eines hadronischen Schauers . . . . .	6
1.8. Cherenkov-Lichtkegel . . . . .	7
1.9. Triggerrate des H.E.S.S.-Teleskop-Array . . . . .	8
2.1. Aufnahme des H.E.S.S. Teleskop-Arrays . . . . .	9
2.2. Illustration von Rektaszension und Deklination . . . . .	11
2.3. Illustration von Altitude und Azimut . . . . .	12
2.4. Teleskopposition der Teleskope CT1-CT4 in Meter im Groundsystem. . . . .	13
2.5. Multiplizitätsverteilung für H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten . . . . .	14
2.6. Illustration eines $\gamma$ -Schauers. . . . .	15
2.7. Parametrisierung der Hillas-Ellipse . . . . .	15
2.8. Projektion von Kamerabildern in eine gemeinsamem Kameraebene . . . . .	16
2.9. Pointingmodel für das H.E.S.S.-Experiment . . . . .	17
2.10. Myon in Kamerabild . . . . .	18
2.11. Proton in Kamerabild . . . . .	18
2.12. Elektron in Kamerabild . . . . .	19
3.1. Multiplizitätsverteilung und Energiespektrum von H.E.S.S.-MC-Daten und Si- mulation . . . . .	23
3.2. Ablaufdiagramm der entwickelten Simulation . . . . .	24
3.3. Simulierte Schauerverteilung im Groundsystem . . . . .	24
3.4. Simuliertes Energiespektrum . . . . .	25
3.5. Lookup-Tabelle für Detektionswahrscheinlichkeit . . . . .	27
3.6. Lookup-Tabelle für Anzahl der Photoelektronen . . . . .	28
4.1. Schauerverteilung für geometrische Detektion im Groundsystem bei $30^\circ$ Ze- nitwinkel, Multiplizität 2, CoG und Core Verteilung . . . . .	30
4.2. Schauerverteilung für Lookup-Tabellendetektion im Groundsystem bei $30^\circ$ Zenitwinkel, Multiplizität 2, CoG und Core Verteilung . . . . .	30
4.3. Schauerverteilung von H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten im Groundsystem bei $0^\circ$ Zenitwinkel. Die Multiplizität ist 2. . . . .	31
4.4. Multiplizitätsverteilung für H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten und Simulationen . . . .	31
4.5. Simulierte Quelle ohne Manipulation . . . . .	32
4.6. H.E.S.S.-Daten Quellposition und Überschusskarte . . . . .	32
4.7. Schematische Darstellung der Verschiebung der rekonstruierten Schauerrich- tung durch Verschiebung eines Kamerabildes. . . . .	33
4.8. Überschusskarte für Manipulierte H.E.S.S.-Daten und dazu passende Simulation	34

4.9. Auf der Abszissenachse ist die künstliche Verschiebung der H.E.S.S.-Kameras und auf der Ordinatenachse die Verschiebung Verschiebung des Schwerpunkts der rekonstruierten Schauerrichtungen von der Katalogposition der Quelle. Die Gerade hat eine Steigung von 1. . . . .	34
4.10. Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1. Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Verdrehung 1 Grad. Rechts: Verdrehung 5 Grad. Runliste „all“ . . . . .	35
4.11. Die Standardabweichung der in Abb 4.10 gezeigten Schauerrichtungsverteilung projiziert auf die RA und Dec-Koordinatenachsen, abhängig vom Rotationswinkel von CT1 (links) und die Schwerpunktposition abzüglich der Position bei Rotation $0^\circ$ (rechts). . . . .	36
4.12. Manipulierte H.E.S.S.-Daten Links: Breite des gefitteten 2D-Gauß abhängig vom Rotationswinkel von CT1. Rechts: Die Schwerpunktposition abzüglich der Testposition ( $329,7166^\circ$ : $-30,2255^\circ$ ). . . . .	36
4.13. Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung um $3,6^\circ$ der Kamera von Teleskop 1. Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Oben links: Wobble-Offset in positive RA-Richtung. Oben rechts: in negative RA-Richtung. Unten links: Wobble-Offset in positive Dec-Richtung. Unten rechts: Wobble-Offset in negative Dec-Richtung. . . . .	37
4.14. Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskops. Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Verdrehung 1 Grad. Rechts: Verdrehung 5 Grad. Von links nach rechts Wobble-Offset: RA positiv, RA negativ, Dec positiv, Dec negativ. Von oben nach unten CT1 $3,6^\circ$ verdreht dann CT2, CT3 und CT4. . . . .	38
4.15. Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1 um $4^\circ$ . Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Sind die Teleskope 1 und 2 Beteiligt und rechts Teleskope 1 und 4. . . . .	39
4.16. Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1 um $4^\circ$ . Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Sind die Teleskop 1, 2 und 3, rechts: 1, 2 und 4 und unten: Teleskop 1,3 und 4. . . . .	40
4.17. Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1 um $4^\circ$ . Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Alle vier Teleskope sind Beteiligt. . . . .	40
A.1. geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei $30^\circ$ Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	45
A.2. Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei $30^\circ$ Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	45
A.3. Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei $0^\circ$ Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 2. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	46

A.4. Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei $0^\circ$ Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	46
A.5. Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei $0^\circ$ Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	47
A.6. Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei $30^\circ$ (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	48
A.7. Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei $30^\circ$ (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	48
A.8. Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei $0^\circ$ (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 2. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	49
A.9. Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei $0^\circ$ (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	49
A.10. Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei $0^\circ$ (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts). . . . .	50
A.11. H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten: Schauerverteilung von H.E.S.S.-Monte-Carlo Daten im Groundsystem bei $0^\circ$ Zenitwinkel. Die Multiplizität ist 3 (links) und 4 (rechts). . . . .	51
A.12. H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten: Schauerverteilung von H.E.S.S.-Monte-Carlo Daten im Groundsystem bei $30^\circ$ Zenitwinkel. Die Multiplizität ist 2 (links), 3 (rechts) und 4 (unten). . . . .	52
A.13. Illustration der Wobbleoffsets die beobachtete Quelle ist bei (0,0). . . . .	53



# Tabellenverzeichnis

2.1. Technische Daten der H.E.S.S. Teleskope (H.E.S.S., 2012). Mit * gekennzeichnete Werte gelten für den Hybridmodus. . . . .	10
4.1. Feste Parameter, die im Code enthalten sind . . . . .	29
4.2. Analyseergebnisse für H.E.S.S.-Daten mit unterschiedlicher Pointingmanipulation. Überschussphotonen in einer kreisförmigen Signalregion mit Radius $\theta=0,1^\circ$ , zentriert auf die Katalogposition der Quelle. . . . .	35

## Zusammenfassung

Das H.E.S.S. Teleskop ist eins der erfolgreichsten  $\gamma$ -Strahlungsexperimente der Gegenwart. Wie bei allen Experimenten ist es auch bei H.E.S.S. sehr wichtig die systematischen Unsicherheiten zu verstehen. Da man diese nicht mit Hilfe von Laborexperimenten testen kann, werden üblicherweise Monte-Carlo-Simulationen verwendet. Ein wichtiger Bestandteil für die Analyse-Kette ist die Richtungsrekonstruktion. Mit Hilfe von Pointingmodellen werden Abweichungen von der Sollbeobachtungsrichtung parametrisiert. Ziel ist es, diese Abweichungen zu korrigieren, mit dem Ziel auf wenige Bogensekunden genau die Ursprungsrichtung der Strahlung zu bestimmen. In dieser Arbeit wurde eine Simulation entwickelt, die in der Lage ist, einen Teil des in H.E.S.S. verwendeten Pointingmodells nachzustellen. Durch Manipulationen an diesem Modell ist es möglich, die Auswirkungen von Fehlkorrekturen zu studieren. Die Simulation verwendet ein stark vereinfachtes Schauermodell und arbeitet ohne Berücksichtigung der Punktauflösungsfunktion des Teleskops. Das hat zum einen zur Folge, dass die Simulation weniger Zeit zum Rechnen braucht als eine vollständige Simulation und zum anderen kann so die Auswirkung von Pointingfehlern studiert werden, ohne dass diese durch die Punktauflösungsfunktion. Erste Ergebnisse zeigen, dass geringe Verschiebungen oder Verdrehungen der Kamera die Bestimmung von Quellgröße und Quellposition beeinflussen. Dies wurde mit H.E.S.S.-Beobachtungsdaten, welche auf dieselbe Weise manipuliert wurden, überprüft. Auch in den H.E.S.S. Beobachtungen sieht man dieses Verhalten.

## Abstract

The H.E.S.S. telescopes are one of today's most successful  $\gamma$ -ray experiments. As in every experiment it is important to know its systematic errors. Because most of them cannot be studied in the laboratory experiments you need to rely on Monte-Carlo simulations. One important part of the analysis chain is the direction reconstruction where pointing models are used to parameterise and correct between the true pointing direction and the target direction. These models aim for a reconstruction with systematic errors of a few arcseconds. In this Thesis I developed a simulation, which can simulate part of the H.E.S.S. pointing model. By manipulating this model the impact of mis-corrections can be studied. My simulation uses a simplified air-shower model and ignores the point-spread-function of the telescope array. Therefore the simulation is less time consuming than the complete H.E.S.S. simulation and I can study the impact of pointing errors without the smearing of the point-spread-function. First results show that a small camera offset or rotation influence the determination of source size and source position. A similar behaviour is observed when analysing real HESS data which are manipulated in the same way.

# 1. Einführung in die Hochenergie $\gamma$ -Astronomie

Seit der Entdeckung der kosmischen Strahlung Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigt sich die Hochenergieastronomie mit der Frage ihrer Herkunft und Entstehung. Dazu wurden seit Mitte des 20. Jahrhunderts Gammastrahlungs-Experimente durchgeführt, um diesen Fragen nachzugehen. Seit 25 Jahren werden immer mehr Quellen hochenergetischer  $\gamma$ -Strahlung am Himmel entdeckt. In dieser Arbeit beschäftige ich mich mit der Richtungsrekonstruktion der H.E.S.S.-Teleskope. Im Besonderen befasse ich mich mit Abweichungen von der Soll-Beobachtungsrichtung und der daraus resultierenden Fehler in der Richtungsrekonstruktion. Im ersten Kapitel wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Entwicklungen der Astronomie in den letzten Jahrhunderten gegeben. Im Besonderen werden die Methoden der Hochenergie-Astrophysik vorgestellt. Dabei orientiere ich mich an den Werken von Bradt (2004), Longair (2011) und Lorenz & Wagner (2012).

## 1.1. Geschichtliche und technische Entwicklung der Astronomie

Die Anfänge der Astronomie gehen zurück auf vorchristliche Zeit. Damals stand im Mittelpunkt die Beobachtung der Sonne, des Mondes und der Planeten, die für den Alltag wichtig waren. Zum Beispiel konnten mit Hilfe von Sternkonstellationen günstige Zeiten für die Saat und Ernte vorhergesagt werden. Viele der außergewöhnlichen Himmelserscheinungen wurden als magische, politische oder religiöse Zeichen gedeutet.

Mit der Erfindung des Teleskops um 1600 war es möglich Dinge zu beobachten, die für das menschliche Auge nicht mehr erkennbar sind. Mit einem der ersten dieser Teleskope entdeckte Galileo Galilei die vier hellsten Jupitermonde, die heute die galileischen Monde genannt werden. Zu Beginn bestanden Teleskope noch aus Linsensystemen, heutige Hochleistungs-teleskope sind jedoch Spiegelteleskope, wie beispielsweise das Very Large Telescope (VLT). Dies hat vier Teleskope, die jeweils einen Spiegeldurchmesser von 8,2 Metern aufweisen (ESO, 2012).

1931 wurde von Carl Jansky kosmische Radiostrahlung entdeckt und damit der Grundstein für die Radioastronomie gelegt. Dies ermöglichte eine Erweiterung der astronomischen Beobachtungen über den Bereich des sichtbaren Lichts hinaus. Mit der Entdeckung der Höhenstrahlung durch Victor Hess im Jahr 1912 gab es den Beweis für ionisierende Strahlung aus dem Universum. Heute weiß man dass es vorwiegend geladene Teilchen (Protonen, schwerere Kerne und geladene Leptonen) und Photonen sind die auf die Erde treffen. Da die Atmosphäre für Photonen mit hoher Energie undurchlässig ist (Abb. 1.1), war es erst mit der Entwicklung von Raketen und Satelliten möglich, Beobachtungen im Röntgen- und weichen  $\gamma$ -Bereich durchzuführen. Dies geschah ab Mitte des 20. Jahrhunderts. Erste Versuche der Detektion hochenergetischer  $\gamma$ -Strahlung vom Erdboden aus (mit indirekter Detektionsmethode) in den 60er Jahren waren nicht erfolgreich, da die Auflösung und Sammelflächen nicht ausreichend waren. 1989 wurde mit Hilfe des Whipple Teleskops die erste  $\gamma$ -Quelle, der Krebsnebel, entdeckt (Weekes et al., 1989). 1992 fand die Whipple Kollaboration die erste extra-galaktische  $\gamma$ -Quelle, den aktiven Galaxienkern (AGN) Markarian 421 (Punch et al., 1992). Das aktuell im VHE-Bereich (Very High Energies, 100 GeV bis 100 TeV) erfolgreichste

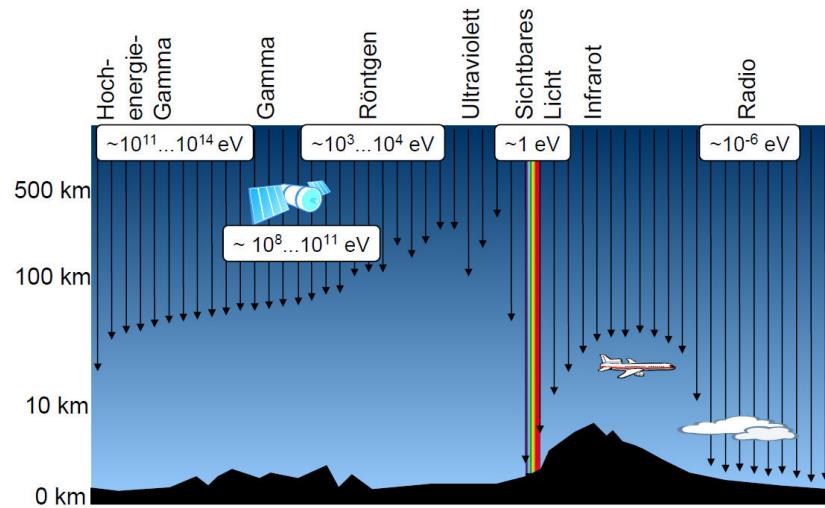


Abbildung 1.1.: Transparenz der Erdatmosphäre für elektromagnetische Strahlung: die Pfeile deuten symbolisch an, wie tief Strahlung unterschiedlicher Energie in die Atmosphäre eindringt.

Teleskop ist H.E.S.S., welches mehr als die Hälfte der heute bekannten Quellen entdeckt hat. Mit modernen Instrumenten ist es möglich mehr als 25 Größenordnungen im elektromagnetischen Spektrum zu beobachten. Der durch das H.E.S.S. Experiment abgedeckte Bereich ist in Abbildung 1.2 angedeutet. Whipple und H.E.S.S. haben gemeinsam, dass beide Teleskope auf die Detektion von Cherenkov-Licht ausgelegt sind und damit eine indirekte Methode zur Detektion kosmischer Gammastrahlung verwenden. Andere Beispiele für heutige Cherenkov-Teleskope sind MAGIC und VERITAS. Eine alternative Methode um kosmische Strahlung zu messen ist die Detektion atmosphärischer Schauer, bei denen die Teilchen auf den Boden auftreffen (Lorenz & Wagner, 2012).

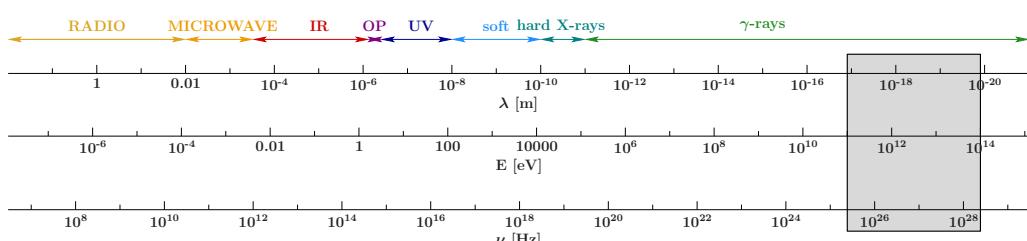


Abbildung 1.2.: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom Radiobereich bis zu sehr hohen Energien unter Angabe der Wellenlänge und dazugehörigen Energie. Der markierte Bereich entspricht etwa dem Energiebereich, den das H.E.S.S.-Experiment untersucht (mit freundlicher Genehmigung von F. Krauß).

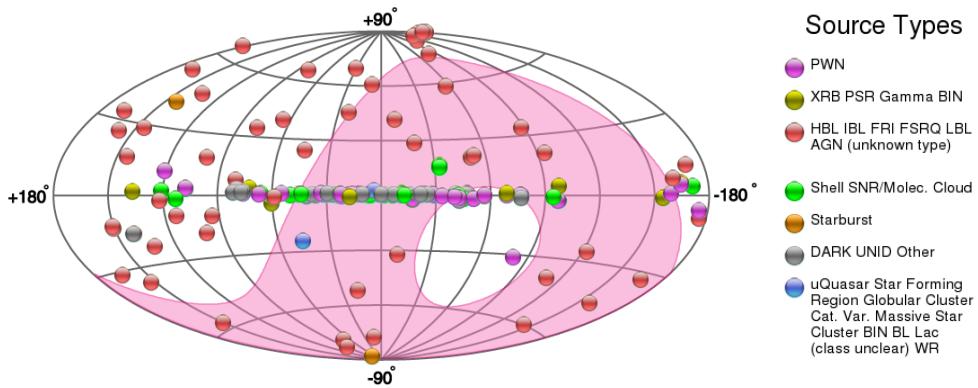


Abbildung 1.3.: VHE- $\gamma$ -Himmelskarte in galaktischen Koordinaten, H.E.S.S. Blickfeld (lila; <http://tevcat.uchicago.edu/>)

## 1.2. Quellen hochenergetischer $\gamma$ -Strahlung

In diesem Abschnitt gebe ich eine Übersicht über die typischen astronomischen Quellen, die im  $\gamma$ -Bereich detektierbar sind. Danach gehe ich auf die physikalischen Prozesse ein, die derart hochenergetische Photonen produzieren. Ich orientiere mich dabei an Jung (1999) und Lorenz & Wagner (2012).

### 1.2.1. Quellen von TeV- $\gamma$ -Strahlung

Seit der Entdeckung des ersten TeV-Emitters wurden über 150 Quellen verschiedener Arten gefunden (Lorenz & Wagner, 2012). Eine aktuelle Himmelskarte ist in Abb. 1.3 zu sehen. Die bisher am häufigsten entdeckten Quelltypen sind Pulsarwindnebel (PWN), Aktive Galaxienkerne (AGN) und Supernovaüberreste (SNR).

### 1.2.2. Supernovaüberreste

Ein massereicher Stern, der am Ende seines Lebenszyklus angekommen ist, kann in Form einer Supernova explodieren und dabei große Mengen Materie ins All schleudern. In der ersten Phase nach der Explosion kann das Material frei expandieren, man spricht von der *free expansion phase*. Irgendwann hat die Explosionswelle genug Materie des interstellaren Mediums aufgesammelt, so dass eine Schockfront entsteht, sowie ein rücklaufender Schock (*reverse shock*). Diese Phase nennt man die Sedov-Taylor Phase (Taylor, 1950). Ab Erreichen dieser Phase spricht man von einem Supernovaüberrest. In dieser können Beschleunigungsmechanismen stattfinden, welche Teilchen auf hohe Energien beschleunigen. Dies wird im nächsten Abschnitt detailliert betrachtet.

Im  $\gamma$ -Bereich wurden bisher etwa 13 Supernovaüberreste entdeckt, fünf davon mit H.E.S.S. (Wakely & Horan, 2013). Ein Beispiel ist der Supernovaüberrest RX J1713.7–3946. Mit Hilfe der 2003 genommenen Daten konnte das erste Mal ein astronomisches Objekt bei Energien oberhalb von 1 TeV auf Größenskalen von Bogenminuten aufgelöst werden (Berge et al., 2005, Abb. 1.4).

### 1.2.3. Pulsarwindnebel

Bei einem Untertyp aller Supernovae verliert ein massereicher Stern nur die äußeren Hälften, es bleibt ein sehr dichter, kompakter Kern übrig. Dieses Objekt, welches fast nur aus Neutronen besteht, kann übriges Gas aus der Umgebung akkretieren. Dieses wird ebenfalls

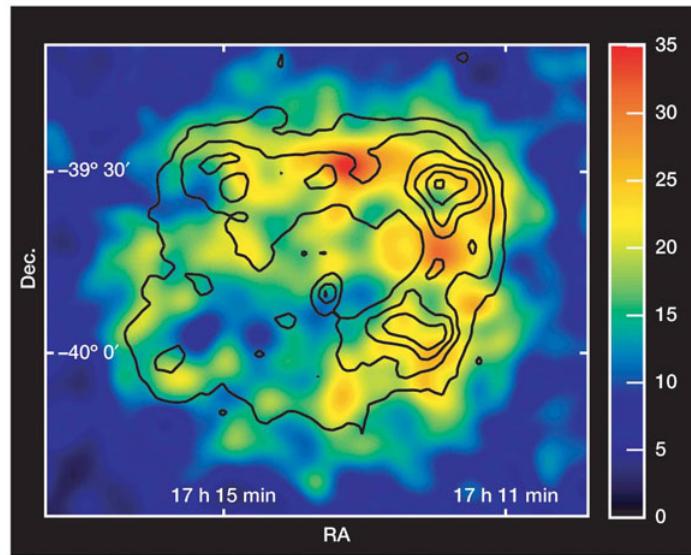


Abbildung 1.4.: H.E.S.S. Aufnahme des Supernovaüberrests RX J1713.7–3946. Die Daten wurden mit einer Gauß-Funktion mit einer Breite von  $3'$  verschmiert. Die schwarzen Konturen zeigen die Oberflächenhelligkeit der Quelle im Röntgenbereich (1 – 3 keV), aufgenommen mit ASCA (Aharonian et al., 2004).

in Neutronen umgewandelt. Gewinnt das kompakte Objekt durch den Akkretionsprozess mehr als 3 Sonnenmassen ( $M_\odot$ ) kann die Gravitation den Entartungsdruck (Pauli-Prinzip) überwinden, es entsteht eine schwarzes Loch. Übersteigt die Masse nicht die  $3 M_\odot$  entsteht ein Neutronenstern. Aufgrund der Drehimpulserhaltung und der Erhaltung des magnetischen Flusses können diese Objekte hohe Rotationsfrequenzen von über 100 Hz aufweisen und starke Magnetfelder von bis zu  $10^8$  T. Sind Rotationsachse und magnetische Achse zueinander geneigt handelt es sich um einen Pulsar. Pulsare sind in der Lage Teilchen zu beschleunigen, trifft dieser Teilchenwind auf das umgebende Medium so kann es zu Schocks kommen welche wiederum Teilchen zu noch höheren Energien beschleunigen. Ist dies der Fall so spricht man von einem Pulsarwindnebel.

Bisher wurden im VHE-Bereich 35 Pulsarwindnebel entdeckt (Wakely & Horan, 2013), davon die meisten mit H.E.S.S. Der wohl bekannteste Vertreter ist der Krebsnebel (Abb. 1.5).

#### 1.2.4. Aktive Galaxienkerne

Bei Aktiven Galaxienkernen (AGN - Active Galactic Nuclei) handelt es sich um supermassereiche schwarze Löcher, die im Zentrum einer Galaxie liegen. Einige dieser aktiven Kerne besitzen Jets, in denen Teilchen senkrecht zur Akkretionsscheibe beschleunigt werden. Beschleunigte Teilchen in den Jets bilden Schockfronten im umgebenden Medium. Dies kann zur Erzeugung von hochenergetischer Strahlung führen. Die bisher am häufigsten im TeV-Bereich beobachteten AGNs sind so genannte Blazare, bei diesem Subtyp ist der Winkel zwischen der Sichtlinie und dem Jet gering.

Bisher wurden etwa 60 Aktive Galaxien im  $\gamma$ -Bereich entdeckt (Wakely & Horan, 2013). Ein Beispiel eines bekannten Blazares ist PKS 2155–304. H.E.S.S. hat diese Quelle über mehrere hundert Stunden beobachtet.

Durch die daraus resultierenden kleinen statistischen Fehler auf die Quellposition eignet sich diese Quelle gut für die in dieser Arbeit durchgeführte Studie. Alle durchgeführten Simulationen stellen Beobachtungen von PKS 2155–304 nach, wodurch es möglich ist, die

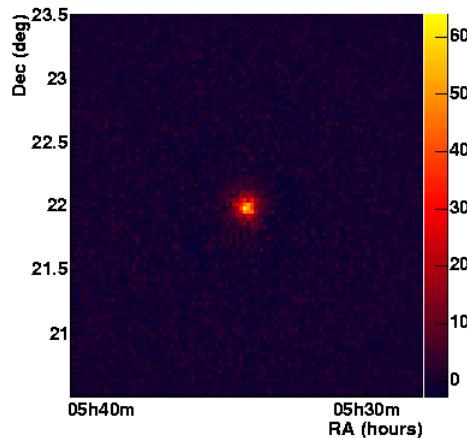


Abbildung 1.5.: Erste Aufnahme des Krebsnebels mit H.E.S.S. (<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/home/som/2004/10/>).

Ergebnisse mit denen der H.E.S.S.-Daten zu vergleichen.

### 1.3. Physikalische Prozesse

Das Energiespektrum von VHE  $\gamma$ -Quellen ist nicht durch thermische Strahlung zu erklären, da es keine bekannten Himmelsobjekte gibt die heiß genug sind. Die beiden Prozesse die zu Photonen mit derart hoher Energie führen sind der  $\pi^0$ -Zerfall und der Inverse Compton-Effekt. In Protonkollisionen können Pionen entstehen. Der dominante Zerfallskanal des  $\pi^0$ -Zerfalls ist durch

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (1.1)$$

gegeben (Beringer et al., 2012). Ein möglicher leptonischer Entstehungsprozess ist die Inverse Compton-Streuung, bei der ein Elektron Energie auf ein Photon überträgt. In beiden Fällen müssen die Primärteilchen auf sehr hohe Energie beschleunigt werden. Ein Szenario hierfür ist die Fermi-Beschleunigung erster Art (Fermi, 1949). Dabei überqueren Teilchen eine Schockfront und gewinnen dabei bei jeder Überquerung Energie. Dieser Energiegewinn wird durch

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E_1} \right\rangle = \frac{8}{3} \frac{\Delta v}{c^2} \quad (1.2)$$

beschrieben. Dabei ist  $\Delta v$  die Relativgeschwindigkeit der Materie vor und hinter dem Schock und  $E_1$  ist die Energie des Teilchens vor dem Überqueren der Schockfront. Durch dieses Verfahren entsteht typischerweise eine Potenzgesetz-Energieverteilungen mit einem Index von 2.

### 1.4. Der Cherenkov-Mechanismus und die Entwicklung von atmosphärischen Schauern

Die Atmosphäre ist für Photonen ab Energien von einigen Elektronenvolt (eV) intransparent. Deswegen werden für die Detektion von höherenergetischen Photonen meist keine bodengebundenen Teleskope eingesetzt. Zur Messung von Röntgenstrahlung werden üblicherweise Satelliten verwendet. Bei sehr hohen Energien werden die benötigten Flächen jedoch so groß, dass Satelliten keine umsetzbare Möglichkeit sind. Deshalb werden bodengebundene Teleskope verwendet. Da die Photonen jedoch von der Atmosphäre absorbiert werden ist nur

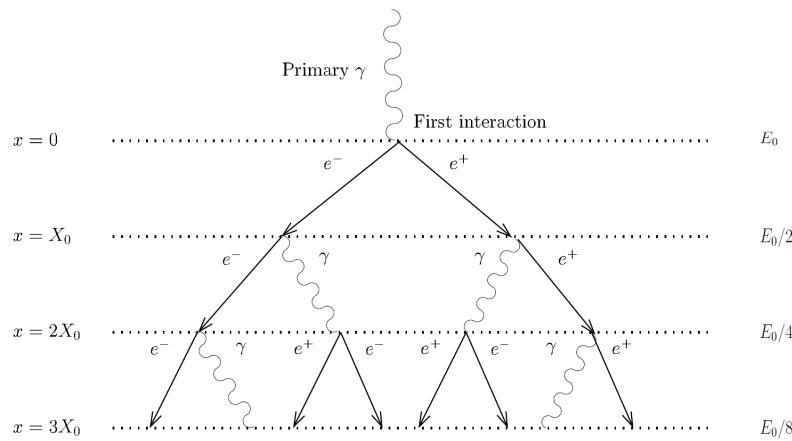


Abbildung 1.6.: Heitler-Modell eines elektromagnetischen Schauer (Funk, 2005).

ein indirekter Nachweis möglich. Trifft ein hochenergetisches Teilchen auf die Atmosphäre so kann es zu Wechselwirkung mit dem Kernfeld von Atomen der Atmosphäre kommen.

Ein einfaches Modell für die Erzeugung von Sekundärteilchen ist in Abbildung 1.6 zu sehen (für hadronische Schauer Abbildung 1.7). Dabei trifft ein Photon mit der Energie  $E_0$  auf die Atmosphäre und erzeugt nach einer charakteristischen Strahlungslänge  $X_0$  ein Elektron-Positron-Paar. Diese erzeugen nach einer weiteren Wechselwirkungslänge weitere Photonen durch Bremsstrahlung. Dadurch entsteht eine Kaskade. Die Energie der Sekundärteilchen lässt sich beschreiben durch  $\frac{E_0}{2^N}$ , wobei  $N$  die atmosphärische Tiefe in Vielfachen von  $X_0$  ist. Der Schauer endet wenn der Wechselwirkungsquerschnitt für Ionisation höher wird als für Paarerzeugung und Bremsstrahlung. Sobald die Ionisation eintritt verlieren die Teilchen des Schauers schlagartig ihre Energie, da die Wechselwirkungslänge für Ionisation kleiner ist als  $X_0$ . Da der elektromagnetische Schauer aus einer zusammengehörenden Teilchen-Kaskade besteht ist er zusammenhängend und hat eine symmetrische Form. Ein hadronischer Schauer hingegen besteht aus mehreren Subschauern und ist dadurch asymmetrisch, dies macht man sich zum nutzen bei der Untergrund Unterdrückung.

Wenn die Geschwindigkeit  $v$  der geladenen Teilchen größer als die Lichtgeschwindigkeit in der

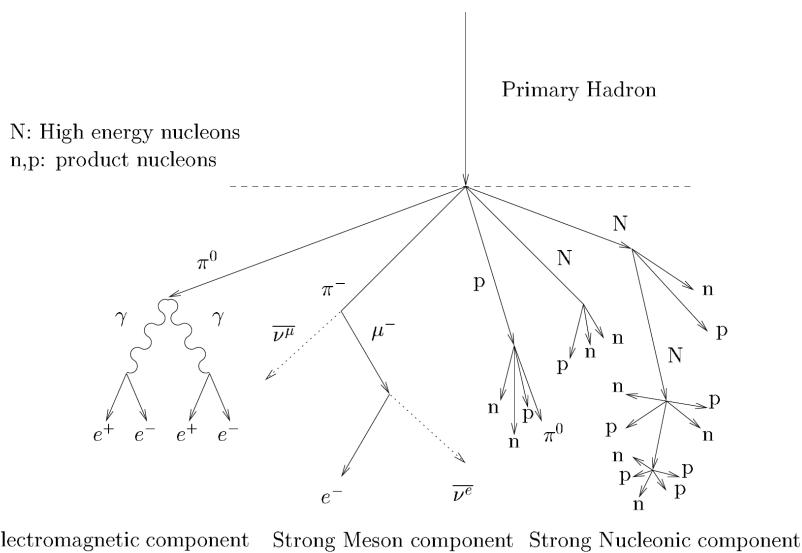


Abbildung 1.7.: Beispiel der Entwicklung eines hadronischen Schauers (Funk, 2005).

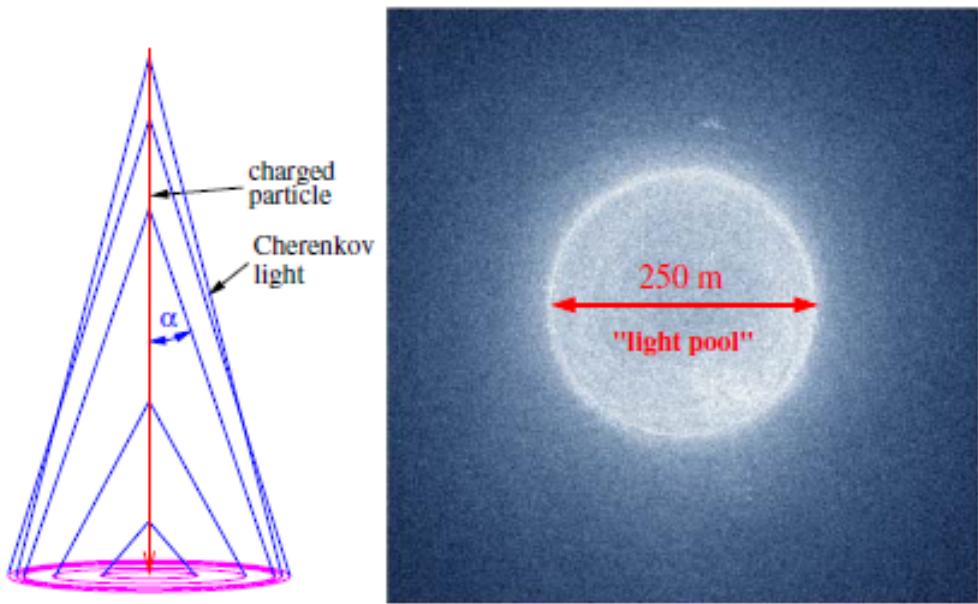


Abbildung 1.8.: Links: Cherenkov-Lichtkegel eines einfallenden Teilchens (rot). Rechts: Lichtkegel eines  $\gamma$ -Schauers mit Primärenergie von 1 TeV auf 1800 Metern über NN. (Völk & Bernlöhr, 2009).

Luft  $c_L = \frac{c_0}{n}$  (Brechungsindex  $n$ ) ist, strahlen die Teilchen Cherenkov-Licht ab (Abb. 1.8). Das Licht wird in Vorfärtsrichtung unter einem Winkel  $\theta$  abgestrahlt. Dieser Winkel wird durch

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad \text{mit } \beta = \frac{v}{c} \sim 1 \quad (1.3)$$

beschrieben und hängt von der Geschwindigkeit der Teilchen und dem Brechungsindex  $n$  ab. Da der Brechungsindex von Luft  $n$  etwa 1 ist, lässt sich daraus schließen, dass der Winkel  $\theta$  etwa  $1^\circ$  beträgt. Das Spektrum der Cherenkov-Photonen in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  ergibt sich aus

$$-\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \sin^2 \theta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda^2} d\lambda \quad (1.4)$$

dabei ist  $\alpha$  die elektromagnetische Feinstrukturkonstante ( $\approx 1/137$ ) und  $z$  die Ladungszahl des Teilchens, welche im Fall von Elektronen -1 beträgt und  $dx$  die vom geladenen Teilchen zurückgelegte Strecke. Wie man am  $\frac{1}{\lambda^2}$  Verhalten des Ausdruck 1.4 sieht, wird bevorzugt kurzwelliges Licht ausgesendet (Jung, 1999).

Die Lichtblitze die von einem solchen Teilchenschauer erzeugt werden dauern typischerweise nur wenige Nanosekunden, weshalb sie nicht vom menschlichen Auge wahrgenommen werden können. Verwendet man jedoch geeignete Detektoren ist es möglich mit Hilfe des gemessenen Signals Rückschlüsse auf Energie und Richtung zu ziehen.

## 1.5. Anforderungen an Cherenkov-Teleskope

Ein Cherenkov-Lichtkegel erreicht seine maximale Lichtausbeute in den oberen Atmosphärenschichten in ca. 8 – 10 km Höhe. Lichtkegel erreichen am Boden Radien von typischerweise wenigen hundert Metern (vgl. Abb. 1.8). Um dieses Cherenkov-Licht nachweisen zu können, ist es nötig große Lichtsammelflächen zur Verfügung zu haben, da die Lichtblitze nur sehr kurz und sehr schwach sind. Dafür sind sehr kurze Auslesezeiten (wenige Nanosekunden)

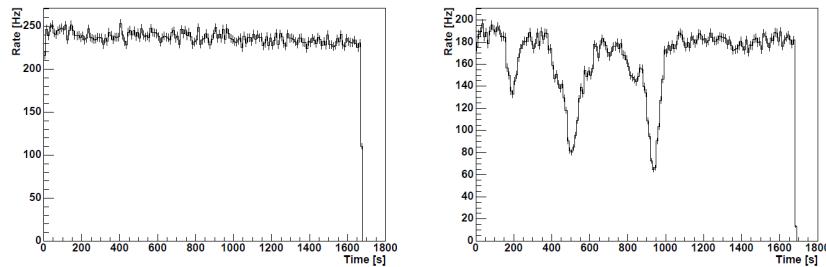


Abbildung 1.9.: Die Graphen zeigen die Triggerrate des H.E.S.S. Teleskop im Verlauf einer Beobachtung. Links eine Beobachtung mit guten Atmosphärenbedingungen. Rechts eine Beobachtung, in der Wolken durch das Blickfeld wandern, zu erkennen am deutlichen Einbruch der Triggerrate. (Aharonian et al., 2006)

nötig um das Signal vom Hintergrundlicht der Sterne oder anderer Lichtquellen trennen zu können. Dafür eignen sich CCD (Charge-Coupled-Devices)-Kameras nicht, da die Auslezezeiten üblicherweise im Millisekunden- bis Sekundenbereich liegen. Deswegen werden in vielen Cherenkov-Teleskopen Photomultiplier (PMTs) verwendet. In einem Photomultiplier lösen die auftreffenden Photonen in der Photokathode Elektronen aus, welche mittels Dynoden vervielfacht werden und so ein messbares Signal erzeugen. Für eine optimale Messung von Cherenkov-Licht ist außerdem die Standortwahl entscheidend. Durch die Wahl einer besiedlungsarmen Region wird der Einfluss der Lichtverschmutzung reduziert. Außerdem ist es sinnvoll Cherenkov-Teleskope an erhöhten Standorten zu bauen (H.E.S.S.: 1800 m NN). Dadurch wird die Absorption des Cherenkov-Lichts in der Atmosphäre verringert.

Um in möglichst vielen Nächten beobachten zu können ist es wichtig, dass der Standort wolkenarm ist. Abbildung 1.9 zeigt ein Einbrechen der Triggerrate, während Wolken durch das Gesichtfeld ziehen. Die Triggerrate ist Rate mit der Daten Aufgezeichnet werden. Diese Aufnahmen können für präzise Analysen, wie etwa die Rekonstruktion des Energiespektrums der primären Photonen, nicht verwendet werden.

Da nicht nur hochenergetische Photonen Schauer in der Atmosphäre auslösen, sondern fast alle hochenergetischen Teilchen, ist es wichtig unterscheiden zu können durch welches Teilchen ein Schauer verursacht worden ist. Dies ist möglich, da die Schauer sich in ihrer Form unterscheiden (siehe auch Abschnitt 2.6). Damit man in der Lage ist dies zu tun und zur Richtungsrekonstruktion, ist es nötig eine pixelierte Kamera zu verwenden. Untergrundeffekte und deren Unterdrückung in H.E.S.S. werden im Abschnitt 2.6 genauer betrachtet.

## 1.6. Ziel der Studie

In dieser Arbeit beschäftige ich mich genauer mit der Rekonstruktion von Cherenkov-Schauern des H.E.S.S.-Teleskopes. Dabei liegt der Fokus auf der Studie von systematischen Fehlern bei der Rekonstruktion der Ankunftsrichtung der Gamma-Strahlung. Diese entstehen zum Beispiel durch Abweichungen von der gewünschten Beobachtungsposition (Pointing). Mögliche Ursachen sind mechanische Verformungen oder Fehlausrichtung des Teleskops. Zu diesem Zwecke habe ich im Rahmen dieser Arbeit Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Diese werden mit H.E.S.S.-Simulations- und Beobachtungsdaten verglichen.

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

### 2.1. Aufbau und Funktionsweise

Das High Energy Stereoscopic System befindet sich in Namibia bei den Koordinaten  $23^{\circ}16'$  S,  $16^{\circ}30'$  O auf 1800 m NN (Hofmann & H.E.S.S. Collaboration, 2001). Die erste Phase des H.E.S.S. Experiments wurde 2002/2003 aufgebaut und besteht aus vier Teleskopen mit je  $108\text{m}^2$  Spiegelfläche und Kameras mit je 960 PMTs. Mit einem Gesichtsfeld (FOV – field of view) von  $5^{\circ}$  ist es möglich, Bereiche am Himmel abzusuchen, wodurch H.E.S.S. in der Lage war, in den vergangenen 10 Jahren sehr viele, bis dahin unbekannte  $\gamma$ -Quellen zu entdecken. Im Jahre 2012 wurde die Phase II in Betrieb genommen. Ein fünftes Teleskop mit  $614\text{m}^2$  Spiegelfläche wurde in das Zentrum gebaut (Abb. 2.1). Alle fünf Teleskope haben eine AltAz-Montierung. Typischerweise werden Daten in Abschnitten mit 28 Minuten Länge genommen. Im Folgenden werden diese Beobachtungsabschnitte als „Runs“ bezeichnet. Während einer Beobachtung muss eine Nachführung stattfinden, bei der die Teleskopbewegung die Drehung um die Erdachse ausgleicht. Weitere technische Daten der Teleskope finden sich in Tabelle 2.1 (H.E.S.S., 2012). In dieser Arbeit werden Daten der ersten Phase verwendet und auch in Simulationen nur die vier Teleskope der ersten Ausbaustufe implementiert.

In regelmäßigen Kalibrationsbeobachtungen werden Daten genommen, um die Beobachtungs-



Abbildung 2.1.: Aufnahme des H.E.S.S. Teleskop-Arrays. (mit freundlicher Genehmigung von K. Valerius)

richtung (Pointing) zu korrigieren. Das Kalibrieren der Beobachtungsrichtung bei Cherenkov-Teleskopen ist nicht einfach, da die Intensität von Sternenlicht zu hoch für die sensitiven Photomultiplier ist. Deswegen sind die H.E.S.S.-Teleskope mit je zwei optischen CCD-Kameras ausgerüstet. Eine davon wird verwendet, um Sterne zu beobachten und deren Position am Himmel mit Katalogpositionen zu vergleichen. Mit der zweiten Kamera wird während spezieller Kalibrationsruns die abgedeckte Cherenkov-Kamera betrachtet. Dorthin wird das Licht der Sterne von den Spiegeln reflektiert und auf die Kameraebene fokussiert. Mit Hilfe von Referenz-LEDs auf dem geschlossenen Kameradeckel kann die genaue Blickrichtung des Teleskops bestimmt werden.

Während der Beobachtung einer Quelle wird üblicherweise im sogenannten Wobble-Modus gemessen. Dabei ist die Beobachtungsrichtung in Rektaszension (RA) oder Deklination (Dec) um einen bestimmten Winkel verschoben, meist  $0,5^\circ$  oder  $0,7^\circ$ .

Tabelle 2.1.: Technische Daten der H.E.S.S. Teleskope (H.E.S.S, 2012).

Mit \* gekennzeichnete Werte gelten für den Hybridmodus.

	H.E.S.S. I (CT1–CT4)	H.E.S.S. II (CT5)
Design der Spiegelfläche	Davies-Cotton	Parabolisch
Fokallänge	15 m	36 m
Gesamtspiegelfläche	$108 \text{ m}^2$	$614 \text{ m}^2$
Gewicht der Kamera	1 Tonne	3 Tonnen
Effektive Belichtungszeit	16 ns	16 ns
Bildrate	300 Bilder/s	3600 Bilder/s
Winkelauflösung	$< 0.1^\circ$	$0.24^\circ - 0.28^\circ$
Energiebereich	100 GeV - 100 TeV	40 GeV (*)
Energieauflösung	15%	25% (*)
Gesamtgewicht (pro Teleskop)	60 Tonnen	580 Tonnen
Blickfeld (Durchmesser)	$5^\circ$	$3.2^\circ$
Anzahl der Pixel	960	2048

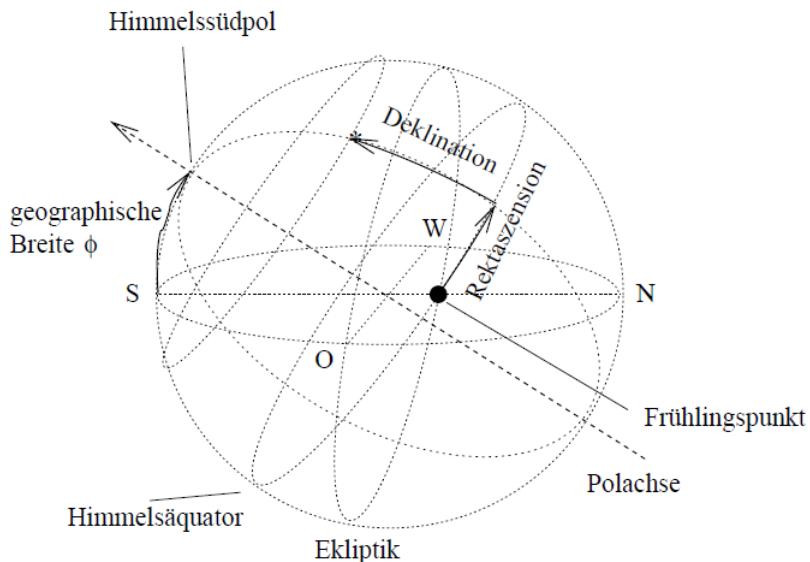


Abbildung 2.2.: Illustration von Rektaszension und Deklination (Gillessen, 2004).

## 2.2. Koordinatensysteme

Bei allen astronomischen Beobachtungen sind Koordinatensysteme von zentraler Bedeutung. Schon seit mehreren Jahrhunderten werden den Objekten am Nachthimmel Koordinaten zugeordnet. Der vermutlich älteste bekannte Katalog ist der Hipparchos-Katalog der auf das zweite Jahrhundert vor Christus zurückgeht (Woolard, 1942). In der heutigen Zeit werden verschiedene Himmelskoordinatensysteme verwendet. Für bodengebundene Teleskope ist eine genaue Kenntnis des Standorts wichtig. Deshalb sind für das H.E.S.S.-Teleskop sowohl Himmels- als auch Erdkoordinatensysteme in der Datennahme und Analyse entscheidend. H.E.S.S. verwendet verschiedene Koordinatensysteme, um das Pointing der Teleskope zu bestimmen. Da ich mich mit der Rekonstruktion der Beobachtungsrichtung (Pointing) beschäftige, stelle ich in diesem Kapitel die Wahl der Koordinatensysteme vor. Dabei orientiere ich mich an Gillessen (2004).

### 2.2.1. Rektaszension-Deklination-System

Alle Himmelskoordinatensysteme sind sphärische Koordinaten und unterscheiden sich nur durch die Wahl der Achsen. Das Rektaszension-Deklination-Koordinatensystem (kurz: RA-Dec) ist ein äquatoriales Koordinatensystem. Der Vorteil im Ra-Dec-System sind die zeit- und ortsunabhängigen Koordinaten von Himmelskörpern. Rektaszension wird in mathematisch positiver Richtung entlang des auf den Himmel projizierten Erdäquators gemessen. Die Deklination ist der Erhebungswinkel über dem Äquator und wird in Grad angegeben. In nördlicher Richtung trägt er ein positives und in südlicher ein negatives Vorzeichen.

Der Nullpunkt wurde auf den Frühlingspunkt festgelegt, dies ist der Punkt in dem sich Himmelsäquator und Ekliptik schneiden. Die Sonne durchquert diesen Punkt um den 20. März, dem Äquinoktium (Tagundnachtgleiche). Die Rektaszension wird üblicherweise in Winkelstunden angegeben. Das RA-Dec-System ist definiert über die Rotationsachse der Erde und den Himmelsäquator (Karttunen et al., 2007). Viele Teleskope haben eine RA-Dec-Montierung, da sich diese leicht nachführen lässt.

In Abbildung 2.2 ist die Definition des RA-Dec-Systems graphisch dargestellt.

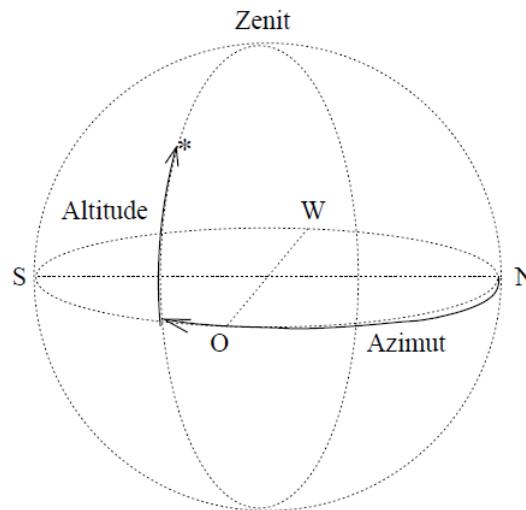


Abbildung 2.3.: Illustration von Altitude und Azimut (Gillessen, 2004).

### 2.2.2. Altitude-Azimut-System

Ein weiteres Himmelskoordinatensystem ist das Altitude-Azimut-System. Durch das Altitude-Azimut-System (kurz: Alt-Az-System) lässt sich die Blickrichtung (Pointing) der Teleskope einfach beschreiben. Dabei wird der Winkel zwischen der Nordrichtung und der auf den Horizont projizierten Quellposition über Osten gemessen (Azimut). Der Höhenwinkel zwischen dem Horizont und der Quelle ist die Altitude (Alt). Häufig wird der Begriff des Zenitwinkels verwendet. Dieser ist definiert als  $\zeta = 90^\circ - \text{Alt}$ . In Abbildung 2.3 ist dies dargestellt. Aus mechanischen Gründen haben Großteleskope eine Alt-Az Montierung. In diesem System ist es einfach, die Blickrichtung der Teleskope zu beschreiben, da die H.E.S.S. Teleskope eine Alt-Az Montierung haben. Ein Nachteil bei dieser Montierung ist, dass Objekte am Himmel zeit- und ortsabhängige Koordinaten besitzen.

### 2.2.3. Groundsystem

Für die Bestimmung der Schauerherkunft ist es wichtig, die genauen Teleskoppositionen zu kennen. Eines der Koordinatensysteme, die von H.E.S.S. verwendet werden, ist das Groundsystem. Das Groundsystem ist ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung im Zentrum des Teleskoparrays liegt. Die x-Achse verläuft in Süd-Nord-Richtung, die y-Achse in Ost-West-Richtung und die z-Achse steht nach oben, es ergibt sich ein rechtshändiges System. Durch die Wahl der Achsen sind die Positionen der vier H.E.S.S. I-Teleskope sehr einfach zu beschreiben (Abb. 2.4).

Das Groundsystem wird benutzt um in diesem System den Schauerauf treffpunkt und das Schauermaximum in der Atmosphäre anzugeben. In dieser Arbeit wird es verwendet, um den Schauer in diesen Koordinaten zu parametrisieren.

### 2.2.4. TiltedTelescopeSystem

Das TiltedTelescopeSystem ist ein dreidimensionales, kartesisches Koordinatensystem. Es dient als Zwischenschritt bei der Transformation zwischen Ground- und Nominalsystem. Die z-Achse des TiltedTelescopeSystems zeigt in die Beobachtungsrichtung der Teleskope und ist somit bei verschiedenen Höhenwinkeln unterschiedlich ausgerichtet. Beim Blick auf die

$$\begin{aligned}
 \text{Tel2} &= \begin{pmatrix} 85 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \text{Tel3} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 85 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{Tel1} &= \begin{pmatrix} 0 \\ -85 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \text{Tel4} &= \begin{pmatrix} -85 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Abbildung 2.4.: Teleskopposition der Teleskope CT1-CT4 in Meter im Groundsystem.

Spiegelfläche des Teleskops zeigt die x-Achse parallel zur Spiegelebene Richtung Boden und die y-Achse nach rechts.

### 2.2.5. Nominalsystem

Mit dem Nominalsystem wird eine gemeinsame Kameraebene aller Teleskope beschrieben. Wenn alle Teleskope parallel ausgerichtet sind, kann man die Kamerakoordinaten der einzelnen Teleskope in einem gemeinsamen Koordinatensystem darstellen. Das Nominalsystem ist das (flache) Kamerakoordinatensystem eines idealen Teleskops mit Fokallänge 1 m. Auf Grund der Altitude-Azimut-Montierung der Teleskope ist die x-Achse immer parallel zur xy-Ebene des Groundsystems und zeigt beim Blick auf die Kamera nach links. Die y-Achse zeigt entsprechend einem rechtshändigen Koordinatensystem Richtung Boden. Das Nominalsystem wird benötigt, um die Informationen der einzelnen Teleskopbilder zusammenzufügen und die Ursprungsrichtung des Schauers zu bestimmen.

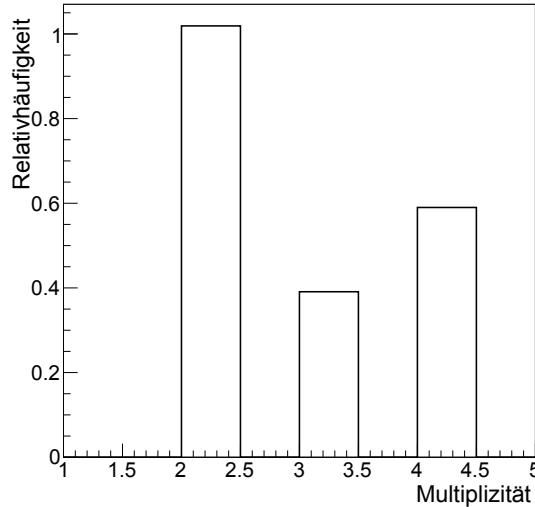


Abbildung 2.5.: Multiplizitätsverteilung für H.E.S.S. Monte-Carlo-Daten bei einem Zenitwinkel von  $10^\circ$ , Standart-Cuts und einem Spektralindex  $\Gamma = -2$ .

## 2.3. Trigger und Kameraauslese

In diesem und dem nächsten Abschnitt werden der Auslesevorgang der Kamera und die Kamerabildanalyse kurz vorgestellt. Aufgrund der anfallenden Datenmenge ist es nicht möglich dauerhaft das Signal der Kamera aufzuzeichnen. Deswegen ist es nötig einen Trigger zu verwenden. Wenn mindestens zwei Teleskope ein Schauerereignis sehen, sendet der zentrale Trigger ein Signal zum Aufzeichnen der Daten. Es gibt zwei Arten von Trigger, den externen Trigger und den Selbsttrigger. Beim externen Trigger gibt es ein auslösendes Signal von außen. Die H.E.S.S.-Teleskope besitzen jedoch Selbsttrigger, die automatisch auslösen, wenn die genannte Bedingung erfüllt ist. Der Trigger der H.E.S.S.-Teleskope ist zweistufig. In der ersten Stufe muss in einer Kamera ein Triggersegment auslösen, das heißt, die in ein elektrisches Signal umgewandelte, vom Photomultiplier aufgezeichnete Lichtintensität muss in einer bestimmten Anzahl von Kamerapixeln einen Schwellwert überschreiten. Die Größe des elektrischen Signals ist ein direktes Maß für die Anzahl der eingetroffenen Photonen. Hat ein Triggersegment ausgelöst, sendet das Teleskop ein Trigger-Signal an den zentralen Trigger. Erreichen den zentralen Trigger Signale von mindestens zwei Teleskopen innerhalb eines Zeitfensters von 80 ns, wird das Auslesesignal an die Kamera geschickt und die Daten aufgezeichnet (Funk et al., 2004). Während die Kamera auf die Entscheidung des zentralen Triggers wartet, werden weiterhin Daten aufgenommen und in einem Ringspeicher. Dies ermöglicht sehr kurze Totzeiten der Kamera, die nach 446  $\mu$ s wieder ausgelesen werden kann, falls ein Ereignis (Event) ausgelesen wird und nach 5,5  $\mu$ s, falls ein Event den Trigger nicht auslöst. Je nach mittlerem Zenitwinkel der beobachteten Quelle triggern im mittel 2,6 bis 3,2 Teleskope, eine typische Verteilung einer solchen Multiplizität ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Gezeigt sind nur Ereignisse, die durch die Daten-Qualitätsschnitte gekommen sind (Standard-cut mit 4-7 Tailcut-Image-Cleaning (siehe auch Kapitel 2.6)).

## 2.4. Schauerparametrisierung und Hillas-Analyse

Für die in der H.E.S.S. Analysis Pipeline (HAP) verwendete Standardanalyse gilt: Wird ein Event vom H.E.S.S.-Array aufgezeichnet, wie in Abb. 2.6 angedeutet, werden zuerst die Bilder aller

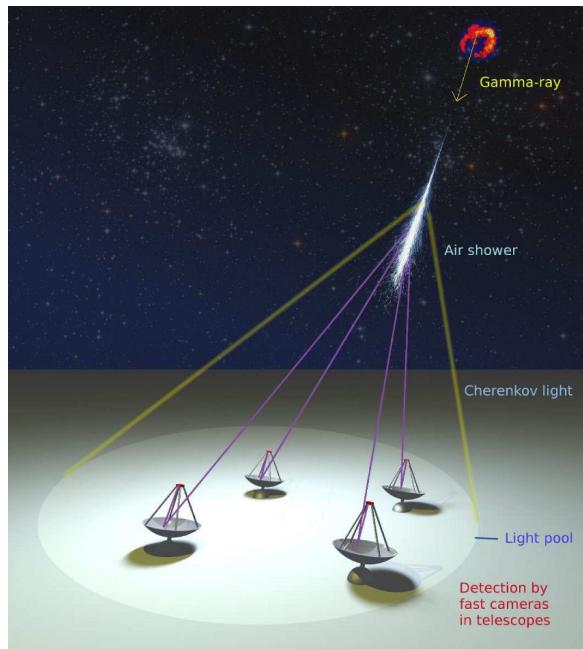


Abbildung 2.6.: Illustration eines  $\gamma$ -Schauers, welcher von einem Teleskoparray gesehen wird (Völk & Bernlöhr, 2009).

beteiligten Kameras mit Hilfe von Bildbereinigungsverfahren (Image Cleaning (siehe auch Kapitel 2.6)) vom Nachthimmelhintergrund bereinigt.

Anschließend werden die Schauer mit dem Hillasverfahren (Hillas, 1985) parametrisiert (Abb. 2.7). Dabei wird eine Ellipse anhand des Schauerbildes berechnet (Abb. 2.8). Den Schwerpunkt des Kamerabildes bezeichnet man als Center of Gravity (CoG). Die Summe der Pixeleinträge ist ein Maß für die deponierte Energie und somit für die Energie des Primärteilchens. Mit Hilfe der Parametrisierung kann man wirksam hadronische Schauer herausfiltern und so von der Analyse ausschließen. Dies ist nötig da geladene Teilchen auf dem Weg zur Erde durch Magnetfelder abgelenkt werden und daher in der Regel nicht mehr aus der Richtung der eigentlichen Quelle kommen.

## 2.5. Richtungsrekonstruktion

Anhand der Hillas-Parameter lässt sich außerdem die Richtung rekonstruieren, aus der ein Schauer kommt. Schneidet man die Hauptachsen der Ellipsen in den einzelnen Teleskopen

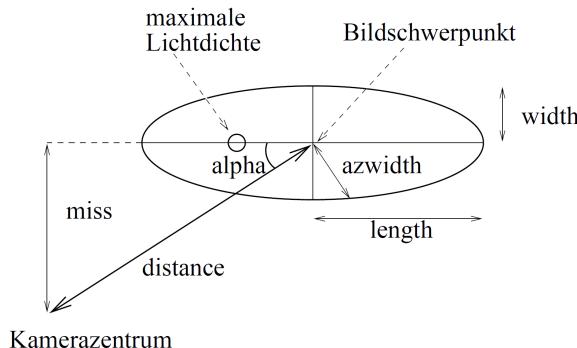


Abbildung 2.7.: Parametrisierung der Hillas-Ellipse (Gillessen, 2004).

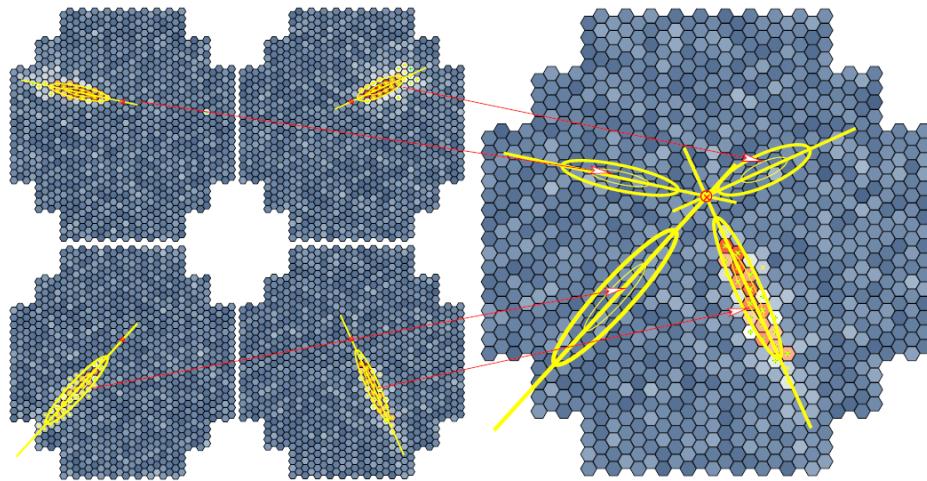


Abbildung 2.8.: Projektion von Kamerabildern eines Ereignisses in eine gemeinsame Kameraebene. Die Rekonstruierte Schauerrichtung ist der Schnittpunkt der Hauptachsen (Völk & Bernlöhr, 2009).

(Abb. 2.8 rechts), erhält man so die Ursprungsrichtung des Schauers (Aharonian et al., 2006). Zur Rekonstruktion der Schauerrichtung werden die Hauptachsen paarweise geschnitten und die Schnittpunkte (S) gewichtet aufaddiert. Das verwendete Gewicht (w) ist der Sinus des Schnittwinkels ( $\alpha$ ) der zwei Achsen.

Deshalb haben Achsen, die sich in einem kleinen Winkel schneiden und somit schlechter den Schnittpunkt bestimmen, weniger Gewicht. Es wird ein weiteres Gewicht hinzugefügt, welches über die Anzahl der Photonen jedes Schauerbildes berechnet wird. Der gewichtete Schnittpunkt (S) berechnet sich damit aus

$$S = \frac{\sum_{j,k, k>j} S_i \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{\frac{1}{A_j} + \frac{1}{A_k}}}{\sum_{j,k, k>j} \sin \alpha \cdot \frac{1}{\frac{1}{A_j} + \frac{1}{A_k}}}, \quad (2.1)$$

mit den jeweiligen Schnittpunkten zweier Teleskope,  $S_i$  und den dazugehörigen Bildamplituden,  $A_j$  und  $A_k$ .

Die Berechnung des Kamerabildes und die Schauerparametrisierung finden im Nominalsystem statt. Die gesuchte Größe ist die Quellrichtung in Himmelskoordinaten. Diese erhält man, indem man die Schnittpunktkoordinaten in das RADec-System, transformiert.

Neben der Richtungsbestimmung liefert der Schnittpunkt der rekonstruierten Schauerachse mit dem Boden im GroundSystem die sogenannte Core-Position. Diese Schnittpunkt der Schauerrichtung mit dem Boden (Groundebene) nennt man den Core. Dieser wird für die Energierekonstruktion benötigt, um den Abstand jedes Teleskops vom Schauerauftreffpunkt, die sogenannte Impact Distance, zu bestimmen. Bei der Energierekonstruktion wird dann unter Benutzung der Bildamplituden, die wahrscheinlichste Primärenergie bestimmt. Mit steigender Entfernung zum Teleskop wird die Lichtausbeute geringer. Dies wird bei der Energierekonstruktion berücksichtigt.

### 2.5.1. Pointing bei H.E.S.S.

Unter Pointing versteht man die Richtung, in die ein Teleskop zeigt. Dabei kommt es in der Regel zu Abweichungen von der Sollposition. Ziel ist es, diese Abweichungen so gering wie möglich zu machen, um Richtungsrekonstruktion auf wenige Bogensekunden genau zu ermöglichen. Um mögliche Abweichungen nach der Datennahme zu korrigieren, verwendet

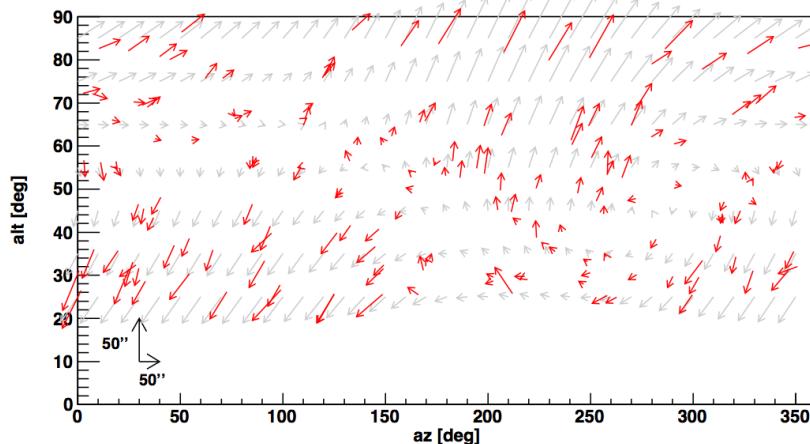


Abbildung 2.9.: Die Abbildung zeigt ein Pointingmodel für das H.E.S.S.-Experiment. Messdaten (rot) und das gefittete Modell (grau) (Lennarz, 2012).

man Pointingmodelle. Für die Realisierung eines solchen Modells gibt es mehrere Ansätze. Das anschaulichste Modell ist ein mechanisches Modell. Das in HAP verwendete mechanische Modell umfasst pro Teleskop 18 Parameter, die zur Korrektur verwendet werden. Für eine vollständige Liste der Modellparameter und eine detaillierte Beschreibung des Pointingmodells ist dem Leser Gillessen (2004) empfohlen. In dieser Arbeit wurde die Auswirkung von Fehlkorrekturen studiert. Dabei beschränkt sich die Studie auf die Auswirkung von einer falsch korrigierten Rotation und Verschiebung der Kamera bezüglich der optischen Achse des Teleskops.

### 2.5.2. Fehler der Rekonstruktion

Es gibt verschiedene potenzielle Fehlerquellen bei der Richtungsrekonstruktion von Ereignissen. Die Quelle der größten Fehler kommt aus der mechanischen Konstruktion der Teleskope. Zum Einen sind die Teleskope nicht perfekt ausgerichtet und zum Andern verformen sie sich unter ihrem Eigengewicht. Beide Abweichungen müssen korrigiert werden. Um dies zu erreichen, werden in der Analyse-Kette von H.E.S.S. Pointingmodelle verwendet, mit deren Hilfe man die Abweichung von der Sollposition des Teleskops parametrisiert und korrigiert. Ein Beispiel für ein solches Pointingmodell, das aus speziellen Kalibrationsruns wie in Abschnitt 2.9 beschrieben erstellt wurde. Es ist deutlich erkennbar, dass die Korrektur abhängig von der Blickrichtung ist.

## 2.6. Untergrund

Bei Cherenkov-Teleskopen ist die Untergrund-Separation wichtig, da man das Signal zum Einen von der Cherenkov-Licht-Ereignissen trennen muss und zum Anderen Nachthimmelsuntergrund, z.B. durch helle Sterne und Lichtverschmutzung durch Städte. Der Nachthimmelsuntergrund wird korrigiert durch Image Cleaning. Dabei wird ein sogenannter Tailcut durchgeführt (z.B. 5-10-Tailcut), bei dem ein Pixel mit  $\geq 5$  Photoelektronen mindestens ein Nachbarpixel mit  $\geq 10$  Photoelektronen aufweisen muss, um als gültiges Pixel zu zählen. Während einer Beobachtung werden einzelne Photomultiplier abgeschaltet, damit sie durch direktes Sternenlicht nicht beschädigt werden.

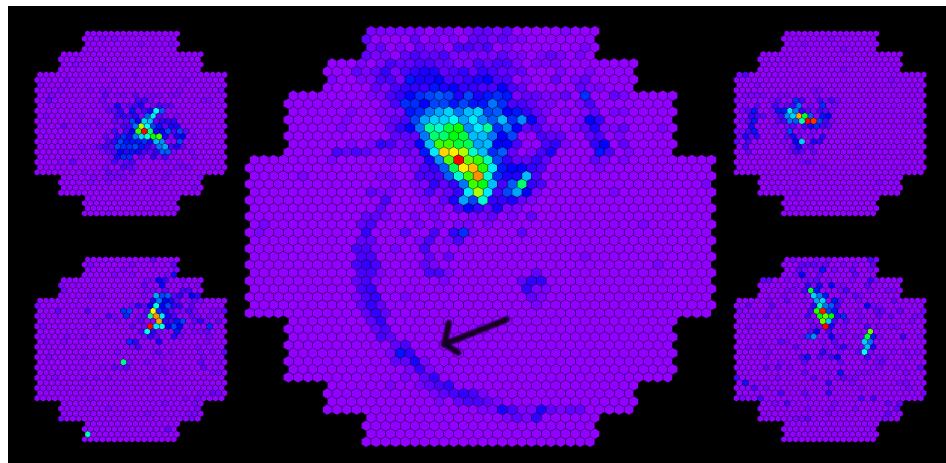


Abbildung 2.10.: Vermutetes Myonen-Ereignis (die Ringförmige Struktur, mit dem Pfeil angedeutet) eingebettet in einen hadronischen Schauer in H.E.S.S. II, vor dem Image Cleaning (H.E.S.S., 2012).

### 2.6.1. Myonen

Myonen sind geladene Teilchen, die bei Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre entstehen. Sie haben lokale Überlichtgeschwindigkeit und können deshalb Cherenkov-Licht abstrahlen, welches von H.E.S.S. als Untergrund detektiert werden kann (Abb. 2.10). Muonen werden auf Grund der geringen Größe ihres Kegels nur von einem Teleskop gesehen und können deshalb im Trigger herausgefiltert werden.

### 2.6.2. Hadronen

Hadronische Teilchen (Protonen, schwere Kerne) mit hoher Energie wechselwirken in der Atmosphäre, was eine Kaskade an Sekundärteilchen auslöst, welche Cherenkov-Licht aussstrahlen können. Auf Grund der Struktur des Schauers ist es möglich, mit Hilfe der Hillasparametrisierung diese von elektromagnetischen Schauern zu trennen (Abb. 2.11). Dies geschieht über das Längen-Verhältnis der großen Halbachse zur kleinen Halbachse der Hillas-Ellipse.

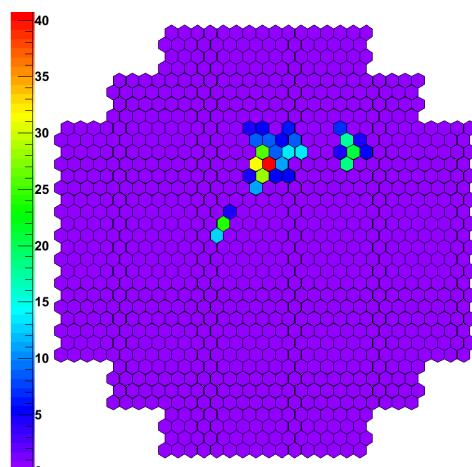


Abbildung 2.11.: Ein simuliertes Protonereignis mit Primärenergie von 0,9 TeV nach dem Image Cleaning.

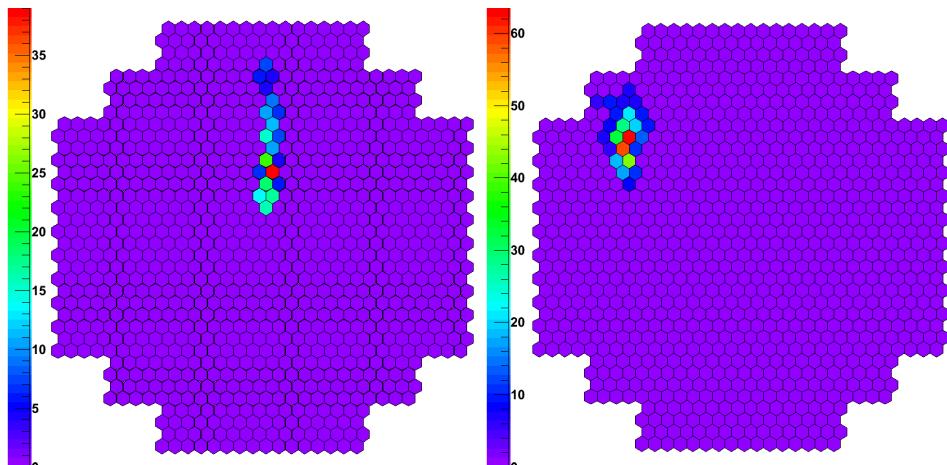


Abbildung 2.12.: Ein simuliertes  $\gamma$ -Ereignis mit Primärenergie von 0,4 TeV nach dem Image Cleaning (links). Ein simuliertes  $e^-$ -Ereignis mit Primärenergie von 0,5 TeV (rechts).

### 2.6.3. Elektronen

Elektronen sind Teil der kosmischen Strahlung und wechselwirken mit der Atmosphäre. Dort können sie einen elektromagnetischen Schauer auslösen, der kaum unterscheidbar von einem  $\gamma$ -Schauer ist (Abb. 2.12), der durch ein Photon ausgelöst wurde. Eine Separation von Elektronen und Photonen ist zur Zeit nur über die schlecht bestimmte atmosphärische Höhe des Schauermaximums möglich (??).

### 2.6.4. Untergrundsubtraktion

Da durch die oben genannten Selektionen es nicht möglich ist allen Untergrund herauszuschneiden wird mit Hilfe von Kontrollregionen (meist im gleichen Gesichtsfeld der Signalregion) der verbleibende Untergrund abgeschätzt. Welcher dann vom Signal der Quellregion abgezogen werden kann. Durch dieses Verfahren werden verbleibende Hadronen aber auch isotrope Elektronen und Photonen welche nicht von der Quelle kommen abgezogen.



## 3. Verwendete Software und Simulation

Für diese Arbeit wurde eine Simulation geschrieben, die es ermöglicht, die in Kapitel 2 beschriebene Standard-Richtungsrekonstruktion mit den vier HESS-I-Teleskopen auf verschiedene systematische Fehler zu untersuchen. Ziel der Studie ist es die Auswirkung von Fehlkorrekturen durch das Pointingmodel besser zu verstehen. In diesem Kapitel stelle ich sowohl die verwendete Software als, auch die eigene Simulation kurz vor.

In dieser Arbeit wurde ROOT 5.28.00-2 als Programmierumgebung für Skripte verwendet. Dies ist ein am CERN entwickeltes Datenanalyse-Programm, welches auf C++ basiert. Für die Analysen der H.E.S.S. Daten wurde Version 12-03 der H.E.S.S. Analysis Pipeline (HAP) verwendet. HAP ist ROOT-kompatibel, wodurch es möglich ist alle Bibliotheken und Funktionen, die in HAP enthalten sind, auch in ROOT Skripten anzuwenden. Im Folgenden wird auf die Funktionsweise von HAP eingegangen.

### 3.1. H.E.S.S. Analysis Pipeline (HAP)

Die H.E.S.S. Analysis Pipeline umfasst eine große Sammlung an Funktionen, mit deren Hilfe man Beobachtungs- und Monte-Carlo-Daten des H.E.S.S. Experiments auswerten kann. Im Folgenden möchte ich kurz auf die von mir für diese Arbeit verwendeten Funktionen eingehen. Bevor man eine Analyse starten kann, ist es nötig, eine Liste von Beobachtungsrungs zu selektieren. Dies ist mit dem perl-Skript `findruns.pl` möglich; hier gibt es sehr viele Optionen, um Beobachtungen für die gewünschte Region zu suchen und eine Liste erstellen zu lassen. In meiner Arbeit verwende ich verschiedene Listen der Quelle PKS2155-304, da es für diese Quelle sehr viele Beobachtungen gibt und die statistischen Fehler der Rekonstruierten Richtung sehr klein. Dadurch eignet sich diese Quelle gut für meine Studie. Die verwendeten Runlisten sind entweder nach ihrem Wobble-Offset benannt oder, wenn sie gemischte Wobble-Offsets haben, mit „all“ bezeichnet sind (siehe auch Anhang A.4). Als nächstes folgt die eigentliche Analyse. Diese wird mit dem Programm `hap` durchgeführt. Dabei werden die Kamerabilder mit dem gewünschten Image Cleaning behandelt, die Richtung und die Energie der Schauer rekonstruiert. Eine Himmelskarte mit den Gamma-Kandidaten-Ereignissen wird erstellt und eine Überschusskarte, bei der der Untergrund durch die in Kapitel 2 erwähnten Untergrundschätzverfahren abgezogen wurde. Mit den so aufbereiteten Daten ist es möglich, Positions- und Spektralfits zu machen.

### 3.2. Konzept der Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Simulation entwickelt mit der es möglich ist einen Teil des H.E.S.S.-Pointings zu studieren. Ziel war es die Simulation so minimal wie möglich zu halten um die Auswirkung von Pointingmanipulation nicht durch andere Effekte zu verschleiern. Deswegen wird im Gegensatz zu der H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulation sehr viel nicht berücksichtigt was dazu beiträgt, dass die Simulation zum Einen weniger Rechenleistung benötigt und zum Andern man direkt die Auswirkung der Pointingmanipulation beobachten kann. So wird in dieser Simulation nicht die Schauerentwicklung in der Atmosphäre simuliert und in die Kamera abgebildet. Es wird nur der Auftreffpunkt im TiltedSystem und die Energie des Primärteilchens

gewürfelt und zusammen mit der vorgegebenen Quellrichtung und einer festen Höhe für das Schauermaximum ist so der Schauer eindeutig definiert. Diese Schauerparameter werden dann in das Nominalsystem transformiert und die Quellrichtung rekonstruiert. Anschließend wird die rekonstruierte Quellrichtung zurück in das RA-Dec-System transformiert damit man eventuelle Abweichungen von der nominalen Richtung bestimmen kann. Damit die Simulation dennoch in der Lage ist das Detektionsverhalten der H.E.S.S.-Teleskope darzustellen ist es nötig dies mit Hilfe von Lookup-Tabellen in die Simulation einzubinden. Die Lookup-Tabellen wurden aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-Simulationen von  $\gamma$ s erstellt. So ist es möglich die für die Richtungsrekonstruktion wichtigen Informationen aus den H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten in meiner Simulation zu verwenden.

### 3.3. Lookup-Tabellen

Zur Erzeugung der Lookup-Tabellen wurden H.E.S.S. Monte-Carlo-Simulationen verwendet. Es werden zwei Arten von Lookup-Tabellen verwendet, eine zur Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit von Schauern, abhängig von ihrer Energie und Abstand zum Teleskop, eine weitere zur Bestimmung der Bildhelligkeit. Es wird angenommen, dass die Detektionswahrscheinlichkeit und die Photoelektronenausbeute radial symmetrisch im Tilted-System ist. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten wurde aus den Monte-Carlo-Produktionsinformationen für jedes Bin der Lookup-Tabellen berechnet, wie viele Schauer erzeugt wurden und bestimmt, wie viele davon vom Teleskop gesehen wurden. In Abbildung 3.1 sind Multiplizitätsverteilung und Spektrum für beide Fälle, sowie die Monte-Carlo-Daten, aus den die Lookup-Tabellen produziert worden sind, gezeigt. Es hat sich herausgestellt, dass es sinnvoll ist bei der Bestimmung der Detektion für jedes Teleskop die gleiche Zufallszahl (rot) zu verwenden und nicht unabhängig (blau) zu würfeln.

Für die Bestimmung der Bildhelligkeit wird ausgenutzt, dass die Amplitudenverteilung in jedem Bin gaußförmig ist und in der Lookup-Tabelle nur Mittelwert und Breite der Verteilung gespeichert. Bei der Bestimmung der Helligkeit im Teleskop wird dann entsprechend der Verteilung des Bins gewürfelt.

### 3.4. Simulationen

Die Simulation wurde mit dem Ziel möglichst hoher Flexibilität geschrieben. Beim Durchlaufen der Simulationen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die hier genauer beschrieben werden (Abb. 3.2).

Als Erstes erfolgt die Eingabe. Hier gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder wird für die Schauersimulation eine feste Teleskop- und Schauerrichtung im AltAz- oder RA-Dec-System vorgegeben, oder man gibt der Simulation eine Runliste von H.E.S.S.-Beobachtungen. Bei der Vorgabe der Positionen sind sowohl Koordinaten in RA-Dec als auch in Alt-Az möglich. Wählt man jedoch die Option eine Runliste einzulesen, werden für jeden enthaltenen Run die Uhrzeit der Beobachtung, Beobachtungs- und die Quellrichtung aus der H.E.S.S.-Datenbank gelesen.

Die Informationen über die Quellposition und den Spektralindex der Quelle werden verwendet, um Schauer zu simulieren. Teleskopposition, Beobachtungsrichtung und Manipulationen am Teleskop werden verwendet, um virtuelle Teleskope zu bauen. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob ein Schauer vom Teleskop gesehen wird. Wenn das der Fall ist, wird der Schauer in die nötigen Koordinatensysteme transformiert und rekonstruiert. Als Letztes werden alle Schauer und die für jeden Schauer relevanten Daten in eine Datei geschrieben. Im Folgenden soll die Simulation im Detail betrachtet werden.

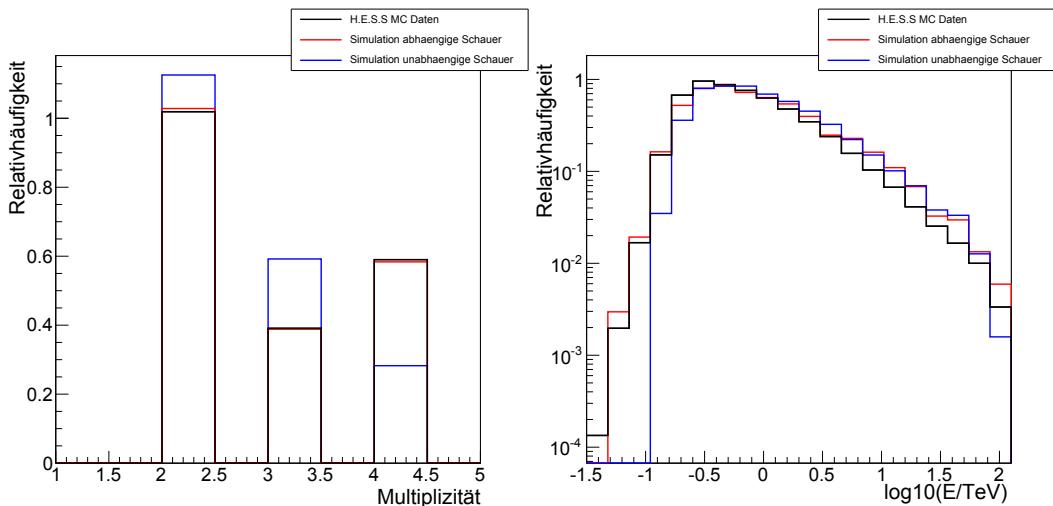


Abbildung 3.1.: Links: Multiplizitätsverteilung für H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten und Simulationsdaten. Rechts: Energiespektrum für H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten und Simulationsdaten. Die Kurve der H.E.S.S.-Daten stammt von  $10^\circ$  Zenit Simulierte  $\gamma$  die mit Standard-Selektionsschnitten prozessiert wurden. In den Simulationen (beide mit Lookup-Tabellen) wurde ein Run auf PKS2155-304 mit mittlerem Zenitwinkel von  $10^\circ$  mit Standart-Cuts verwendet, es wurde ein Spektralindex von 2 simuliert. Alle Kurven sind auf die Fläche 1 normiert.

### 3.4.1. Informationseingabe

Die Eingabe der Parameter erfolgt über zwei Wege. Zum einen gibt es fest in den Code geschriebene Parameter, zum Anderen gibt es Parameter, die bei jedem Aufruf der Simulation eingegeben werden müssen. Die Liste der festen Parameter ist für jede der Eingabeverisionen gleich, dazu zählen: Spektralindex der Quelle, Schwellenenergie, ab der Schauer gewürfelt werden, Teleskoppositionen im Groundsystem und Teleskopmanipulation. In den folgenden Simulationen verwende ich die Parameter, die in Tabelle 4.1 gegeben sind.

Wählt man die Variante 1, in der die Quellposition und Beobachtungsrichtung in Alt-Az angegeben werden, muss man zusätzlich noch benennen, wie viele Schauer simuliert werden sollen. Für die Variante, bei der die Quellposition in RA-Dec angegebenen wird, muss man zusätzlich noch eine Startzeit im Format JJJJ-MM-TT hh:mm:ss vorgeben, sowie eine Dauer der simulierten Beobachtung in Sekunden. Bei dieser Eingabemethode ist es nicht nötig, eine Teleskopausrichtung vorzugeben, da automatisch für die vier Wobble-offsets mit je  $0,5^\circ$  Abstand zur Quellposition simuliert wird. Bei Variante 2 gibt man eine Runliste an, und wie viele Ereignisse pro 30 Minuten simuliert werden sollen. Die Simulation liest dann für jeden Run Quellposition, Beobachtungsrichtung, Dauer und Startzeit ein. durch diese Funktion ist es möglich H.E.S.S.-Beobachtungen nach zu stellen wodurch die Ergebnisse vergleichbarer sind.

### 3.4.2. Schauersimulation

Bei der Simulation der Schauer werden Schauer gewürfelt die aus der Quellrichtung kommen. Die Auftreffpunkte im TiltedSystem sind homogen verteilt. Dies geschieht im TiltedTelescopeSystem, da auf diese Weise zenitwinkelabhängige Änderungen der Schauerverteilung berücksichtigt werden (Abb. 3.3).

Zusätzlich wird für jeden Schauer, der simuliert wird, auch eine Energie gewürfelt, diese folgt einem Potenzgesetz da, dass der typische Spektraleverlauf einer  $\gamma$ -Quelle ist. Aus in  $[0,1]$

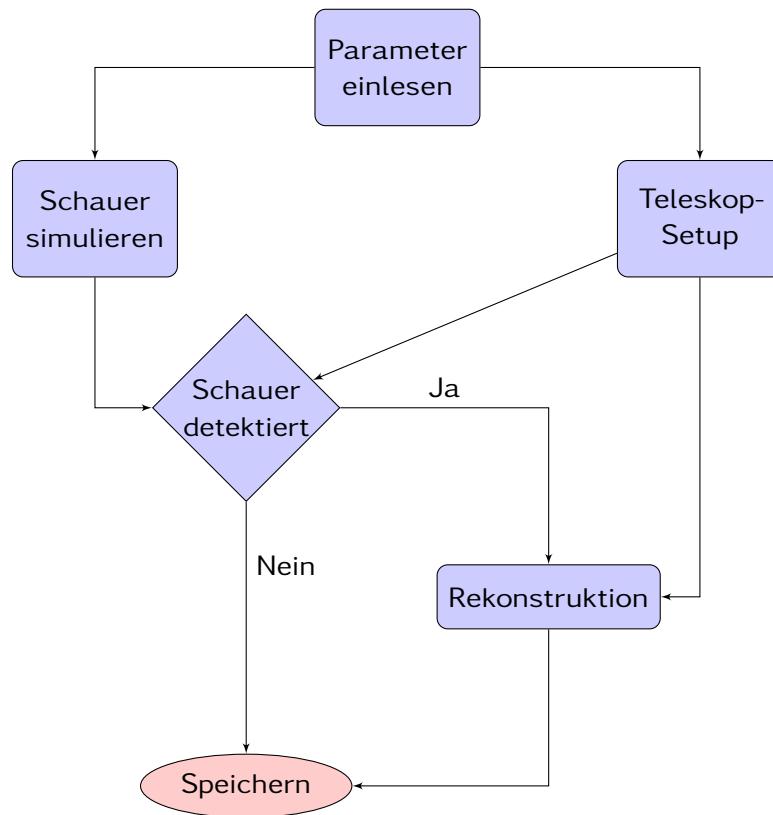
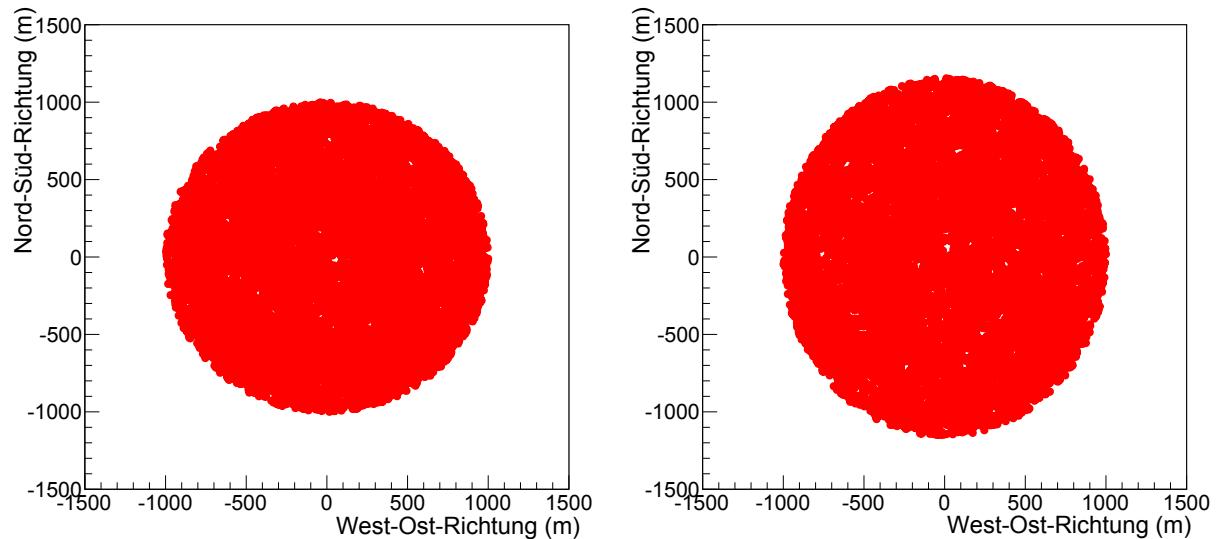


Abbildung 3.2.: Ablaufdiagramm der entwickelten Simulation

gleichverteilten Zahlen wird mit Hilfe von

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

Abbildung 3.3.: Verteilung der gewürfelten Schauerauftreffpunkte im GroundSystem bei  $0^\circ$  (links) und  $30^\circ$  (rechts) Zenitwinkel. Man sieht den Projektionseffekt der dadurch zustande kommt das man unter verschiedenen Zenitwinkel Schauer würfelt.

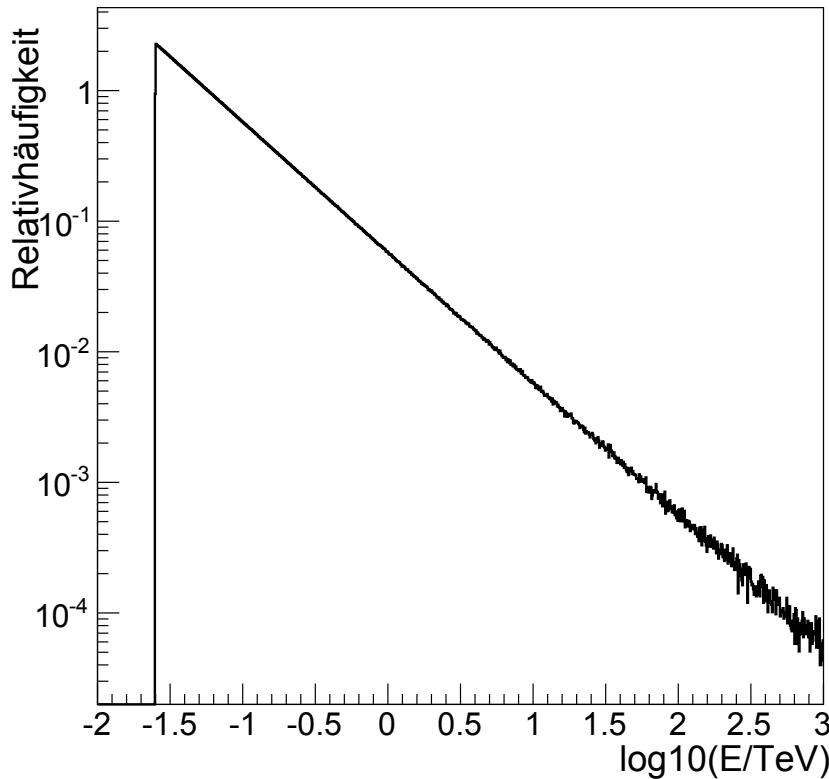


Abbildung 3.4.: Simuliertes Energiespektrum mit  $E_0 = 35 \text{ GeV}$  und  $\gamma = 3,4$ .

Ereignisse simuliert, deren Energieverteilung einem Potenzgesetz mit Index gamma folgt. Dabei ist  $E_0$  die kleinste gewürfelte Energie und  $\gamma$  der spektrale Index der simulierten Quelle. Für meine Tests wurde ein Index von -2 verwendet, da dieser auch in den H.E.S.S. Monte-Carlo-Simulationen genutzt wird. Abbildung 3.4 zeigt ein von mir gewürfeltes Spektrum. Der spektrale Index ist definiert als  $F_{\text{ph}} \propto E^{-\gamma}$ .

### 3.4.3. Teleskop-Setup

Mit den Informationen über Blickrichtung und Teleskoppositionen wird ein Teleskoparray erzeugt. Zusätzlich werden die Koordinatentransformation zwischen Ground- und Nominalsystem für jeden gewürfelten Schauer berechnet. In dieser Transformation werden die Manipulationen des Teleskops eingebaut um die Richtungsrekonstruktion zu untersuchen. Um einen Schauer vom Groundsystem in das Nominalsystem zu transformieren, wurde nicht die in HAP zur Verfügung stehende Transformation verwendet, sondern eine eigene Transformation geschrieben, um Manipulationen am Pointing einfacher durchführen zu können. Im Allgemeinen lassen sich Koordinatentransformationen durch schrittweises Ausführen von Translationen und Rotationen beschreiben. Durch die Wahl des Ursprungs von Ground- und Nominalsystems genügen Rotationen. Das Ziel ist es, den Pointing-Vektor, dass ist der Vektor der die Blickrichtung des Teleskopes angibt, der im Groundsystem x, y und z-Komponente besitzt, in das Nominalsystem zu transformieren. Dort entspricht das Pointing dem Einheitsvektor in z-Richtung. Ebenfalls werden Core-Punkt und Schauermaximum in das Nominalsystem transformiert. Da für beide Fälle die Transformation identisch ist, wird diese hier nur anhand des Core-Punktes beschrieben.

Zunächst wird der Richtungsvektor vom Teleskop zum Core-Punkt,  $R_C$ , berechnet. Dieser wird um  $180^\circ$  um die Pointing-Richtung,  $R_P$ , rotiert,

$$\text{Core}_{\text{rot}} = R_P * (R_P * R_C) - (R_P \times R_C) \times R_P \quad (3.2)$$

um die Abbildungsfunktion der Spiegel des Teleskopes zu berücksichtigen. Nun kommt die eigentliche Koordinatentransformation. Zuerst wird der Vektor des Pointings auf die xz-Ebene des Ground-Systems projiziert. Als erstes wird um den von  $e_x$  und dem projizierten Vektor eingeschlossenen Winkel  $\phi$  rotiert. Mit Hilfe einer Rotationsmatrix wird der Pointingvektor um die y-Achse rotiert:

$$\begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \times R_P = R'_P. \quad (3.3)$$

Als nächstes wird der Winkel  $\tau$  zwischen dem Einheitsvektor  $e_x$  und dem neuen Pointingvektor  $R'_P$  bestimmt und mit diesem um die z-Achse rotiert:

$$\begin{pmatrix} \cos \tau & -\sin \tau & 0 \\ \sin \tau & \cos \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times R'_P = R''_P. \quad (3.4)$$

Die nächste Rotation wird durch den Winkel  $\alpha$  zwischen  $R''_P$  und  $e_z$  bestimmt und um die y-Achse ausgeführt:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \times R''_P = R'''_P. \quad (3.5)$$

Durch die bisher durchgeführten Rotationen ist der Pointingvektor nun parallel zur z-Achse des Ground-Systems. Mit einer weiteren Rotation um die z-Achse wird sichergestellt, dass die x-Achse des Nominalsystems parallel zur xy-Ebene des Groundsystems liegt. Dies erreicht man, indem der  $e_z$ -Vektor des Groundsystems in das Nominalsystem transformiert wird. Dieser wird auf die xy-Ebene des Nominalsystems projiziert und um dessen z-Achse um den Winkel zwischen  $e_y$  des Nominalsystems und dem projizierten  $e_z''$  rotiert. Am Ende der Transformation ist es möglich, noch eine weitere Rotation einzufügen, welche dafür sorgt, dass die Kamera ein Stück rotiert bzw verschoben wird. Dadurch lässt sich das Pointing auf einfache Weise manipulieren.

### 3.4.4. Schauerdetektion

Für die Schauerdetektion gibt es zwei Ansätze, einen geometrischen und einen, der aus H.E.S.S.-Monte-Carlo Simulationen gewonnene Lookup-Tabellen verwendet. Beim geometrischen Ansatz wird geprüft, ob der Schauer im Blickfeld der einzelnen Teleskope ist. Falls dies bei zwei oder mehr Teleskopen der Fall ist, zählt der Schauer als gesehen und wird rekonstruiert. Bei der Version mit den Lookup-Tabelle wird für jedes Teleskop eine zweistufige Abfrage verwendet. Es gibt für jedes der vier H.E.S.S. I-Teleskope eigene Lookup-Tabellen für die Zenitwinkel  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  und  $40^\circ$ . Dies ist nötig da das am Teleskop ankommende Licht davon abhängt wie weit es durch die Atmosphäre muss und dies ist wiederum vom Zenitwinkel abhängig. In der ersten Stufe wird mit Hilfe einer Lookup-Tabelle, welche die Detektionswahrscheinlichkeit enthält, geprüft ob das entsprechende Teleskop den Schauer detektiert hat. Ein Beispiel für diese Lookup-Tabelle ist in Abbildung 3.5 zu sehen.

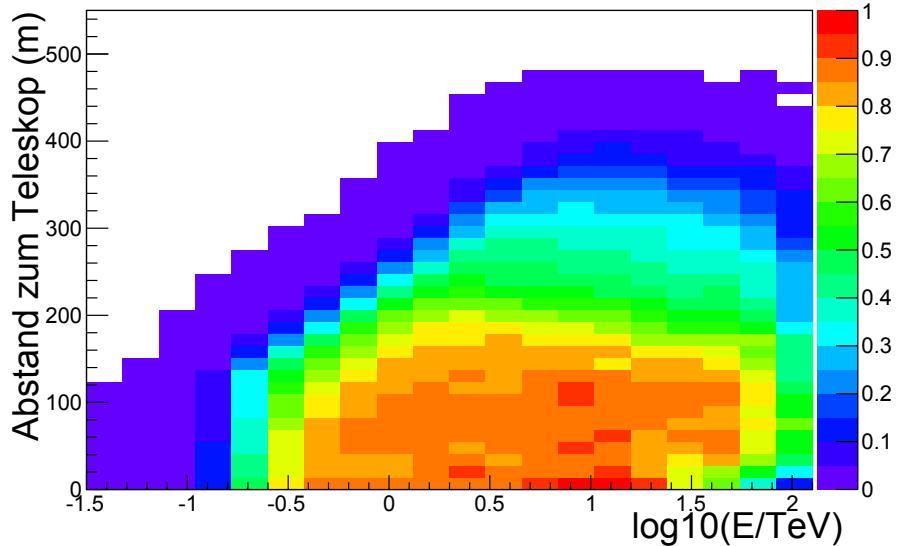


Abbildung 3.5.: Lookup-Tabelle für die Detektionswahrscheinlichkeit eines photon-induzierten Schauers bei Primärenergie  $E$  und gegebenem Abstand zu Teleskop 1 bei einem Zenitwinkel von  $10^\circ$  und Blickrichtung Süden. Das Maximum der Verteilung ist auf 1 normiert, damit nicht unnötig simulierte Schauer verworfen werden.

Wenn ein Teleskop einen Schauer gesehen hat, wird mit einer weiteren Lookup-Tablelle (Abb. 3.6) simuliert, wie viel Photoelektronen (PE) in der Kamera erzeugt wurden und anschließend mit der Minimalanforderung (80 p.e. für Standardschnitte und 200 p.e. für sogenannte harte Schnitte) verglichen (Aharonian et al., 2006).

### 3.4.5. Schauerrekonstruktion

Die Schauerrekonstruktion unterscheidet sich für die beiden Detektionsalgorithmen nur in der Gewichtung der paarweisen Schnittpunkte beim Aufaddieren. Zuerst wird in jedem Teleskop, das einen Schauer gesehen hat, die Hauptachse des Schauers im Nominalsystem bestimmt. Dafür werden das CoG und der Corepunkt in das Nominal-System transformiert. Dann wird jede Schauer Hauptachse paarweise mit denen der jeweils anderen Kamerabilder der beteiligten Teleskope geschnitten. So ergeben sich 1 bis 6 Schnittpunkte, je nach Multiplizität des Ereignisses. Für die geometrische Rekonstruktion wird die Summe nur über den Schnittwinkel der Hauptachsen gewichtet. Bei der Variante, welche die Lookup-Tabellen verwendet, wird zusätzlich mit der Anzahl der Photoelektronen gewichtet.

### 3.4.6. Speichern

Am Schluss der Simulation werden alle simulierten Schauer in eine Datei geschrieben. Für die Datenstruktur wird ein ROOT-Tree verwendet.

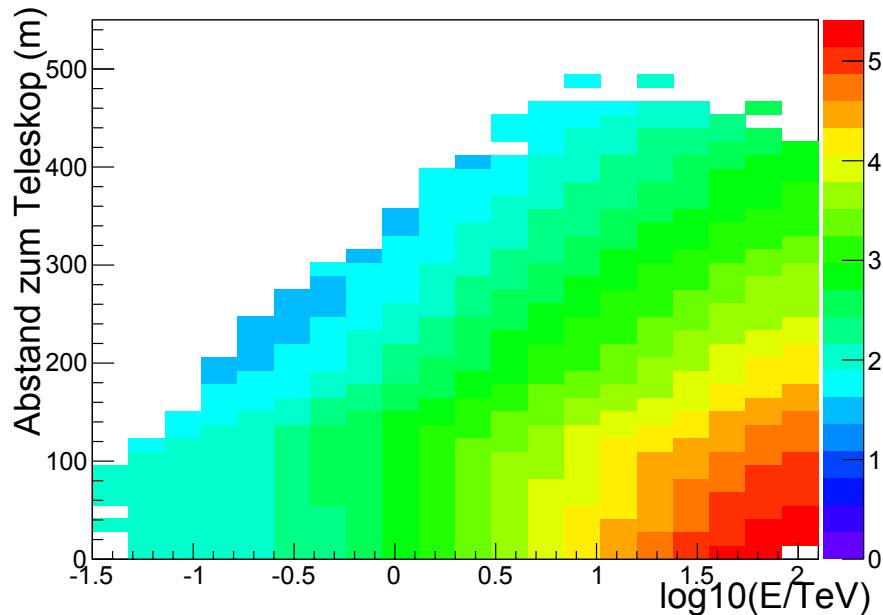


Abbildung 3.6.: Lookup-Tabelle für die Bildhelligkeit des Teleskops 1 bei einem Zenitwinkel von  $10^\circ$  und Blickrichtung Süden, die Anzahl der Photoelektronen ist in  $\log_{10}$ -Darstellung. Man kann gut das erwartete Verhalten der Helligkeit sehen, nämlich dass mit zunehmender Energie bei festem Abstand die Photonenzahl steigt und mit zunehmendem Abstand bei fester Energie zum Teleskop die Photonenzahl abnimmt. Die Farbskala gibt an wie viel Photonen ein Schauer mit Abstand  $R$  und Energie  $E$  im mittel im Teleskop Erzeugt.

## 4. Ergebnisse

Um festzustellen, ob und wie gut die Simulation funktioniert, werden zuerst Ergebnisse der Simulation ohne Pointingmanipulation mit H.E.S.S.-Monte-Carlo- und Beobachtungsdaten verglichen. Anschließend werden Ergebnisse der Studie, darüber wie sich künstliche Rotation und Verschiebung von Kameras auf das Bild ausüben diskutiert. Diese werden verglichen mit H.E.S.S.-Beobachtungen, die auf gleiche Art manipuliert worden sind. Es gibt mehrere Größen, die sich zum Vergleich eignen. Für die Simulation, welche nur über die Geometrie rekonstruiert, eignen sich die rekonstruierte Richtung, die Multiplizitäts-Verteilung, sowie Corepunktverteilungen im Groundsystem. Für die Rekonstruktion, welche zusätzlich die Energie berücksichtigt, steht noch das Spektrum als weiterer Größe zur Verfügung. Um die Ergebnisse vergleichbar zu gestalten, wurden einige Parameter der Simulation festgehalten. Diese finden sich in Tabelle 4.1. Die Bedeutung der Schauerparameter sind wie folgt:  $r_{\max}$  ist der maximale Abstand zum Zentrum des Arrays bei dem Schauer gewürfelt werden,  $h$  die Höhe des Schauermaximums in der Atmosphäre,  $E_0$  die minimale Energie bei der Schauer simuliert werden und  $\gamma$  der Spektralindex des gewürfelten Potenzspektrums.

Tabelle 4.1.: Feste Parameter, die im Code enthalten sind

Teleskopparameter		Schauerparameter	
Name	Wert	Name	Wert
Position (in Meter)	$\begin{pmatrix} 0 \\ -85 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 85 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 85 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -85 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$r_{\max}$	1000 m
Blickfeld	4°	$h$	8000 m
Kameraverschiebung	0'' – 1000''	$E_0$	30 GeV
Kamerarotation	0° – 5°	$\gamma$	2 bzw 3,4

### 4.1. Performance der Simulation

Zunächst betrachte ich die nicht manipulierte Rekonstruktion. In Abbildung 3.3 wurde gezeigt, wie die Schauer am Boden gewürfelt werden. Jedoch wird nicht jeder Schauer vom Teleskoparray gesehen. Betrachtet man die verschiedenen Multiplizitäten im Kamera- und Groundsystem, so stellt man fest, dass es unterschiedliche Bereiche gibt, in denen 2, 3 oder 4 Teleskope einen Schauer sehen. Abbildung 4.1 zeigt die Schauerverteilung für eine simulierte Quelle an fester AltAz-Position (60°, 180°) mit geometrischer Detektion und Multiplizität 2 an, weitere Verteilungen für andere Multiplizitäten und Quellpositionen befinden sich in Anhang A.1.

Betrachtet man Abbildung 4.2, stellt man fest, dass auch bei der Detektion mit Hilfe der Lookup-Tabellen gewisse Bereiche unterschiedlichen Multiplizitäten zuordnbar sind, jedoch gibt es jetzt einen deutlichen Überlapp der Bereiche (weitere Verteilungen befinden sich in Anhang A.2). Vergleicht man diese Verteilungen mit der Verteilung aus H.E.S.S.-Monte-Carlo-

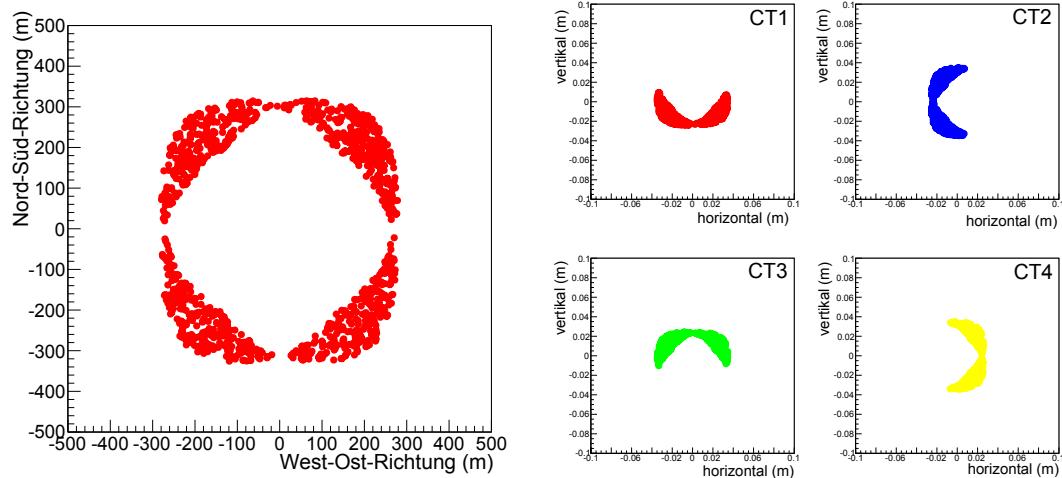


Abbildung 4.1.: Schauerverteilung für geometrische Detektion im Groundsystem bei  $30^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 2. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

Daten (Abb. 4.3, weitere in Anhang A.3), so stellt man fest, dass die Simulation mit den Lookup-Tabellen (Abb. 4.2) deutlich besser zu den H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten passt. Das ist auch einfach zu verstehen: Wendet man die geometrische Rekonstruktion an, so werden alle Schauer, die im Zentrum des Blickfeldes auftreffen, von allen vier Teleskopen gesehen. Hat ein solcher Schauer jedoch wenig Energie, so wird er nicht alle Teleskope triggern oder durch die Selektionsschnitte in einem Teil der Kameras herausgeschnitten. Dadurch gibt es einen Überlapp-Bereich, in dem Schauer mit verschiedenen Multiplizitäten gesehen werden. Das Gleiche kann man auch in der Multiplizitätsverteilung sehen. Bei der geometrischen Rekonstruktion wird der Anteil an Schauern mit Multiplizität 4 deutlich überschätzt; die Verteilungen von den H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten und der Lookup-Tabellen verwendenden Simulation passen deutlich besser zusammen (Abb. 4.4).

Betrachtet man das die Energieverteilung der rekonstruierten Ereignisse, so stellt man fest,

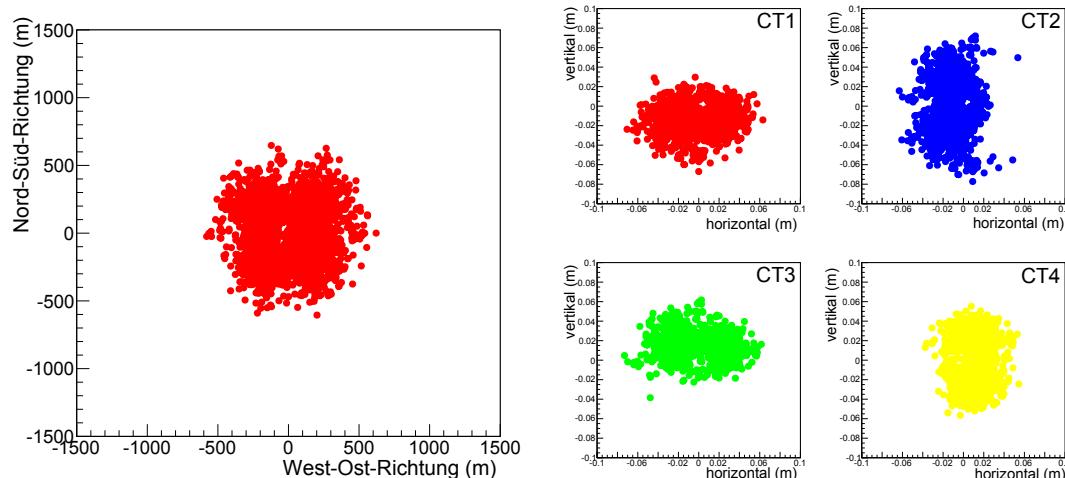


Abbildung 4.2.: Schauerverteilung für Lookup-Tabellendetektion im Groundsystem bei  $30^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 2. Schauerverteilung im Kamerasytem (rechts) gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer.

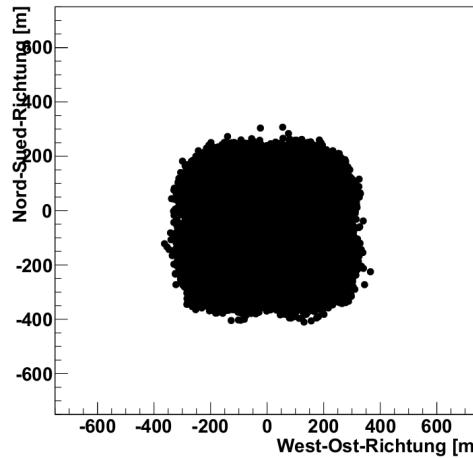


Abbildung 4.3.: Schauerverteilung von H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten im Groundsystem bei  $0^\circ$  Zenitwinkel. Die Multiplizität ist 2.

dass bei Rekonstruktion mit Lookuptabellen der Fluss bei geringen Energien unterschätzt wird (Abb. 3.1). Ab einer Energie von ca. 300 GeV wird der Fluss leicht überschätzt. Der Grund dafür ist, dass ab einer Energie von etwa 300 GeV Schauer nur noch über die erste Lookuptabelle aussortiert werden da sie wenn sie gesehen werden genügend hell sind, um den 80 p.e.-Schnitt der Standardrekonstruktion zu passieren. Die Auswahl-Kriterien für Schauer sehen für beide Simulationen sinnvoll aus. Betrachtet man die Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtungen in Himmelskoordinaten für nicht künstlich rotierte oder verschobene Kameras, so ergibt sich für beide Algorithmen eine vernachlässigbar kleine Quellaufweitung von  $0,03''$ . Der Schwerpunkt der Verteilung stimmt innerhalb von  $10^{-4}''$  mit der simulierten Quellposition überein (Abb. 4.5). Das ist beides durch numerische Unsicherheiten erklärbar und damit ist die Rekonstruktion sinnvoll.

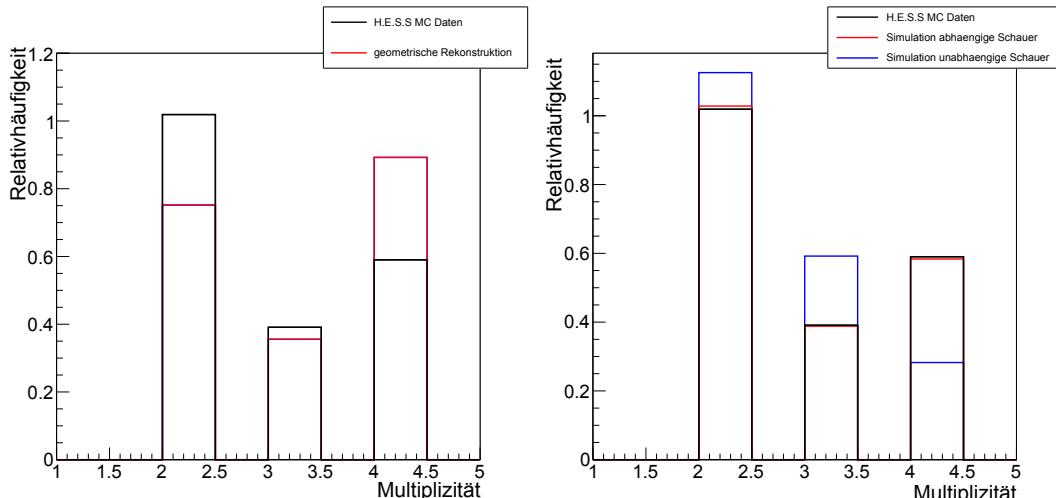


Abbildung 4.4.: Links: Multiplizitätsverteilung der geometrischen Rekonstruktion und H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten. Deutlich zu erkennen ist der Überschuss an Schauern mit Multiplizität 4. Rechts: Multiplizitätsverteilung der Simulation, die Look-up-Tabellen verwendet, die Verteilung für abhängig Simulierte Schauer passt deutlich besser als für unabhängige Schauer. Man sieht die deutlich bessere Übereinstimmung in der Multiplizitätsverteilung.

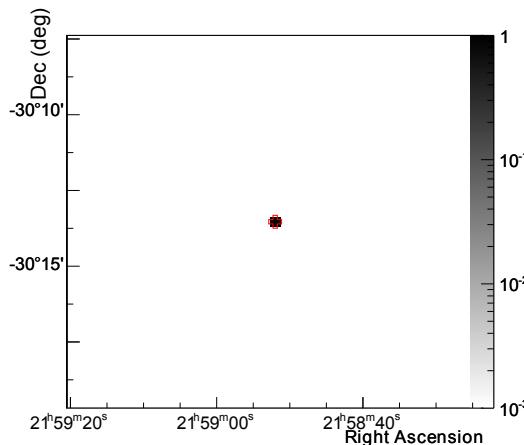


Abbildung 4.5.: Einer simulierten Gammastrahlungsquelle an der Katalogposition des Aktiven Galaxienkerns PKS 2155-304. Der Simulation liegen Zenit- und Azimut-Winkelverteilungen der Beobachtungsrichtung zugrunde, wie sie für tatsächliche Beobachtungen der Quelle mit H.E.S.S. realisiert wurden (Runliste ällöhne Manipulation der Kameraausrichtung).

Vergleicht man dies mit H.E.S.S.-Daten, so stellt man fest, dass die rekonstruierte Quellposition von der Katalogposition der Quelle abweicht. Bei Unterteilung der Daten in Beobachtungen mit unterschiedlichem Wobble-Offset sind Positionen innerhalb der statistischen Fehler miteinander kompatibel. Weiterhin fällt auf, dass die Quelle eine von Null verschiedene Größe hat, dies kann durch die PSF erklärt werden (Abb. 4.6).

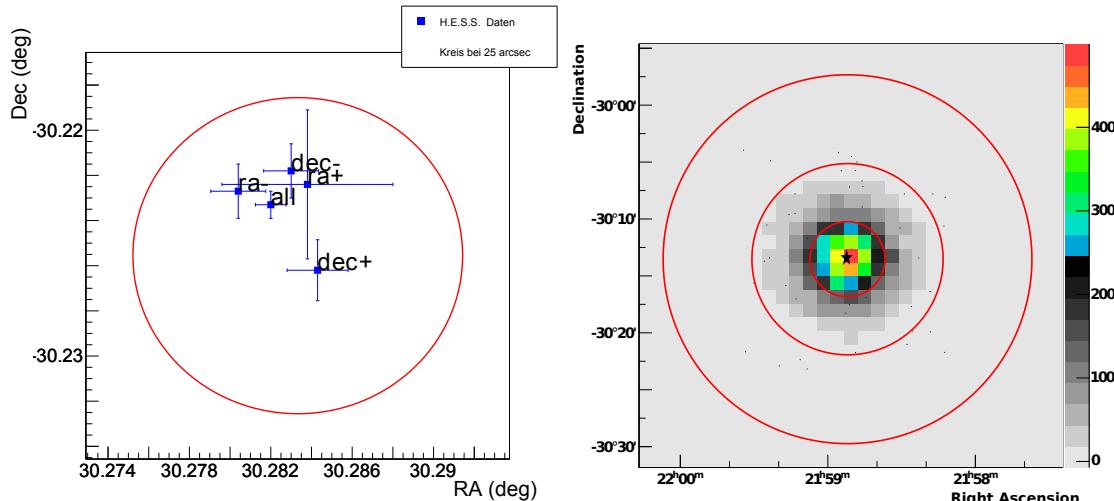


Abbildung 4.6.: Links: Rekonstruierter Schwerpunkt von Gammastrahlungs-Ereignissen, aufgezeichnet in etwa 290 Stunden Beobachtung der Aktiven Galaxie PKS 2155-304. Die Katalogposition der Quelle liegt im Zentrum des roten Kreises, der einen Radius von 25" hat. Die Fehlerbalken an den Datenpunkten geben die statistische Unsicherheit der Schwerpunktsbestimmung wieder. Gezeigt sind die Ergebnisse aller Beobachtungen („all“), sowie getrennt nach den verschiedenen Wobble-Offsets, unter denen die Quelle beobachtet wurde. Rechts: Überschusskarte für eine „all“ Runliste mit 350 Runs ohne Pointingmanipulation. Die Kreise haben einen Radius von 200, 500, 1000".

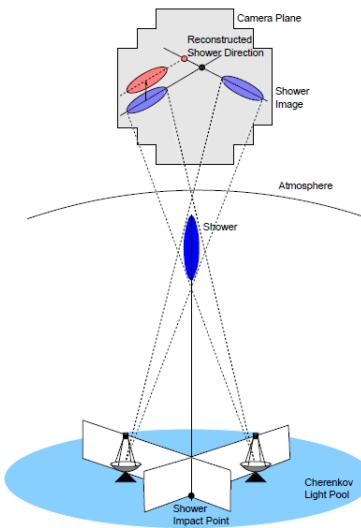


Abbildung 4.7.: Schematische Darstellung der Verschiebung der rekonstruierten Schauerrichtung durch Verschiebung eines Kamerabildes (mit freundlicher Genehmigung von C. van Eldik).

## 4.2. Verschieben von Kameras

Im folgenden werden Ergebnisse gezeigt die mit Hilfe der geometrischen Rekonstruktion entstanden sind. Wenn eine Cherenkov-Kamera in der Ebene senkrecht auf die Beobachtungsrichtung leicht verschoben wird, kommt es zu einer Fehlrekonstruktion der Schauerrichtung, da die Hauptachse der Hillas-Ellipse im Kamera-Koordinatensystem verschoben wird. In Abbildung 4.7 ist dies zu sehen. Sind alle vier Kameras auf die gleiche Art verschoben, kommt es zu Bildfeld-Rotation, da bei der Koordinatentransformation von RA-Dec- in das Kamerasystem effektiv um die falschen Achsen gedreht wird. Bei Verschiebungen, die klein sind gegen die Punktabbildungsfunktion des HESS-Instruments (etwa 0.1 Grad) wirkt sich dies als Quellaufweitung aus, bei großen Verschiebungen ist eine Bildfeld-Rotation gut zu erkennen. Um die Auswirkung zu quantifizieren, wurden in der geometrischen Schauersimulation und in H.E.S.S.-Beobachtungen von PKS 2155-304 die Kameras im Nominal-System um bis zu 1000" nach unten verschoben.

Um die Position der in realen Daten durch die PSF verschmierten zu finden, wurde ein symmetrischer 2D-Gauß an die Himmelskarte gefittet. Für geringe Verschiebungen der Kamera liefert diese Funktion eine gute Beschreibung der Daten, für große ist sie aufgrund der Bildfeldrotation eher schlecht geeignet. In Abbildung 4.8 sind eine die Ergebnisse der Simulation und die dazu passenden H.E.S.S.-Daten gezeigt. Die Ergebnisse aus den Daten sind nicht direkt vergleichbar, da die H.E.S.S.-Daten durch die PSF verschmiert sind.

Wie in den beiden Abbildungen zu sehen, ist die Quelle entlang eines Kreisbogens, der etwa der Kamera-Verschiebung entspricht, verschmiert. Um die Auswirkung der Kameraverschiebung auf die rekonstruierte Quellposition zu untersuchen, wurden die Kameras des Arrays um unterschiedliche Beträge künstlich verschoben und die entstandene Quellposition bestimmt. Abb. 4.9 zeigt die Abhängigkeit der Quellverschiebung von der Kameraverschiebung. Eine näherungsweise lineare Abhängigkeit ist erkennbar, in guter Übereinstimmung mit den Erwartungen aus der Simulation.

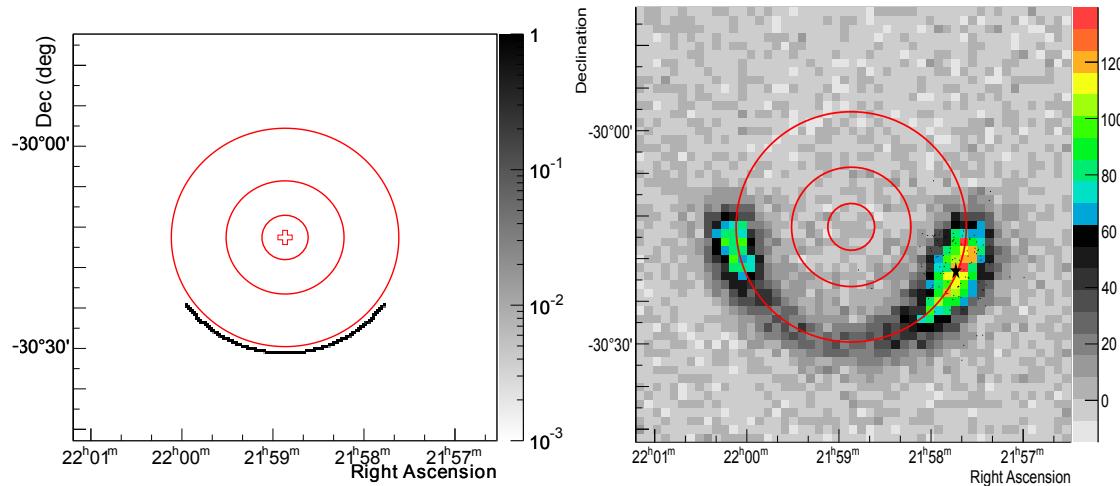


Abbildung 4.8.: Links: Verteilung der rekonstruierten Schauerrichtung in Himmelskoordinaten für eine Simulation, in der die Kameras aller vier HESS-Teleskope um  $1000''$  nach unten verschoben wurden. Das Kreuz gibt die simulierte Quellposition an. Rechts: Analyse von H.E.S.S.-Daten unter Anwendung der selben Kameraverschiebung.

### 4.3. Kamerarotation

Eine weitere interessante Fragestellung ist: Was passiert mit der Richtungsrekonstruktion, wenn eine Kamera um einen kleinen Winkel verdreht ist? Um dies zu untersuchen, wurden einzelne Kameras in der Simulation um einen Winkel von  $1^\circ$ - $5^\circ$  verdreht. Wie bei der Verschiebung von Kameras sorgt auch das Verdrehen von Kameras dafür, dass die Schnittpunkte der Hauptachsen verschoben werden. Durch das Verdrehen von Kameras bleibt die Quellposition im Wesentlichen die gleiche, aber die Quellgröße ändert sich stark (Abb. 4.10). Um die Auswirkungen zu quantifizieren, wurden Schwerpunkt und Standardabweichung der rekonstruierten simulierten Schauer bestimmt. Dafür wurde die gesamte Runliste simuliert.

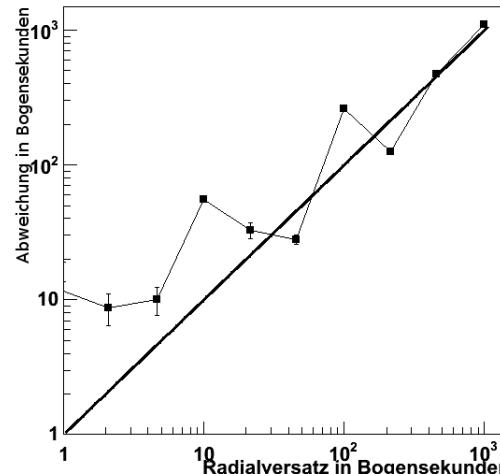


Abbildung 4.9.: Auf der Abszissenachse ist die künstliche Verschiebung der H.E.S.S.-Kameras und auf der Ordinatenachse die Verschiebung Verschiebung des Schwerpunkts der rekonstruierten Schauerrichtungen von der Katalogposition der Quelle. Die Gerade hat eine Steigung von 1.

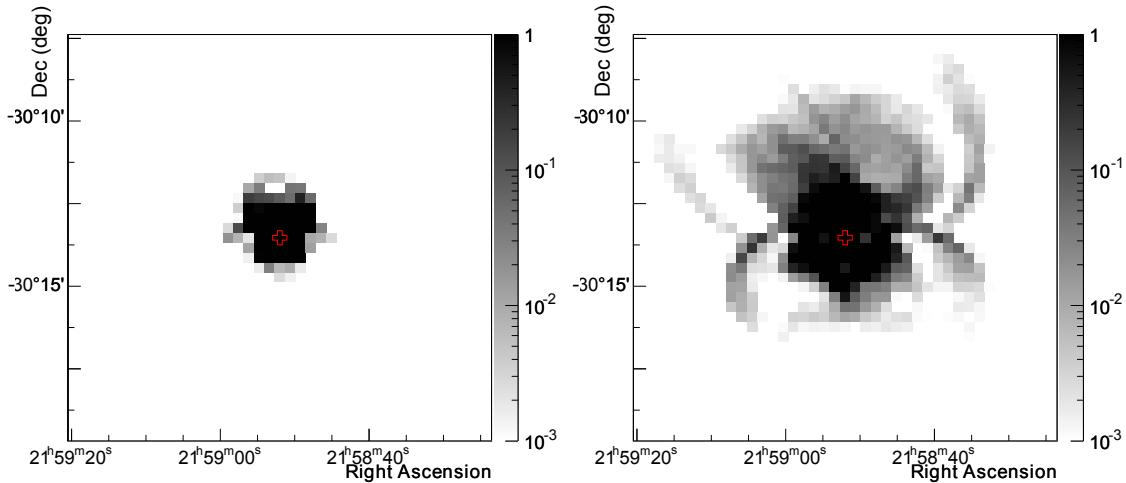


Abbildung 4.10.: Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1. Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Verdrehung 1 Grad. Rechts: Verdrehung 5 Grad. Runliste „all“.

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.11 zu sehen. Das Ansteigen der Standardabweichung ist einfach zu verstehen, da mit größer werdender Rotation der Kamera der Fehler beim Bestimmen des Schnittpunktes der Hauptachsen steigt. Wieso der Schwerpunkt scheinbar entlang der Deklinationsachse wandert ist hingegen bisher nicht verstanden, ein Grund könnte sein, dass PKS 2155-304 hauptsächlich in südlicher Richtung beobachtet wird, so dass sich eine Vorzugsrichtung im Array ergibt. Vergleicht man die Ergebnisse dieser Simulation mit manipulierten H.E.S.S.-Daten, so stellt man fest, dass die Position sich nicht ändert, jedoch die Breite der Verteilung das gleiche Verhalten zeigt wie in der Simulation (Abb. 4.12). Zu bedenken ist, dass sich die Breite der Verteilung der aus Daten rekonstruierten Schauerrichtungen aus der Faltung der Punktabbildungsfunktion mit der Aufweitung durch die Kameramanipulation ergibt. Da die PSF groß ist verglichen mit den hier gezeigten Effekten, muss die PSF sehr genau verstanden sein, um den Effekt der Kamerarotation quantitativ bestimmen zu können. Ein für Quellanalysen vermutlich interessanter Effekt ist, dass durch die Kameraverdrehung einige von der Quelle stammende Photonen außerhalb der Signalregion rekonstruiert werden, was die statistische Signifikanz der Quelle reduzieren kann (Abb. 4.2).

Tabelle 4.2.: Analyseergebnisse für H.E.S.S.-Daten mit unterschiedlicher Pointingmanipulation. Überschussphotonen in einer kreisförmigen Signalregion mit Radius  $\theta=0,1^\circ$ , zentriert auf die Katalogposition der Quelle.

Rotationswinkel von CT1	Überschussphotonen	Detektionssignifikanz
0°	11182	196 $\sigma$
1°	11167	195,8 $\sigma$
2°	11133	195,4 $\sigma$
3°	11065	194,7 $\sigma$
4°	10933	193,1 $\sigma$
5°	10806	191,6 $\sigma$

Bemerkenswert ist, dass man deutliche Unterschiede sieht, wenn man sämtliche Beobach-

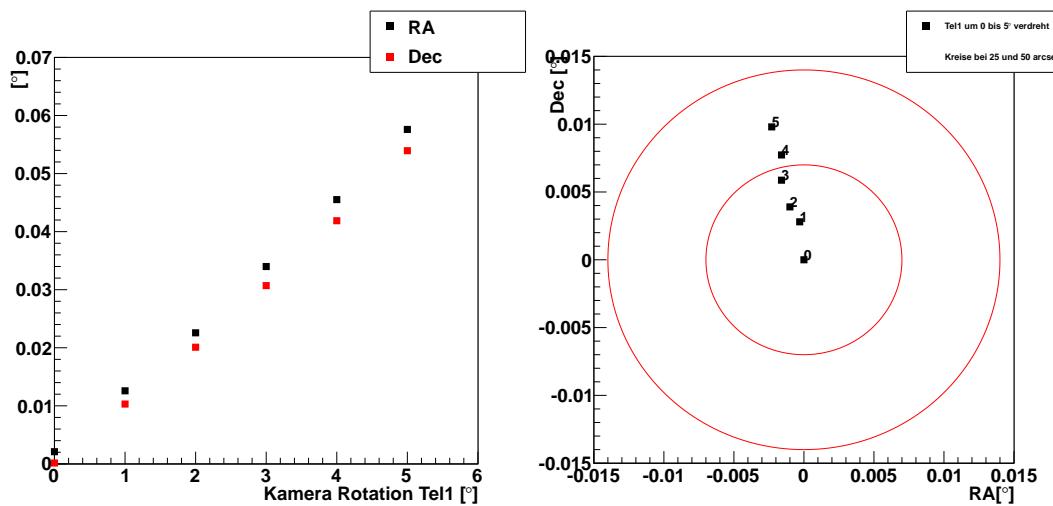


Abbildung 4.11.: Die Standardabweichung der in Abb 4.10 gezeigten Schauerrichtungsverteilung projiziert auf die RA und Dec-Koordinatenachsen, abhängig vom Rotationswinkel von CT1 (links) und die Schwerpunktposition abzüglich der Position bei Rotation  $0^\circ$  (rechts).

tungen auf PKS 2155-304 betrachtet, sondern wenn man nach den vier Wobble-Offsets selektiert (Abb. 4.13).

Betrachtet man jede Kombination von Kameraverdrehungen mit jedem Wobble-Offset, so stellt man fest, dass es ein sich wiederholtes Muster gibt (Abb. 4.14). Jedes der Bilder, das bei Teleskop 1 (CT1) vorkommt, ist auch bei den anderen drei Teleskopen zu sehen, jedoch anders rotiert und anders permutiert. Betrachtet man von Teleskop 1 und 3 die Bilder von positivem bzw. negativen RA-Wobble so stellt man fest, dass sie vertauscht sind und um  $180^\circ$  um die Quellposition verdreht. Das findet seine Entsprechung in der Anordnung der Teleskope am Boden, wo bei Beobachtung in Richtung Süden die zwei unterschiedlichen RA-Wobbleoffsets im wesentlichen mit einem Austausch der beiden Teleskope (CT1 steht im Osten, CT3 im Westen) identisch ist.

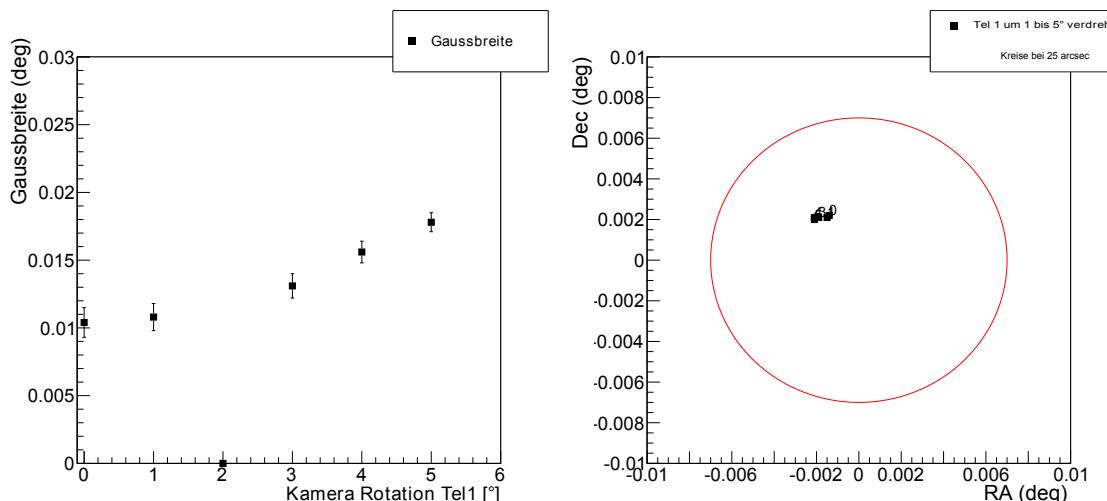


Abbildung 4.12.: Manipulierte H.E.S.S.-Daten Links: Breite des gefitteten 2D-Gauß abhängig vom Rotationswinkel von CT1. Rechts: Die Schwerpunktposition abzüglich der Testposition ( $329,7166^\circ:-30,2255^\circ$ ).

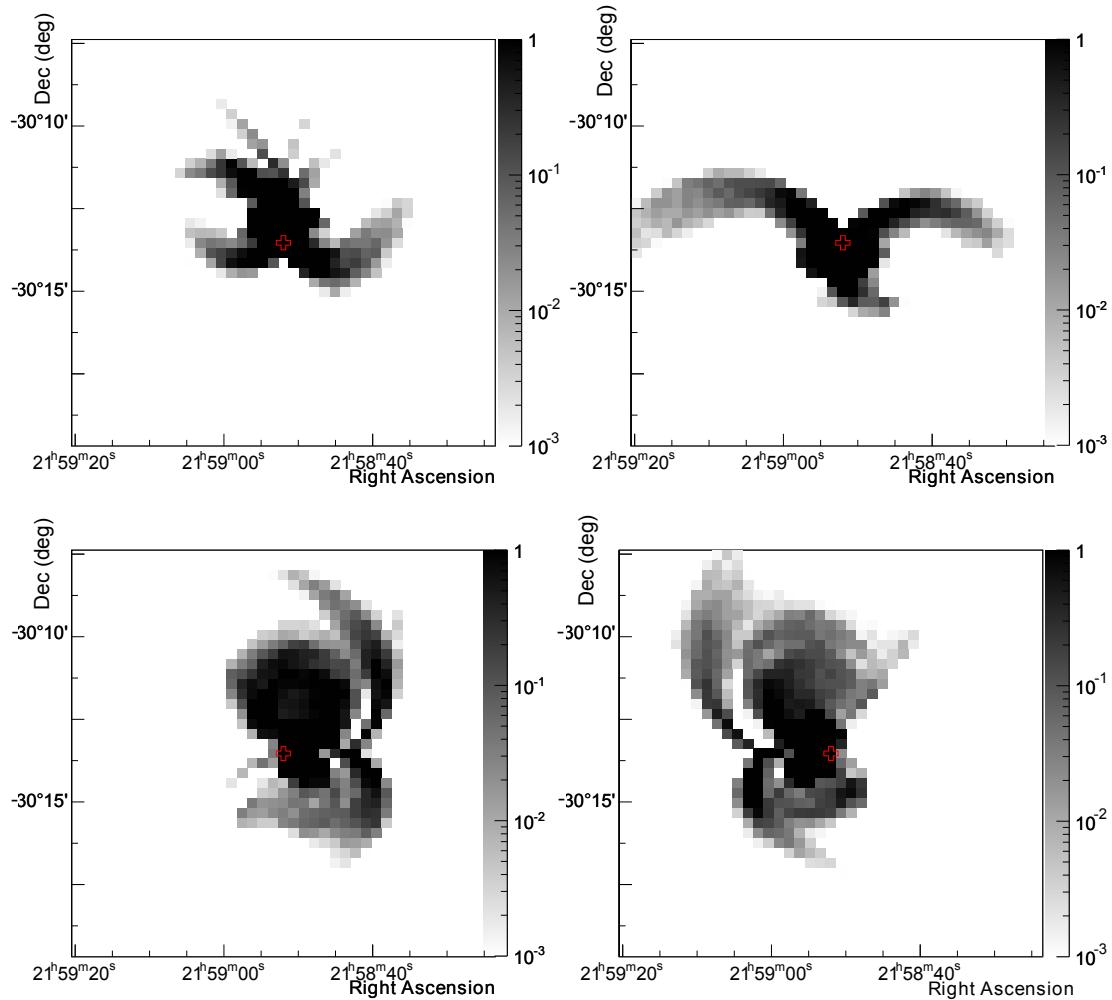


Abbildung 4.13.: Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung um  $3,6^\circ$  der Kamera von Teleskop 1. Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Oben links: Wobble-Offset in positive RA-Richtung. Oben rechts: in negative RA-Richtung. Unten links: Wobble-Offset in positive Dec-Richtung. Unten rechts: Wobble-Offset in negative Dec-Richtung.

Betrachtet man für einen ausgewählten Wobble-Offset und ein verdrehtes Teleskop die Richtungsverteilungen, die sich für bestimmte Kombinationen von an der Rekonstruktion beteiligten Teleskopen ergeben, so ergibt sich folgendes Bild: Betrachtet man nun die Kombinationen von zwei Teleskopen unter denen eines stets das Manipulierte ist, so ergeben sich die Verteilungen in Abbildung 4.15 für zwei beteiligte Teleskope. Da es keine Ereignisse gibt, die nur von den Teleskop 1 und 3 gesehen werden, wird diese Abbildung nicht gezeigt. Wie man sieht, gibt es in beiden Verteilungen einige Punkte, die weit weg von der Quellposition rekonstruiert werden. Vergleicht man dies mit den Verteilungen für Multiplizität 3 (Abb. 4.16) und 4 (Abb. 4.17) stellt man fest, dass diese im Mittel weniger abweichen. Das ist einfach zu verstehen über die Summierung der Schnittpunkte: Für einen Schauer mit Multiplizität 2 gibt es nur einen Schnittpunkt. Durch die Manipulation eines Teleskops ist dieser systematisch verschoben. Für Schauer mit Multiplizität 3 gibt es drei Schnittpunkte, von denen einer korrekt rekonstruiert wird und zwei systematisch verschoben sind. Durch die Mittelung über alle Schnittpunkte wird der Einfluss der Verschiebung reduziert. Für Multiplizität 4 gibt es sechs Schnittpunkte, von denen drei korrekt rekonstruiert wird und drei systematisch verschoben

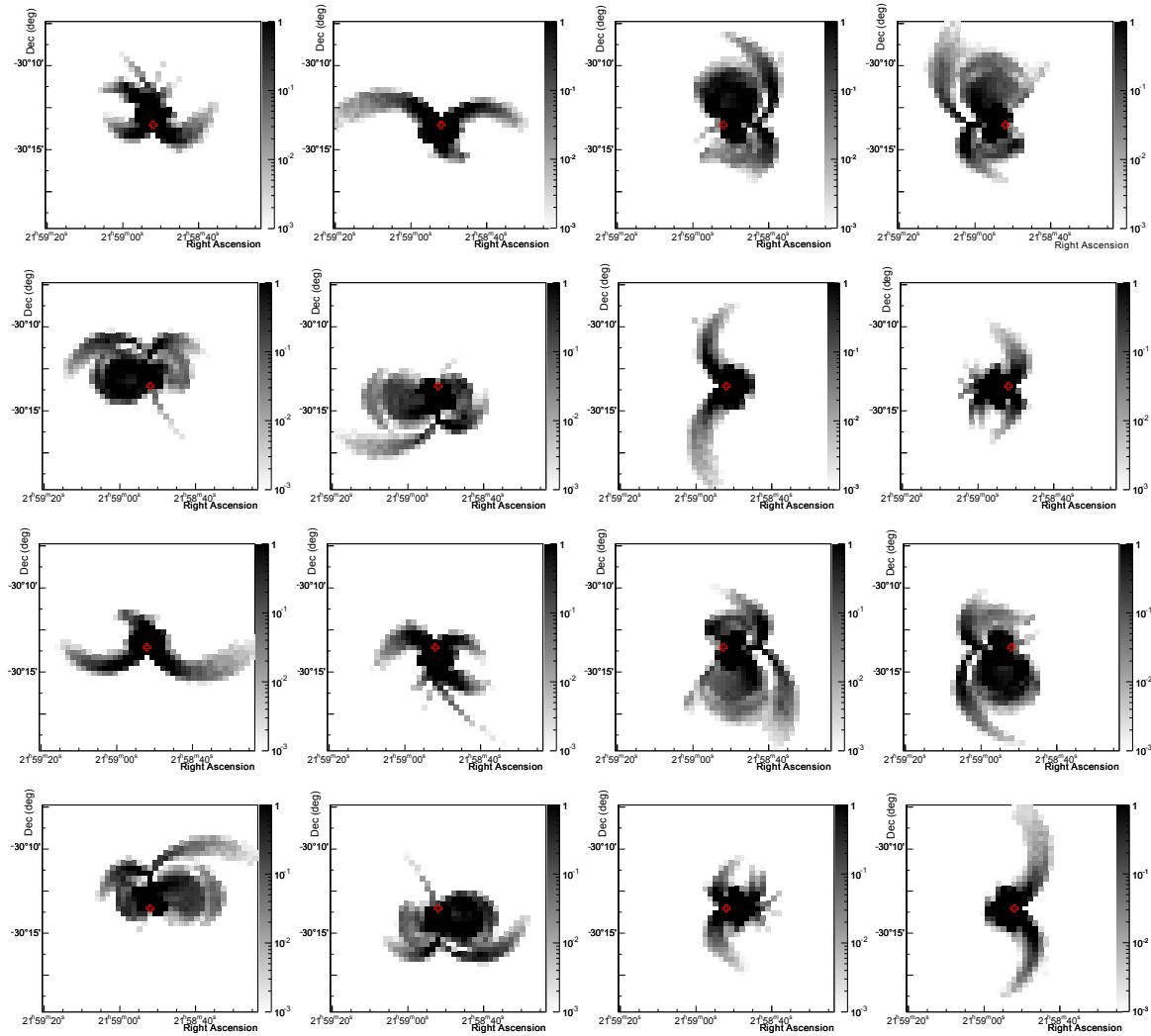


Abbildung 4.14.: Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskops. Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Verdrehung 1 Grad. Rechts: Verdrehung 5 Grad. Von links nach rechts Wobble-Offset: RA positiv, RA negativ, Dec positiv, Dec negativ. Von oben nach unten CT1  $3,6^\circ$  verdreht dann CT2, CT3 und CT4.

sind.

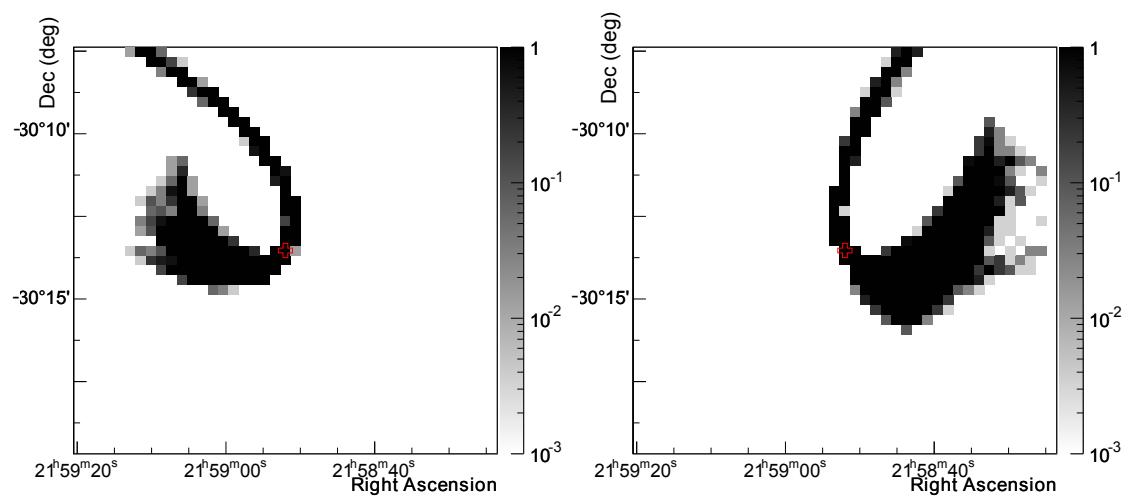


Abbildung 4.15.: Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1 um  $4^\circ$ . Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Sind die Teleskope 1 und 2 Beteiligt und rechts Teleskope 1 und 4.

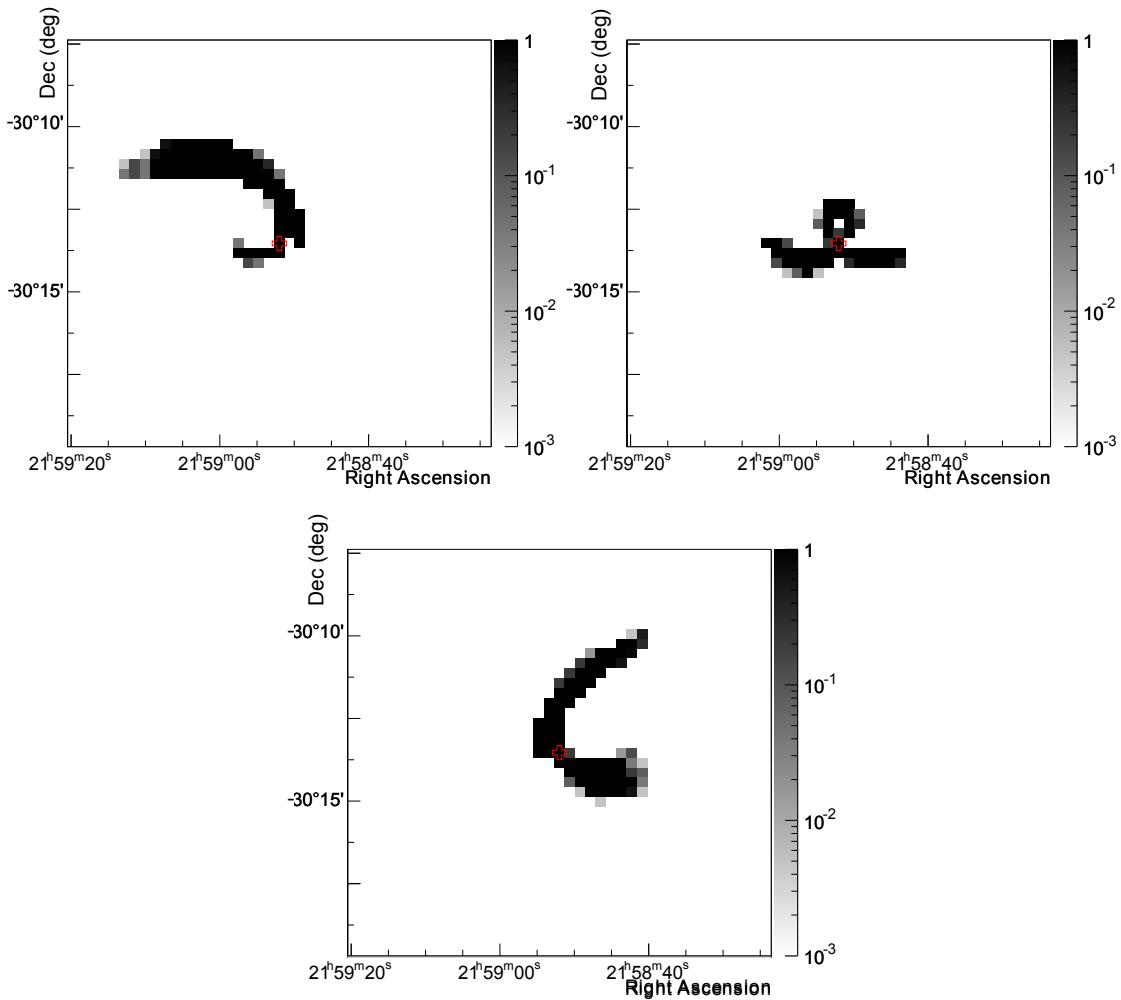


Abbildung 4.16.: Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1 um  $4^\circ$ . Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Links: Sind die Teleskop 1, 2 und 3, rechts: 1, 2 und unten: Teleskop 1,3 und 4.

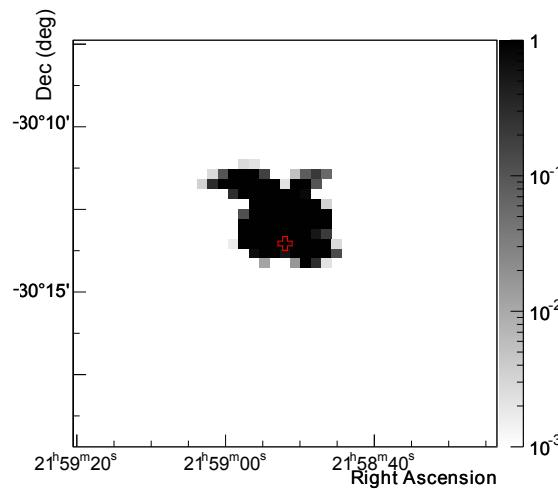


Abbildung 4.17.: Himmelskarte der rekonstruierten Schauerrichtungen bei Verdrehung der Kamera von Teleskop 1 um  $4^\circ$ . Die Farbskala ist logarithmisch gewählt. Das rote Kreuz zeigt die Position der simulierten Quelle. Alle vier Teleskope sind Beteiligt.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Pointing-Studien des H.E.S.S. I-Teleskops-Arrays durchgeführt. Dazu habe ich eine eigene Schauersimulation geschrieben, die mit Hilfe von sehr vereinfachter Schauerparametrisierung die Richtung der simulierten Schauer berechnet und mit einfachen Mitteln Manipulationen an der Teleskopgeometrie zulässt. Da in dieser einfachen Simulation die Punktauflösungsfunktion des H.E.S.S.-Instruments absichtlich nicht simuliert wird, ist es möglich, die rekonstruierte Richtung ohne Verschmierung durch die PSF zu beobachten, so dass man die Auswirkung von Pointingmodellparametern auf die Richtungsrekonstruktion studieren kann. Durch die Möglichkeit, Beobachtungsparameter aus H.E.S.S.-Beobachtungen auszulesen, ist es möglich Beobachtungen mit korrekter Zenit- und Azimutwinkelverteilung in der Simulation nachzustellen. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse der Simulation mit Ergebnissen von Beobachtungen zu vergleichen. Erste Ergebnisse der Simulation zeigen, dass kleine Verschiebungen oder Verdrehungen von Kameras einen deutlichen Einfluss auf die Rekonstruktion der Quelle haben. Durch Manipulation von entsprechender Teleskopparameter bei der Rekonstruktion von H.E.S.S.-Beobachtungsdaten konnte dieser Effekt bestätigt werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, bei Cherenkov-Teleskopen diese Parameter genau zu bestimmen, wenn man eine Auflösung im Bogensekunden-Bereich erreichen möchte, oder in der Lage sein will, zwischen ausgedehnten Quellen und Punktquellen zu unterscheiden. Für die Zukunft ist es geplant, die Simulation weiter mit H.E.S.S.-Daten zu vergleichen, um herauszufinden, wie gut die Vorhersagen der Simulation sind. Ein weiterer Schritt, der bereits im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht wird, ist, in wieweit der hier gewählte Ansatz auf ein Array übertragbar ist, welches aus mehr als einem Teleskop-Typ besteht. Dies wird mit der Konfiguration des H.E.S.S.-II-Arrays umgesetzt. Ein weiterer Schritt ist es dann die Anwendung Simulation auf Cherenkov Telescopes Array.



# Literaturverzeichnis

- Aharonian F., Akhperjanian A.G., Anton G., et al., 2009, *Astron. Astrophys.* 508, 561
- Aharonian F., Akhperjanian A.G., Aye K.M., et al., 2004, *Nature* 432, 75
- Aharonian F., Akhperjanian A.G., Bazer-Bachi A.R., et al., 2006, *Astron. Astrophys.* 457, 899
- Berge D., Funk S., Hinton J., et al., 2005, In: Aharonian F., Völk H.J., Horns D. (eds.) *HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: 2nd International Symposium on High Energy Gamma-Ray Astronomy*. AIP Conf. Ser. 745
- Beringer J., Arguin J.F., Barnett R.M., et al., 2012, *Phys. Rev. D* 86
- Bradt H., 2004, *Astronomy Methods*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Braun I., 2007, *Improving the Pointing Precision of the H.E.S.S. Experiment*
- Draine B.T., 2011, *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*, Princeton University Press
- ESO 2012, <http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt.html>
- Fermi E., 1949, *Physical Review* 75, 1169
- Funk S., 2005, A new population of very high-energy  $\gamma$ -ray sources detected with H.E.S.S. in the inner part of the Milky Way
- Funk S., Hermann G., Hinton J., et al., 2004, *Astroparticle Physics* 22, 285
- Gillessen S., 2004, Sub-Bogenminuten-genaue Positionen von TeV-Quellen mit H.E.S.S.
- Granato F., 2010, *ESA/Hubble*
- H.E.S.S C., 2012, H.E.S.S. Webseite, <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- Hillas A.M., 1985, In: Jones F.C. (ed.) *International Cosmic Ray Conference*, 3. International Cosmic Ray Conference, p.445
- Hinton J.A., Hofmann W., 2009 47, 523
- Hofmann W., 2006, *ArXiv Astrophysics e-prints/0603076*
- Hofmann W., H.E.S.S. Collaboration 2001, In: *International Cosmic Ray Conference*, 7. International Cosmic Ray Conference, p. 2785
- Jung I., 1999, Methoden zur Bildverarbeitung und Ereignisrekonstruktion des HEGRA-Teleskopsystems
- Karttunen H., Krüger P., Oja H., et al., 2007, *Fundamental Astronomy*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Lennarz D., 2012, *Transient Very-High-Energy Gamma-Ray Emission from Gamma-Ray Bursts and Supernovae*
- Longair M.S., 2011, *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Lorenz E., Wagner R., 2012, *European Physical Journal H* 37, 459
- Petschek A.G., (ed.) 1990, *Supernovae*
- Punch M., Akerlof C.W., Cawley M.F., et al., 1992, *Nature* 358, 477
- Taylor G., 1950, *Royal Society of London Proceedings Series A* 201, 159
- Völk H.J., Bernlöhr K., 2009, *Experimental Astronomy* 25, 173
- Wakely S., Horan D., 2013, <http://tevcat.uchicago.edu/>
- Weekes T.C., Cawley M.F., Fegan D.J., et al., 1989, *Astrophys. J.* 342, 379
- Woolard E.W., 1942, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 54, 77



# A.

## A.1. Schauerverteilung der geometrischen Rekonstruktion

In diesem Abschnitt werden Schauerverteilungen der geometrischen Rekonstruktion gezeigt, die in Kapitel 4.1 nicht gezeigt wurden.

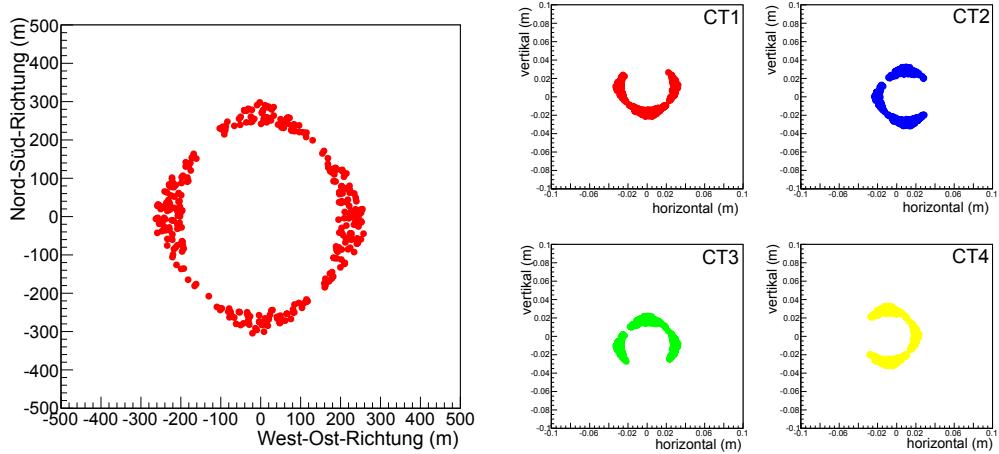


Abbildung A.1.: geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $30^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

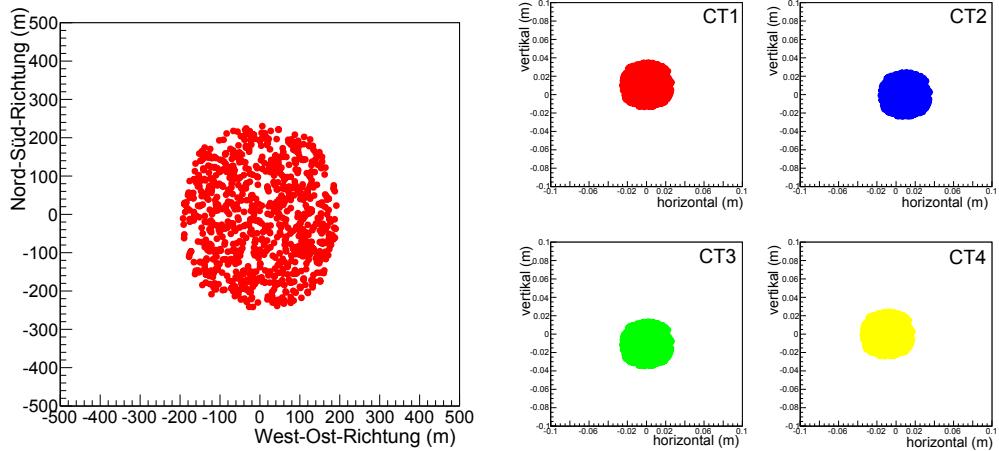


Abbildung A.2.: Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $30^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

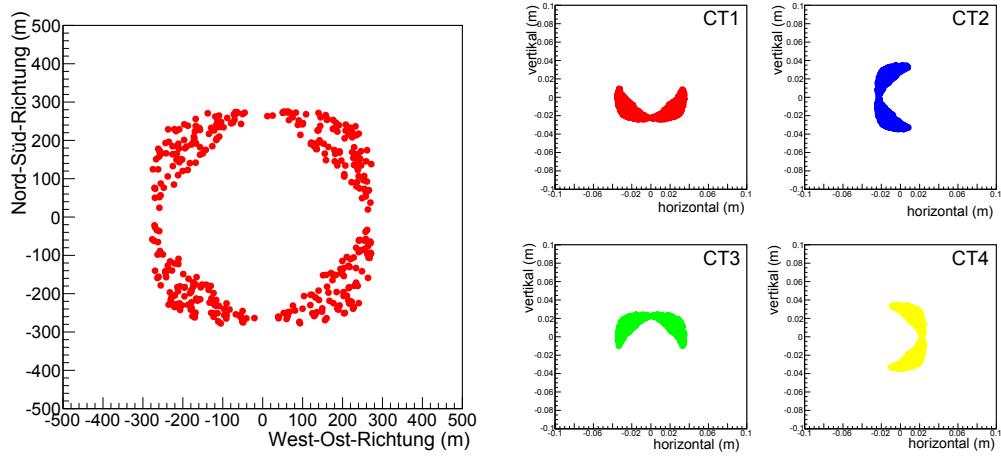


Abbildung A.3.: Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $0^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 2. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

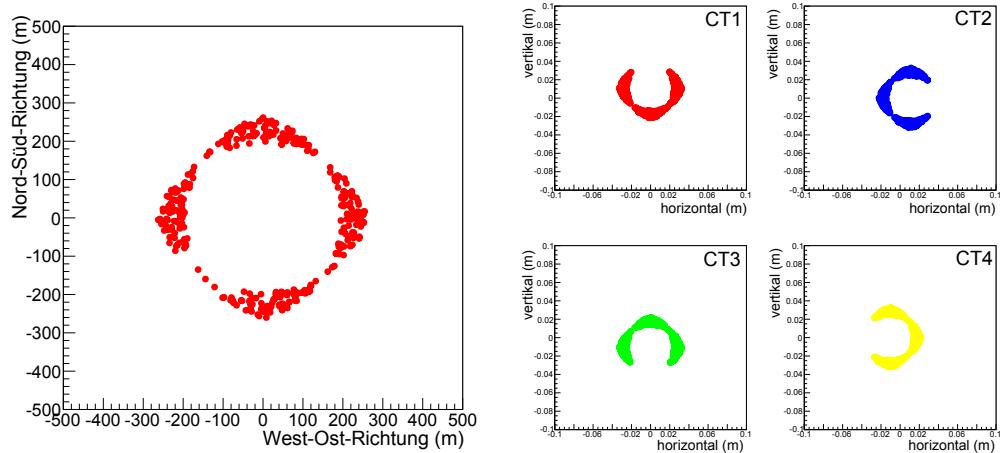


Abbildung A.4.: Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $0^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

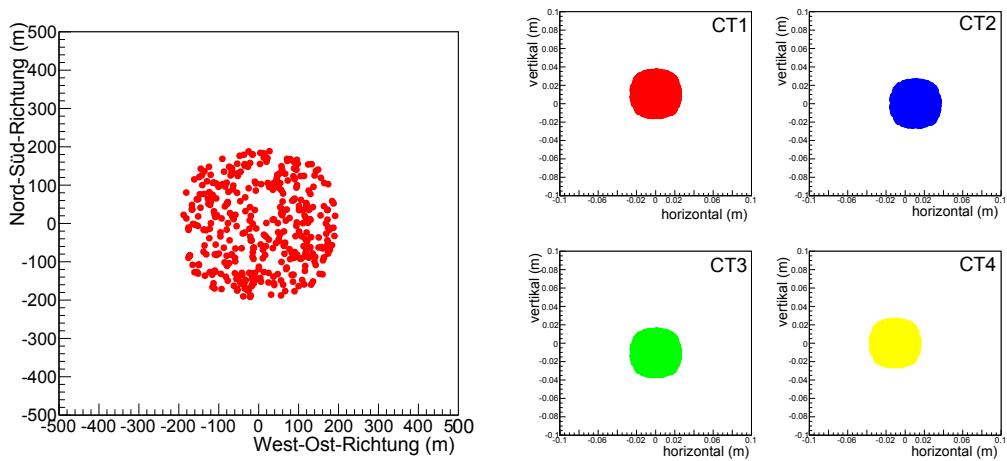


Abbildung A.5.: Geometrische Rekonstruktion: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $0^\circ$  Zenitwinkel (links). Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

## A.2. Schauerverteilung der Lookupsimulation

In diesem Abschnitt werden Schauerverteilungen der Lookup-Tabellen basierenden Simulation gezeigt die in Kapitel 4.1 nicht gezeigt wurden.

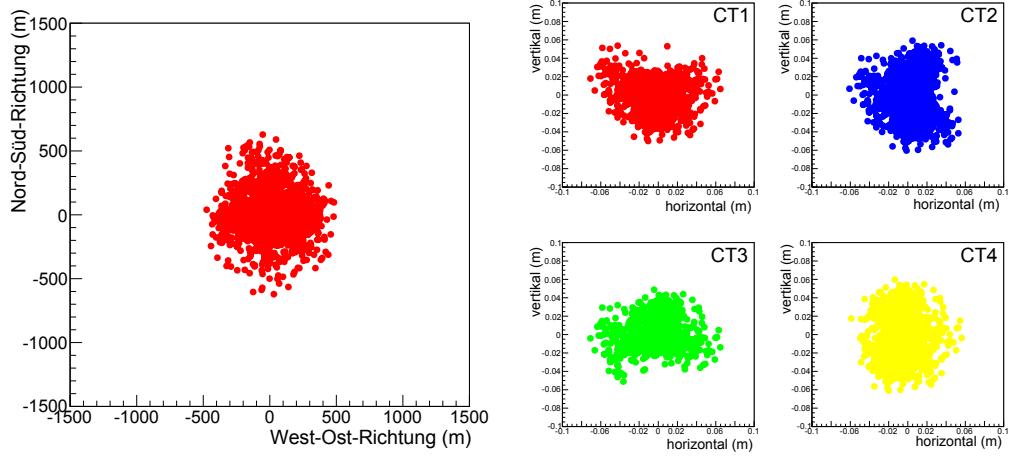


Abbildung A.6.: Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $30^\circ$  (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

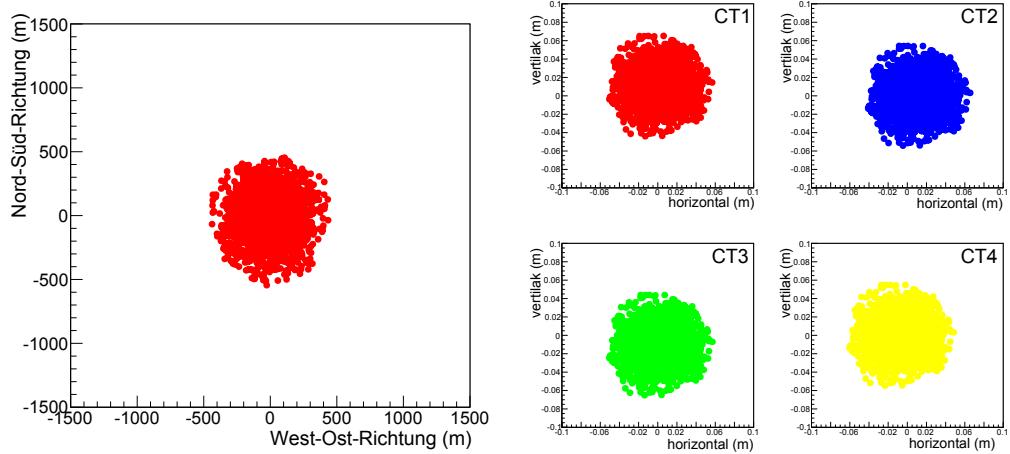


Abbildung A.7.: Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $30^\circ$  (links) Zenitwinkel. Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

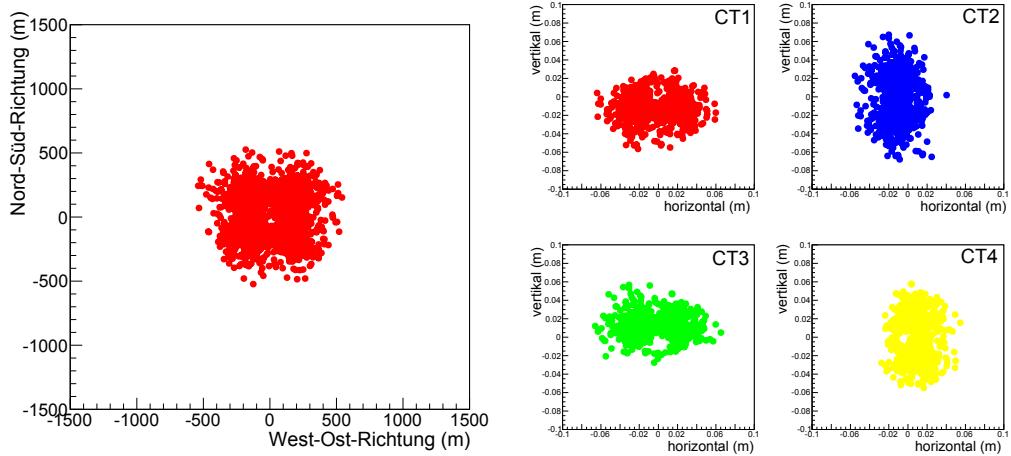


Abbildung A.8.: Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $0^\circ$  (links) Zenitwinkel.  
Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 2. Schauerverteilung im Kamerasytem  
gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

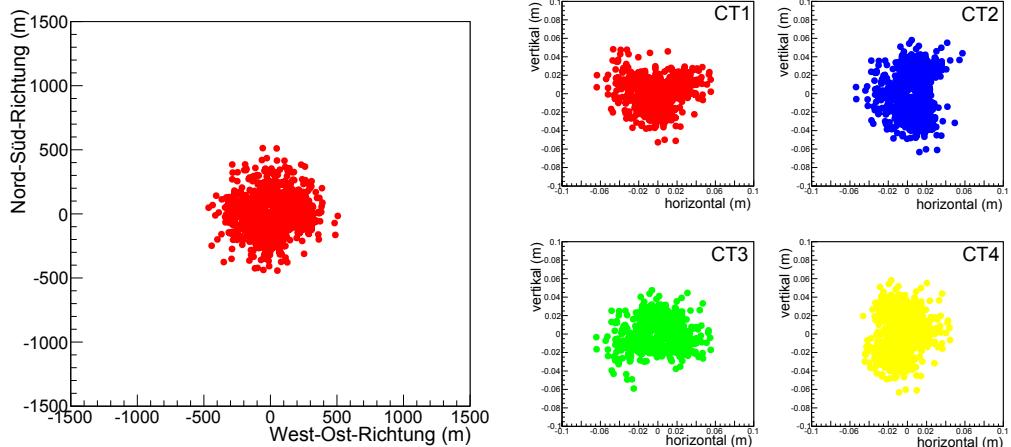


Abbildung A.9.: Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $0^\circ$  (links) Zenitwinkel.  
Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 3. Schauerverteilung im Kamerasytem  
gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

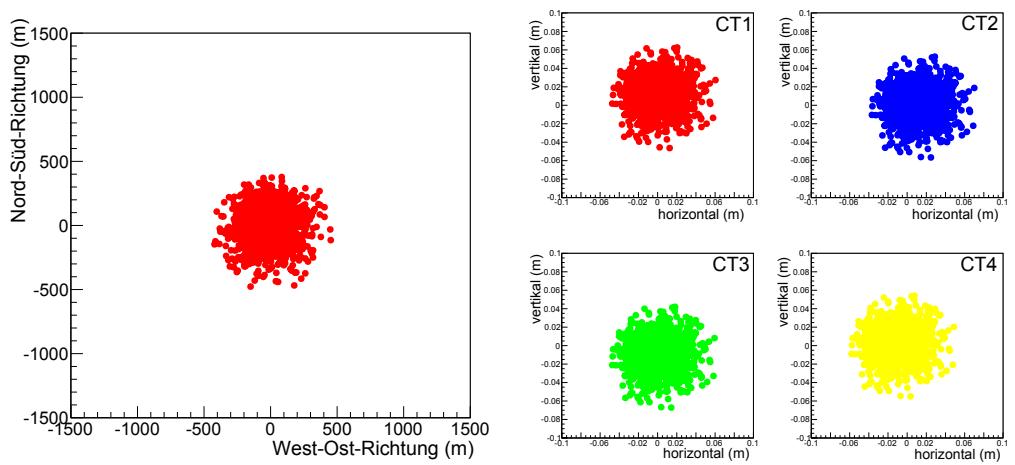


Abbildung A.10.: Lookupsimulation: Schauerverteilung im Groundsystem bei  $0^\circ$  (links) Zenitwinkel.  
Gezeigt ist der Corepunkt bei Multiplizität 4. Schauerverteilung im Kamerasytem  
gezeigt ist das CoG für die gleichen Schauer (rechts).

### A.3. Schauerverteilung im Groundsystem für H.E.S.S.-Monte-Carlo Daten

In diesem Abschnitt werden Schauerverteilungen der H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten gezeigt die in Kapitel 4.1 nicht gezeigt wurden.

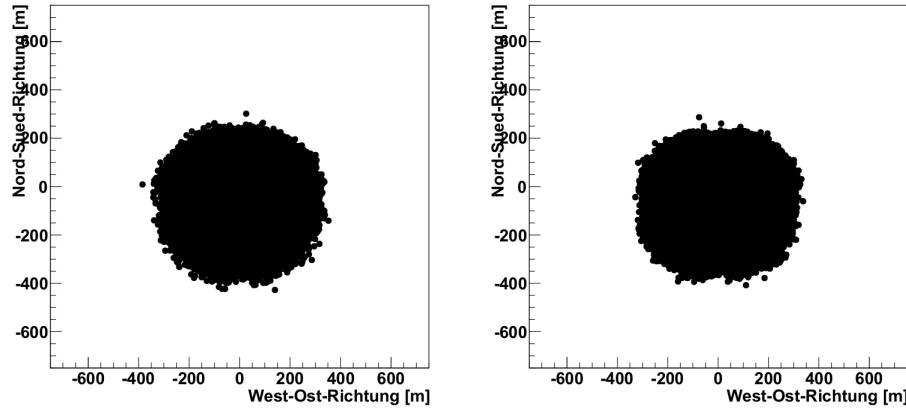


Abbildung A.11.: H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten: Schauerverteilung von H.E.S.S.-Monte-Carlo Daten im Groundsystem bei  $0^\circ$  Zenitwinkel. Die Multiplizität ist 3 (links) und 4 (rechts).

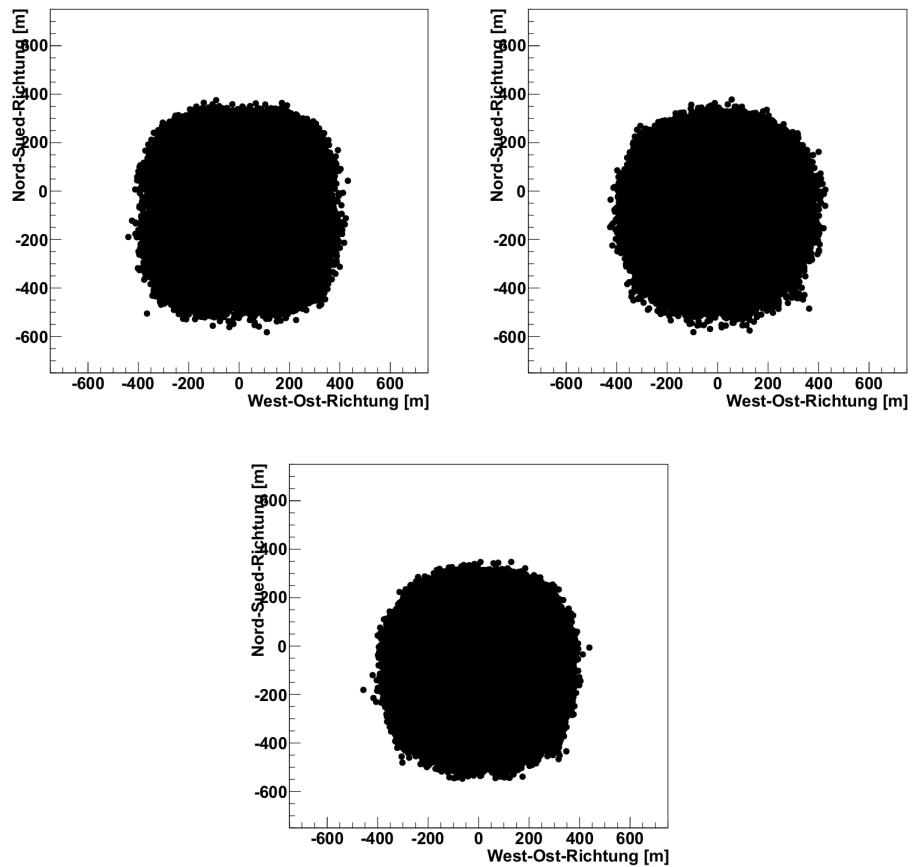


Abbildung A.12.: H.E.S.S.-Monte-Carlo-Daten: Schauerverteilung von H.E.S.S.-Monte-Carlo Daten im Groundsystem bei  $30^\circ$  Zenitwinkel. Die Multiplizität ist 2 (links), 3 (rechts) und 4 (unten).

## A.4. Runlisten

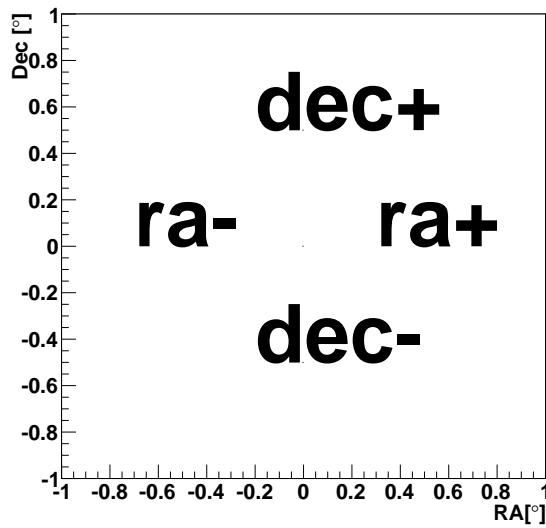


Abbildung A.13.: Illustration der Wobbleoffsets die beobachtete Quelle ist bei (0,0).

Runlisten wurden mit dem tool `findruns` welches in der HAP Software enthalten ist erzeugt dafür wurden folgende Kommandos verwendet:

`dec-` (enthält 161 Runs)

```
findruns --selection spectral --first 20000 --output PKS2155_decmminus --mintels 4 329.716666666667  
-30.725555555556 0.2
```

`dec+` (enthält 160 Runs)

```
findruns --selection spectral --first 20000 --output PKS2155_decplusplus --mintels 4 329.716666666667  
-29.725555555556 0.2
```

`ra+` (enthält 134 Runs)

```
findruns --selection spectral --first 20000 --output PKS2155_raplus --mintels 4 330.295253696839  
-30.225555555556 0.2
```

`ra-` (enthält 123 Runs)

```
findruns --selection spectral --first 20000 --output PKS2155_raminus --mintels 4 329.137966666667  
-30.225555555556 0.2
```

`all` (enthält 578 Runs)

```
findruns --selection spectral --first 20000 --output PKS2155_all --mintels 4 --pickfirst --name  
PKS%2155-304 0.7
```

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen der vorliegenden Masterarbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt:

- Prof. Dr. Christopher van Eldik für die Ausschreibung dieses Arbeitsthemas und für die gute und stetige Betreuung dieser Masterarbeit.
- Prof. Dr. Uli Katz für die Übernahme des Korreferats.
- Dr. Kathrin Valerius für die hilfreichen Diskussionen und die Ausdauer beim Korrekturlesen der Arbeit.
- Dank gilt auch der gesamten H.E.S.S.-Arbeitsgruppe in Erlangen, für die gute Arbeitssatmosphäre, die schönen Mittagspausen und die vielen Diskussionen rund um mein Arbeitsthema.
- Felicia Krauß für Unterstützung während meines Studiums, die hilfreichen Diskussionen und die große Unterstützung beim Schreiben der Arbeit.
- Meiner Familie für die Unterstützung während des gesamten Studiums.
- Allen die ich vergessen habe, obwohl sie eine namentliche Nennung verdient hätten.

# Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Nürnberg, den 12.06.2013

---

Johannes Veh