

Untersuchung von Bildern einer Pointing-Kamera am *MAGIC*-Teleskop

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von

Fabian Richter

15.01.2020

Erlangen Centre for Astroparticle Physics

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Betreuer: Prof. Dr. Christopher van Eldik

Kurzfassung

Das *Cherenkov Telescope Array CTA* soll in Zukunft eine nie da gewesene Präzision in der Vermessung extraterrestrischer Gammastrahlung ermöglichen. Ein wichtiger Schritt zur möglichst genauen Rekonstruktion des Ursprungsorts der Gammastrahlung ist die Kenntnis der Teleskop-Position. Um diese bestmöglich zu bestimmen, ist das sogenannte Pointing notwendig. Dabei nimmt eine optische Kamera, PointingCCD genannt, Bilder des Nachthimmels auf. Durch Abgleich der in den Aufnahmen sichtbaren Sterne mit bekannten Sternen aus einem Katalog kann die Ausrichtung der PointingCCD bestimmt werden. Für den geplanten Teleskop-Typen Medium-Sized Telescope (MST) des *CTA* soll die Pointingpräzision dazu besser als sieben Bogensekunden sein. Gegenstand dieser Arbeit ist das bessere Verständnis der dazu genutzten Pointing-Aufnahmen. Die dafür zu Testzwecken genutzte PointingCCD ist an einem *MAGIC*-Teleskop befestigt. Besonderes Interesse gilt dem Verständnis des Einflusses des Mondes auf diese Bilder. Für die Untersuchung des Abstandes zwischen Mond und PointingCCD wurde ein für diese Zwecke ausreichend präzises Modell zur Berechnung der Richtung der PointingCCD aus der Ausrichtung des Teleskops entwickelt.

Es ergab sich, dass beinahe alle Bilder, welche bei einem Abstand zwischen PointingCCD und Mond von weniger als 40° aufgenommen wurden, unabhängig von der Mondphase wegen des in das Bild scheinenden Mondlichts nicht zum Pointing verwendet werden können. Für größere Abstände fanden sich überwiegend nicht lösbare Bilder, welche nicht durch den Mond beeinflusst wurden. Bei einem Abstand von 118° traten allerdings auch vom Mond beeinflusste Bilder auf.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Grundlagen	6
2.1. Gammaastronomie	6
2.1.1. VHE Gammaastronomie	6
2.1.2. Entstehung von VHE Gammastrahlen am Beispiel von AGN	7
2.2. Teilchenschauer	8
2.3. Cherenkov-Strahlung	10
3. Imaging Air Cherenkov Telescopes	12
3.1. Aufbau	12
3.2. Detektionsprinzip	12
3.3. Pointing	14
3.4. Die MAGIC-Teleskope	17
3.5. Das Cherenkov Telescope Array	18
4. Qualitätsprüfung der Bilder	21
4.1. Übersicht über die zur ersten Untersuchung herangezogenen Parameter . . .	21
4.2. Erste Vermutung der Ursachen für nicht lösbare Bilder	22
4.3. Einschränkung der herangezogenen Parameter	28
4.4. Fazit der Qualitätsprüfung	33
5. Rekonstruktion der Koordinaten der PointingCCD für nicht lösbare Bilder	36
5.1. Verwendete Koordinatensysteme	36
5.2. Bestimmung des Winkelabstandes zwischen Teleskop und PointingCCD für lösbare Bilder	37
5.3. Konkretes Vorgehen bei der Rekonstruktion	37
5.4. Test der Rekonstruktion	44
6. Einfluss des Mondes auf die nicht lösbaren Bilder	46
6.1. Untersuchung der nicht lösbaren Bilder	46
6.1.1. Einfluss des Abstands zum Mond	48
6.1.2. Einfluss der Mondphase	50
6.2. Vergleich mit den lösbaren Bildern	51
6.3. Fazit	54
7. Zusammenfassung und Ausblick	55
8. Anhang	57
8.1. Qualitätsprüfung	57
8.2. Winkelrekonstruktion	58
8.3. Einfluss des Mondes	60

1. Einleitung

„Die Ergebnisse der vorliegenden Beobachtungen scheinen am ehesten durch die Annahme erklärt werden zu können, daß eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben her in unsere Atmosphäre eindringt.“ [1, S. 1090] Dieses Fazit zog Victor Franz Hess 1912 in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung nach sieben Ballonfahrten.

Mit Ausnahme einer dieser Fahrten waren bei allen Ballonaufstiegen drei Messgeräte mit an Bord. Zunächst zu nennen ist hier eine Apparatur zur Bestimmung der β -Strahlung. Viel bedeutender sind allerdings zwei *Wulfsche Strahlungsapparate* zur Messung der einfallenden ionisierenden γ -Strahlung. Im Inneren der Detektoren befand sich eine Ionisierungsquelle, welche durch die γ -Strahlung angeregt wurde. Aus dem durch die Ionen erzeugten Sättigungsstrom konnte auf die Zahl der Ionen pro Zeitintervall und Volumen (*Ionisierungsstärke*) geschlossen werden (vgl. [2, S. 104 ff.]). Im Zuge seiner letzten Fahrt erklimm der Ballon Höhen von beinahe 5.400 Metern [1, S. 1088].

Vor Hess' Fahrten wurden solche Experimente vor allem auf hohen Türmen wie dem Eiffelturm durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messungen war, dass die ionisierende γ -Strahlung mit zunehmender Höhe abnahm. Dies konnte Hess bis in Höhen von etwa 1400 Metern bestätigen. Ab einer Höhe von ungefähr 2500 Metern stellte er aber einen exponentiell wachsenden Anstieg der Ionisierungsstärke fest (Informationen über die Ballonfahrten allesamt entnommen aus [1]).

Die Tatsache, dass aus der Erdkruste stammende Strahlung wegen Absorption nicht in Frage kommen konnte, geleitete Hess zur diese Arbeit einleitenden Aussage, welche ihm den Nobelpreis für Physik im Jahr 1936 einbrachte [3].

Diese von Hess als *Höhenstrahlung* postulierte γ -Strahlung ist heute bekannt als sogenannte sekundäre kosmische Strahlung, welche durch die kosmische Strahlung hervorgerufen wird. Letztere selbst besteht dabei vorwiegend aus Protonen und weiteren ionisierten Teilchen [4]. γ -Strahlen können direkt oder indirekt nachgewiesen werden. Der direkte Nachweis ist nur mit Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre möglich, da die Photonen bei Eindringen in diese zur Produktion zahlreicher Sekundärteilchen führen [5]. Wegen der begrenzten Masse der Satelliten ist allerdings auch die Detektionsfläche stark begrenzt, weshalb nur niederenergetische γ -Strahlen nachgewiesen werden können (bis hin zu einigen hundert GeV; als Beispiel sei an dieser Stelle der Satellit *Fermi* genannt, dessen Energiebereich von 10 keV bis zu 300 GeV reicht [6]).

Unter *Very High Energy* (*VHE*) γ -Strahlen versteht man einen Energiebereich von 100 GeV bis zu 100 TeV, demgegenüber Satelliten wie *Fermi* insensitiv sind. Zur Detektion von Strahlung im VHE-Bereich werden sogenannte *Imaging Air Cherenkov Telescopes* benutzt [5]. Diese detektieren mithilfe einer großen Spiegelfläche das Cherenkovlicht der bei Eintritt der γ -Strahlen in die Erdatmosphäre erzeugten geladenen Sekundärteilchen. Somit kann sowohl die Energie als auch der Ursprung der γ -Strahlen rekonstruiert werden. Um Quellen solcher γ -Strahlung präzise mit dem Teleskop erfassen und verfolgen zu können sowie die Position einer Quelle zu bestimmen, ist das *Pointing* von unermesslicher Bedeutung.

Ein geplantes Großprojekt, bestehend aus über 100 solcher Cherenkov-Teleskope, stellt das *Cherenkov Telescope Array* (*CTA*) dar. Es soll Strahlung in einem Energiebereich zwischen 20 GeV und 300 TeV untersuchen. Dazu sind drei verschiedene Teleskoptypen geplant, welche sich hinsichtlich ihrer verschiedenen effektiven Spiegelflächen unterscheiden. Einen dieser Typen stellt das *Medium-Sized Telescope* (MST) mit einem Spiegeldurchmesser von etwa 12 Metern dar, das im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht wird [7]. Für das

Pointing eines solchen Teleskops wird ein sogenanntes Single-CCD-Pointing verwendet. Dabei nimmt die am Teleskop befestigte Pointing-Kamera Bilder des Nachthimmels auf. Mithilfe der Bibliothek *libPointingMST* kann unter anderem die Ausrichtung der CCD-Kamera, als PointingCCD bezeichnet, anhand der aufgenommenen Sterne rekonstruiert werden [8]. Die Pointingpräzision soll einen Maximalwert von sieben Bogensekunden, was einem Winkel von ungefähr $0,0019^\circ$ entspricht, nicht unterschreiten [7].

Das Ziel dieser Arbeit stellte es dar, die von der Pointing-Kamera aufgenommenen Bilder zunächst hinsichtlich ihrer Qualität zu prüfen. Im Fall dieser Bachelor-Arbeit wurde das zur Verfügung stehende Bildmaterial mithilfe einer an einem der *MAGIC*-Teleskope angebrachten Kamera gewonnen. Dies stellt eine Testphase für die später beim *CTA* aufgestellten MST-Teleskope dar. Bilder, auf denen beispielsweise zu viel störender Einfluss durch externe Lichtquellen hervorgerufen wird oder wegen eines bewölkten Himmels kaum Sterne zu erkennen sind, können von der *reconstruct-images* Funktion der *libPointingMST* ebenso wenig gelöst werden, wie Bilder, auf denen wegen der Parkposition des Teleskops beinahe nur der Berg, auf dem das Teleskop steht, zu sehen ist.

Der abschließende Schritt dieser Arbeit bestand darin, den Einfluss des Mondes auf die Lösbarkeit der Bilder zu betrachten. Dazu wurde zunächst der Winkelabstand zwischen dem Mond und dem Zentrum der PointingCCD untersucht. Für nicht von *reconstruct-images* lösbare Bilder musste dazu die Richtung der PointingCCD aus den Koordinaten der mechanisch eingestellten Teleskoprichtung rekonstruiert werden. Darüber hinaus wurde die Phase des Mondes mit in Betracht gezogen.

2. Grundlagen

2.1. Gammaastronomie

Die Gammaastronomie befasst sich damit, mithilfe von Gamma-Teleskopen Quellen extraterrestrischer Gammastrahlung zu untersuchen. Als mögliche Quellen sind an dieser Stelle zum Beispiel *Active Galactic Nuclei* (AGN) und Gammablitz zu nennen [5]. Die durch diese Quellen freigesetzten Energien variieren dabei sehr stark, d.h. von einigen keV bis hin zu hunderten TeV. Entscheidend ist, dass Gammastrahlung unterschiedlicher Energien ebenso durch verschiedene physikalische Vorgänge bedingt ist. Als Beispiel kann hier angebracht werden, dass Gammastrahlung im MeV- bis TeV-Bereich nicht durch thermische Anregung erzeugt werden kann [9, S. 566] und entsprechend ein anderer Ursprung in Betracht gezogen werden muss. Demzufolge ist es notwendig, alle möglichen Energiebereiche zu untersuchen.

Um alle Energiebereiche abdecken zu können, wird auf verschiedene Möglichkeiten, die Gamma-Teleskope einzusetzen, zurückgegriffen. Eine Variante zur Detektion niederenergetischer Gammastrahlung stellt die Nutzung von in die Erdumlaufbahn gebrachten Satelliten wie zum Beispiel *Fermi* dar. Diese sind dazu prädestiniert, niederenergetische Gammastrahlung von einer Energie von einigen zehn MeV bis hin zu Teilchen im GeV-Bereich zu beobachten. Dies ist vor allem dadurch bedingt, dass die Größe der Detektorfläche wegen des Transports dieser Satelliten bis auf dessen Umlaufbahn beschränkt ist [5], [10].

2.1.1. VHE Gammaastronomie

Unter *VHE* (= *Very High Energy*) versteht man extraterrestrische Gammastrahlung mit einer Energie $E \gtrsim 100 \text{ GeV}$. Auf diesem Bereich der Gammaastronomie soll im Folgenden der Fokus liegen, da eine Technik zur Untersuchung von Gammastrahlen in diesem Energiebereich die Imaging Air Cherenkov Technique darstellt. Hierbei wird mittels erdbodengestützter Teleskope - *Imaging Air Cherenkov Telescopes* (*IACT*) genannt - das durch Teilchenschauer, welche in Unterkapitel 2.2 näher behandelt werden, in der Erdatmosphäre erzeugte Cherenkov-Licht aufgefangen.

Als dritte und letzte Technik zur Detektion von Gammastrahlung ist an dieser Stelle noch die Water Cherenkov Technique zu nennen ([11]), bei der ebenso hochenergetische Gammastrahlungsquellen rekonstruiert werden können. Hierbei wird ebenso wie bei den *IACTs* Cherenkov-Licht detektiert; allerdings wird dieses nicht in der Atmosphäre erzeugt, sondern in den zahlreichen Wasserbehältern, welche wiederum ein Array bilden. Vorteile dieser Technik stellen das große Sichtfeld (etwa 15 % des Himmels können abgedeckt werden) und im Vergleich zu den *IACTs* die Unabhängigkeit vom Wetter dar. Für das *HAWC*-Projekt (*High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory*) werden 300 solcher Wassertanks verwendet [11].

Zum besseren Verständnis wird des Weiteren im nächsten Abschnitt exemplarisch anhand von AGN erklärt, wie es zur Entstehung solch hochenergetischer Gammastrahlung kommt.

2.1.2. Entstehung von VHE Gammastrahlen am Beispiel von AGN

AGN

Unter *Active Galactic Nuclei* (AGN) versteht man die Zentren von Galaxien, welche eine Menge nicht stellarer Strahlung emittieren. Bei diesen Zentren handelt es sich um schwarze Löcher. Ein solches schwarzes Loch wird von Materie umkreist, welche immer weiter in das Loch hineingezogen wird [12]. Diese kreisende Materie wird in der Fachsprache *accretion disk* genannt und ist in Abbildung 1 durch zwei sich drehende schwarze Pfeile gekennzeichnet. Durch diese kreisende Materie werden zwei starke, entgegengesetzte Magnetfelder erzeugt, welche die restlichen Teilchen um das schwarze Loch herum stark beschleunigen [12]. Diese als *Jets* bezeichneten Materieausflüsse sind schematisch in Abbildung 1 gezeigt und sind auch in Abbildung 2 gut zu erkennen.

Die wichtigste Unterklasse dieser AGN sind die sogenannten Blazare, welche sich dadurch auszeichnen, dass deren Jets in Richtung der Erde zeigen [13]. Die stark beschleunigten Teilchen können nun entlang ihrer Bewegung im Jet mit umliegender Materie in Wechselwirkung treten. Als erste favorisierte Wechselwirkung für geladene Teilchen wie Elektronen oder Protonen ist hier die Bremsstrahlung zu nennen [14]. Die weiteren Reaktionen werden zum einen durch das hadronische und zum anderen durch das leptonische Modell beschrieben, welche im Folgenden jeweils näher beleuchtet werden sollen [5].

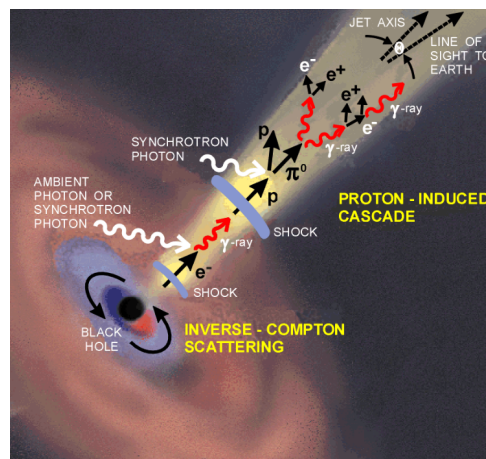


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines AGN. Gut zu erkennen ist hier einer der beiden Jets sowie die Wechselwirkung der beiden verschiedenen Modelle [12]

Leptonisches Modell

Dieses Modell nimmt als zentralen Bestandteil den sogenannten inversen Compton-Effekt an. Unter diesem versteht man den Vorgang, bei dem ein Photon - vorzugsweise im Infrarot-Bereich oder von der Energie des sichtbaren Lichts - von einem durch einen Jet auf relativistische Geschwindigkeit beschleunigten Elektron getroffen wird, so dass sich die Energie des Photons typischerweise bis in den *VHE*-Energiebereich erhöht [16].

Bei den getroffenen Photonen kann es sich einerseits um externe Photonen, andererseits auch um ein im Zuge der Bremsstrahlung abgestrahltes Teilchen handeln. Im letztgenannten Fall wird dies als *Synchrotron-self-Compton* (*SSC*) bezeichnet. Dem aktuellen

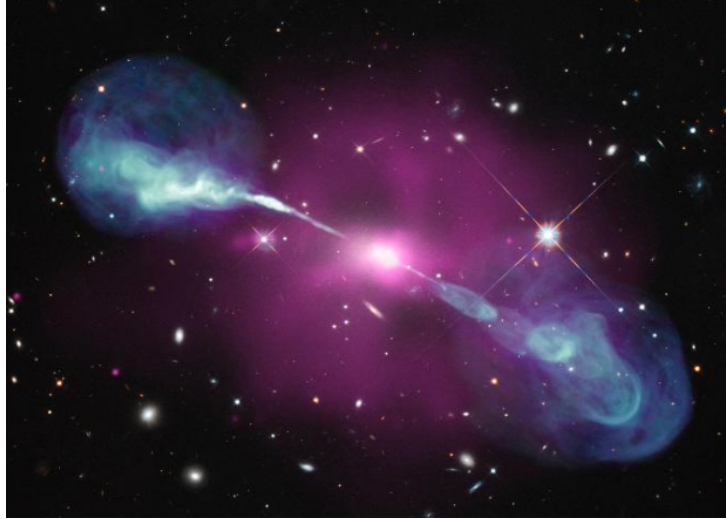


Abbildung 2: Multiwellenlängenaufnahme der Radiogalaxie Hercules A [15]

Kenntnisstand zu Folge handelt es sich beim *SSC* um den bei Blazaren dominanten Effekt in Bezug auf das leptonische Modell [13].

Hadronisches Modell

Gemäß dem hadronischen Modell stellt die hochenergetische γ -Strahlung zunächst die durch Protonen hervorgerufene Synchrotronstrahlung dar. Aber auch in Teilchenkaskaden, welche ausgelöst werden, falls im Jet eines Blazars ein relativistisches Proton mit vorhandenen Photonen - seien diese extern oder durch Bremsstrahlung erzeugt - wechselwirkt, wird solche Strahlung erzeugt [17]. Im Zuge einer solchen Kaskade wird unter anderem auch das neutrale Pion π^0 produziert. Für dieses erfolgt der Zerfall gemäß der Reaktionsgleichung

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (1)$$

In diesem Prozess werden folglich erneut hochenergetische Gammastrahlen erzeugt. Aus Gründen der Energie - und Impulserhaltung müssen dabei zwei Photonen erzeugt werden. Beide Modelle sind in Abbildung 1 angedeutet [12].

2.2. Teilchenschauer

Zu Beginn dieses Abschnitts sei angemerkt, dass Teilchenschauer sowohl durch hochenergetische, auf die Erdatmosphäre treffende Photonen als auch Protonen ausgelöst werden können [5]. Durch erstgenannte Teilchen erzeugte Schauer werden als elektromagnetische, die durch zuletzt genannte Teilchen induzierten als hadronische Schauer bezeichnet. Da für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nur der elektromagnetische Schauer von Bedeutung ist, wird dessen Entstehung in den folgenden Zeilen kurz erläutert.

Falls hochenergetische Photonen - die extraterrestrischen Gammastrahlen - auf die Erdatmosphäre treffen, wird die Teilchenreaktion der Paarerzeugung eines Elektron-Positron-Paars aus energetischen Gründen favorisiert [18]. Die Reaktionsgleichung kann entsprechend als

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad (2)$$

geschrieben werden. Dies ist dadurch möglich, dass in der Atmosphäre der Erde Moleküle existieren, welche wiederum Atomkerne enthalten, die in der Lage sind, den bei der Paarerzeugung entstehenden Impulsrückstoß aufzufangen und somit die Impulserhaltung bei diesem Prozess zu gewährleisten [19].

Den für Elektronen und Positronen hoher Energie dominanten Energieverlust in Materie stellt die Bremsstrahlung dar [14]. Bei dieser emittieren die geladenen Teilchen elektromagnetische Strahlung senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung. In Formeln kann dies im Falle von Elektronen als

$$e^{-*} \rightarrow e^- + \gamma \quad (3)$$

angeschrieben werden. * soll symbolisieren, dass das Elektron von einem energetisch höheren in einen energetisch niedrigeren Zustand übergeht. Die somit entstandenen Photonen besitzen ihrerseits noch immer genügend Energie, um erneut zur Paarerzeugung, deren Produkte ebenso wieder Bremsstrahlung erzeugen, zu führen. Durch diese sich ständig wiederholenden Prozesse wird eine Teilchenkaskade ausgebildet, in der sich zahlreiche Cherenkov-Strahlung emittierende Teilchen befinden [20], [21]. Eine solche Kaskade ist in Abbildung 3 schematisch gezeichnet.

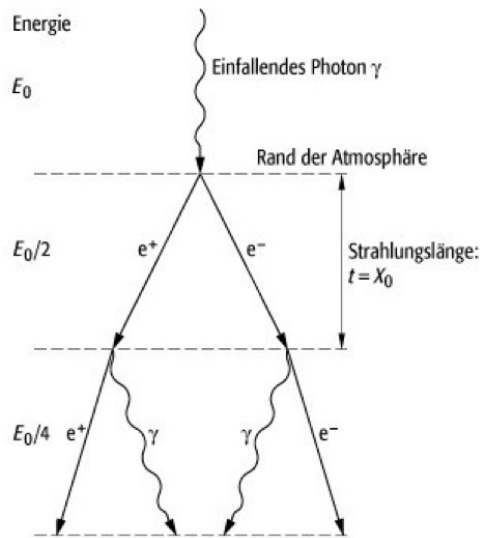


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Teilchenschauers gemäß Heitler-Modell [21]

Dort trifft ein extraterrestrisches Photon mit Anfangsenergie E_0 auf die Erdatmosphäre und induziert den elektromagnetischen Schauer. Gemäß Heitler (vergleiche [20, S. 386 ff.]) kommt es im Modell nach einer sogenannten Wechselwirkungslänge X_0 zu einer Wechselwirkung zwischen einem sich in der Materie bewegendem Teilchen und letztgenannter selbst. Dies ist ebenso auf der rechten Seite von Abbildung 3 dargestellt. Des Weiteren bleibt festzuhalten, dass die Zahl der Teilchen im Schauer mit jeder Wechselwirkungslänge verdoppelt wird. Es ergibt sich folglich der Zusammenhang

$$N = 2^n \quad (4)$$

für die Teilchenzahl N nach n Wechselwirkungslängen.

Des Weiteren sei angemerkt, dass sich der Schauer nur in dieser Form weiter ausdehnen kann, solange Bremsstrahlung und Paarerzeugung die dominanten Wechselwirkungsprozesse sind. Die Energie, bis zu der dies gewährleistet ist, sei als kritische Energie E_c bezeichnet. Für Elektronen und Positronen, deren Energie unterhalb von E_c liegt, stellt die Ionisation den stark bevorzugten Wechselwirkungsprozess dar. Bremsstrahlung und Paarerzeugung finden praktisch nicht mehr statt. Für Photonen selbst gilt dies auch, allerdings wird für niedrige Energien der Effekt der Paarerzeugung vor allem vom Compton-Effekt überschattet [18]. Die maximale Teilchenzahl in einem Schauer ergibt sich unter der Annahme, dass während eines Wechselwirkungsprozesses die Startenergie E_0 gleichermaßen zwischen den beiden resultierenden Teilchen aufgeteilt wird, zu

$$N_{max} = \frac{E_0}{E_c}. \quad (5)$$

Bei Gleichsetzen der Gleichungen 4 und 5 findet man einen Zusammenhang, um die Ausgangsenergie eines ursprünglichen Gammaquants zu berechnen, welcher sich zu

$$E_0 = E_c 2^{n_c} \quad (6)$$

mit der kritischen Zahl an Wechselwirkungslängen n_c ergibt. Nach n_c Wechselwirkungen ist das Schauermaximum erreicht. Das Umstellen von Gleichung 6 ergibt

$$n_c = \log_2\left(\frac{E_0}{E_c}\right). \quad (7)$$

Die Gleichungen wurden aus [20] und [21] entnommen. Die laterale Ausdehnung eines Schauers wird dagegen durch den sogenannten Moliere-Radius

$$21 \text{ MeV} \frac{X_0}{E_c} \quad (8)$$

beschrieben. Innerhalb dieses Radius um die Schauerachse ist 90 % der Schauerenergie zu finden [21], [22].

2.3. Cherenkov-Strahlung

Das Prinzip des Cherenkov-Lichts besteht darin, dass Teilchen, die sich in einem Medium schneller bewegen als die Lichtgeschwindigkeit in dem selben Medium, die umliegende Materie polarisieren. Infolgedessen wird wegen Überlagerung der aufgrund der Polarisierung entstandenen Kugelwellen elektromagnetische Strahlung in einem Winkel θ - in Form eines Kegels - (siehe Abbildung 4) emittiert [23]. Dieser lässt sich über

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta} \quad (9)$$

berechnen [23]. Dabei bezeichnet n den Brechungsindex des betreffenden Mediums und $\beta = \frac{v}{c}$ das Verhältnis aus Teilchengeschwindigkeit v und Vakuumlichtgeschwindigkeit c . In Luft ($n \approx 1$) und für sehr energetische Teilchen ($\beta \approx 1$) ergibt sich ein Öffnungswinkel ($\theta \approx 1^\circ$). Deshalb trifft der Kegel der Cherenkov-Strahlung eines in bis zu 15 Kilometern Höhe erzeugten Schauers mit einem Radius von ungefähr 125 Metern auf die Erdoberfläche[10, S. 176].

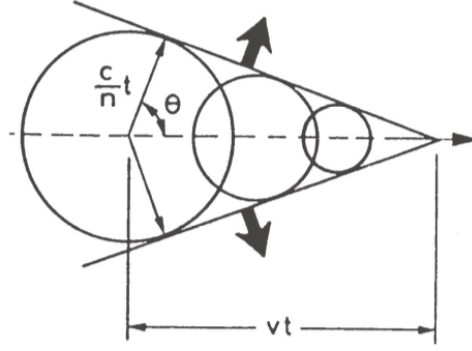


Abbildung 4: Schematische Bildung eines Cherenkov-Kegels [23]

Aus Gleichung 9 ergibt sich unter Beachtung der Tatsache, dass $\cos(\theta) \leq 1$ gelten muss, der Zusammenhang

$$\beta \geq \frac{1}{n}. \quad (10)$$

Damit kann die Mindestenergie E_{min} eines geladenen Teilchens bestimmt werden, um zur Emission von Cherenkovlicht zu führen. Sie ergibt sich zu

$$E_{min} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}, \quad (11)$$

wobei m_0 die Ruhemasse des geladenen Teilchens repräsentiert. Pro Weglänge dx und Wellenlängenintervall $d\lambda$ werden

$$\frac{dN}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2(\theta) \quad (12)$$

Photonen emittiert [23]. Dabei bezeichnet α die Feinstrukturkonstante sowie z die Ladungszahl des zur Cherenkov-Strahlung führenden Teilchens. Einfach ist zu erkennen, dass im Falle kleiner Wellenlängen und somit höherer Energien mehr Photonen emittiert werden. Der höchstenergetische Bereich des sichtbaren Spektrums ist der blau-violette Bereich, weshalb sichtbares Cherenkovlicht - zum Beispiel von Kernreaktoren emittiert - blau scheint [14].

3. Imaging Air Cherenkov Telescopes

Als zentraler Gegenstand sollen nun im Folgenden das Funktionsprinzip eines solchen Teleskops sowie das zur Aufnahme der ausgewerteten Daten benutzte Teleskop selbst vorgestellt werden. Durch einen Überblick über das geplante *CTA* wird dieses Kapitel abgerundet.

3.1. Aufbau

Elementar betrachtet besteht ein *IACT* aus zwei verschiedenen Bestandteilen. Der erste ist - wie bereits diskutiert - die Atmosphäre, der zweite wird durch das bodengestützte Teleskop selbst repräsentiert [5].

Das Teleskop soll das in Bezug auf die Intensität meist schwache Cherenkovlicht auffangen. Dazu besitzt es eine flächengroße, annähernd sphärische Spiegelfläche. Diese Spiegel werfen das Cherenkovlicht gebündelt auf eine vor der Spiegelfläche montierte Kameraapparatur, welche im Folgenden einfach als Cherenkovkamera bezeichnet wird. Diese Kamera selbst besteht aus einem Array von Photodetektoren - entweder Photomultiplier Tubes (PMT) oder Silizium Photomultiplier (SiPM), welche bei auftreffenden Photonen ein Signal erzeugen, das mittels einer geeigneten elektronischen Beschaltung ausgewertet werden kann. Entscheidend ist dabei, dass diese Photodetektoren eine schnelle Ansprechzeit haben, um das interessante Signal, welches in einem Zeitfenster von ≈ 2 ns auftritt, von Untergrundsignalen zu unterscheiden [5].

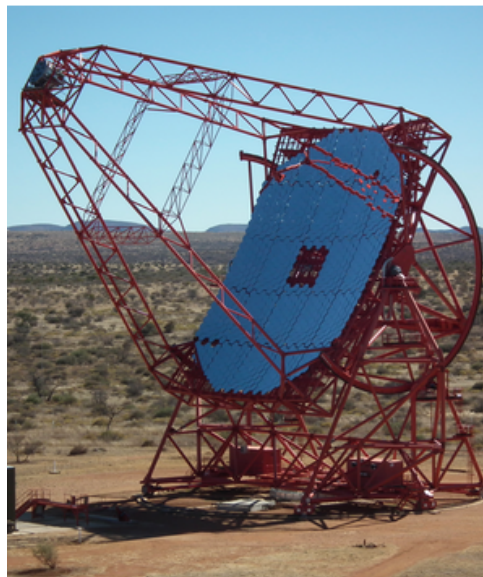


Abbildung 5: Cherenkov-Teleskop H.E.S.S. II des H.E.S.S. Telescope Array in Namibia. Der Durchmesser der Spiegelfläche beträgt 28 m; damit stellt es das derzeit größte *IACT* der Erde dar [24], [25]

3.2. Detektionsprinzip

Die Ausbreitung des Cherenkovlichts erfolgt - perspektivisch dargestellt - wie in Abbildung 6, wobei sich der Leser ein auf dem Erdboden aufgestelltes Teleskop dazu denke. Die von der Spiegelfläche auf die Kamera projizierten Photonen hinterlassen - bedingt durch die

kegelförmige Ausbreitung des Cherenkovlichts gemäß Kapitel 2.3 - ein charakteristisches elliptisches Muster wie in Abbildung 7 zu erkennen ist [5]. Mithilfe dieses Musters kann die Position der ursprünglichen Quelle der primären Gammastrahlung rekonstruiert werden. Dies geschieht zum Beispiel durch geometrische Überlegungen mittels der sogenannten Hillas-Parameter [26].

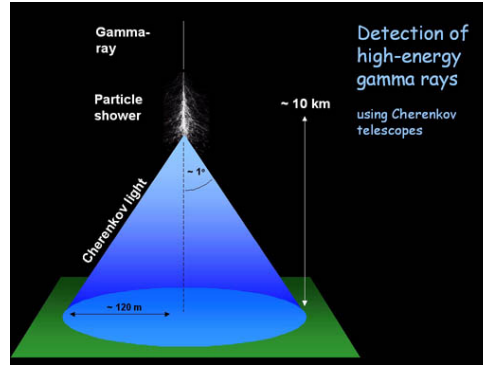


Abbildung 6: Ausbildung eines Cherenkovkegels bedingt durch einen Teilchenschauer [24]

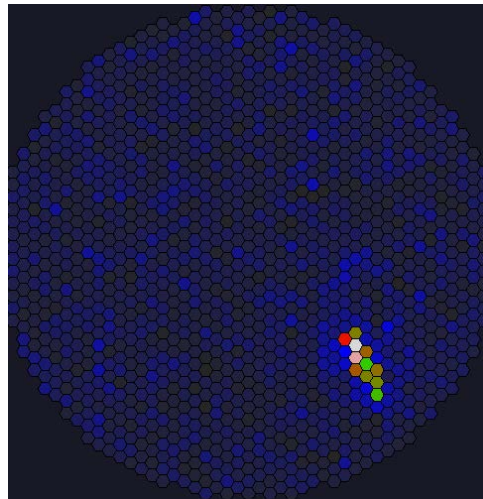


Abbildung 7: Charakteristisches Detektormuster, vermutlich verursacht durch das Cherenkovlicht eines durch extraterrestrische Gammastrahlung verursachten elektromagnetischen Schauers [5]

Zur Verbesserung der Präzision der Rekonstruktion können mehrere solcher Teleskope in einem Array aufgestellt werden, was schematisch in Abbildung 8 a) dargestellt ist. Dies nennt man Stereo-Modus. Dabei wird ein Ereignis von gleich mehreren Teleskopen detektiert [27]. Entsprechend wird für jedes Teleskop ein anderes Muster festgestellt. Aus den verschiedenen Ansprechmustern kann jeweils eine Hauptachse des Schauers ermittelt werden. Werden nun in Gedanken die Detektorflächen der verschiedenen Teleskope übereinander gelegt, kann der Schnittpunkt dieser Hauptachsen bestimmt werden. Aus diesem Schnittpunkt kann die Richtung des den Schauer verursachenden Primärteilchens präziser bestimmt werden als mit nur einem Teleskop (gemäß [27]). Die Detektionsflächen der einzelnen Teleskope mit jeweils registriertem Schauer und Schauerhauptachse sind in Abbildung 8 b) dargestellt. Das geplante *Cherenkov Telescope Array* soll aus zwei Teleskop-Feldern - eines davon auf der Südhalbkugel, das andere auf der Nordhalbkugel -

bestehen. Die insgesamt über 100 geplanten Teleskope sollen ebenfalls im Stereo-Modus operieren [28].

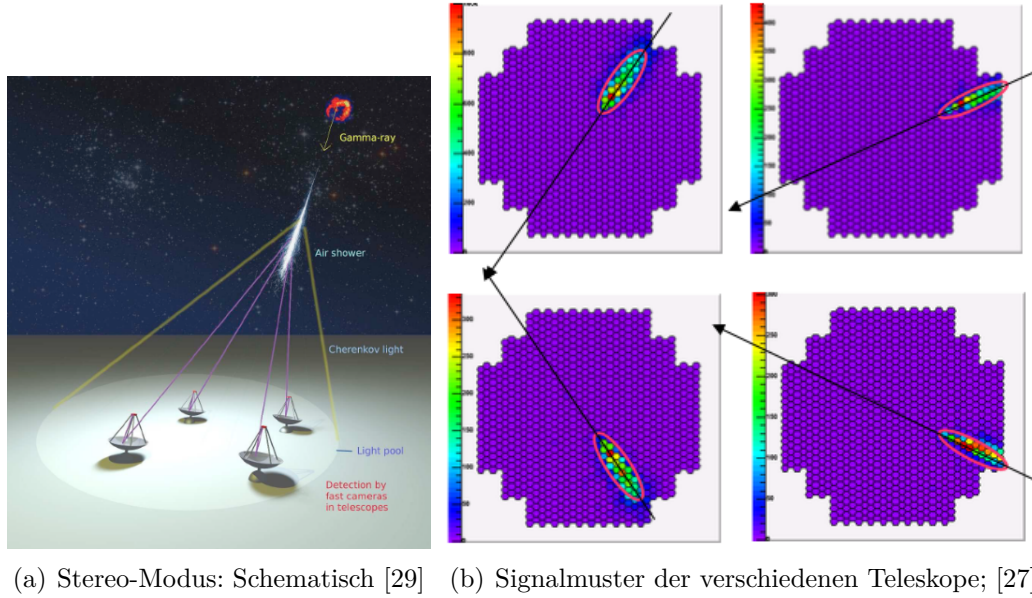


Abbildung 8: Schematische Aufstellung von mehreren Teleskopen im Stereo-Modus sowie Detektionsmuster für die einzelnen Teleskope

3.3. Pointing

Pointing bezeichnet eine Technik, mit deren Hilfe die Richtung, in die das Teleskop zeigt, möglichst genau bestimmt werden soll. Ausschließlich auf die mechanischen Daten des *Drive-Systems* des Teleskops zurückzugreifen, ist hierbei nicht ausreichend. Dies liegt darin begründet, dass abhängig von der eingestellten Richtung des Teleskops Abweichungen zur mit dem mechanischen System erwarteten Richtung der Cherenkovkamera auftreten können. Beispielsweise kann sich die Verwindung der Halterung der Cherenkovkamera abhängig von der Neigung des Teleskops verändern. Genauso können allerdings auch Anomalien durch Verunreinigungen auf den Laufschienen des Teleskops sowie auf das Teleskop treffenden Windes entstehen [30, S. 68]. Interessanterweise ist es wegen des vergleichsweise großen Gesichtsfelds des Teleskops nicht notwendig, die Teleskopausrichtung für das Verfolgen der Quellen möglichst genau zu kennen [30, S. 68]. Vielmehr ist die Kenntnis der Ausrichtung eine essentielle Voraussetzung für die exakte Rekonstruktion der Gammastrahlungsquellen [30, S. 67]. Deshalb ist es vor allem notwendig, die Teleskoprichtung zum Zeitpunkt der Auswertung der Signale mit bestmöglicher Präzision zu kennen. Dies wird zum Beispiel bei erneuter Betrachtung von Abbildung 8 b) klar. Um eine Quelle rekonstruieren zu können, muss zunächst die Bildebene der Cherenkovkamera, auf der das Muster des auftreffenden Cherenkovlichts zu sehen ist, bekannt sein. Ein Fehler dieser Koordinaten führt in der späteren Auswertung zu einer fehlerhaften Bestimmung des Ursprungs der γ -Strahlen. Insbesondere ist die Durchführung des Pointing entsprechend notwendig, während das Teleskop Daten mit der Cherenkovkamera nimmt. Elementar hierbei ist, dass es sich dabei um eine optische Methode handelt, da nur wenige intensiv strahlende Quellen extraterrestrischer Gammastrahlung zur Kalibrierung erfasst werden können [8]. Pointing mithilfe der Cherenkovkamera ist zwar prinzipiell möglich,

allerdings nicht nicht simultan zur Datennahme. Im Folgenden werden nun kurz verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung der Pointing-Korrekturen vorgestellt. Dabei ist es das Ziel, mithilfe eines mechanischen Fit-Modells das Pointing des Teleskops zu korrigieren.

Standard Pointing

Hierbei wird eine sogenannte LidCCD in der Mitte der Spiegelfläche angebracht wie in Abbildung 9 auf der linken Seite gezeigt ist. Diese erfasst auf den Deckel der Cherenkovkamera abgebildete Sterne. Für diesen Prozess muss allerdings die Cherenkovkamera geschlossen sein, so dass das Pointing nicht simultan zur Datennahme des Teleskops erfolgen kann [8]. Demzufolge werden bei geschlossener Cherenkovkamera Pointing-Kalibrationen mithilfe sogenannter Pointing-Runs durchgeführt.

Es gibt zwei Möglichkeiten, einen solchen Run durchzuführen. Zum einen mit der geöffneten Cherenkovkamera selbst, zum anderen mit der LidCCD. Das Prinzip selbst ist dabei das gleiche. Das Teleskop wird auf einzelne Sterne ausgerichtet. Das Bild des Sterns soll sich im Zentrum der Cherenkovkamera befinden. Bei der Variante, welche die Cherenkovkamera nutzt, ist diese geöffnet und erfasst damit einen Stern direkt. Der genaue Ort des Sterns wird bestimmt, in dem eine Verteilung der Stromstärke am zentralen Pixel erstellt wird. Die Abweichung zur erwarteten Position des Sterns aus der mechanischen Ausrichtung des Teleskops stellt die lokale Pointing-Korrektur dar [31], [32].

Bei Nutzung der LidCCD wird ein Stern mittels der Spiegelfläche des Teleskops auf den geschlossenen Deckel der Cherenkovkamera projiziert. Die LidCCD erfasst den Deckel der Cherenkovkamera und wie im Fall des Pointing mit der Cherenkovkamera wird der Unterschied der theoretischen Position und der tatsächlichen Position des Sterns bestimmt, um die lokalen Pointing-Korrektur zu finden. Daraus kann nach Betrachtung einiger Sterne ein Pointing-Modell erstellt werden [8], [32].

Precision Pointing

Wird zusätzlich zu dieser LidCCD noch eine SkyCCD versetzt zum Zentrum der Spiegelfläche angebracht, wird dies *Precision Pointing* genannt. Dabei ist die Cherenkovkamera zusätzlich mit *Pointing LEDs* versehen. Die Cherenkovkamera samt dieser LEDs wird erneut von der LidCCD erfasst. Die Cherenkovkamera kann dabei geschlossen (z.B. Pointing-Runs) oder geöffnet sein [33], [8]. Die Positionen der auf die Cherenkovkamera projizierten Sterne (im Fall der geschlossenen Cherenkovkamera) können mithilfe der LEDs bestimmt werden. Daraus lassen sich die Richtung der Cherenkovkamera und ein Pointing-Modell bestimmen [8]. Die Feinkorrekturen werden mittels der SkyCCD zusammen mit der LidCCD durchgeführt. Dabei können die gesehenen Sterne an aus einem Katalog bekannte Sterne gefittet werden. Dadurch kann die Richtung der SkyCCD bestimmt werden. Wird nun noch eine Koordinatentransformation zwischen dem Sichtfeld der SkyCCD und LidCCD durchgeführt, kann die Ausrichtung der Cherenkovkamera berechnet werden [32].

Single-PointingCCD-Konzept

Beim Single-PointingCCD-Konzept wird dabei nur eine einzelne CCD-Kamera verwendet, welche PointingCCD genannt wird. Diese wird in der Mitte der Spiegelfläche angebracht wie es in Abbildung 9 auf der rechten Seite gezeigt wird. Dabei werden beide beim *Standard Pointing* verwendeten Kameras in einer vereint, welche sowohl die mit LEDs

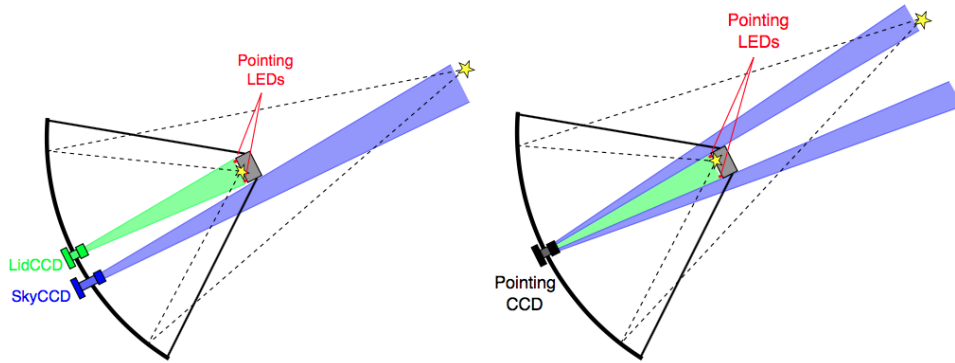


Abbildung 9: Schematische Darstellung des *Precision Pointing* auf der linken Seite mit LidCCD und SkyCCD. Auf der rechten Seite ist das Konzept des Single-PointingCCD-Konzepts abgebildet; hier wird nur eine PointingCCD benötigt. [34]

bestückte Cherenkovkamera als auch den Sternenhimmel erfassen kann. Der Vorteil dieses Konzeptes liegt besonders darin, dass nicht zwischen den Koordinatensystemen der SkyCCD und LidCCD umgerechnet werden muss, was durch eine solche Transformation auftretenden Fehlern vorbeugt. Ebenso kann eine Kamera eingespart werden. Dies wirkt sich unter anderem positiv in Hinblick auf Kosteneinsparung aus. Nachteile dieses Konzeptes bestehen aber besonders darin, dass sowohl die nahegelegene Cherenkovkamera als auch die weit entfernten Sterne nur schwierig gleichzeitig scharf fokussiert werden können [8].

In dieser Arbeit ausgewertete Pointing-Aufnahmen

Im Falle der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Datensätze wurde abweichend von Abbildung 9 die PointingCCD so ausgerichtet, dass sie aus der gezeigten Position um 12° verkippt wurde, damit die Cherenkovkamera nicht im Bild zu sehen ist. Dies wurde vor allem getan, um die Effekte der Bildverzerrung ohne die störende Kamera im Bild besser verstehen zu können [33]. Der angegebene Winkel der Verkipfung zwischen PointingCCD und Teleskop wurde gemäß Kapitel 5.2 exakt berechnet und wird dort kurz diskutiert. Des Weiteren können mehr Sterne in einer Aufnahme erfasst werden. Dabei ist natürlich zu beachten, dass die Koordinaten der PointingCCD nun nicht mehr mithilfe der Daten des *Drive-Systems* des Teleskops grob bekannt sind, sondern lediglich über die rekonstruierten Sternpositionen ermittelt werden können.

Zur Aufnahme der Daten fotografiert die PointingCCD in regelmäßigen zeitlichen Abständen den Nachthimmel, während das Teleskop selbst auf einen bestimmten Himmelskörper und dessen Trajektorie gerichtet wird. Sie ist dabei zu Testzwecken für das geplante CTA am MAGIC-Teleskop befestigt. Die Bildnahme funktioniert unabhängig von der Aktivität des Teleskops, so dass auch während das Teleskop geparkt ist, Bilder genommen werden. Dies soll sich für das MST des CTA ändern. Dort soll die PointingCCD an das *Drive-System* des MST (siehe dazu Genaueres in Kapitel 3.5) gekoppelt sein, da Pointing-Aufnahmen nur während der Operationszeit des Teleskops sinnvoll sind. Die Belichtungszeit muss wegen der geringen Intensität der strahlenden Sterne in der Größenordnung mehrerer Sekunden gewählt werden; für die im Folgenden ausgewerteten Bilder handelt es sich dabei um einen Zeitraum von 10 s.

Verwendete Software

Mittels der Funktion *PointingWCSFitter* aus der Bibliothek *libPointingMST*, welche in *reconstruct-images* aufgerufen wird, kann ein Fit der im Bild gefundenen Sterne an Sterne aus einem Himmelskatalog, deren Positionen bekannt sind, erstellt werden. Aus diesem Fit kann mittels Koordinatentransformation auf die Richtung der PointingCCD zurückgeschlossen werden. Der Fit basiert darauf, dass die gefundenen Sterne zu Clustern von vier Sternen - genannt Quads - zusammengefasst werden. Eine Zahl von vier Sternen erwies sich hier durch Testen als geeignet. Zwischen den Koordinaten des Bildes und den Himmelskoordinaten wird eine Transformation durchgeführt, wodurch die Richtung des Bildausschnitts bestimmt werden kann [33]. Dieses Programm wird für jedes Bild ausgeführt. Die Ausgabe des Programms wird mittels einer Schleife so präpariert, dass für eine einstellbare Anzahl an Bildern eine *.txt*-Datei angelegt wird. Diese enthält in jeweils einer Zeile die zu einem Bild gehörigen Parameter, deren wichtigste im Folgenden erläutert werden. Der Name des Bildes wird zuerst gespeichert. In dem Namen ist die Zeit der Aufnahme gespeichert, so dass die Aufnahmezeit zu jedem Bild bekannt ist. Die Ausgabe des Programms liefert zunächst die Anzahl der gefundenen Sterne. Diese Zahl kann auch für Bilder bestimmt werden, für die der Fit kein Resultat liefert. Nur in Fällen, in denen der Fit nicht konvergiert und deshalb die maximale Laufzeit des Programms überschreitet, wird auch die Anzahl der Sterne nicht ausgegeben. Des Weiteren wird in den Fit die Brennweite der PointingCCD als freier Parameter mit einbezogen. Über eine stärkere Abweichung der gefitteten Brennweite könnte eine Veränderung der Chip-Oberfläche, zum Beispiel im Fall einer deutlich erhöhten Kamertemperatur, festgestellt werden. Ein Maß für die Güte des Fit stellt der ebenfalls erhaltene Parameter *meanResidual* dar. Er gibt die mittlere Abweichung der Sterne von den erwarteten Positionen in Pixeln an. Die weiteren zu nennenden Größen sind die rekonstruierten Koordinaten der Richtung der PointingCCD. Diese sind zum einen im *Horizontsystem* und zum anderen im *Äquatorialsystem* (siehe Kapitel 5.1) gegeben. Da das *Horizontsystem* immer von einem Beobachtungspunkt aus definiert ist, wurden der Software zur Bestimmung der Koordinaten in diesem System die geografischen Daten des *Observatorio del Roque de los Muchachos* (entnommen aus [35]) übergeben.

3.4. Die MAGIC-Teleskope

Auf dem *Roque de los Muchachos* auf der kanarischen Insel La Palma befinden sich zwei zu *MAGIC* (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov*) gehörige *IACTs*. Diese können in Abbildung 10 betrachtet werden. Das eine operiert bereits seit dem Jahr 2004, während das andere im Jahr 2009 in einem Abstand von 85 m neben dem ersten hinzugefügt wurde, um die Präzision der Gammastrahlenrekonstruktion zu verbessern, da ein zweites Teleskop die Nutzung im zuvor diskutierten Stereo-Modus ermöglicht. Beide gleich großen Teleskope sollen Gammastrahlen in einem Energiebereich von 30 GeV bis hin in den *VHE*-Bereich, mit anderen Worten 100 TeV, untersuchen. Dazu stehen bei beiden Teleskopen 1039 PMTs je Cherenkov-Kamera sowie ein Sichtfeld von 3.5° zur Verfügung [36].

An einem der beiden MAGIC-Teleskope befindet sich im Zentrum der im Durchmesser 17 m großen Spiegelflächen eine kleine zusätzliche Kamera, die PointingCCD. Mit dieser wurden die Daten, welche im folgenden Abschnitt ausgewertet werden, aufgenommen. Ein durch das Single-PointingCCD-Konzept auftretender Vorteil liegt nun darin, dass die Kamera während der Nacht in einem Zeitraum von etwa 23 Uhr abends bis kurz nach sieben Uhr morgens in regelmäßigen - dreihundertachtzigsekündigen Zeitintervallen - Bil-

der des Himmels aufnehmen kann, ohne dabei das Auffangen der Cherenkov-Signale zu behindern. Die PointingCCD kann in Abbildung 11 a) in Nahansicht betrachtet werden. Genauer gesagt handelt es sich dabei um die in der linken Hälfte des Ausschnitts angebrachte Kamera mit rotem Gehäuse. In Abbildung 11 b) ist für einen Überblick über die gesamte Konstruktion die komplette Spiegelfläche des entsprechenden *MAGIC*-Teleskops gezeigt. In der Mitte befindet sich dabei der Ausschnitt mit der in dieser Arbeit verwendeten PointingCCD.



Abbildung 10: Die beiden *MAGIC*-Teleskope auf La Palma bei Nacht [36]



(a) Detailansicht

(b) Sicht auf Spiegelfläche des Teleskops

Abbildung 11: Fotografien der am *MAGIC*-Teleskop angebrachten PointingCCD (in rot). Bilder zur Verfügung gestellt von [37]

3.5. Das Cherenkov Telescope Array

Das *Cherenkov Telescope Array* (CTA) ist ein in Planung befindliches Projekt, das es vorsieht, an zwei Standorten auf der Erde insgesamt über 100 *IACT*s zu platzieren, um Gammastrahlung in einem Energiebereich zwischen 20 GeV und 300 TeV mit einer bis zu einem Faktor von zehn höheren Sensitivität als aktuell betriebene Teleskop-Systeme detektieren zu können [7]. Die Sensitivität ist hierbei definiert als der minimale Fluss, welcher notwendig ist, um eine punktförmige Quelle in einem Konfidenzintervall von 5σ zu detektieren. Dies ist in Abbildung 12 zu sehen.

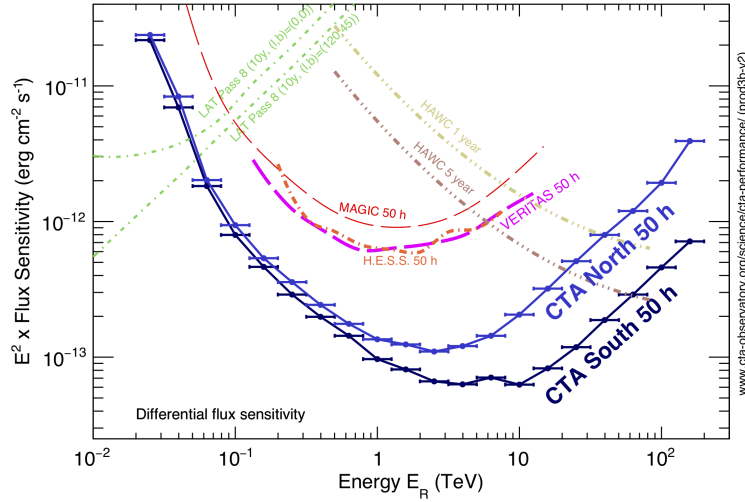


Abbildung 12: Zur Detektion einer Punktquelle im 5σ Vertrauensintervall nötiger Fluss in Abhängigkeit der Energie [7].

Der Standort auf der südlichen Hemisphäre soll sich dabei in Chile befinden, während die Teleskope der nördlichen Hemisphäre auf der Kanareninsel La Palma - direkt neben den *MAGIC*-Teleskopen - lokalisiert sind. Diese beiden Orte wurden derart gewählt, um den gesamten Himmel beobachten zu können [7]. Zur Detektion der Strahlung sind im Prinzip drei verschiedene, standardisierte Teleskoptypen geplant, welche sich hinsichtlich ihrer Spiegelflächen und dementsprechend den von ihnen mit hoher Präzision untersuchbaren Energiebereichen unterscheiden: Small-Sized Telescope (SST), Medium-Sized Telescope (MST) und Large-Sized Telescope (LST). Ein Abriss über einige wichtige Eigenschaften der Teleskope ist in Tabelle 1 festgehalten. Es sei hier noch angemerkt, dass sich auch innerhalb dieser drei Typen Unterschiede ergeben können; beispielsweise sind die MST-Teleskope in zwei verschiedenen, sich hinsichtlich des Kameradesigns unterscheidenden Ausführungen geplant [7].

Tabelle 1: Übersicht über die drei verschiedenen Teleskop-Typen des *CTA*; Daten von [7]

Teleskop	Spiegeldurchmesser	Energiebereich	Anzahl Süden	Anzahl Norden
LST	23,0 m	20 – 150 GeV	4	4
MST	11,5 m	150 GeV – 5 TeV	25	15
SST	$\approx 4,0$ m	5 – 300 TeV	70	0

Bei Betrachtung von Tabelle 1 wird bereits klar, dass das auf der Südhalbkugel positionierte Teleskop-System über eine deutlich höhere Anzahl an Teleskopen verfügen soll. Dies liegt daran, dass das Array auf der südlichen Hemisphäre die Zentralregion der *galactic plane* abdeckt. Es wird daher mit Gammastrahlen mit bis in einen Bereich von PeV reichenden Energien gerechnet. Diese machen die zahlreichen SSTs nötig, um auch derart hohe Energien untersuchen zu können. Die Teleskope auf La Palma hingegen sehen weniger vom *galactic center* [38, S. 10]. Dies stellt ebenso wie die Kosten - und Platz-Einschränkungen ([33]) die Ursache für den Verzicht der SSTs auf der Nordhalbkugel dar. Im Vergleich zu den momentan existenten Telescope-Arrays erlauben es die 70 SST-Teleskope, welche in Chile in einem Radius von 1200 m kreisförmig um die beiden anderen Teleskoptypen aufgestellt werden sollen, Strahlung in einem Energiebereich bis zu 300 TeV

zu vermessen [7]. Dies entspricht Energien, die auf der Erde mit Teilchenbeschleunigern nicht erreicht werden können. Hier kann als Beispiel die am *LHC* des *CERN* erreichbare Energie bei Protonenkollisionen von 13 TeV angeführt werden [39]. Deshalb ergibt sich dadurch die Möglichkeit, bisher unbekannte Quellen solch energetischer Strahlung zu entdecken.

Die physikalischen Ziele von CTA sind reichhaltig. Zunächst stellt die weitere Beobachtung und Entdeckung neuer Gammastrahlenquellen und das bessere Verständnis der zu Kosmischer Strahlung führenden physikalischen Mechanismen einen Schlüsselaspekt dar. Zusätzlich gibt es kosmologische Forschungsziele. Dazu soll die Selbst-Annihilation Dunkler Materie untersucht werden [7].

Das in dieser Bachelor-Arbeit erarbeitete Resultat soll zur Verbesserung des Pointing der etwa 82 Tonnen schweren MST-Teleskope beitragen. Dabei soll eine Pointing-Präzision von schlechtestenfalls sieben Bogensekunden erreicht werden. Eine künstlerische Visualisierung des CTA-Systems auf La Palma ist in Abbildung 13 gezeigt.



Abbildung 13: Geplantes *CTA*-System auf La Palma. Auf der rechten Seite sind ebenso die beiden *MAGIC-Teleskope* erkennbar. In dieser Darstellung sind neben den vier LST-Teleskopen nur sieben der 15 angedachten MST-Systeme erkennbar [7].

4. Qualitätsprüfung der Bilder

Nach den zu Grunde liegenden Prinzipien des Pointing und der Gammaastronomie soll es in diesem Kapitel nun um die Auswertung der von der PointingCCD aufgenommenen Bilder gehen. Der Zeitraum, in dem die Aufnahmen gemacht wurden, dauerte vom 06.08.2019 bis zum 11.11.2019. In dieser Zeit wurden mithilfe der Kamera etwa 7500 Bilder des Nachthimmels aufgenommen. Die an einem der *MAGIC*-Teleskope befestigte PointingCCD nimmt in einer festen Zeitspanne Bilder mit einer Belichtungszeit von zehn Sekunden auf. Die Zeitspanne liegt dabei für die Bilder, welche von Beginn des genannten Zeitraums an bis zum 27.10.2019 aufgenommen wurden, zwischen 23:00 Uhr abends und 7:15 Uhr morgens des Folgetages. Im Fall der danach aufgenommenen Bilder wurde der Beginn der Bildaufnahme auf 22:00 Uhr vorverlegt, genauso wie das Ende der Aufnahmen am Folgetag um eine Stunde vorverlegt wurde. Diese Zeitveränderung ist allerdings auf die Zeitumstellung im europäischen Raum zurückzuführen. Der zeitliche Abstand zwischen den Bildern beträgt dabei 380 Sekunden. Des Weiteren sei zu erwähnen, dass die PointingCCD nicht an das Teleskop gekoppelt ist, sondern unabhängig von diesem operiert. Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, war die PointingCCD während der Aufnahmen um zwölf Grad zur Teleskopachse verkippt. Zu Beginn sollen diese Aufnahmen anhand der für alle Bilder erhältlichen Informationen vorselektiert werden, um Datensätze mit einer möglichst hohen Lösungsquote der *reconstruct-images*-Funktion aus der *libPointingMST* zu erhalten, d.h. Bilder, für die der Fit der Quads gelingt. Im Anschluss soll die Ursache für die Nicht-Lösbarkeit von Bildern genau untersucht werden. Insbesondere wird im letzten Teil 6 der Arbeit der Einfluss des Mondes auf die Lösbarkeit eines Bildes untersucht.

4.1. Übersicht über die zur ersten Untersuchung herangezogenen Parameter

Vor Beginn der Auswertung der Daten galt es zunächst, die Qualität der Bilddateien zu prüfen. Dazu steht in der *libPointingMST* die Funktion *imagequalitycheck* zur Verfügung. Dafür wird ein aufgenommenes Bild pixelweise eingelesen und hinsichtlich der Pixelintensität untersucht. Dies geschieht mittels *PointingImageHistogram*. Diese Klasse erstellt ein Histogramm der verschiedenen Pixelintensitäten der unterschiedlichen Pixel eines Bildes. Neben dem Mittelwert der Pixelintensität kann der Root Mean Square (RMS) der Pixelintensität bestimmt werden. Der RMS ist im Allgemeinen ein Indikator dafür, wie stark sich die Werte einer Messreihe untereinander unterscheiden und wird im Deutschen auch Quadratisches Mittel genannt. Des Weiteren kann der am häufigsten angenommene Intensitätswert bestimmt werden. Dieser sei im Folgenden als Max Pixel Value bezeichnet. Zusätzlich sei erwähnt, dass wegen der Rotation der Erde und des Himmels relativ dazu Bildfeldrotationen zu erwarten sind. Dies bedeutet, dass die als Sterne identifizierten Intensitätsspot nicht kreisförmig, sondern elliptisch erwartet werden. Durch Aufrufen von *PointingImageObject* in *imagequalitycheck* kann dieser Effekt quantifiziert werden; dies geschieht über die Bestimmung der Ausdehnung eines als Stern erkannten Objekts und daraus die Bestimmung der elliptischen Parameter. Genauso kann der Winkel, um welchen ein Stern gegenüber einer der Koordinatenachsen des Bildes verkippt ist, ermittelt werden. Der CCD-Chip selbst wird direkt gekühlt. Die Temperatur des Chips wird ebenfalls für jedes Bild entnommen.

Folglich können die Bilder zu Beginn nach folgenden Kriterien untersucht werden:

- Mittelwert der Pixelintensität (MEAN_{int}),
- Root Mean Square (RMS_{int}) der Pixelintensität,
- am häufigsten angenommener Intensitätswert (Max Pixel Value),
- Temperatur des CCD-Chips der Kamera,
- Verhältnis der großen und kleinen Halbachse der Strahlungsquellen und
- RMS des Winkels der Quellen (RMS_{θ})

Das Ziel stellte es dar, eine Vorauswahl an Bildern zu treffen, die mit einer hohen Quote ($\approx 95\%$) von der *reconstruct-images*-Funktion gelöst werden können. Dabei galt es ebenso zu beachten, dass nicht zu viele Bilder aussortiert werden, um eine sinnvolle Gesamtstatistik beizubehalten. Entsprechend sollte mindestens die Hälfte der Bilder nicht aussortiert werden.

Zunächst sollen dazu einige vermutete Ursachen vorgestellt werden, welche dazu führen, dass ein Bild nicht gelöst werden kann. Im Anschluss wird in den folgenden Unterkapiteln dargestellt, auf welche Wertebereiche die eben genannten Größen eingeschränkt werden, um möglichst nur lösbare Bilder überhaupt auszuwerten. Schlussendlich wird ein Fazit dieser Qualitätsprüfung gezogen.

4.2. Erste Vermutung der Ursachen für nicht lösbare Bilder

Bei genauerer Betrachtung der nicht lösbaren Bilder fielen vor allem drei generelle Charakteristiken dieser Bilder ins Auge. Als erstes ist das Problem zu weniger in einem Bild gefundenen Sterne zu nennen. Darüber hinaus können trotz genügend identifizierter Sterne zu viele fehlerhafte Pixel im Bild dazu führen, dass ein Bild nicht lösbar ist. Den letzten Aspekt stellen zu große Bildfeldrotationen dar, so dass die Sterne nicht richtig erkannt und entsprechend das Bild nicht gelöst werden kann. Im Detail werden diese drei Ursachen im Folgenden vorgestellt und begründet.

Zu wenige erkennbare Sterne

Der Hintergrund dieses Aspekts liegt darin, dass mithilfe von *PointingImageObject* zu wenige Sterne identifiziert werden können, so dass der von *PointingWCSFitter* durchgeführte Fit nicht genug Punkte zum Anpassen der Sterne an den Himmelskatalog zur Verfügung hat. In der Folge kann der Fit nicht durchgeführt werden und das Bild ist nicht lösbar. Die Anzahl der im Bild gefundenen Sterne ist als Histogramm in Abbildung 14 gezeigt. Hierbei stellt die orange gefärbte Verteilung die Zahl der gefundenen Sterne im Fall nicht lösbarer Bilder dar, die blaue Verteilung die selbe Größe für gelöste Bilder.

Dabei fällt zunächst auf, dass die Verteilung der lösbaren Bilder annähernd normalverteilt ist, während die der nicht lösbaren exponentiell abzufallen scheint. Für weniger als ≈ 50 gefundene Sterne gibt es überhaupt keine lösbaren Bilder, während die Verteilung für die nicht lösbaren Bilder an dieser Stelle stark gepeakt ist. Allgemein dominiert bis hin zu etwa 200 gefundenen Sternen der Teil der nicht lösbaren Bilder die lösbaren. Ab dann überwiegen die lösbaren allerdings. Des Weiteren sei angemerkt, dass auch nicht

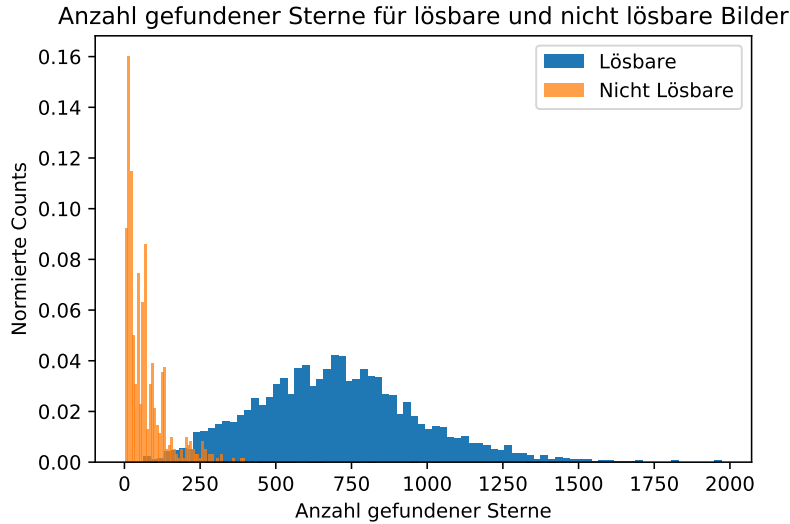


Abbildung 14: Zahl der gefundenen Sterne für lösbare und nicht lösbare Bilder. Die Counts an der y-Achse wurden dabei normiert, da die Datensätze stark verschiedene Größen aufwiesen.

lösbare Bilder mit mehr als 250 identifizierten Sternen existieren, obwohl dieser Wert - gemäß der Verteilung der lösbaren Bilder - zum Lösen bereits ausreichend sein sollte. Bei Betrachtung solcher Bilder kann die Erklärung gefunden werden, dass es sich um Bilder mit zahlreichen Pixelfehlern handelt. Diese werden vermutlich hauptsächlich durch eine zu hohe Temperatur des CCD-Chips der Kamera hervorgerufen (Genauerer im nächsten Abschnitt). Die so entstandenen einzelnen *Hot Pixels* werden nicht als Intensitätspunkte und somit Sterne erkannt, da zur Erkennung eines Sterns seitens der Software eine bestimmte Anzahl an Pixeln nebeneinander eine hohe Intensität aufweisen muss. Allerdings gilt dies nicht für ganze Spalten aus falsch ausgelesenen Pixeln. Letztere werden als Sterne erkannt, können allerdings nicht mit den Sternen aus dem Katalog übereinstimmen, was zum Scheitern des Fit führt.

Um die vermuteten Ursachen zu weniger gefundenen Sterne herauszufinden, wurden Mittelwert und RMS der Pixelintensität eines Bildes gegen die Zahl der gefundenen Sterne aufgetragen. Diese Plots können in Abbildung 15 a) respektive 15 b) betrachtet werden. Bei Betrachtung von Abbildung 15 a) wird klar, dass es im Fall der nicht lösbaren, in rot gekennzeichneten Bilder, einen Bereich mit Intensitätsmittelwerten von über 2000 arb. unit gibt. Für die lösbaren Bilder gibt es nur wenige solcher hohen Intensitätsmittelwerte. Da die Sterne mit hoher Intensität nur einen geringen Teil eines Bildes ausmachen, wird der Mittelwert der Pixelintensität hauptsächlich von den Hintergrundpixeln geprägt. Für hohe Intensitätsmittelwerte erwartet man zunächst **helle externe Lichtquellen**; zum Beispiel den ins Bild strahlenden Mond, welcher in Abbildung 16 a) dargestellt ist. Für den RMS der Intensität verhält es sich anders. Hier gibt es für wenige gefundene Sterne bei nicht lösbaren Bildern einige RMS-Werte, welche niedriger als die der lösbaren Bilder sind. Besonders bei einer Anzahl zwischen 50 und 100 gefundenen Sternen sind stark geclusterte nicht lösbare Bilder mit niedrigem RMS vorhanden. Es gibt allerdings auch zahlreiche lösbare Bilder, deren RMS-Wert höher ist als der der lösbaren Bilder. Daraus lässt sich zunächst schließen, dass sowohl Bilder mit einem zu hohen als auch einem zu niedrigen Intensitätskontrast nicht gelöst werden können.

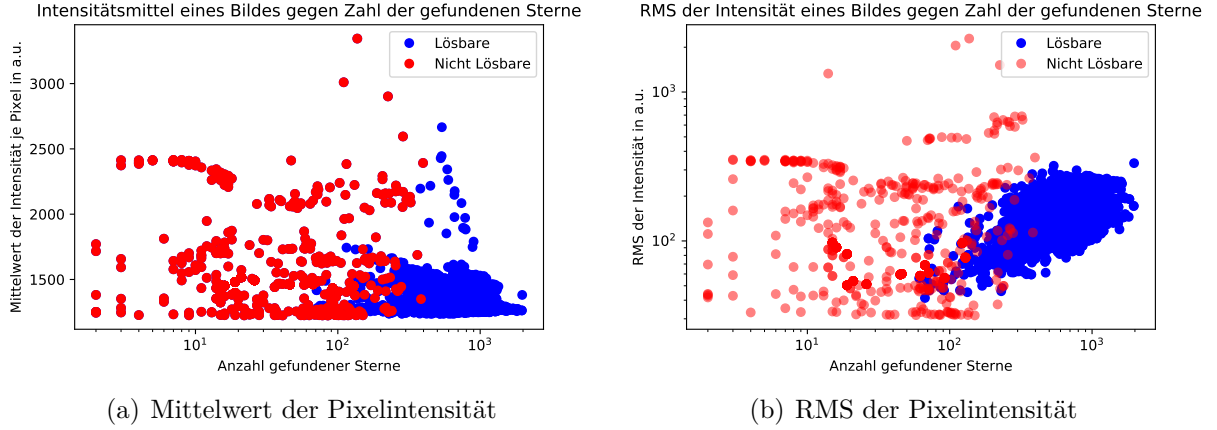


Abbildung 15: Mittelwert und RMS der Pixelintensität in Abhängigkeit der Anzahl gefundener Sterne

Die im Format *FITS* gespeicherten Aufnahmen der PointingCCD wurden mit dem Programm *SAOImageDS9* in der Version 7.2 betrachtet (siehe [40]). Dieses stellt die Pixel mit verschiedenen Intensitäten in unterschiedlichen Falschfarben dar. Deshalb ist entsprechend besonders der Gradient des Intensitätsverlaufs als interessante Größe zu nennen. Für die in dieser Arbeit gezeigten Bilder wurde die Farbcodierung *Cool* gewählt. Deshalb sind alle Pixel in verschiedenen Blautönen dargestellt. Je heller ein Pixel eingefärbt ist, desto höher ist die an ihm bestimmte Intensität; umgekehrt ist für dunklere Bereiche die Intensität geringer.

Die Begründung, dass das extern einfallende Licht in Abbildung 16 a) tatsächlich durch den Mond verursacht wird, findet sich in Kapitel 6. Dadurch können wenige Sterne gefunden werden, da sie von der Intensität des externen Lichts überdeckt werden. Ebenso wie der Mittelwert ist hier der RMS der Pixelintensität hoch. Die Ursache für den hohen RMS liegt darin begründet, dass wegen der Streuung des Lichts in der Atmosphäre die Lichtintensität mit zunehmendem Abstand zur Quelle abnimmt. Da die verwendete PointingCCD ein Gesichtsfeld von ungefähr $15^\circ \times 12^\circ$ besitzt und damit einen relativ großen Teil des Himmels abdeckt, ist somit ein Teil des Bilds hell erleuchtet, während der Rest des Bildes eine damit verglichen geringe Intensität, dominiert durch den dunklen Hintergrund, besitzt. Diese starke Streuung der Intensitätswerte führt zu einem hohen RMS.

In Abbildung 16 a) können neben dem auf der linken Seite ins Bild fallende Licht kleine dunkle Stellen gesehen werden. Dabei handelt es sich um Eis. Dieses bildet sich entweder auf dem Chip selbst oder einer dünnen Scheibe direkt vor diesem. Dies liegt daran, dass der Chip, wie bereits erwähnt, auf -20°C gekühlt ist und somit in der Nähe des Chips vorhandenes Wasser zum Gefrieren bringen kann. Des Weiteren ist bekannt, dass das Eis durch gefrierendes Wasser entsteht, welches über nicht komplett dichte Dichtungen in das Gehäuse der Kamera eindringt.

Als weitere Gründe für eine ungenügende Zahl an Sternen können darüber hinaus die Aufnahme von Fotos in der **Parkposition** und während **bewölkten Himmels** aufgezeigt werden. In der Parkposition wird stets der Boden des Bergs, an dem das Teleskop montiert ist, mit erfasst. Der sichtbare Berg macht dabei etwa ein Drittel des Bildausschnittes aus. Dies ist in Abbildung 16 b) gezeigt und führt zu den in Abbildung 15 b) sichtbaren hohen RMS-Werten für nur wenige gefundene Sterne. Diese resultieren daraus, dass es zu einem zahlreichen Pixel ähnlicher Intensität gibt, welche den Berg darstellen und zum

anderen Pixel ähnlicher Intensität gibt, welche den Himmel samt Sternen repräsentieren. Entsprechend ist die Streuung der Intensitätswerte hoch.

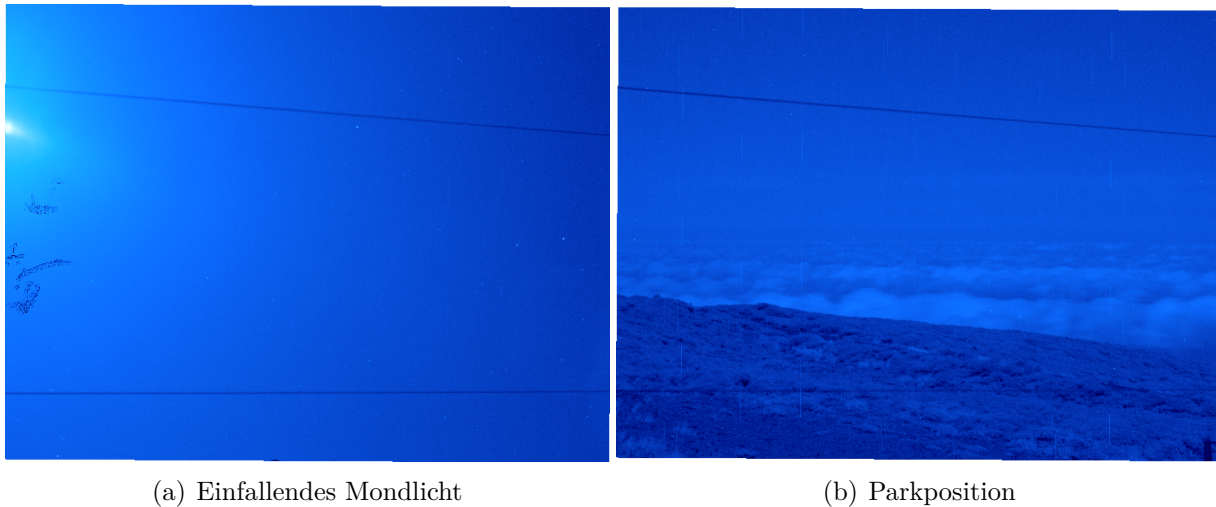


Abbildung 16: Aufnahmen der PointingCCD mit hohen RMS-Werten im Fall von Parkposition bzw. Mondlicht. Aus diesen beiden Aufnahmen wurden die in Abbildung 17 gezeigten Intensitätsverteilungen für Parkposition respektive Mondlicht erstellt.

Anzumerken ist, dass Pointing-Aufnahmen in der Parkposition des Teleskops nicht sinnvoll sind, da keine Daten genommen werden und entsprechend keine Rekonstruktion der Cherenkov-Ereignisse stattfinden kann. Im Fall des *MAGIC*-Teleskops ist die PointingCCD nicht an das Teleskop selbst gekoppelt und fotografiert entsprechend unabhängig von der Datennahme des letzteren den Himmel. Für das *CTA* soll dies geändert werden, so dass in der Parkposition die PointingCCD keine Bilder aufnimmt. Genauso soll beim *CTA* die PointingCCD zusätzlich für kleine Altitude-Winkel des Teleskops ausgeschaltet bleiben. Dies hat die Ursache, dass kurz nach Verlassen der Parkposition noch immer im Bild störende Teile des Berges zu sehen sind. Eine weitere Option für die in dieser Arbeit verwendete PointingCCD wäre es, die Aufnahmezeitpunkte der PointingCCD mit dem *Drive*-Systems des Teleskops abzugleichen und über den Teleskopstatus aus dem *Drive*-System (etwas mehr Information zum *Drive*-System in Kapitel 5.2) die entsprechenden Aufnahmen direkt zu verwerfen. Hier besteht allerdings das Problem, dass das *Drive*-System und die PointingCCD zeitlich nicht synchronisiert sind, so dass die Zeitdaten nicht für alle Bilder mit dem *Drive*-System übereinstimmen. Somit können nicht alle Bilder in Parkposition auf diese Weise gefunden und herausgefiltert werden. Entsprechend wird zum Aussortieren der Bilder in Parkposition eine Begrenzung über den RMS-Wert der Pixelintensität bevorzugt (Genauerer dazu in Kapitel 4.3). Dies wurde wenige Zeilen zuvor bereits angerissen und wird im Folgenden noch einmal ausführlicher motiviert. Validität für die gerade getroffenen Aussagen gibt Abbildung 17. Hier sind die Verteilungen der Intensität für die verschiedenen gerade genannten Ursachen zu weniger gefundener Sterne dargestellt. Als Referenz dazu ist ebenfalls die Verteilung für ein lösbares Bild gezeigt. Für die Bilder mit sichtbarem Berg besitzt die Verteilung zwei Peaks, was die klare Trennung zwischen Berg und Himmel auf dem Bild untermauert. Im Fall externen Lichts ist der RMS genauso wie der Mittelwert noch einmal deutlich höher als bei den Bildern mit sichtbarem Berg. Dies liegt an der starken Intensität des extern eingestrahlten Lichts.

Die Verteilung zeigt hier allerdings keine scharfen Peaks, da der Übergang zwischen der hohen Intensität des externen Lichts und der niedrigen Intensität des Nachthimmels nicht scharf ist, wie im Fall des sichtbaren Bergs.

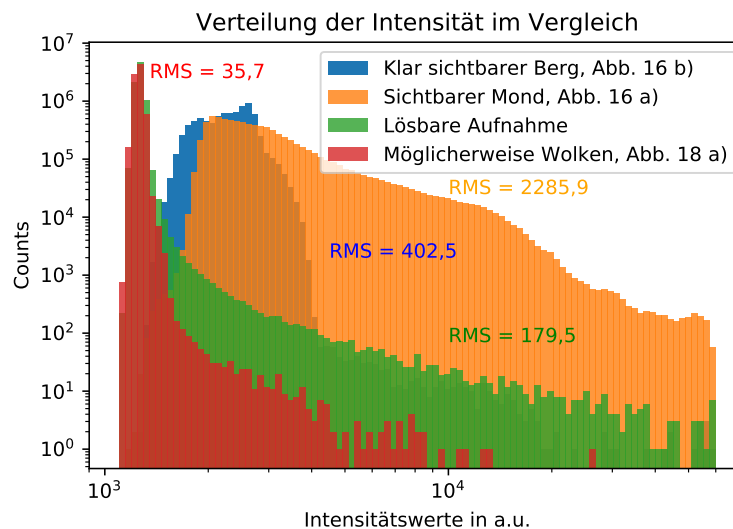
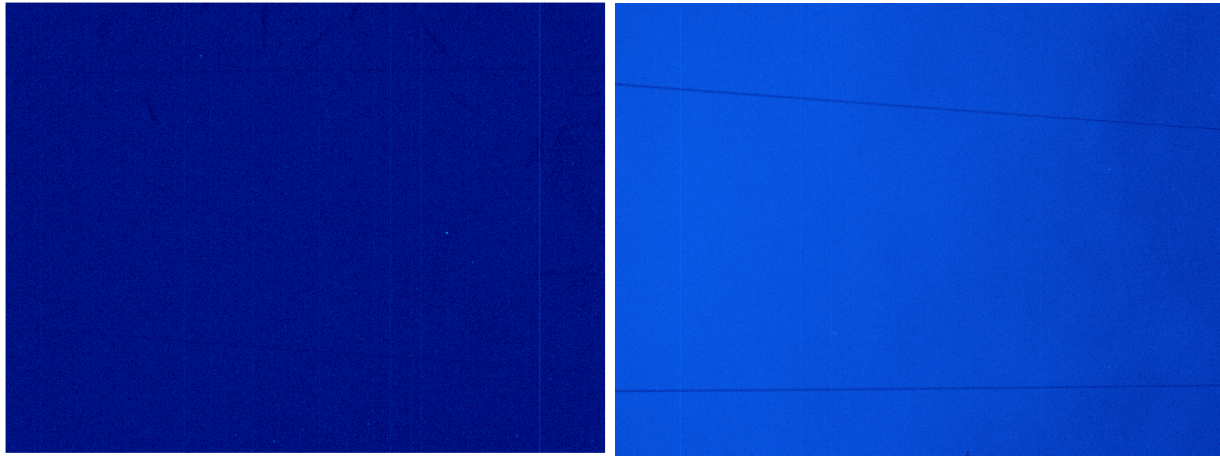


Abbildung 17: Histogramm für die in verschiedenen Aufnahmen der PointingCCD bestimmten Pixelintensitäten.

In Abbildung 17 ist darüber hinaus eine vierte Verteilung dargestellt, welche zu einem Bild mit offenbar den Himmel verdeckenden Wolken gehört, welches in Abbildung 18 a) dargestellt ist. Dabei sind viele Sterne verdeckt. Der mangelnde Kontrast durch fehlende sichtbare Sterne führt zu einem niedrigen RMS-Wert. Abbildung 17 zeigt für dieses Bild eine äußerst schmale Intensitätsverteilung mit dem deutlich niedrigsten RMS-Wert.

Abbildung 17 kann allerdings ebenfalls entnommen werden, dass im Fall der getesteten Bilder mit einem zunehmenden RMS-Wert auch der Mittelwert der Pixelintensität zunimmt. Dies liegt zunächst daran, dass in allen Bildern die Pixel mit den geringsten Intensitäten Intensitätswert von etwa 1000 arb. unit annehmen. Dementsprechend führt ein höherer RMS zu einer verbreiterten Verteilung, deren Mittelwert entsprechend ebenso wächst. Deshalb verhält sich der Mittelwert in den meisten Fällen in seiner Charakteristik wie der RMS und kann ebenso zum Aussondern der eben genannten Ursachen für nicht lösbare Bilder genutzt werden. Ein Beispiel für ein Bild, welches nur mithilfe des Mittelwerts, nicht aber des RMS aussortiert werden kann, ist in Abbildung 18 b) dargestellt. Wie im Bild daneben in Abbildung 18 a) sind kaum Sterne auszumachen. Im Fall des zuletzt genannten Bildes ist der Intensitätsgradient beinahe verschwindend. Folglich kann die Aufnahme wegen eines geringen RMS-Werts aussortiert werden. Als Ursache sind hier atmosphärische Effekte wie Wolken zu vermuten. In das Bild auf der rechten Seite scheint allerdings ein leichtes externes Licht einzufallen, weshalb die Kabel der Teleskopkonstruktion Schatten werfen. Der Gradient der Intensität ist insofern zu erkennen, als dass die Intensität von links nach rechts abnimmt. Die Abnahme des Gradienten ist allerdings geringer als zum Beispiel in Abbildung 16 b). Möglicherweise sind Streuprozesse in den vermuteten Wolken dafür verantwortlich. Im späteren Kapitel 4.3 würde ein solcher RMS-Wert deswegen nicht aussortiert. Der Mittelwert liefert allerdings ein Resultat, das zum Aussortieren dieses nicht lösbaren Bildes führt. Dieses Bild wird im späteren Teil der Arbeit in Kapitel 6 nochmal aufgegriffen und untersucht, ob das einfallende Licht durch

den Mond verursacht wird. Dabei konnte ermittelt werden, dass das einfallende Licht vom Mond stammt.



(a) Wolken; RMS = 35,7 arb. unit, MEAN = 1251 arb. unit (b) Möglicherweise angestrahlte Wolken; RMS = 111,4 arb. unit, MEAN = 1716,8 arb. unit

Abbildung 18: Aufnahmen der PointingCCD mit niedrigem RMS-Wert im Fall von Wolken.

Nachdem nun die Ursachen von zu wenigen Sternen in den Bildern ausführlich diskutiert wurden, kann festgehalten werden, dass diese Gründe mithilfe des RMS - bzw. Mittelwerts der Pixelintensität aus der *imagequalitycheck*-Funktion ausgeschlossen werden können. Dies wird in Kapitel 4.3 nochmals aufgegriffen. Zum Abschluss dieses Kapitels sollen noch die Bildfehler und Bildfeldrotation als Ursache für die Nicht-Lösbarkeit von Bildern erörtert werden.

Bildfehler

CCD-Chips bestehen aus einem Raster aus einzelnen Pixeln. Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen solchen Pixel, wird mittels des *Inneren Photoeffekts* ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Die Zahl der freigesetzten Elektronen ist dabei proportional zur Intensität der einfallenden Strahlung [41]. Das Auslesen der Pixel erfolgt mithilfe eines Schieberegisters, da einzelne Pixel nicht alleine ausgelesen werden können. Dabei werden die Pixel seriell in Zeilen ausgelesen [42]. Problematisch ist nun, dass ein Elektron-Loch-Paar auch thermisch erzeugt werden kann, d.h. ohne dass überhaupt Strahlung eingefallen ist [41]. Deswegen gibt es mit zunehmender Temperatur mehr fälschlich ausgelöste Pixel, weshalb der Kamerachip auf -20°C gekühlt wird. Auf diese Weise fälschlich ausgelöste Pixel oder defekte Pixel werden *Hot Pixels* genannt [43]. Wegen der seriellen Auslese kann es darüber hinaus passieren, dass eine ganze Zeile von Pixeln zu *Hot Pixels* wird, diese Reihen werden auch als *Hot Rows* bezeichnet. Ein Bild mit vielen *Hot Rows* ist in Abbildung 19 gezeigt. Die als Sterne erkannten *Hot Rows* führen zum Scheitern des Fit, obwohl im Prinzip genügend Sterne verfügbar sind, um das Bild zu lösen. In Kapitel 4.3 wird der Parameter der Temperatur genauer unter die Lupe genommen und letzten Endes auf -20°C beschränkt werden.

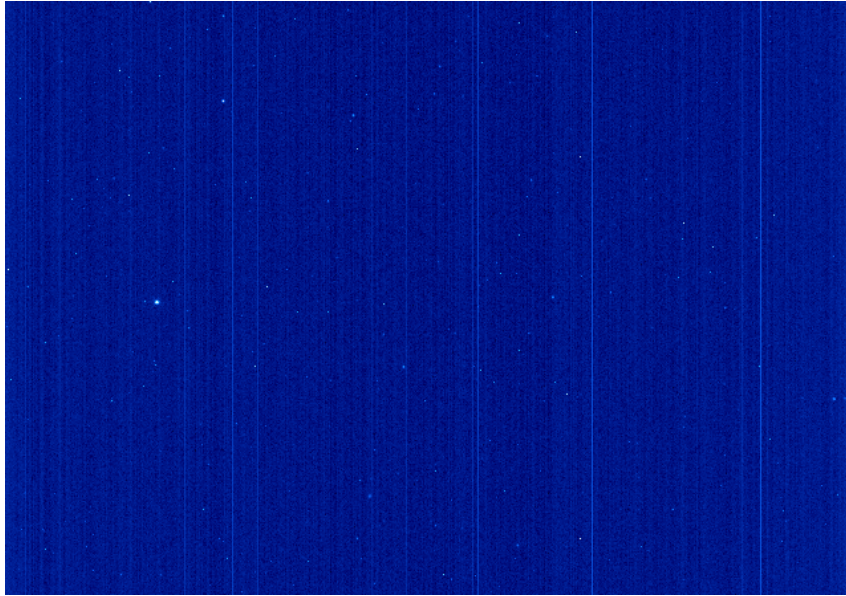


Abbildung 19: Nachthimmelaufnahme mit zahlreichen Reihen an *Hot Pixels*

Bildfeldrotation

Den letzten hier zu nennenden Effekt stellt die hohe Bildfeldrotation dar. Wegen der Bewegung der Erde und der Sterne am Himmel gemeinsam mit der langen Belichtungszeit der Bilder wirken die Sterne auf den Himmelsfotografien stets leicht elliptisch. Besonders zum Tragen kommt dieser Effekt, da die Kamera nicht nach vorne auf die Cherenkov-Kamera gerichtet, sondern um einen Winkel von etwa 12° verkippt ist, um die störende Cherenkov-Kamera aus dem Bild fernzuhalten. Falls die Sterne allerdings zu elliptisch scheinen, kann der Mittelpunkt eines Sternes nicht mehr sinnvoll gefunden werden, was entsprechend zu einem falsch rekonstruierten Stern führt. Dies trifft vor allem auf die an den Bildrändern befindlichen Himmelskörper zu. In Abbildung 20 ist ein Bildausschnitt mit stark elliptischen Sternen gezeigt. Beim Abgleich der gefundenen Sterne mit dem Katalog führt dies zu Fehlern und verursacht das Scheitern des Fit. Zu hohe Bildfeldrotation soll in Kapitel 4.3 mithilfe des RMS des Verkipfungswinkels und dem Verhältnis aus großer und kleiner Halbachse der Sterne ausgeschlossen werden.

4.3. Einschränkung der herangezogenen Parameter

In diesem Kapitel werden nun die Einschränkungen der Wertebereiche der verschiedenen Parameter und die Effekte der Beschränkungen vorgestellt. Dabei sei an dieser Stelle hervorgehoben, dass die Parameter in der im Folgenden gelisteten Reihenfolge beschränkt wurden.

RMS und Mittelwert der Pixelintensität

Zu Beginn wurde getestet, ob sich die gemessene Pixelintensität im Laufe einer Messreihe verändert hat. Zum Beispiel könnte es geschehen sein, dass die Kamera noch Bilder genommen hat, während die Sonne bereits aufgegangen war. Dies könnte zu einer Beschränkung des Zeitraums, aus dem Pointing-Aufnahmen ausgewertet werden, führen. Dazu wurden MEAN- und RMS-Wert aller verfügbaren Bilder gegen die ebenso bekannte

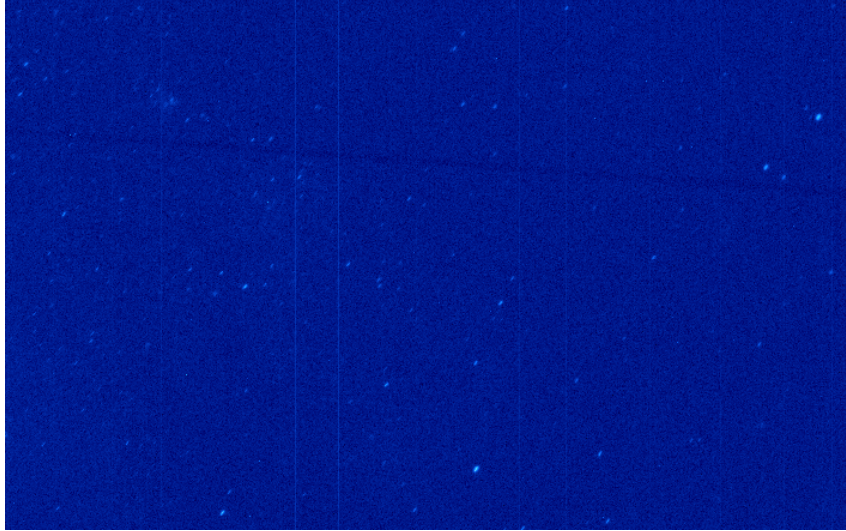


Abbildung 20: Ausschnitt aus einer Nachthimmelaufnahme mit stark elliptischen Sternen.

Aufnahmezeit der Bilder aufgetragen. Dies ist in Abbildung 21 a) für den Mittelwert der Pixelintensität gezeigt. Die analoge Abbildung für den RMS-Wert findet sich direkt daneben in Abbildungsteil b). Die Zeitpunkte der Aufnahme der Bilder wurden dabei mittels einer entsprechenden Implementierung in *Python* nur in die Tageszeit einer Aufnahme, nicht aber den Tag selber umgerechnet. Dies ermöglicht es, alle genommenen Bilder in Abbildung 21 im Stundenformat darzustellen. Dabei markiert der Wert null die Uhrzeit 0 Uhr. -2 hingegen stellt 22 Uhr dar, um die Achsenskalierung möglichst geschickt zu wählen. Die positiven Werte entsprechen direkt der Tageszeit.

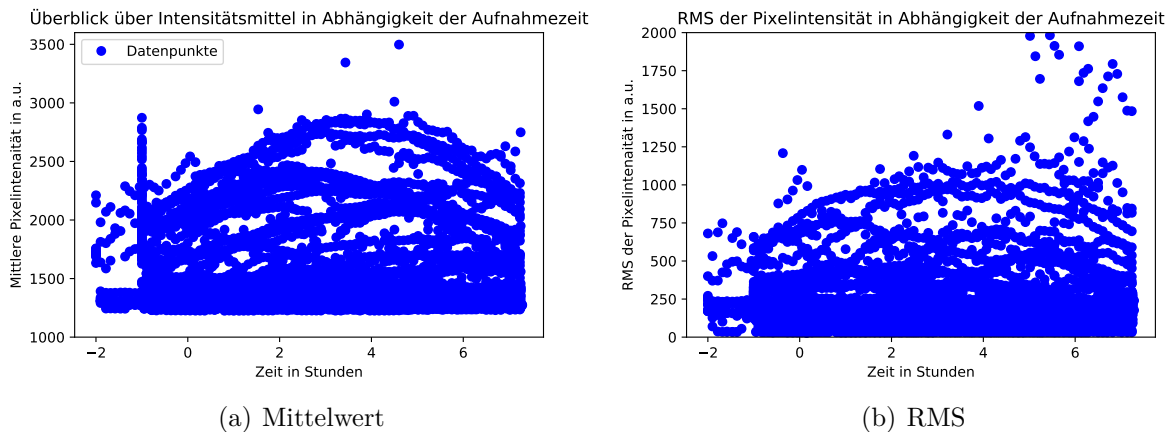


Abbildung 21: Mittelwert und RMS der Pixelintensität in Abhängigkeit der Aufnahmezeit des Bildes; reduziert auf ein 24-stündiges Intervall

Bei Betrachtung von Abbildung 21 fallen im Zeitraum von 23 Uhr bis 7:30 Uhr einige Kurven im Verlauf der mittleren Intensität bei Werten von über 1500 arb. unit auf. Diese könnten beispielsweise durch den auf - und wieder untergehenden Mond bedingt sein. Für den RMS-Wert hingegen zeigen sich Anomalien zu Uhrzeiten ab etwa 5:00 Uhr morgens. Einige dieser Bilder wurden daraufhin mit *SAOImageDS9* betrachtet. Es handelte sich dabei allerdings in erster Linie um externe Lichteffekte, welche allen Anschein nach

durch vorbeifahrende Autos, nicht aber in signifikanter Zahl durch vermutetes Mondlicht, verursacht wurden. Es wurde beschlossen, die Bilddateien hinsichtlich ihrer jeweiligen Aufnahmezeit nicht zu beschränken.

Anknüpfend an Kapitel 4.2 wurden unter Verwendung von Abbildung 17 Bilder mit RMS-Werten, welche im Bereich des dort gezeigten lösbaren Bildes lagen, mithilfe des Programms *SAOImageDS9* angeschaut. Anschließend wurde der Wertebereich solange nach unten und oben verschoben, bis keines der zufällig ausgewählten Bilder in diesen Bereichen entweder den Berg im Bild oder externes Licht bzw. Wolken zeigten. Der Bereich, in welchem nur hinsichtlich der weiteren Bearbeitung vielversprechende Bilder lagen, wurde auf $45 \text{ arb.unit} < \text{RMS}_{\text{int}} < 270 \text{ arb.unit}$ gesetzt. Eine Tabelle mit den Wertebereichen aller Parameter und der wegen dieser Begrenzungen ausgeschlossenen Zahl an Bildern findet sich im Anhang 8.1 in Tabelle 4. Diese Tabelle ist am Ende des Kapitels zur Qualitätsprüfung in Abbildung 24 als Grafik zur besseren Anschauung abgedruckt.

Für den Mittelwert der Intensität wurde nach Abschätzung aus Abbildung 21 ein sinnvoller maximaler Wert von etwa 1500 arb.unit erwartet. Entsprechend wurden Bilder, deren Mittelwertparameter etwa dieser Größenordnung entsprach, ausgewählt und betrachtet, um eine Obergrenze für den Mittelwert zu setzen. Analog zum RMS-Wert wurde nun der Bereich des Intensitätsmittels weiter ausgeweitet. Ab einem Wert von etwa 1600 arb. unit fanden sich nur noch Bilder mit entweder offensichtlich im Bild befindlichem Berg oder mit durch angestrahlte Wolken verdeckten Sternen. Bei letzterem Bildtypen handelt es sich um den bereits in Abbildung 18 b) gezeigten Fall. Hier konnte im späteren Kapitel 6 der Mond als eine beitragende Ursache ermittelt werden. Somit können Bilder, welche vom Mond beeinflusst werden, im Prinzip über einen hohen Mittelwert identifiziert werden. Es sei angemerkt, dass der Einfluss der vermutlich im Bild erkennbaren Wolken nicht eingeschätzt werden kann. Das soll bedeuten, dass nicht herausgefunden werden konnte, ob die Wolken selbst bereits ohne Mondeinfluss zum Scheitern des Fit führen. Entsprechend wird der Mond im Fall eines hohen Mittelwerts nicht als alleinige Ursache ausgemacht. Deswegen wird dem RMS in Bezug auf das Finden von nur durch den Mond beeinflussten Bildern bevorzugt. Im Falle eines hohen Wertes von Letzterem wurde bei Nichtbeachtung der in Parkposition genommenen Bilder nur der einfallende Mond als Ursache gefunden. Für eine geeignete Untergrenze des Mittelwertes wurde bei den niedrigsten gefundenen Mittelwerten begonnen und der Mittelwert stückweise erhöht. Allerdings fanden sich beinahe keine Bilder, welche offensichtliche Gründe für die Nicht-Lösbarkeit zeigten, durch das Setzen einer Untergrenze für den Mittelwert. Dies liegt daran, dass die meisten Bilder mit niedrigem RMS auch einen niedrigen Mittelwert aufweisen. Die Ursache hierfür ist, dass alle Bilder den niedrigsten Intensitätswert bei etwa 1000 arb. unit besitzen. Daraus ergibt sich für eine schmalere Verteilung mit niedrigem RMS auch ein niedriger Mittelwert. Entsprechend waren viele der Bilder mit niedrigen Mittelwerten bereits durch das zuvor ausgeführte Filtern nach dem RMS-Wert aussortiert worden. Der Wertebereich wurde schlussendlich auf $1250 \text{ arb.unit} < \text{MEAN}_{\text{int}} < 1600 \text{ arb.unit}$ gesetzt. Bilder mit Mittelwerten unterhalb der Untergrenze wiesen zum Beispiel wieder Wolken auf.

Max Pixel Value

Der Max Pixel Value gibt denjenigen Pixelwert an, welcher am häufigsten an Pixeln gemessen wurde. Bei Einschränkung des Wertebereichs dieses Parameters fiel dementsprechend auf, dass diese Werte etwa eine ähnliche Größe wie die MEAN-Werte haben, weshalb sich aufgrund der durchgeführten Wertebereichsbeschränkungen nur noch minimale aus-

zuschließende Datensätze finden ließen. Eine Untergrenze für diesen Parameter ließ sich nicht mehr sinnvoll definieren, da bereits niedrige RMS - und Mittelwerte entsprechend herausgefiltert wurden. Die Obergrenze wurde auf $\text{MAX}_{\text{int}} < 1500 \text{ arb.unit}$ festgelegt. An dieser Stelle sind die Ursachen für das Aussortieren vielfältig und nicht derart eindeutig wie im Fall des RMS und Mittelwerts der Intensität. Für höhere Werte dieses Parameters fanden sich lediglich Bilder mit sichtbarem Berg sowie Wolken; und vereinzelt mit externen Lichtquellen.

Verhältnis der großen und kleinen Halbachse der Strahlungsquellen

Dieser Parameter kann zum Ausschluss zweier zum Scheitern des Fit führender Ursachen verwendet werden. Zum einen kann hohe Bildfeldrotation erkannt werden, zum anderen aber auch eine große Zahl an *Hot Pixels*. Im letzten Fall wird eine ganze Zeile aus *Hot Pixels* als ein Stern mit der Breite eines Pixels und der Länge fast der gesamten Bildhöhe erkannt. Zu viele Fehler erhöhen das Verhältnis der beiden Achsen entsprechend stark. Auf diesen Parameter wurde keine Untergrenze gesetzt, da im optimalen Fall das Verhältnis beider Achsen einen Wert von eins besitzt. Dieser Wert kann nicht unterschritten werden. Für die Obergrenze wurden die Bilder erneut für verschiedene Verhältnisse betrachtet. Alle Bilder mit einem Verhältnis (RATIO) kleiner als vier weisen weder stark elliptische Sterne noch viele Bildfehler auf. Als Sterne erkannte *Hot Rows* könnten dieses Verhältnis dabei stark erhöhen. Interessant ist in jedem Fall die Beobachtung, dass von den 354 der auf Grund des Verhältnisses der Achsen aussortierten Bilder (siehe Tabelle 4) 91 Prozent eine Kamertemperatur von mehr als -20°C aufweisen. Darauf aufbauend wird vermutet, dass es mit zunehmender Temperatur des CCD-Chips der Kamera zu mehr Bildfehlern kommt, wie es die Charakteristik eines CCD-Chips erwarten lässt. Genauer ließ sich dieser Zusammenhang allerdings nicht quantifizieren. Das Kriterium des Verhältnisses der großen und kleinen Halbachse scheint sich folglich gut zum Aussortieren von Bildern mit vielen Fehlern zu eignen.

RMS des Verkippfungswinkels θ

Der Verkippfungswinkel eines gefundenen Sterns definiert den Winkel dieses Objekts in Bezug auf eine feste Koordinatenachse des Bildes. Im Falle eines kleinen RMS-Wertes unterscheiden sich die Winkel θ aller gefundenen Objekte kaum. Dies bedeutet, dass alle Sterne gleichsam verkippt sind. Als Erklärung eines geringen RMS des Winkels kann herangezogen werden, dass sich das aufgenommene Bild weit weg vom Drehpunkt des gesamten Systems befindet. Deshalb müssen sich die Sterne schneller drehen und verursachen dadurch wieder Bildfeldrotationen, welche durch Einschränkung des Achsenverhältnisses möglicherweise nicht aussortiert wurden. Zudem sind Bildfehler in Form von *Hot Pixels* stets parallel zueinander ausgerichtet und tragen dementsprechend ebenso zu einem niedrigen Wert von RMS_θ bei. Die Obergrenze des RMS wurde nach erneuter Betrachtung der Bilder auf $\text{RMS}_\theta < 0,3^\circ$ gesetzt. Unter Werten von $0,15^\circ$ fand sich darüber hinaus ein interessanter Effekt, im Zuge dessen sich schnell zu bewegen scheinende Himmelsobjekte fotografiert wurden. Ein Beispiel eines solchen Bildes ist in Abbildung 22 abgedruckt. Die plausibelste Erklärung hierfür ist, dass das Teleskop während der Belichtungszeit der Aufnahme bewegt wurde. Dafür spräche vor allem, dass fast alle verschmierten Quellen in die gleiche Richtung gedreht wurden und ihre Schweife somit gleich ausgerichtet sind [44].

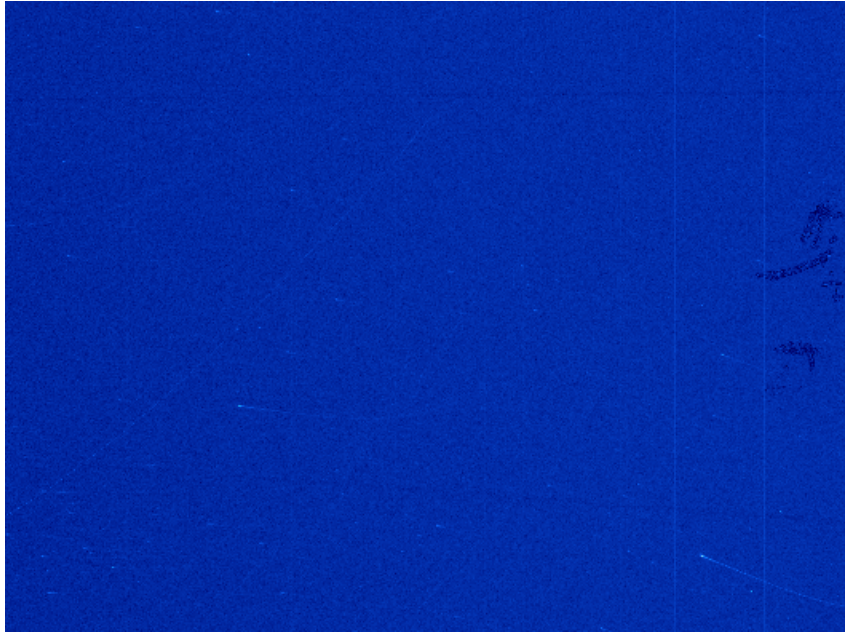


Abbildung 22: Vermutete Bewegung des Teleskops

Temperatur des Chips der Kamera

Die Kamertemperatur im normalen Betriebsmodus sollte bei -20°C liegen. Diese Temperatur erwies sich als geeignete Temperatur, welche beim zukünftigen *CTA* durchgängig aufrechterhalten werden kann [44], [32]. Vor allem in den Nächten zu Beginn der in dieser Arbeit verwerteten Datensätze wich die Temperatur allerdings stark von dieser Vorgabe ab. Mit anderen Worten wurden Temperaturen von bis zu $+20^{\circ}\text{C}$ angenommen. Dementsprechend wurde hinterfragt, ob die Kamertemperatur einen quantifizierbaren Einfluss auf die Bilder hat. In den meisten Fällen führten die *Hot Pixels* scheinbar nicht zu so gravierenden Fehlern, dass die Bilder nicht gelöst werden konnten. Ein Indiz dafür liefert die relativ hohe Lösungsquote der Bilder mit vom Soll abweichenden Temperaturen (76,3 Prozent; siehe Tabelle 2). Der Einfluss einer falschen Kamertemperatur wurde anhand zweier Parameter der *reconstruct-images*-Funktion näher überprüft; namentlich handelte es sich dabei um die Brennweite und den Fit-Parameter *meanResidual*. Es ist damit zu rechnen, dass sich für verschiedene Temperaturen der Chip der Kamera verschieden ausdehnt und entsprechend die anschlagenden Pixel nicht mehr der erwarteten Position bei -20°C entsprechen. Die Brennweite ist der geeignetste Parameter, um diesen Effekt zu untersuchen. Der Vergleich dieser beiden Parameter - zum einen bestimmt aus den lösbaren Bildern mit falscher und zum anderen aus den lösbaren Bildern mit richtiger Temperatur - ist in Abbildung 23 gezeigt.

Bei Betrachtung der Abbildung 23 a) sind zwei klar voneinander abgrenzbare Verteilungen erkennbar. Allerdings sei hervorgehoben, dass sich der Unterschied im Bereich von $10\text{ }\mu\text{m}$ bewegt, was einer Abweichung im Promillebereich entspricht. Folglich ist der Unterschied auf den Wert der Brennweite vernachlässigbar klein. Die Güte des Fit, beschrieben durch den *meanResidual*, ist in Abbildung 23 b) gezeigt. Hieraus wird erkenntlich, dass der Fit im Schnitt um ungefähr 0,05 Pixel schlechter ist. Ein Pixel entspricht dabei einem Bereich von etwa 20 Bogensekunden. An dieser Stelle kann erwähnt werden, dass sich die Güte der mit der *reconstruct-images* bestimmten Fits im Falle aller gelösten Bilder kaum unterscheidet. Es musste keine Selektion der gelösten Bilder anhand des *meanResidual*

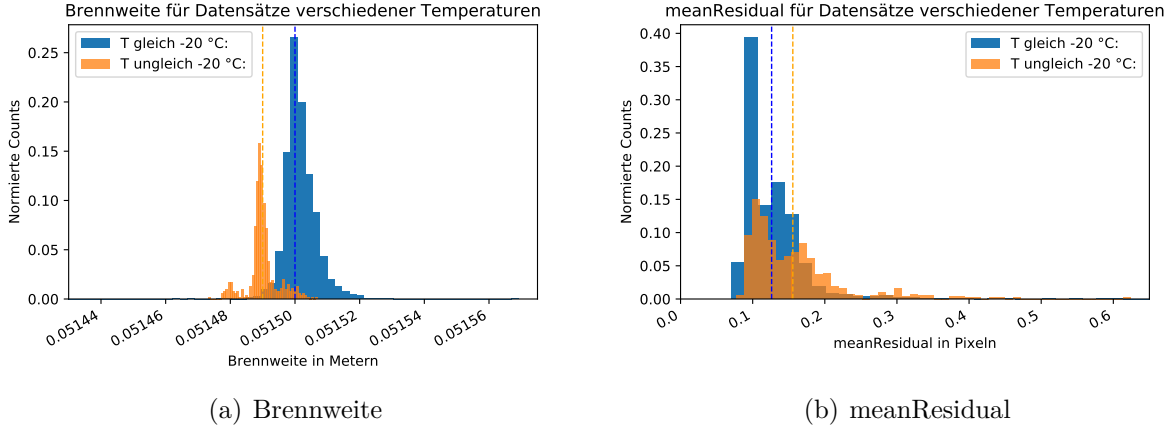


Abbildung 23: Brennweite und meanResidual für Bilder mit richtiger Temperatur (blau) und davon abweichender Temperatur (orange).

vorgenommen werden. Deswegen wurden alle überhaupt lösbaren Bilder gleichermaßen für die weiteren Auswertungen zu Rate gezogen.

Obwohl bei Betrachtung ausschließlich lösbarer Bilder kein eindeutiger Unterschied der Kamera bei verschiedenen Temperaturen gefunden werden konnte, wurde beschlossen die Kamertemperatur auf ein Intervall von $-20,5\text{ °C} < T < -19,5\text{ °C}$ zu beschränken. Dies liegt einerseits im Ausschluss von Bildern mit zu vielen Bildfehlern und andererseits im mangelnden Verständnis des tatsächlichen Kameraverhaltens begründet.

Darüber hinaus kann bei Betrachtung von Tabelle 4 in 8.1 festgehalten werden, dass am Ende der Qualitätsprüfung weniger als 200 Bilder wegen falscher Temperatur ausgeschlossen wurden. Insgesamt enthielten alle 7105 ausgewerteten Bilder 737 Bilder mit einer von -20 °C abweichenden Temperatur. Dies spricht dafür, dass anhand der durchgeführten Qualitätsprüfung bereits eine Vielzahl dieser Bilder anhand der durch die falsche Temperatur verursachten Bildfehler aussortiert wurden.

4.4. Fazit der Qualitätsprüfung

Insgesamt standen vor der Qualitätsprüfung 7105 Bilder zur Verfügung, welche mit der *imagequalitycheck*-Funktion sinnvoll ausgewertet werden konnten. Die ausgeführten Beschränkungen der Parameter und die nach jeder Beschränkung übrige Zahl an Bildern ist in Abbildung 24 festgehalten. Die exakten Zahlen finden sich im Anhang 8.1 in Tabelle 4. In dieser Tabelle sind ebenso die vermutlich zum Scheitern des Fit führenden Ursachen genannt, welche durch die Beschränkungen weitestgehend aussortiert wurden. In der selben Abbildung ist an einer zweiten y-Achse auch die Lösungsquote der nach der jeweiligen Beschränkung übrigen Bilder festgehalten. Insgesamt waren nach der Qualitätsprüfung noch 4138 Bilder übrig, was einem Anteil von $\approx 58\%$ entspricht. Damit wurde deutlich über die Hälfte aller Bilder nicht aussortiert.

Bei Betrachtung von Abbildung 24 wird vor allem ersichtlich, dass die Quote der lösbaren Bilder in jedem Schritt zunimmt. Bei den Parametern MEAN_{int} (Untergrenze) und Max Pixel Value verbessert sich die Quote jedoch kaum. Dies ist der bereits diskutierten Tatsache geschuldet, dass die Beschränkung dieser Parameter kaum Bilder ausschließen konnte. Auch die Qualitätsbeschränkungen mithilfe des Verkippungswinkels und des Ausschlusses der falschen Temperaturen des Kamera-Chips brachten keine signifikanten Verbesserun-

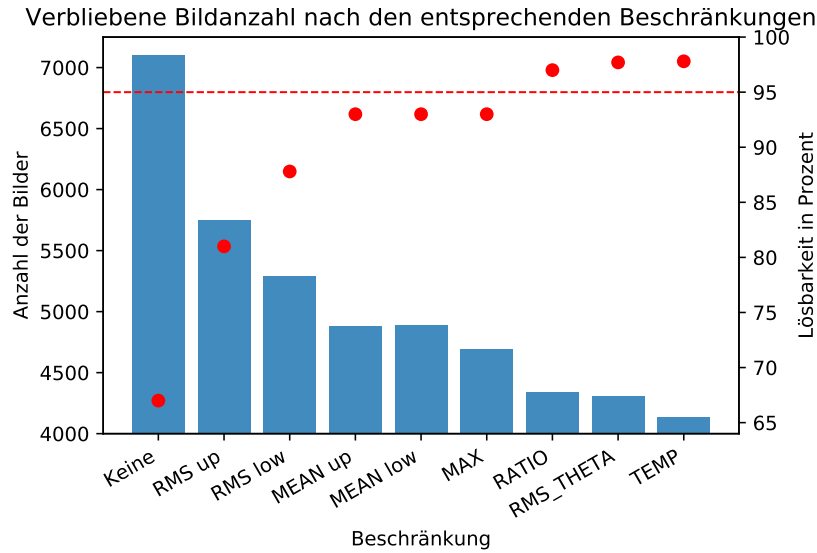


Abbildung 24: Übersicht über die Zahl der verbliebenen Bilder vor und nach einer Beschränkung der an der x-Achse angetragenen Parameter. Die zweite y-Achse gibt die Lösbarkeitsquote der Bilder nach der jeweiligen Beschränkung in Prozent an. Die rot gestrichelte Linie gibt die gewünschte Lösungsquote von 95 Prozent an.

gen mehr.

Letzten Endes stellte es das Ziel der ersten Qualitätsprüfung dar, überwiegend lösbare Bilder ($\approx 95\%$ Lösungsquote) herauszufiltern. In Tabelle 2 sind die Lösungsquoten der nach der Qualitätsprüfung übrigen Bilder, der verworfenen Bilder sowie der Bilder mit falscher Kamertemperatur gesondert aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht über die Lösungsquoten verschiedener Kategorien von Bildern

Kategorie	Lösungsquote in Prozent
Qualitätsprüfung: Gute Bilder	97,8
Qualitätsprüfung: Verworfenen Bilder	27,6
Falsche Temperatur	76,3

Aus Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die nach der Qualitätsprüfung übrigen Bilder in 97,8 Prozent der Fälle gelöst werden können. Dies entspricht sogar mehr als die geforderte Quote von 95 Prozent. Von den aussortierten Bildern sind lediglich 27,6 Prozent lösbar. Folglich herrscht zwischen den nach den Qualitätsbeschränkungen übrigen und den aussortierten Bildern ein großes Gefälle. Einige aussortierte Bilder sind dennoch lösbar. Darunter befinden sich unter anderem Bilder, welche von einem externen Lichteinfall betroffen sind. Im Anhang 8.1 in Abbildung 40 a) findet sich ein solches Beispielbild. Dieses Bild mit einem RMS der Intensität von 310 arb. unit wurde bereits im ersten Schritt der Qualitätsprüfung aussortiert. Abbildung 40 b) lässt dabei vermuten, dass es sich um Mondlicht handelt. Hier scheint die hohe Intensität durch dieses Licht allerdings nur so stark ausgedehnt zu sein, dass genug Sterne zum Funktionieren des Fit gefunden werden können. Die Ursache für diesen Effekt ist allerdings nicht verstanden worden. Weshalb im Allgemeinen manche Bilder mit einfallendem Mondlicht lösbar sind und andere nicht, konnte nicht evaluiert werden. Vielleicht kommt es zu unterschiedlichen Effekten der Streuung

des Lichts durch Atmosphäreneffekte. Die Bilder bei falscher Kamertemperatur für sich genommen besitzen eine Lösungsquote von 76,4 Prozent. Dies ist vielleicht der Tatsache geschuldet, dass manche *Hot Rows* nicht vollständig als Sterne erkannt werden. Im Fall von genügend anderen erkannten Sternen kann der Fit dann trotzdem gelingen.

5. Rekonstruktion der Koordinaten der PointingCCD für nicht lösbare Bilder

Wie bereits in der Einleitung 1 erwähnt, stellte die Untersuchung der Abhängigkeit der Lösbarkeit eines Bildes vom Abstand des Mondes den letzten Schritt dieser Arbeit dar. Dazu war es notwendig, für die nicht lösbaren Bilder die Ausrichtung der PointingCCD aus der Teleskopausrichtung zu bestimmen. Dies liegt daran, dass nur für von *reconstruct-images* lösbare Bilder Informationen über die Ausrichtung der PointingCCD vorliegen. Allerdings ist der Abstand vom Zentrum der PointingCCD zum Mond gerade für die nicht lösbaren Bilder interessant, um einen möglichen Einfluss dieser Größe überprüfen zu können. Bevor die konkrete Rekonstruktion aber in Kapitel 5.3 durchgeführt wird, wird zuvor in 5.1 eine kleine Einführung zu den verwendeten Koordinatensystemen gegeben. Anschließend wird die Berechnung des Abstandes zwischen Teleskop - und PointingCCD-Ausrichtung für die lösbaren Bilder durchgeführt. Anhand dessen findet auch die Überprüfung der Rekonstruktion in 5.4 statt.

5.1. Verwendete Koordinatensysteme

In Abbildung 25 sind die zwei gängigsten astronomischen Koordinatensysteme abgebildet. Da in dieser Arbeit fast ausschließlich das *Horizontsystem* benutzt wurde, wird dieses hier etwas ausführlicher präsentiert. In beiden Fällen wird ein Himmelskörper über jeweils zwei Winkel in Kugelkoordinaten definiert. Der Radius als dritte Kugelkoordinate wird in der Regel weggelassen.

Zunächst ist hier das *äquatoriale Koordinatensystem* zu nennen. Dieses hat seinen Koordinatenursprung wahlweise im Zentrum der Erde oder dem tatsächlichen Beobachtungsort (topozentrische Koordinaten). Gegeben sind die Koordinaten eines Himmelsobjekts über die zwei Winkel Rektaszension und Deklination. Der erstgenannte Winkel wird definiert über den Abstand zum Frühlingspunkt ($\approx 20.$ März) parallel zum Himmelsäquator (Abbildung 25 links). Die Deklination definiert den Abstand zum Himmelsäquator. Wegen der Präzession der Erdachse sind diese Koordinaten zeitabhängig.

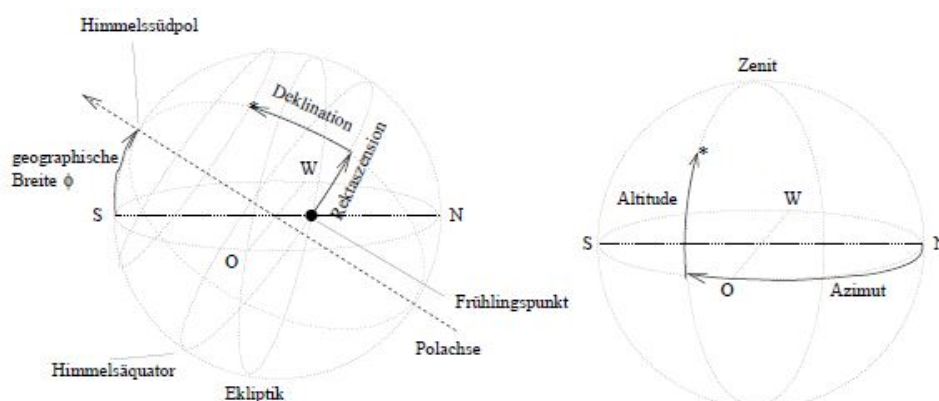


Abbildung 25: Darstellung der zwei gängigsten astronomischen Koordinatensysteme: Auf der linken Seite das *äquatoriale Koordinatensystem* und rechts das *Horizontsystem*; aus [30]

Das weitere genutzte Koordinatensystem ist das *Horizontsystem*. Dieses drückt die Position eines Punktes am Himmel abhängig von einer Beobachungsposition auf der Erde

aus. Die Altitude Alt definiert dabei den Winkel über bzw. unter dem Horizont einer Erdposition. Für einen Winkel von $Alt = 90^\circ$ spricht man vom Zenit, während der Winkel $Alt = -90^\circ$ als Nadir bezeichnet wird. Die zweite Koordinate wird als Azimut Az bezeichnet und beschreibt die Himmelsrichtung eines Himmelsobjekts (Abbildung 25 rechts). Der Wertebereich des Azimut erstreckt sich über eine gesamte Rotation von 360° . Die Drehrichtung ist in der Regel bei $Az = 0^\circ$ im Norden orientiert und wird ostwärts vollzogen. Mithilfe einer Rotationsmatrix können das *Horizontsystem* und das topozentrische *äquatoriale Koordinatensystem* untereinander transformiert werden.

5.2. Bestimmung des Winkelabstandes zwischen Teleskop und PointingCCD für lösbare Bilder

Wie vielmals erwähnt, wurde die PointingCCD gegenüber der Teleskopachse verkippt. Um diesen Winkel zu bestimmen, wurde aus der *reconstruct-images*-Funktion für alle lösbaren Bilder die Richtung des Zentrums der PointingCCD bestimmt und wurde zum zugehörigen Zeitpunkt der Aufnahme gespeichert (siehe auch Kapitel 3.3). Diese Koordinaten lagen dazu sowohl im *Horizontsystem* als auch im *äquatorialen Koordinatensystem* vor.

In den Daten des *Drive*-System sind dagegen die Koordinaten der mechanischen Ausrichtung des Teleskops festgehalten. Diese Daten sind jeweils ebenso zu der entsprechenden Ausrichtung des Teleskops gehörenden Zeit gespeichert. Die Koordinaten liegen hier ebenso sowohl im *Horizontsystem* als auch im *äquatorialen Koordinatensystem* vor. Die Informationen im *Drive*-System liegen jeweils in Zeitabständen von wenigen Sekunden vor und sind komplett unabhängig von den Aufnahmezeiten der PointingCCD. In *Python* wurde ein Code implementiert, welcher nach Übereinstimmungen der Zeitkomponente zwischen *Drive*-System und der *reconstruct-images*-Funktion suchte. Daraus konnte folglich allen Bildern, für die eine Zeitübereinstimmung mit dem *Drive*-System gefunden wurde, sowohl die Richtung der PointingCCD als auch des Teleskops zugeordnet werden.

Im Anschluss wurden diese beiden Paare an Winkeln zu jedem Bild im Format des *Horizontsystems* der *Seperation*-Funktion aus dem *Python*-Modul *astropy* ([45]) übergeben, um den Winkelabstand zu berechnen. Das Ergebnis der Abstandsberechnung ist in Abbildung 30 des nächsten Unterkapitels gezeigt.

5.3. Konkretes Vorgehen bei der Rekonstruktion

Ziel dieses Teils der Arbeit war es, nur aus der mechanischen Ausrichtung des Teleskops die Richtung der PointingCCD zu bestimmen. Dazu wurde aus allen lösbaren Bildern ein einfaches Modell entwickelt, welches im Anschluss auf die nicht lösbaren Bilder angewendet wurde.

Das Vorgehen hierbei bestand darin, analog zum vorherigen Unterkapitel für alle lösbaren Bilder die Koordinaten der PointingCCD und der Teleskoprichtung zu bestimmen. Um die Differenzen der Winkel Altitude und Azimut zu bestimmen, musste im nächsten Schritt eine Koordinatentransformation in Kugelkoordinaten durchgeführt werden. Das Ziel lag darin, die Koordinaten der PointingCCD auf den kartesischen Punkt $(1,0,0)$ zu transformieren. Dies muss durch zwei Rotationen um die Koordinatenachsen geschehen. Zur besseren Vorstellung ist die Definition eines Punktes P in Kugelkoordinaten in Abbildung 26 aufgezeigt. Um diesen auf die x-Achse mit Einheitsabstand eins zu legen, muss zunächst eine Rotation um die z-Achse durchgeführt werden. Der Drehwinkel ϕ entspricht

dabei dem Azimut-Winkel. ϕ ist dabei analog zu Abbildung 26 definiert und auch in Kugelkoordinaten als Azimutwinkel bekannt. Im Anschluss wird eine zweite Rotation um die y-Achse durchgeführt. Dazu muss der Altitude-Winkel Alt zu einem an Abbildung 26 angepassten Winkel θ umdefiniert werden. θ wird in der Darstellung in klassischen Kugelkoordinaten auch Polar - oder Zenitwinkel genannt. Die hierzu benötigte Definition lautet

$$\theta = 90^\circ - Alt,$$

wobei Alt in Grad angegeben ist.

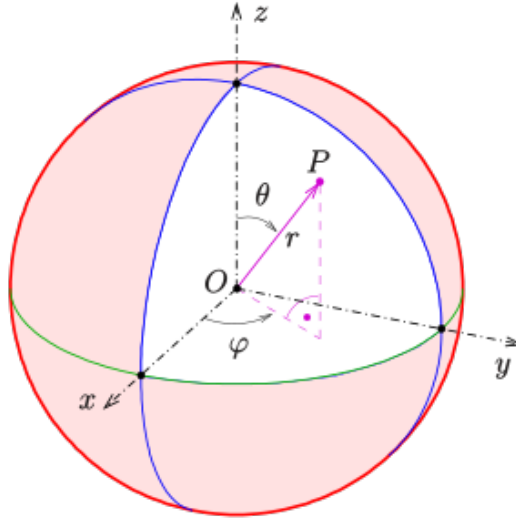


Abbildung 26: Darstellung eines Punktes P auf einer Einheitssphäre in Kugelkoordinaten [46]

Die beiden verwendeten Rotationsmatrizen lauten gemäß [47]

$$R_z(\phi) = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

für die Drehung um die z-Achse sowie

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

für die Drehung um die y-Achse. Mit der selben Transformation wurde nun der Richtungsvektor des Teleskops transformiert, so dass er an einen Punkt nahe des Punktes (1,0,0) transformiert wird. Werden nun beide Punkte in Kugelkoordinaten zurück überführt, kann die Differenz des Azimut-Winkels aus beiden Vektoren durch Subtraktion gebildet werden. Analog kann auch die Differenz für den Altitude-Winkel berechnet werden. Bei Betrachtung der errechneten Winkeldifferenzen ergab sich, dass wegen der Verwendung von Kugelkoordinaten sowohl die Differenz des Altitude - als auch des Azimut-Winkels vom Altitude-Winkel der Teleskoprichtung abhängig ist. Entsprechend wurden diese Zusammenhänge im weiteren Verlauf des Kapitels zunächst genauer untersucht.

Rekonstruktion des Altitude-Winkels der PointingCCD

Für die Rekonstruktion des Alt-Winkels der PointingCCD wurde zunächst die berechnete Differenz des Alt-Winkels zwischen Teleskop und PointingCCD gegen den Alt-Winkel des Teleskops angetragen. Um Verwirrung beim Leser vorzubeugen, sei ab hier von **rekonstruierten** Koordinaten die Rede, falls diese mit *reconstruct-images* bestimmt wurden. **Berechnete** Koordinaten seien jene, die mithilfe des einfachen Modells aus den Teleskopkoordinaten ermittelt wurden. Hier sollte des Weiteren erwähnt werden, dass Altitude-Winkel des Teleskops von mehr als 80° ausgeschlossen wurden. Zunächst liegt die Begründung hierfür darin, dass nur sehr wenige Daten bei größeren Winkeln aufgenommen wurden, so dass eine für das Modell sinnvolle Statistik nicht gewährleistet werden kann. Dies ist in Abbildung 27 a) abgebildet. Es wurde ein Zusammenhang in Form einer Tangens-Funktion erwartet. Diese Funktion wurde durch Probieren einer trigonometrischen Fit-Funktion gefunden [48]. Entsprechend wurde eine Funktion der Form

$$f(Alt_{Teleskop}) = a + b \cdot \tan(c \cdot Alt_{Teleskop} + d) \quad (13)$$

an die Messwerte angelegt. Die Parameter a,b,c und d stellen hierbei die freien Parameter der Fit-Funktion $f(Alt_{Teleskop})$ dar. Die Fitparameter sind in Tabelle 3 festgehalten. Der rekonstruierte Alt-Winkel der PointingCCD wurde gemäß der Fit-Funktion aus Abbildung 27 a) zu

$$Alt_{PointingCCD} = Alt_{Teleskop} - f(Alt_{Teleskop}) \quad (14)$$

bestimmt. Das Vorzeichen in dieser Gleichung ergab sich aus dem Vergleich der Winkel der *reconstruct-images*-Funktion mit denen des *Drive*-Systems für einige lösbare Bilder. Das Ergebnis dieser Berechnung ist als Grafik in Abbildung 27 b) dargestellt. Hier wurde der mithilfe von Gleichung 14 berechnete Alt-Winkel der PointingCCD gegen den aus *reconstruct-images* bestimmten angetragen. Erwartet wird für diesen Plot als Zusammenhang der beiden angetragenen Größen natürlich die Identität, da die berechneten Winkel denen aus *reconstruct-images* entsprechen sollten. Bis zu einem mit *reconstruct-images* gefundenen Winkel bis zu 70° gilt dies bereits in guter Näherung. Für darüber befindliche Winkel wird der Zusammenhang allerdings leicht gekrümmt. Um ein optimales Resultat bei der Rekonstruktion zu erlangen, wurde ein linearer Fit der Form

$$g(Alt_{reco}) = a + b \cdot Alt_{reco} \quad (15)$$

für verschiedene Altitude-Winkelbereiche der Teleskoprichtung an die Daten aus Abbildung 27 b) gelegt. Alt_{reco} bezeichnet dabei entsprechend den Alt-Winkel der PointingCCD aus *reconstruct-images*. Dies ist gerechtfertigt, da sich die Steigung der Kurve nur sehr langsam verändert und in kleineren Winkelintervallen als konstant angesehen werden kann. Da die rekonstruierten Winkel im weiteren Verlauf für die nicht lösbaren Bilder nicht verfügbar sind, wurden an dieser Stelle die erhaltenen Fit-Parameter gespeichert und werden später in der Funktion 14 verwendet. Die Begründung dafür ist, dass der selbe Zusammenhang zwischen den berechneten und rekonstruierten Koordinaten auch für die nicht lösbaren Bilder erwartet wird. Die Intervalle des Teleskop-Alt-Winkels für die Rekonstruktion des Alt-Winkels der PointingCCD können Tabelle 5 im Anhang 8.2 ebenso wie die Parameter des jeweiligen linearen Fit entnommen werden. Für den linearen Fit wurden lediglich Alt-Winkel des Teleskops bis hin zu 76° betrachtet. Der Grund dafür ist, dass für den im folgenden Unterkapitel diskutierten Az-Winkel über Teleskop-Alt-Winkeln von 76° eine Rekonstruktion nicht mehr möglich war. Da nur Winkelpaare aus

Alt und Az interessieren, macht es keinen Sinn, für den Alt-Winkel ein größeres Intervall zu betrachten. Mithilfe der Parameter des linearen Fit wurden die aus Gleichung 14 berechneten Werte korrigiert, so dass sich statt des gekrümmten Verlaufs in Abbildung 27 b) bis auf kleine Ungenauigkeiten (Abbildung 29 a)) die Identität für diesen Zusammenhang ergibt. Dabei ist zu erwähnen, dass die Intervalle durch manuelle Justage festgelegt wurden. Dies bedeutet, dass der lineare Fit für ein Intervall einzeln durchgeführt und im Anschluss die Differenz aus dem so berechneten und rekonstruierten Winkel für dieses Intervall betrachtet wurde. Als entscheidende Größe bei der Bewertung der Präzision wurde die Standardabweichung der entstandenen Verteilung der Winkeldifferenz aus berechnetem und rekonstruiertem Alt-Winkel herangezogen.

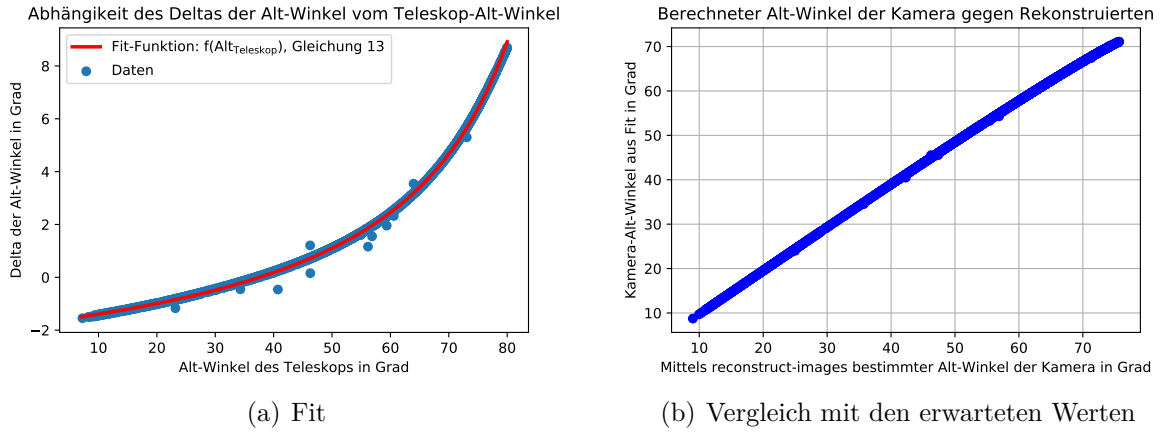


Abbildung 27: Rekonstruktion des Alt-Winkels der PointingCCD: a) Aus der Koordinatentransformation berechnete Differenz des Alt-Winkels zwischen Teleskop und PointingCCD angetragen gegen den Alt-Winkel des Teleskops mit angelegter Fit-Funktion; b) Vergleich der berechneten und rekonstruierten Alt-Koordinaten der PointingCCD

Für den Datensatz aus etwa 4000 lösbaren Bildern, welche nach den zuvor durchgeführten Qualitätsbeschränkungen übrig blieben, mit dessen Hilfe das Modell erstellt wurde, wird die schlussendlich bestimmte Differenz zwischen berechneten und rekonstruierten Alt-Koordinaten in Abbildung 29 a) präsentiert.

Rekonstruktion des Azimut-Winkels der PointingCCD

Das Vorgehen für die Azimut-Koordinate fand analog zu dem für die Alt-Koordinate der PointingCCD statt. Nach Bestimmung der Az-Winkel-Differenz aus PointingCCD - und Teleskop-Richtung wurde klar, dass kein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen dem Teleskop-Azimut-Winkel und der Differenz der Azimut-Winkel bestand. Entsprechend wurde diese Differenz erneut in Abhängigkeit des Alt-Winkels des Teleskops aufgetragen, was Abbildung 28 a) entnommen werden kann.

Dabei war es wegen des Verlaufs der Kurve schwierig, eine physikalische trigonometrische Funktion an den Verlauf der Messwerte zu legen. Um die Messwerte jedoch durch eine Funktion möglichst genau zu beschreiben, wurde

$$h(Alt_{Teleskop}) = a + b \cdot e^{c \cdot Alt_{Teleskop}} + d \cdot Alt_{Teleskop} + e \cdot (Alt_{Teleskop})^2 + f \cdot (Alt_{Teleskop})^3 \quad (16)$$

gewählt. Dabei stellen a,b,c,d,e und f die freien Parameter des Fit dar. Aus Abbildung 28 a) geht hervor, dass diese Funktion die Daten gut beschreibt. Die Parameter des durchgeführten Fit sind in Tabelle 3 abgedruckt. Bei genauerer Betrachtung der Abbildung 28 a) fallen wie in Abbildung 27 a) einige Datenpunkte - um die 10 an der Zahl - auf, welche von den restlichen relativ stark abweichen. Die Ursache für diesen Effekt ist nicht verstanden. Jedoch sind diese abweichenden Punkte zu rar im Vergleich zu den etwa 4000 restlichen, um den Fit zu verfälschen.

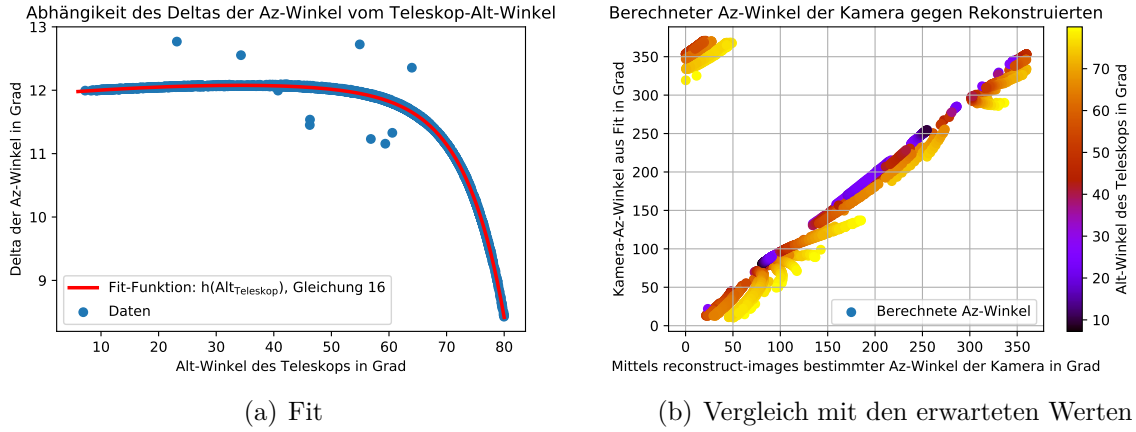


Abbildung 28: Rekonstruktion des Az-Winkels der PointingCCD: a) Aus der Koordinatentransformation berechnete Differenz des Az-Winkels zwischen Teleskop und PointingCCD angetragen gegen den Alt-Winkel des Teleskops mit angelegter Fit-Funktion; b) Vergleich der berechneten und rekonstruierten Az-Koordinaten der PointingCCD. Die Farbskalierung indiziert den Alt-Winkel des Teleskops.

Tabelle 3: Fit-Parameter für die in den Abbildungen 27 a) und 28 a) gezeigten Funktionen.

Parameter	$f(\text{Alt}_{\text{Teleskop}})$	$h(\text{Alt}_{\text{Teleskop}})$
a	$-4,37 \pm 0,04$	$11,940 \pm 0,011$
b	$1,16 \pm 0,10$	$24 \cdot 10^{-6} \pm 4 \cdot 10^{-6}$
c	$0,0041 \pm 0,0004$	$0,1480 \pm 0,0016$
d	$1,16 \pm 0,04$	$0,0072 \pm 0,0012$
e	-	$-7 \cdot 10^{-5} \pm 4 \cdot 10^{-5}$
f	-	$-6 \cdot 10^{-7} \pm 4 \cdot 10^{-7}$

Analog zu Abbildung 27 b) wurde Abbildung 28 b) erstellt. Die verwendete Funktion lautet wegen einer nicht erkennbaren Abhängigkeit der Winkeldifferenz vom Az-Winkel des Teleskops

$$Az_{\text{PointingCCD}} = Az_{\text{Teleskop}} + h(\text{Alt}_{\text{Teleskop}}). \quad (17)$$

Dabei wurde das Vorzeichen wie im Fall des Alt-Winkels der PointingCCD durch Vergleich der Winkel aus *reconstruct-images* und dem *Drive*-System gewählt. Bei Betrachtung von Abbildung 27 b) fällt sofort auf, dass der Verlauf stark von dem einer Einheitsgeraden abweicht. Es lag nahe, dass die verschiedenen Kurvenverläufe vom Alt-Winkel des Teleskops abhängen. Deshalb wurde der Abbildung die Farbskala, welche den Alt-Winkel

des Teleskops repräsentiert, beigefügt. Diese bestätigt den vermuteten Zusammenhang. Ersichtlich wird vor allem, dass die blau gefärbten, kleine Alt-Teleskop-Winkel zeigenden Abschnitte annähernd eine Einheitsgerade darstellen. Dies ist wegen des Gitters im Hintergrund gut zu erkennen. Die von dieser Einheitsgerade abweichenden Punkte entfernen sich mit wachsendem $Alt_{Teleskop}$ immer weiter von dieser. Daraus ergeben sich Offsets von bis zu 50° . Die Punkte links oben in der Abbildung befinden sich wegen des großen Offset der Werte bei hohen Alt-Winkeln des Teleskops an dieser Stelle und müssten im Prinzip um 360° in negative y-Richtung korrigiert werden.

Wie auch die Berechnung des Alt-Winkels der PointingCCD wurde nun für verschiedene Intervalle des Alt-Winkels des Teleskops eine lineare Funktion

$$i(Az_{Reco}) = a + b \cdot Az_{reco} \quad (18)$$

an die Daten in 27 b) gelegt. Hier versteht sich unter Az_{reco} der mithilfe von *reconstruct-images* bestimmte Az-Winkel der PointingCCD. Für geeignet gewählte Bereiche des Alt-Winkels ergab sich auch hier jeweils ein linearer Verlauf. Im Anhang 8.2 in Abbildung 41 ist diese für zwei verschiedene Intervalle des Alt-Winkels des Teleskops gezeigt. Es ist dabei das aus Abbildung 28 erwartete Verhalten zu erkennen. Die Datenpunkte liegen zwar für geeignet gewählte Winkelintervalle auf einer Geraden mit Steigung eins (siehe auch die entsprechende Tabelle 6 im Anhang), allerdings mit einem stets zunehmenden Offset. Des Weiteren musste bei der Selektion dieser Intervalle besonders darauf geachtet werden, dass es zu keinen Offsets wie links oben in der Abbildung kommt. Diese können später für die nicht lösbaren Bilder nicht korrigiert werden, da die an der x-Achse angetragenen rekonstruierten Koordinaten nicht vorhanden sind. Die einzige Möglichkeit zum Ausschluss dieser Werte stellte in bestimmten Winkelintervallen die Einschränkung des Az-Winkels des Teleskops dar. Die gewählten Winkelintervalle des Alt-Winkels des Teleskops sind zusammen mit der Begrenzung des Teleskop-Az-Winkels in Tabelle 6 im Anhang 8.2 abgedruckt. In der selben Tabelle befinden sich auch die entsprechenden Parameter der linearen Fit-Funktion $i(Az_{Reco})$.

Rekonstruktion für den zur Modellierung verwendeten Datensatz

Ein erster Test der Winkelberechnung wurde mit dem Datensatz der lösbaren Bilder, welche zum Erstellen des Modells verwendet wurden, durchgeführt. Dazu wurde zunächst die Differenz der berechneten und rekonstruierten Winkel als Histogramm dargestellt. Dieses ist in Abbildung 29 gezeigt.

Beim Vergleich beider Histogramme fällt zunächst auf, dass die Standardabweichung des Alt-Winkels nur etwa $\frac{1}{8}$ derer des Az-Winkels beträgt. Dies ist vermutlich zum einen dem Fakt geschuldet, dass sich die Abhängigkeit des Alt-Teleskop-Winkels stärker auf den berechneten Az-Winkel der PointingCCD auswirkt, was in erster Linie der Beschaffenheit des Koordinatensystems zuzuschreiben ist. Zum anderen gab es keinen modellierbaren Zusammenhang zwischen dem Az-Winkel des Teleskops und dem Az-Winkel der PointingCCD, welcher sich vermutlich auf das Ergebnis auswirkt. Ein weiterer Test des Modells bestand darin, die aus den berechneten Koordinaten der PointingCCD bestimmte Winkeldistanz zur Teleskopachse mit der in Kapitel 5.2 errechneten zu vergleichen. Diese Größe sollte erhalten sein. Dies ist in Abbildung 30 dargestellt.

Hier können zwei wichtige Informationen entnommen werden. Zunächst ist der Mittelwert des bestimmten Winkelabstands aus allen lösbaren Bildern auf $12,079^\circ$ zu beziffern. Er wird durch die vertikale gestrichelte, orangefarbene Linie in der Abbildung repräsentiert.

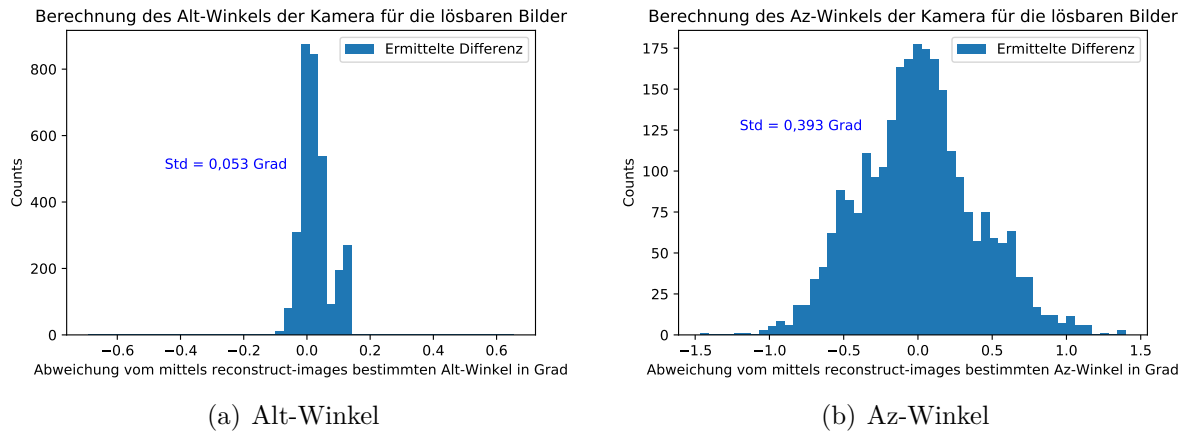


Abbildung 29: Differenz zwischen berechneten und rekonstruierten Winkeln: a) Alt-Winkel und b) Az-Winkel der PointingCCD.

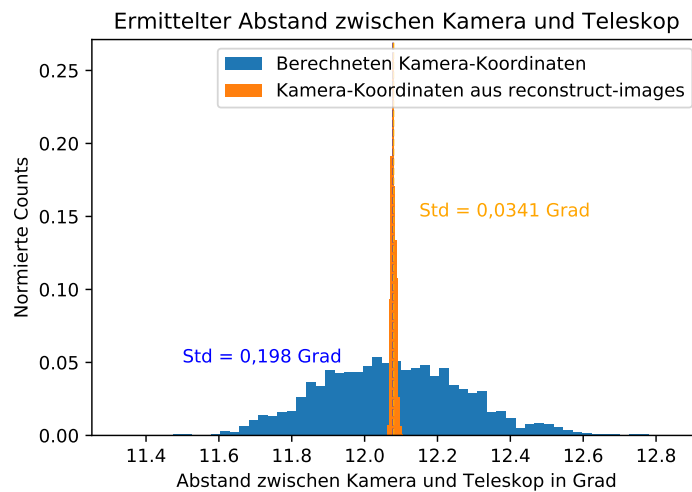


Abbildung 30: Winkelabstand zwischen Teleskop und PointingCCD: Vergleich zwischen berechneten und rekonstruierten Koordinaten

Für die berechneten Alt - und Az-Winkel der PointingCCD ergab sich der gleiche Mittelwert. Er ist in der Abbildung nicht analog zu den lösbaren Bildern gekennzeichnet, da sich die beiden Linien gegenseitig überdecken. Die Standardabweichung der berechneten Winkel ist etwa um einen Faktor sieben größer als im Fall der rekonstruierten Winkel. Es bleibt aber zu bedenken, dass im nächsten Kapitel zur Bestimmung des Abstandes zwischen PointingCCD und Mond genauso wie an dieser Stelle die *Seperation*-Funktion aus *astropy* verwendet wird. Entsprechend wird für diese später interessante Größe eine ähnlich große Streuung der Verteilung erwartet. Dies liegt daran, dass die einzige Fehlerquelle in den berechneten Winkeln liegt, da sowohl die Teleskoprichtung als auch die Position des Mondes ohne Fehler angenommen werden. Da das qualitative Verhalten des Einflusses des Mondes in Bezug auf seinen Abstand zur PointingCCD interessiert, ist eine höhere Präzision als eine Standardabweichung von $\approx 0,5^\circ$ auf diese Größe nicht erforderlich. Dies ist durch die in Abbildung 30 gegebene Standardabweichung von $\approx 0,2^\circ$ für die berechneten Winkel gewährleistet.

5.4. Test der Rekonstruktion

Für die Erstellung des Modells und bisherige Überprüfung wurden - wie in Kapitel 5.3 berichtet - nur die nach der Qualitätsprüfung übrigen lösbaren Bilder in Betracht gezogen. Allerdings bleibt zu berücksichtigen, dass es auch unter den aussortierten Bildern einige lösbare gab. 145 solcher lösbaren Bilder bildeten einen Vergleichsdatensatz, um auszuschließen, dass die Berechnung der Winkel nur wegen der Selektionseffekte auf einem bestimmten Datensatz funktioniert. Die Differenz für Alt - und Az-Winkel zwischen berechneten Koordinaten ist erneut als Histogramm aufgetragen und mit den Verteilungen für den zur Rekonstruktion verwendeten Datensatz verglichen. Dies geschieht in Abbildung 31. Das gleiche wurde in Abbildung 32 auch für den Winkelabstand zwischen Teleskop und PointingCCD durchgeführt.

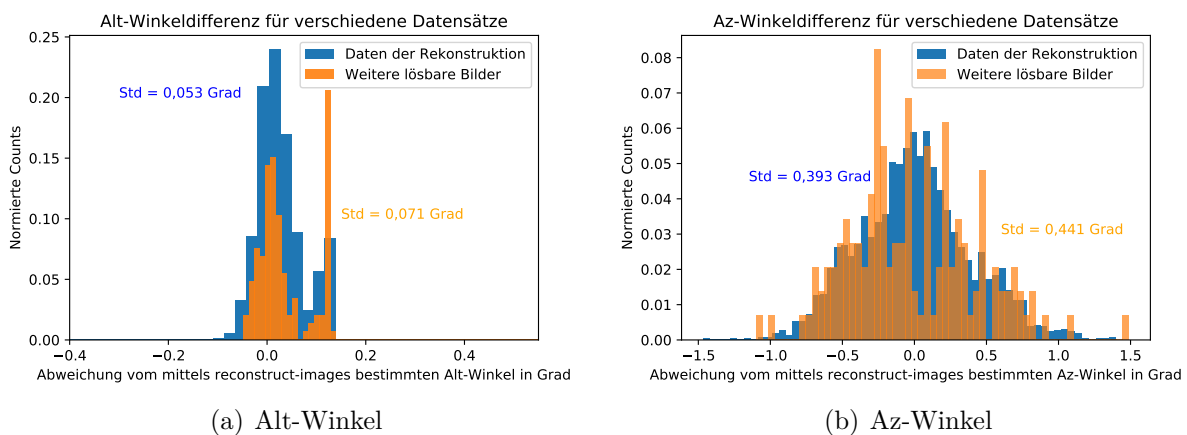


Abbildung 31: Differenz zwischen berechneten und rekonstruierten Winkeln: a) Alt-Winkel und b) Az-Winkel der PointingCCD für den Vergleichsdatensatz.

Verglichen mit dem Datensatz, auf dem das Winkel-Modell basiert, weisen sowohl Form als auch Standardabweichung der Verteilungen des Vergleichsdatensatzes ein analoges Verhalten auf. Besonders wichtig ist, dass auch hier die Breite der Verteilung in Abbildung 32 $0,25^\circ$ nicht überschreitet.

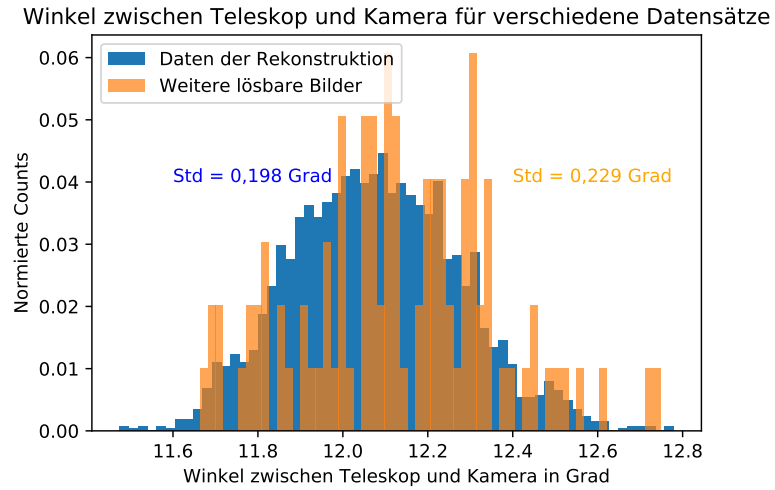


Abbildung 32: Winkelabstand zwischen Teleskop und PointingCCD für den Vergleichsdatensatz: Vergleich zwischen berechneten und rekonstruierten Koordinaten

Auf Grund dieses Resultats kann das Modell zur Winkelrekonstruktion für die nicht lösbaren Bilder im letzten Abschnitt dieser Arbeit angewendet werden.

6. Einfluss des Mondes auf die nicht lösbaren Bilder

In diesem letzten Kapitel soll nun die zuvor erarbeitete und getestete Winkelrekonstruktion der PointingCCD auf alle vorhandenen nicht lösbaren Bilder angewendet werden. Das zunächst größte Problem stellte es dar, für die nicht lösbaren Bilder eine ausreichende Anzahl an Übereinstimmungen mit dem *Drive*-System zu finden. Dies ist erneut notwendig, um an die Ausrichtung des Teleskops selbst zu gelangen und somit die Richtung der PointingCCD rekonstruieren zu können. In diesem Prozess wurden nur insgesamt 100 nicht lösbare Bilder gefunden, zu denen die Teleskopausrichtung ermittelt werden konnte. Bei diesen Bildern wurde explizit darauf geachtet, keine Aufnahmen des Teleskops beim Befinden in der Parkposition zu verwenden.

In Kapitel 4 erwies sich der RMS-Wert der Pixelintensität als ein geeignetes Maß für den in das Bild strahlenden Mond. Im Fall eines hohen RMS-Wertes wurden in Kapitel 4 als zwei Gründe überwiegend die Parkposition, aber auch externe Lichtquellen ausgemacht. Für einen hohen Mittelwert der Intensität hingegen konnten auch Wolken mit einem großen Intensitätsgradienten ausgemacht werden. Erst am Ende dieses Kapitels wird sich dabei bestätigen, dass es sich bei dem vermuteten externen Licht tatsächlich um das des Mondes handelt. Zum Beispiel in Abbildung 18 b) in Kapitel 4 ist dies zu sehen. Deshalb wurde in diesem Kapitel zunächst nur der RMS der Intensität zum Feststellen eines ins Bild einfallenden Mondlichts als Parameter herangezogen. Zudem ist nicht ganz klar, ob der Mond in der eben genannten Abbildung den alleinigen Grund zum Scheitern des Fit darstellt oder ob die vermuteten Wolken nicht alleine bereits zu einem Scheitern geführt hätten. Der am häufigsten angenommene Intensitätswert wurde in einer ähnlichen Größenordnung wie der Mittelwert verortet und wurde somit ebenso wenig in die Betrachtung mit einbezogen. Die weiteren Parameter, namentlich Temperatur, Verkippungswinkel θ und Verhältnis der Achsen der Sterne sind unabhängig vom Mond.

6.1. Untersuchung der nicht lösbaren Bilder

Folglich wurden für die nicht lösbaren Bilder in Abbildung 33 die RMS-Werte in Abhängigkeit des Abstandes zum Mond aufgetragen. Der Abstand wurde dabei mit der *Seperation*-Funktion zwischen den berechneten AltAz-Koordinaten der PointingCCD und denen des Mondes ermittelt. Um die Position des Mondes zu bestimmen, wurde die *astropy*-Funktion *get_moon* (siehe [49]) verwendet. Anschließend wurden die erhaltenen Koordinaten mithilfe von *astropy.coordinates* aus dem entsprechenden *Python*-Modul in das AltAz-Frame, welches als Bezugspunkt La Palma hat, umgerechnet (siehe auch [50]). Ebenso in der Abbildung gekennzeichnet ist die Mondphase als Farbskala. Die Mondphase wurde mithilfe zweier Funktionen aus dem *Python*-Modul *astroplan* ermittelt (siehe hierzu [51]). Darüber hinaus stellen die gepunkteten Markierungen die Daten, während sich der Mond über dem Horizont befand, dar. Im Gegensatz dazu repräsentieren die Kreuze einen Mond unterhalb des Horizonts. Als Begrenzung, ob sich der Mond ober- oder unterhalb des Horizonts befindet, wurde ein Altitude-Winkel des Mondes von -12° gewählt. Bei einem Winkel $> -12^\circ$ befindet sich der Mond dabei über dem Horizont.

Bei Betrachtung von Abbildung 33 fallen zwei Dinge sofort auf. Zunächst sind beinahe all die Aufnahmen bei einem sich über dem Horizont befindlichem Mond aufgezeichnet worden. In Zahlen beträgt der Anteil der Bilder mit Mond über dem Horizont 91 Prozent. Dies könnte allerdings der Tatsache, dass mehr Bilder bei einem Mond über dem Horizont aufgenommen wurden, geschuldet sein. Um dies auszuschließen, ist in Abbildung 45

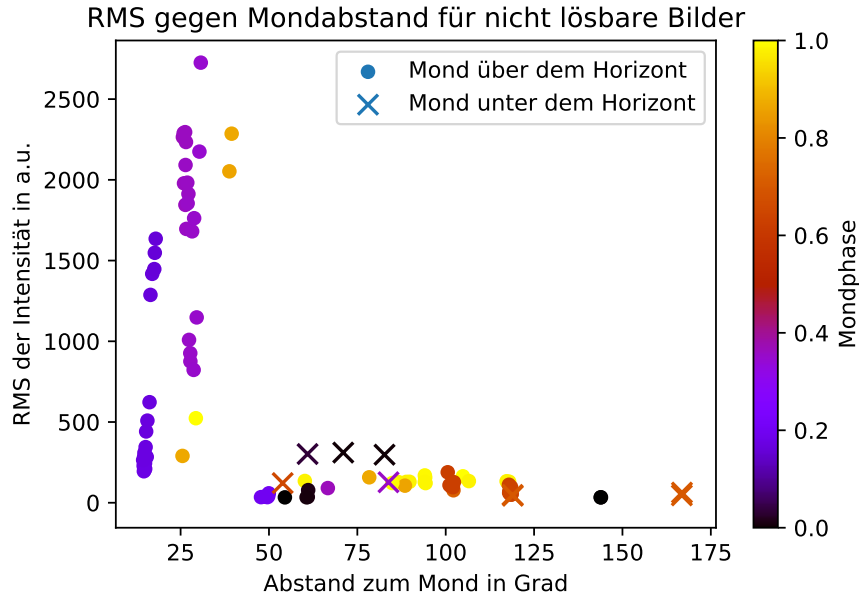


Abbildung 33: RMS der Intensität für die nicht lösbar Bilder in Abhängigkeit des Abstands zwischen PointingCCD und Mond. Die Farbskala stellt die Mondphase dar, gekreuzte Markierungen repräsentieren einen sich unter dem Horizont befindlichen Mond.

im Anhang 8.3 ein Histogramm des Abstandes zum Mond für lösbar Bilder abgedruckt. Diesem ist zu entnehmen, dass während des Mondes oberhalb des Horizonts etwa gleich viele Bilder gemacht wurden wie im Fall eines Mondes unter dem Horizont. In Zahlen wurden von den insgesamt etwa 4000 lösbar Bildern 2073 Bilder bei einem sich unter dem Horizont befindlichen und 1835 bei sich über dem Horizont befindenden Mond aufgenommen. Die lösbar Bilder scheinen von der Position des Mondes folglich unbeeinflusst zu sein, während hingegen im Fall der nicht lösbar Bilder der Mond überwiegend über dem Horizont steht.

Die Bilder, welche bei einem Mond unter dem Horizont aufgenommen wurden, sind kurz zu diskutieren. Die drei durch schwarze Kreuze verkörpert Bilder wurden bei einer zu hohen Kamertemperatur bei mehr als 0°C aufgenommen. Entsprechend sind sie vermutlich wegen zu vieler Bildfehler nicht lösbar. Eines dieser Bilder wurde bereits in Kapitel 4 als Abbildung 19 gezeigt. Die anderen vier Bilder mit Mond unter dem Horizont werden wieder durch Wolken verursacht. Dies kann auch an dem sehr niedrigen RMS-Wert dieser Bilder plausibel gemacht werden. Im Anhang 8.3 unter Abbildung 46 ist dazu eines der beiden Bilder für den höchsten Abstand zum Mond aufgenommen worden. Zu sehen ist dort insbesondere, dass das Teleskop noch nicht vollständig aus der Parkposition ausgefahren ist und deshalb ein kleiner schwarzer Rand mit dem Berg im Bild zu sehen ist. Zusätzlich sind in diesem Bild einige lang gezogene Spots zu erkennen, deren Ursache nicht genau zu identifizieren war.

Die erste Feststellung liegt nun also darin, anhand des untersuchten Datensatzes festzuhalten, dass vor allem Bildfehler und Wolken ein Bild unlösbar machen, falls der Mond unter dem Horizont des Teleskops ist. Dies stand so zu erwarten, da der Mond in diesem Fall keinen Einfluss haben sollte.

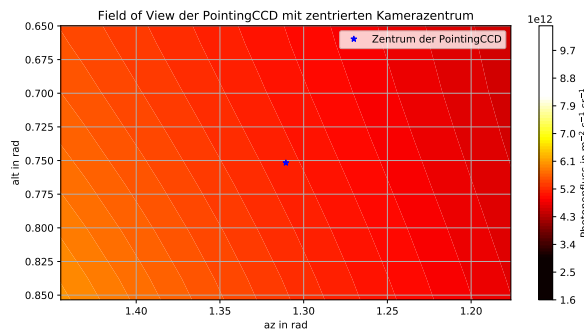
6.1.1. Einfluss des Abstands zum Mond

Die zweite Erkenntnis aus Abbildung 33 ist die Tatsache, dass für Abstände zum Mond $< 40^\circ$ signifikant höhere RMS-Werte angenommen werden als für größere Winkelabstände. Besonders fällt auf, dass in diesem Bereich die Datenpunkte zu Clustern gehören. Dies bedeutet, dass jeweils die Messpunkte, welche sich in einer horizontalen Reihe befinden, zeitlich direkt hintereinander aufgenommen wurden. Deshalb weisen sie eine ähnliche Charakteristik auf. Es sollte daher noch kurz darauf hingewiesen werden, dass die zahlreich scheinenden Messpunkte in diesem Intervall nur zu fünf verschiedenen Ereignissen gehören.

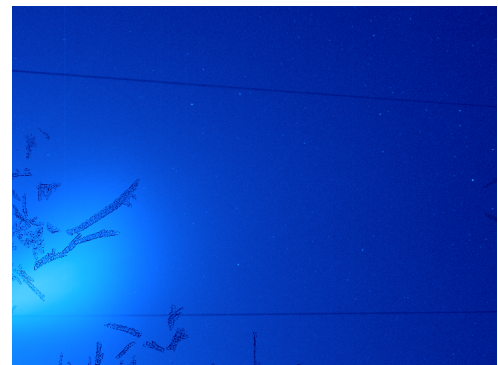
Datenpunkte bei Mond über dem Horizont im Bereich unter 40° Abstand

Die Bilder mit hohen RMS-Werten (> 300 arb. unit) in diesem Bereich wurden alle mittels *SAOImageDS9* betrachtet. All diese Bilder wiesen dabei eindeutig einfallendes externes Licht auf. Ob es sich dabei tatsächlich um Mondlicht handelte, wurde mithilfe des von Christopher van Eldik implementierten *Python*-Moduls *moonlightmap* untersucht. Dieses Modul erlaubt es, den erwarteten Photonenfluss des Mondlichts zu einem bestimmten Zeitpunkt auf eine dreidimensionale Projektion abzubilden. Genauso sind zusätzlich die Position des Mondes und des Zentrums der PointingCCD angetragen (siehe Abbildung 43). Wichtig ist hierbei, dass keine Atmosphäreneffekte in diesem Modul berücksichtigt werden.

Wird nun auf die dreidimensionale Projektion verzichtet, so kann in Näherung der Bildausschnitt der PointingCCD in einer solchen *moonlightmap* dargestellt werden. In Abbildung 34 a) ist dies für ein Bild mit externem Lichteinfluss geschehen, welches selbst in der selben Abbildung in Teil b) abgebildet ist.



(a) *moonlightmap*



(b) Bild der PointingCCD

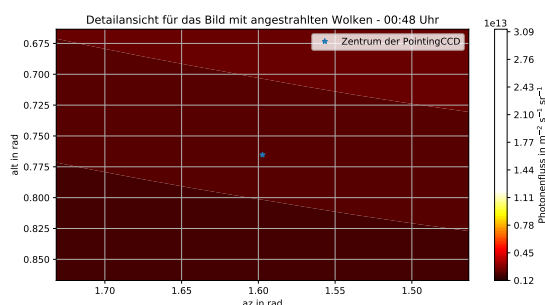
Abbildung 34: Sichtfeld der PointingCCD. In a) ist das in der *moonlightmap* für den Zeitpunkt der Aufnahme simulierte Bild zu sehen und in b) die reale Aufnahme.

Interessant ist in dieser Abbildung der Vergleich des Gradienten der Intensität. In Abbildung 34 a) ist der Fluss durch eine Farbskala ausgedrückt. In der linken unteren Ecke ist dabei der erwartete Fluss des Mondlichtes am höchsten und nimmt in grober Näherung radial von diesem Eckpunkt ausgehend ab. Die Intensität am rechten Bildrand ist am niedrigsten. Abbildung 34 b) kann ein ähnliches Verhalten entnommen werden. Daraus geht hervor, dass das externe Licht in dieser Abbildung tatsächlich vom Mond erzeugt wird. Deutlicher wird dies, falls der Bildausschnitt größer gewählt wird, so dass die Position des Mondes ebenso eingezeichnet ist. Die entsprechende Abbildung 42 ist im Anhang

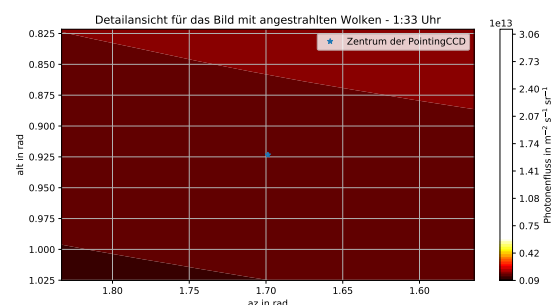
8.3 gezeigt. Für die anderen Bilder mit externem Lichteinfall in diesem Datensatz ergab sich das selbe Bild, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Bilder mit einem Mondabstand von unter 40° wegen des Einflusses des Mondes nicht lösbar sind.

Datenpunkte bei Mond über dem Horizont im Bereich über 40° Abstand

Ab etwa 40° sinkt der RMS-Wert sprunghaft ab. Wegen des Mangels an verwertbaren Daten ist allerdings die Form der Abnahme nicht zu ermitteln. Die Mehrheit der Bilder befindet sich bei RMS-Werten von unter 50 arb. unit. Dies entspricht ungefähr der in Kapitel 4.3 gefundenen Untergrenze für den RMS-Wert. Das spricht dafür, dass die nicht lösbaren Bilder für Abstände vom Mond von mehr als 40° vor allem durch Wolken, nicht aber primär durch den Mond beeinflusst werden. Um den Einfluss des Mondes als Faktor zu untersuchen, wurde erneut die *moonlightmap* bemüht. Dies geschah für das bereits in Kapitel 4 in Abbildung 18 b) gezeigte Bild der PointingCCD. In diesem wird ein schwaches externes Hintergrundlicht erwartet, welches zu dem deutlich sichtbaren Schattenwurf der Kabel führt. In Abbildung 43 im Anhang ist eine vollständige *moonlightmap* abgedruckt, aus der bei grober Betrachtung kein Mondlicht im Bereich der Kamera auszumachen ist. Deshalb wurde für dieses Bild genauso wie ein knapp eine Stunde später aufgenommenes eine Detailansicht der *moonlightmap* erstellt. Für das Bild aus Abbildung 18 b) ist dies in Abbildung 35 a) gezeigt. Daneben ist das knapp eine Stunde nach dem Bild in Abbildung 35 b) aufgenommene Bild abgedruckt. Das von der PointingCCD genommene Bild dazu ist im Anhang unter Abbildung 44 a) gezeigt.



(a) Aufnahmezeit: 0:48 Uhr



(b) Aufnahmezeit: 1:33 Uhr

Abbildung 35: *moonlightmaps* für zwei in der selben Nacht aufgenommenen Bilder mit einem Abstand zum Mond von 118°

Aus Abbildung 35 geht hervor, dass der Gradient des Mondlichts gering zu sein scheint. Allerdings ist hier die Skalierung des vom Mond verursachten Photonflusses zu beachten. Dieser Fluss sorgt für ein in das Bild sichtbar einfallendes Mond. Dabei ist der Fluss für das in Abbildung 18 b) gezeigte Bild geringer als derjenige des in Abbildung 18 a) dargestellten Bildes. Das in Abbildung 44 b) gezeigte Bild ist ebenso in der selben Nacht aufgenommen worden und ebenfalls nicht lösbar. Hier zeigte die *moonlightmap* lediglich einen sich unter dem Horizont befindlichen Mond, weshalb die Auswertung dieses Bildes nicht sinnvoll war. Der Mond scheint bei diesem Bild ebenso die Wolken leicht anzustrahlen. Allerdings ist immer eine Definition des noch sichtbaren Mondes zu wählen. In diesem Fall scheint sich der Mond noch über dem Horizont befunden zu haben. Allgemein kann festgehalten werden, dass bei den eben genannten Bildern vermutlich bereits die Wolken ohne den Mondeinfluss zum Scheitern des Fit geführt hätten, genauer nachgeprüft werden

konnte dies jedoch nicht.

Die Bilder aus der eben genannten Nacht haben alle einen Abstand von etwa 118° zum Mond. Sie stellen die einzigen weiteren Bilder mit Mondeinfluss dar, welche gefunden werden konnten. Warum allerdings auch bei diesem großen Abstand im Vergleich zu den vielen vom Mond beeinflussten Bildern bei Abständen von unter 40° der Mond einen Einfluss nimmt, konnte im Zuge dieser Arbeit nicht mehr geklärt werden.

6.1.2. Einfluss der Mondphase

Aus Abbildung 33 geht hervor, dass beinahe alle der Bilder bei einem Mondabstand von weniger als 40° eine Mondphase im Bereich zwischen 20 und 40 Prozent aufweisen. Lediglich zwei Punkte fallen dort wegen einer Phase von über 70 Prozent aus dem Rahmen. Problematisch ist nun erneut, dass nur so wenig Daten für die nicht lösbaren Bilder vorliegen. Dass beinahe alle interessanten Messpunkte eine Phase zwischen 20 und 40 Prozent haben, könnte zufällig bedingt sein oder dadurch, dass *MAGIC* bei zu vollem Mond nicht nahe des Mondes observiert. Die Bilder, welche in einem Abstand von mehr als 40° zum Mond aufgenommen werden, zeigen hingegen Mondphasen über die gesamte Bandbreite. Die bei einem Abstand von 118° aufgenommenen Bilder weisen zum Beispiel eine Mondphase von 50 Prozent. Anhand von Abbildung 33 kann entsprechend nicht auf einen Einfluss der Mondphase auf die Lösbarkeit eines Bildes geschlossen werden. Deshalb wurde Abbildung 36 erstellt, welche den RMS der Intensität in Abhängigkeit von der Mondphase zeigt. Die Farbskalierung wird dieses Mal über den Abstand zum Mond bestimmt.

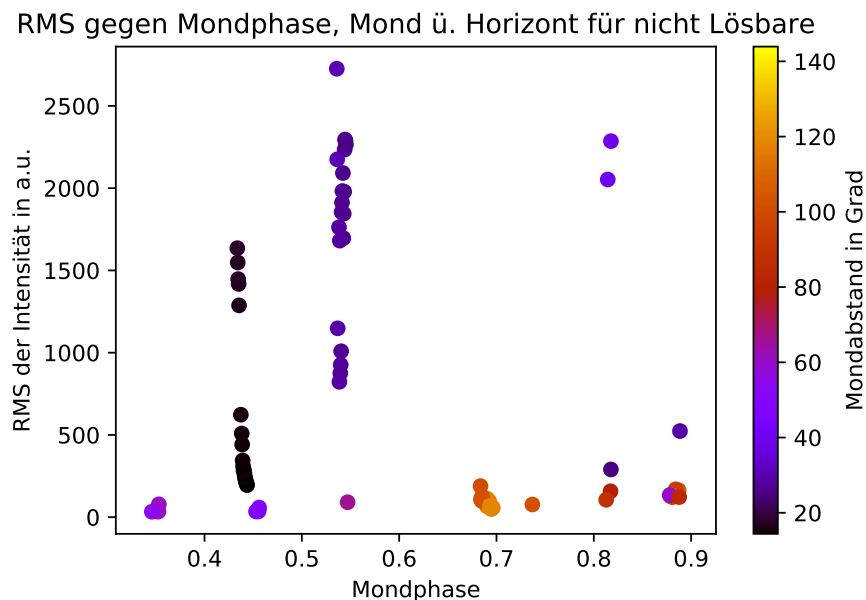
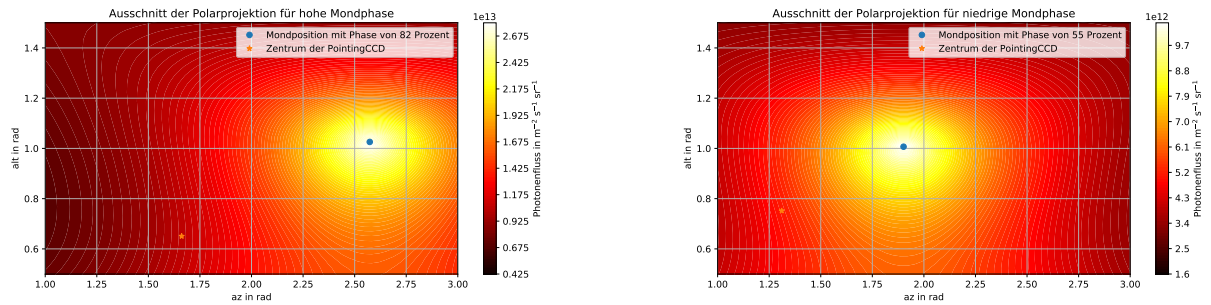


Abbildung 36: Abhängigkeit des RMS der Intensität von der Mondphase.

Bei Betrachtung dieser Abbildung fallen in erster Linie wieder die Verläufe der Datenpunkte in Clustern auf. Daneben gibt es zum Beispiel die hellblauen und lilafarbenen Datenpunkte. Diese unterscheiden sich kaum bezüglich ihres Abstandes. Allerdings gibt es Punkte dieser Farbe, welche bei einer geringen Mondphase niedrige RMS-Werte besitzen als auch Punkte, die RMS-Werte in der gleichen Größe bei deutlich höherer Mondphase

aufzeigen. Deshalb kann anhand eines solchen Plots kein Einfluss der Mondphase festgestellt werden.

Ein letzter Versuch machte erneut von der *moonlightmap* Gebrauch. Das Ergebnis ist in Abbildung 37 dargestellt. Hierzu wurden zwei Bilder mit ähnlichem Abstand zum Mond und RMS-Wert aus Abbildung 33 verglichen. Die Daten stehen unter dem jeweiligen Bild in Abbildung 37.



(a) Mondabstand: $39,4^\circ$, Mondphase: 82 %, RMS: 2286 arb. unit (b) Mondabstand: $25,6^\circ$, Mondphase: 55 %, RMS: 2265 arb. unit

Abbildung 37: *moonlightmap* für zwei verschiedene nicht lösbare Bilder mit unterschiedlicher Mondphase

Auch hier kann kein entscheidender Unterschied in Hinblick auf den Verlauf der Gradienten der Intensität des Mondlichts gefunden werden. Auffällig ist allerdings, dass der Photonenfluss für einen volleren Mond etwa um einen Faktor von 2,5 höher ist als im Fall einer niedrigeren Mondphase. Da aber der Gradient des Lichts in beiden Fällen gleich verläuft und auch im Fall der geringen Mondphase das emittierte Licht vermutlich deutlich heller als der Rest des Sternenhimmels ist, ist in beiden Fällen das Bild der PointingCCD nicht mehr lösbar. Festgehalten werden kann also, dass wegen eines ähnlichen Gradienten der Intensität des Mondlichts der Abstand zum Mond von deutlich höherer Wichtigkeit als die Mondphase ist. Letztere nimmt praktisch keinen Einfluss. Die zu Abbildung 37 gehörigen Bilder der PointingCCD sind in Abbildung 47 im Anhang 8.3 gezeigt.

6.2. Vergleich mit den lösbaren Bildern

Um eine abschließende Aussage treffen zu können, ist allerdings noch ein Vergleich mit den lösbaren Bildern notwendig. Hierzu ist der zu Abbildung 33 analoge Plot für die lösbaren Bilder in Abbildung 38 gezeigt. An dieser Stelle musste jedoch auf eine kombinierte Darstellung für die Bilder, welche bei einem sich über respektive unter dem Horizont befindlichen Mond aufgenommen wurden, verzichtet werden. Der Grund hierfür ist, dass wegen der etwa zehnfach höheren Anzahl an Daten nichts mehr in den Plots zu erkennen gewesen wäre.

Zu Beginn ist klar ersichtlich, dass beide Verteilungen zu verschiedenen Winkeln hin verschoben sind. So liegen die Datenpunkte für den sich über dem Horizont befindlichen Mond zu kleineren Winkeln hin verschoben als die für den Mond unter dem Horizont. Dies stand so zu erwarten, da das Teleskop oberhalb des Horizonts ausgerichtet wird. Die Auftragung der Winkelabstände als Histogramm für die lösbaren Bilder ist im Anhang 8.3 unter Abbildung 45 zu finden. Die Werte der Mondphasen liegen allerdings auch hier ohne ersichtlichen Zusammenhang verteilt und haben offenbar auf die lösbaren Bilder keinen

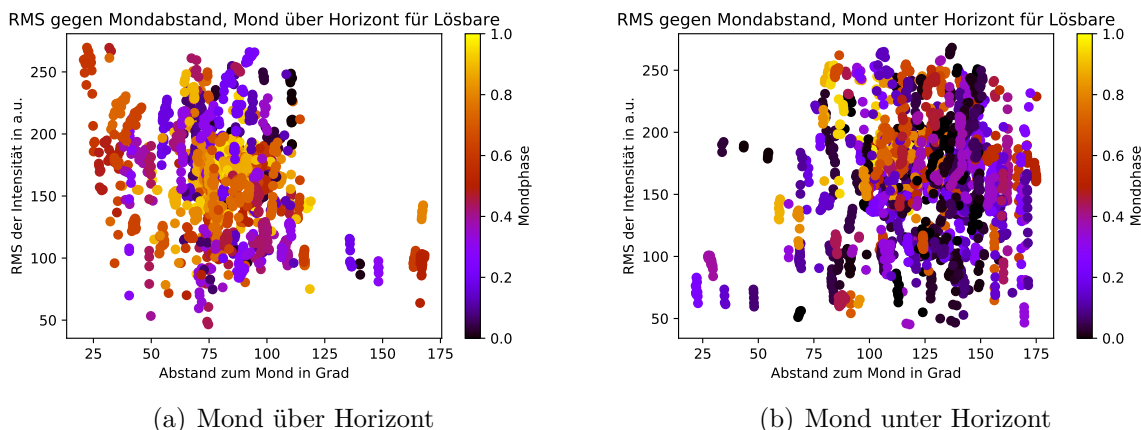


Abbildung 38: RMS der Intensität für die lösbaren Bilder in Abhängigkeit des Abstands zwischen PointingCCD und Mond. Die Farbskala stellt die Mondphase dar.

Einfluss. Deutlich auffälliger ist jedoch, dass es in beiden Teilen der Abbildung beinahe keine Aufnahmen für Abstände zum Mond von weniger als 25° gibt, was wahrscheinlich wieder dadurch zu erklären ist, dass das Teleskop nicht zu nah an den Mond gerichtet wird [33]. Insgesamt gibt es nur sehr wenige Bilder mit Abständen zum Mond von weniger als 40° . Genauer untersucht wurde diese Vermutung in Abbildung 39. Diese wurde aus den Datensätzen der lösbaren und nicht lösbaren Bilder für einen Mond über dem Horizont betrachtet. Gerechtfertigt wird dies durch die Tatsache, dass es keine nicht lösbaren Bilder mit einem Mond unter dem Horizont gibt, welche durch den Mond beeinflusst wurden. Die verschiedenen Farben geben verschiedene Mondphasen an, um noch einmal zu bestätigen, dass keine erkennbare Abhängigkeit von der Mondphase vorliegt. Die Intervalle der Mondphase wurden dabei so gewählt, dass jedes der Intervalle ungefähr ein Drittel der 100 nicht lösbaren Bilder enthält. Die Größe der Punkte skaliert linear mit der Anzahl der in den jeweiligen Datenpunkt einfließenden Gesamtzahl an Bildern. Die neben einigen Punkten angetragenen Zahlen entsprechen in ihrer Farbe jeweils dem Punkt, auf den sie sich beziehen. Diese Zahlen geben die gesamte Anzahl an Bildern, welche in diesen Punkt eingeflossen sind, an und sollen so ein Gefühl für die hinter den Punkten stehende Statistik vermitteln. Die Größe der Bins der x-Achse wurde zu 3° gewählt.

Gezeigt ist in Abbildung 39 der Abstand zum Mond an der x-Achse. Dagegen ist an der y-Achse der Anteil der lösbaren Bilder an der Gesamtzahl der Bilder (d.h. die Summe aus lösbaren und nicht lösbaren Bildern) aufgetragen.

Der erste auffallende Bereich liegt bei Mondabständen von weniger als 40° . Hier liegen sehr wenige Bilder bei einem verschwindenden Anteil von lösbaren Bildern. Die Gesamtstatistik ist jedoch ebenso gering. Dies ist der bereits festgestellten Tatsache geschuldet, dass es für kleine Abstände zum Mond beinahe keine Datenpunkte in den Plots der lösbaren Bilder gibt. Die Farben der Punkte in diesem Intervall decken alle drei Mondphasen ab. Dies verstärkt nochmals die Vermutung, dass die Mondphase im Vergleich zu dem Einfluss des Abstandes zum Mond vernachlässigbar klein ist.

Das Winkelintervall zwischen 40° und 100° wird dagegen von den lösbaren Bildern dominiert. Hier ist die Statistik sehr hoch und nicht lösbare Bilder machen einen vernachlässigbaren Einfluss aus. Hervorgehoben sei hier, dass es sich dabei um das erhoffte Ergebnis handelt. Die Winkelbereiche, in welchen die nicht lösbaren Bilder dominieren, sollten nämlich in der Statistik nur schwach auftreten.

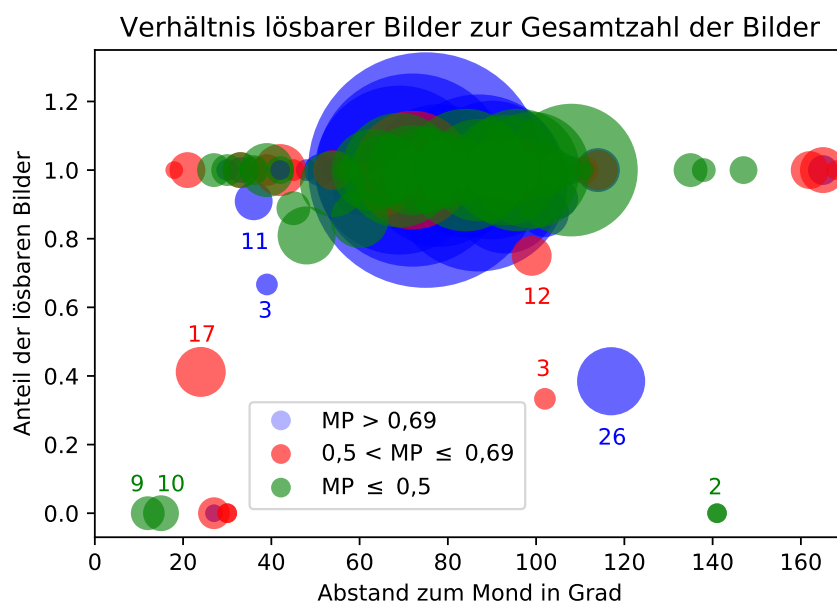


Abbildung 39: Verhältnis zwischen der Anzahl der lösbaren Bilder und der Summe aller verfügbaren Bilder für verschiedene Winkelabstände zum Mond. Die Größe der Punkte nimmt als ein Maß für die insgesamt vorhandene Zahl an Bildern linear mit der Zahl der Bilder zu. Die drei verschiedenen Farben repräsentieren drei unterschiedliche Bereiche von Mondphasen; MP steht dabei für Mondphase. Die Zahlen neben den Datenpunkten geben für den entsprechenden Punkt die gesamte Zahl an verfügbaren Bildern an. Die Größe der Bins wurde auf 3° gesetzt.

Für größere Abstände zum Mond gibt es weitere wenige Punkte mit geringer Statistik. Dies liegt daran, dass nur Bilder, bei denen der Mond über dem Horizont stand, betrachtet wurden. Deswegen gibt es wegen der Ausrichtung des Teleskops über dem Horizont kaum Aufnahmen bei Mondabständen $> 125^\circ$. Zuletzt soll hier noch der Punkt bei $\approx 120^\circ$ diskutiert werden, welcher mit insgesamt 26 Bildern zu Buche schlägt. Die nicht lösbaren Bilder machen dort etwa 60 Prozent der Bilder aus. Bei Betrachtung der Bilder in diesem Intervall ergab sich, dass alle bis auf zwei zu diesem Punkt beitragenden Bildern in der selben Nacht aufgenommen worden. Diese Bilder wurden bereits im Vorlauf diskutiert. Es handelt sich dabei unter anderem um das in Abbildung 18 b) gezeigte Bild. Die Ursache für einen Mondeinfluss bei solch hohen Abständen konnte nicht im Detail verstanden werden. Abschließend sei festgehalten, dass die verschiedenen Kolorierungen entsprechend der verschiedenen Mondphasen ohne erkennbaren Zusammenhang in dem Plot liegen. Folglich kann der Einfluss der Mondphase tatsächlich vernachlässigt werden.

6.3. Fazit

In diesem Kapitel ergab sich zunächst anhand des dominanten Anteils von während eines über dem Horizont stehenden Mondes unter den nicht lösbaren Bildern, dass jener eine Rolle bei der Lösbarkeit der Bilder spielt. Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe der im vorherigen Kapitel entwickelten Rekonstruktion der Koordinaten der PointingCCD herausgefunden, dass für einen Abstand zum Mond von weniger als 40° externes - erwiesenermaßen durch den Mond verursachtes - Licht in das Bild einfällt und es somit unlösbar macht. Für Abstände zum Mond von mehr als 40° ist der Mond ebenso in einer Serie von Bildern als beeinflussender Faktor in Erscheinung getreten. Sein Einfluss für hohe Abstände von der PointingCCD konnte allerdings nicht verstanden werden. Ein Einfluss der Mondphase konnte nicht ermittelt werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zum Beginn dieser Arbeit wurde untersucht, ob die Einflüsse auf Bilder, welche die *reconstruct-images*-Funktion nicht lösen kann, verstanden werden können. Als Hauptursachen wurden zu wenige im Bild gefundene Sterne genauso wie zu viele Bildfehler und zu hohe Bildfeldrotation ausgemacht. Bilder mit zu hohen Temperaturen des Kamera-Chips wurden genauso aussortiert wie jene mit zu hoher Bildfeldrotation. Wegen zu weniger gefundener Sterne allerdings konnten die meisten Bilder nicht gelöst werden. Der Hauptgrund für zu wenige gefundene Sterne liegt darin begründet, dass das Teleskop eingeparkt war. Da beim MST des CTA die PointingCCD wegen der Kopplung an das *Drive*-System des Teleskops keine Aufnahmen in dieser Parkposition nehmen wird, wurden diese Bilder so gut wie möglich aussortiert und nicht weiter beachtet. Auch atmosphärische Effekte in Form von Wolken konnten zu wenigen Sternen führen.

Der Hauptteil dieser Arbeit galt allerdings dem Einfluss des Mondlichts auf die Aufnahmen. Dabei fiel zunächst auf, dass es sowohl nicht lösbare als auch lösbare Bilder mit Einfluss des Mondes gab. Welche Effekte im Detail dazu führen, dass manche solcher Bilder lösbar sind und andere nicht, konnte nicht ermittelt werden. Extern einfallendes Licht überdeckt wegen seiner hohen Intensität eine Vielzahl an Sternen. Analysiert wurde im Genaueren die Einflussnahme in Abhängigkeit vom Abstand zwischen PointingCCD und Mond sowie der Mondphase. Um den Abstand der PointingCCD vom Mond für die interessierenden nicht lösbaren Bilder zu ermitteln, wurde ein Modell entwickelt, um die Richtung der PointingCCD aus der Richtung des Teleskops zu bestimmen.

Diese berechneten Koordinaten lassen eine Bestimmung des interessierenden Abstandes mit einer Präzision von ungefähr einem Viertel Grad zu. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine solche Präzision ausreichend, da der Abstand zum Mond quantitativ untersucht werden soll. Sollte in Zukunft eine höhere Präzision notwendig sein, kann das Modell allerdings verbessert werden. Ein erster Schritt dazu wäre, mehr Pointing-Bilder mit verkippter PointingCCD für das Modell zu verwenden, um die Statistik zu verbessern. Des Weiteren bereitete vor allem die Rekonstruktion des Az-Winkels der PointingCCD Probleme. Hier wäre es sicher möglich, die Abhängigkeit zum Az-Winkel des Teleskops besser zu verstehen als in dieser Arbeit. Entsprechend könnte das Modell für diesen Winkel angepasst werden.

Im letzten Teil der Arbeit wurde zunächst der Abstand zwischen Mond und PointingCCD untersucht. Hier wurde anhand der zur Verfügung stehenden Daten herausgefunden, dass der Mond für Abstände von weniger als 50° bei fast allen nicht lösbaren Bildern eindeutig ins Bild der PointingCCD fällt. Für über diesem Wert liegende Bilder übten Wolken einen Einfluss aus. Ein Zusammenhang zur Mondphase konnte nicht gefunden werden.

Problematisch ist allerdings die geringe Statistik, welche dieses Ergebnis stützt. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass für viele nicht lösbare Bilder keine Teleskopausrichtung aus dem *Drive*-System gefunden werden konnte. Hier konnte kein Fehler im Code, welcher zu diesen Bildverlusten führt, gefunden werden. Die Lösung für dieses Problem läge zum einen darin, PointingCCD und Teleskop zu synchronisieren. Eine andere Möglichkeit stellt lediglich die Aufnahme weiterer Pointing-Bilder bei verkippter PointingCCD dar. Dies verbessert zwar den Anteil der auswertbaren Bilder nicht, aber möglicherweise kann auf Grund der höheren absoluten Bildzahl ein erkennbarer Zusammenhang zwischen Abstand zum Mond und ins Bild fallendem Licht gefunden werden. In dieser Arbeit konnte bisher anhand des RMS-Werts der Intensität zunächst scheinbar ein binärer Übergang an einem Grenzwert von 40° ermittelt werden. Allerdings erga-

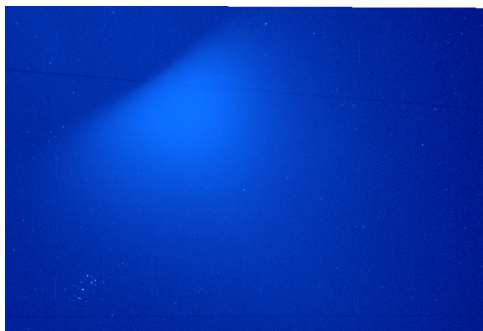
ben sich auch für etwa 118° Mondabstand Bilder, welche von diesem beeinflusst wurden. An dieser Stelle wäre eine höhere Gesamtstatistik von entscheidendem Vorteil, um den Einfluss des Mondes bei größeren Abständen zur PointingCCD besser verstehen zu können. Für genauere Studien könnte darüber hinaus die *moonlightmap* genutzt werden. Insbesondere könnten die atmosphärischen Effekte durch Vergleich von erwartetem und tatsächlichem Mondlicht besser verstanden werden. Gegebenenfalls könnte das Modul um atmosphärische Effekte erweitert werden.

8. Anhang

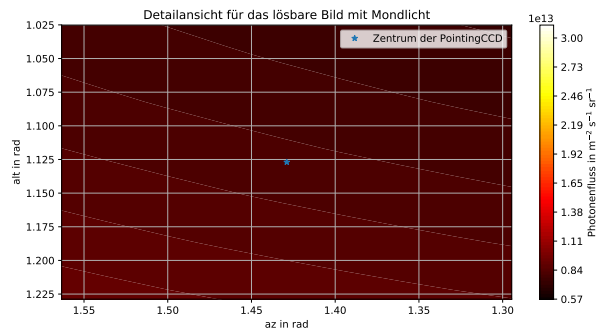
8.1. Qualitätsprüfung

Tabelle 4: Übersicht über die Zahl aussortierter Bilder in Abhängigkeit der Beschränkung der einzelnen Parameter. Der Punkt vlt. Bildfehler in der drittletzten Zeile sagt aus, dass der Zusammenhang zwischen dem RATIO-Wert und den Bildfehlern nicht eindeutig belegt werden konnte.

Grenze	Parameter	Parameterwert	# aussortierter Bilder	Aussortierte Effekte
Obergrenze	RMS_{int}	270 arb. unit	1337	Parkposition, Licht
Untergrenze	RMS_{int}	45 arb. unit	460	Wolken
Obergrenze	$MEAN_{int}$	1600 arb. unit	407	Parkposition, Wolken
Untergrenze	$MEAN_{int}$	1250 arb. unit	4	-
Obergrenze	MAX_{int}	1500 arb. unit	167	keine eindeutigen Ursachen
Obergrenze	RATIO	4	354	Bildfeldrot., vlt. Bildfehler
Untergrenze	RMS_{θ}	0.3	20	Bildfeldrotation
Obergrenze	Temperatur	$-19,5^{\circ}C$	162	vermutlich Bildfehler
Obergrenze	Temperatur	$-20,5^{\circ}C$	5	-



(a) Bild der PointingCCD



(b) *moonlightmap*

Abbildung 40: Lösbares Bild mit externem Lichteinfluss. Gemäß der *moonlightmap* handelt es sich dabei um Licht des Mondes.

8.2. Winkelrekonstruktion

Tabelle 5: Einteilung des Fitbereichs für einen linearen Fit $g(Alt_{Reco})$ aus Gleichung 15 entsprechend Abbildung 27 b). Der Tabelleneintrag Alt bezeichnet dabei die Begrenzung des Alt-Winkels des Teleskops, die Parameter a und b sind entsprechend der Funktion $g(Alt_{Reco})$ aus Gleichung 15 definiert.

Alt in °	a	b
0 - 40	$0,036 \pm 0,004$	$0,97474 \pm 0,00015$
40 - 45	$0,62 \pm 0,12$	$0,9588 \pm 0,0029$
45 - 55	$1,460 \pm 0,025$	$0,9406 \pm 0,0005$
55 - 60	$2,56 \pm 0,10$	$0,9204 \pm 0,0018$
60 - 68	$4,006 \pm 0,024$	$0,8966 \pm 0,0004$
68 - 76	$7,734 \pm 0,004$	$0,8409 \pm 0,0006$

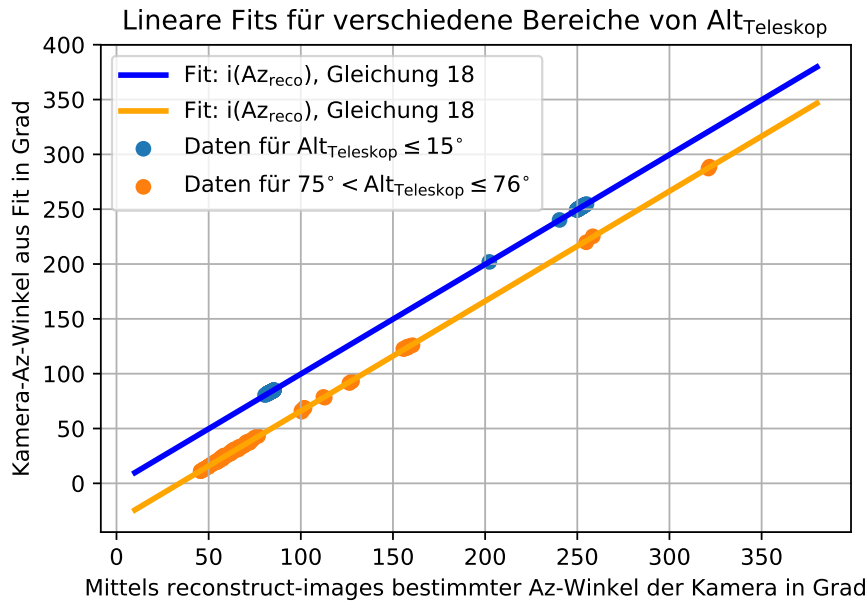


Abbildung 41: Rekonstruktion des Azimut-Winkels der PointingCCD Für das Winkelintervall mit den kleinsten Werten des Alt-Winkels des Teleskops sowie das Intervall mit den größten Werten wurden die linearen Fits gemäß Gleichung 18 durchgeführt. Zu sehen ist, dass sich mit zunehmenden Alt-Winkeln des Teleskops der Offset vergrößert (vgl. Tabelle 6), die Steigung aber der einer Einheitsgeraden entspricht.

Tabelle 6: Einteilung des Fitbereichs für einen linearen Fit $i(Az_{Reco})$ entsprechend Abbildung 28 b). Der Tabelleneintrag Alt bezeichnet dabei die Begrenzung des Alt-Winkels und Az die Obergrenze des Azimut-Winkels des Teleskops, die Parameter a und b sind entsprechend der Funktion $i(Az_{Reco})$ aus Gleichung 18 definiert.

Alt in °	Az in °	a	b
0 - 15	360	$-0,256 \pm 0,014$	$0,99985 \pm 8 \cdot 10^{-5}$
15 - 20	360	$-0,601 \pm 0,020$	$1,00002 \pm 0,00011$
20 - 25	360	$-1,031 \pm 0,028$	$0,99995 \pm 0,00016$
25 - 30	360	$-1,44 \pm 0,04$	$0,99972 \pm 0,00017$
30 - 37	360	$-2,46 \pm 0,10$	$0,9999 \pm 0,0003$
37 - 42	360	$-3,85 \pm 0,07$	$1,00035 \pm 0,00024$
42 - 46	360	$-4,84 \pm 0,07$	$0,99989 \pm 0,00023$
46 - 50	350	$-6,30 \pm 0,07$	$1,0014 \pm 0,0003$
50 - 54	350	$-8,08 \pm 0,05$	$1,0012 \pm 0,0003$
54 - 57	350	$-9,59 \pm 0,08$	$1,0001 \pm 0,0004$
57 - 58,5	350	$-10,66 \pm 0,04$	$0,9995 \pm 0,0003$
58,5 - 60	350	$-11,89 \pm 0,07$	$1,0003 \pm 0,0003$
60 - 62	345	$-13,17 \pm 0,07$	$1,0003 \pm 0,0004$
62 - 63,5	345	$-14,62 \pm 0,06$	$1,0000 \pm 0,0004$
63,5 - 65	345	$-16,01 \pm 0,06$	$1,0001 \pm 0,0004$
65 - 66	345	$-17,20 \pm 0,05$	$0,9996 \pm 0,0003$
66- 67	345	$-18,27 \pm 0,07$	$0,9992 \pm 0,0004$
67 - 68	345	$-19,51 \pm 0,11$	$0,9994 \pm 0,0005$
68 - 69	345	$-21,04 \pm 0,10$	$0,9999 \pm 0,0005$
69 - 70	345	$-22,41 \pm 0,11$	$0,9999 \pm 0,0005$
70 - 71	340	$-24,00 \pm 0,10$	$1,0002 \pm 0,0005$
71 - 72	330	$-25,84 \pm 0,13$	$1,0001 \pm 0,0007$
72 - 73	330	$-27,75 \pm 0,13$	$1,0016 \pm 0,0008$
73 - 74	330	$-29,54 \pm 0,14$	$1,000 \pm 0,001$
74 - 75	330	$-31,67 \pm 0,16$	$1,000 \pm 0,0015$
75 - 76	330	$-34,28 \pm 0,13$	$1,0024 \pm 0,0013$

8.3. Einfluss des Mondes

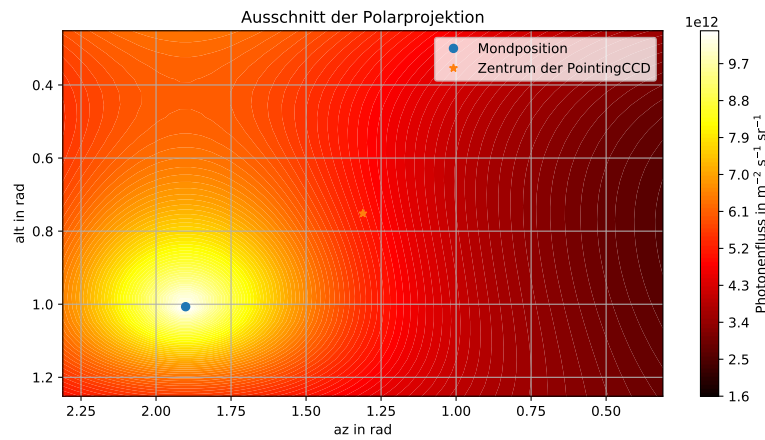


Abbildung 42: Ausschnitt aus der selben *moonlightmap* wie in Abbildung 34 a), nur weniger stark vergrößert. Erkennbar ist hier der Mond, um welchen herum der Fluss deutlich sichtbar am höchsten ist. Am Verlauf des Gradienten ist definitiv festzustellen, dass es sich um in das Bild einfallendes Mondlicht handelt.

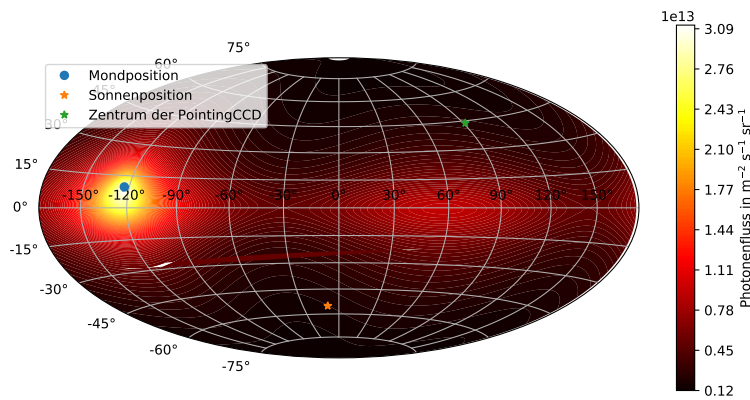
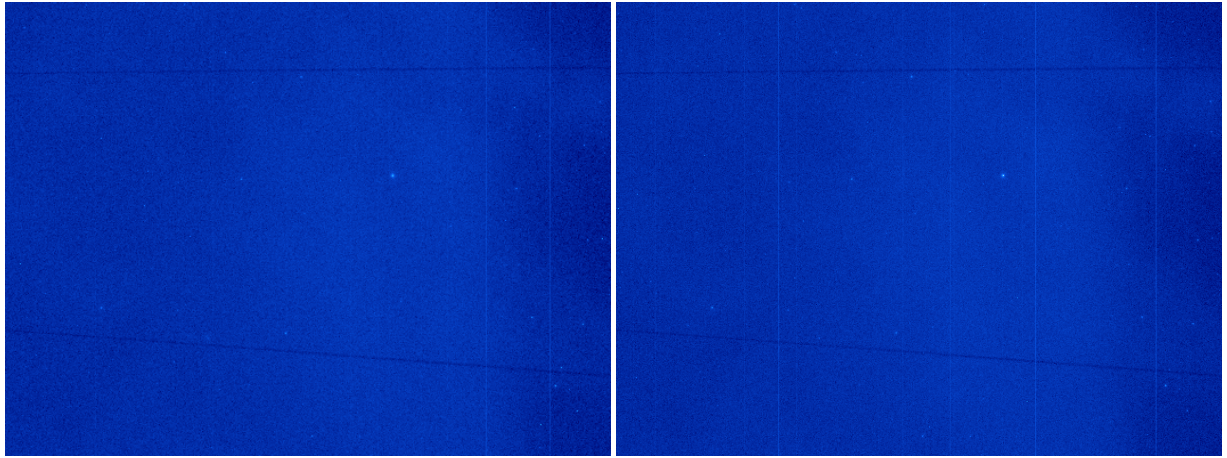


Abbildung 43: *moonlightmap* des in Abbildung 18 b) gezeigten Bildes der PointingCCD



(a) Aufnahmezeit: 1:33 Uhr

(b) Aufnahmezeit: 2:11 Uhr

Abbildung 44: Zwei in der selben Nacht aufgenommene Bilder. Die *moonlightmap* für das rechte der beiden konnte nicht sinnvoll ermittelt werden.

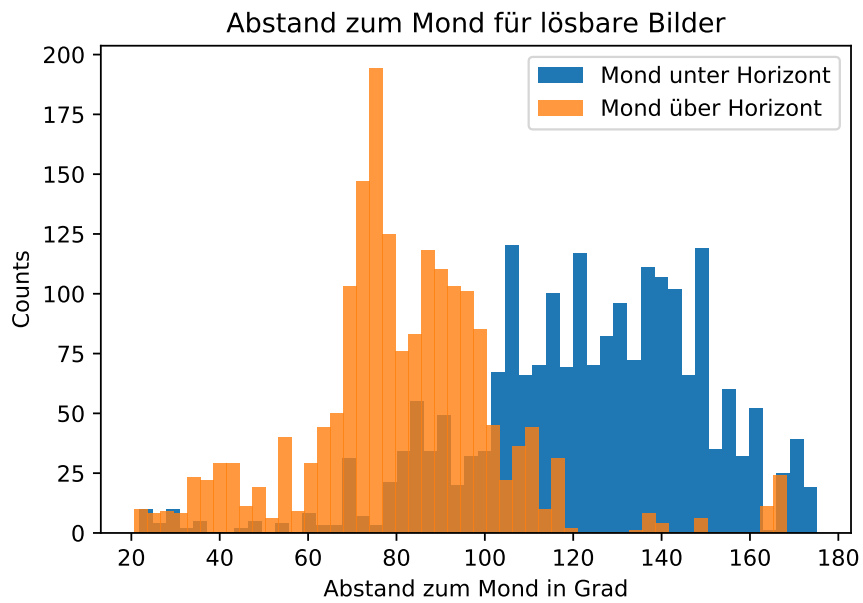


Abbildung 45: Histogramm der Abstände zwischen PointingCCD und Mond für die lösbaren Bilder in Abhängigkeit davon, ob sich der Mond unter - oder oberhalb des Horizonts des Teleskops befindet.

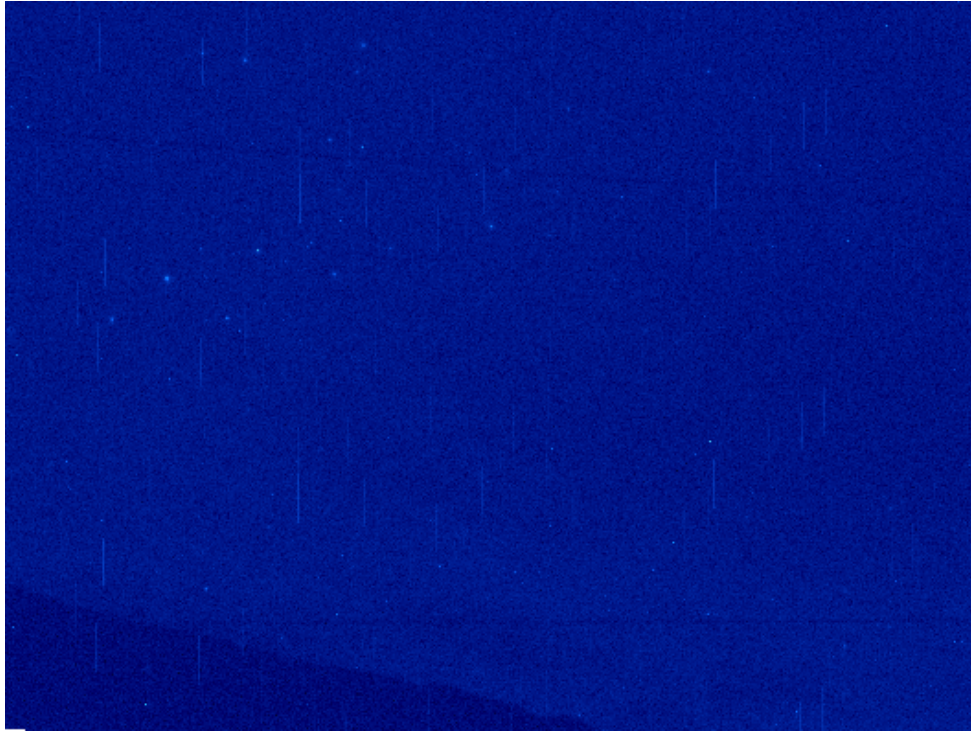
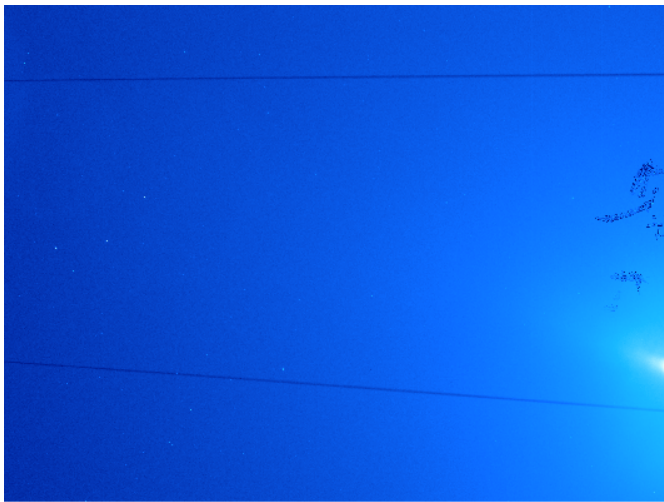
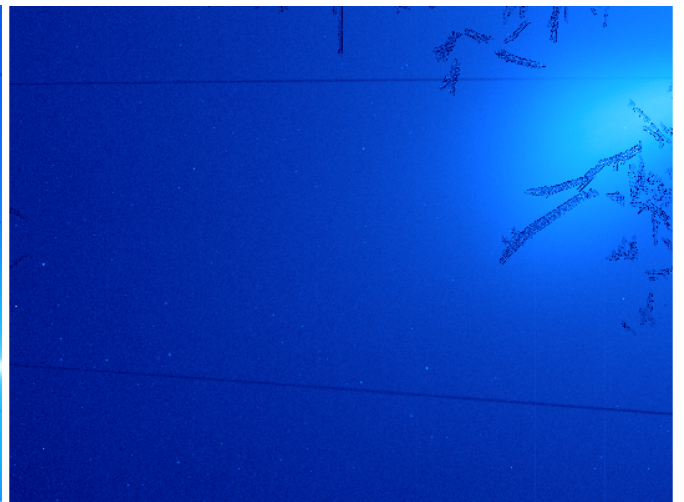


Abbildung 46: Bild der PointingCCD mit dem gemäß Abbildung 33 größten Abstand zum Mond.



(a) Mondabstand: $39,4^\circ$, Mondphase: 82 %, RMS: 2286 arb. unit



(b) Mondabstand: $25,6^\circ$, Mondphase: 55 %, RMS: 2265 arb. unit

Abbildung 47: *moonlightmap* für zwei verschiedene nicht lösbare Bilder mit unterschiedlicher Mondphase

Literatur

- [1] Victor F. Hess. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Phys. Z.*, 13:1084–1091, 1912.
- [2] Victor F. Hess. *Die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre und ihre Ursachen*. Springer Spektrum, 1912.
- [3] Victor F. Hess: Biographie auf der Website des Nobelpreis-Komitees. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1936/hess/biographical/>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [4] Wikipedia: Kosmische Strahlung. https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmische_Strahlung. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [5] D. Dorner. Vorlesung an der FAU: Gamma Ray Telescope in the Class Room. https://www.studon.fau.de/studon/goto.php?target=fold_2540019. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [6] Fermi Gamma-ray Space Telescope, NASA. <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/overview.html>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [7] CTA - offizielle Website. <https://www.cta-observatory.org/>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [8] D. Tiziani. Investigations towards a Single-CCD Pointing-Solution for the Medium-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array. https://ecap.nat.fau.de/wp-content/uploads/2017/05/2015_Tiziani_Master.pdf, 2015.
- [9] S. Funk. Space- and ground-based gamma-ray astrophysics. *Annual Reviews*, 2015.
- [10] Heinrich J. Völk und Konrad Bernlöhr. *Imaging very high energy gamma-ray telescopes*. Springer Spektrum, 2009.
- [11] HAWC: The High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory. <https://www.hawc-observatory.org/observatory/sensi.php>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [12] C. Allard. Analysis of the 2008 markarian 421 flare with veritas. 2011.
- [13] J. Albert et al. Variable vhe γ -ray emission from mrk 501. *The Astrophysical Journal*, 669(2):862 – 883, 11 2007.
- [14] C. van Eldik. Vorlesung an der FAU: Experimentalphysik 5.
- [15] National Geographic: Week’s Best Space Pictures: Hercules Poses, California Glaciers, and a Pulsar Puzzles. <https://www.nationalgeographic.com/news/2014/10/141024-black-hole-hand-galaxy-science-galaxies-space/>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [16] L. Reb. Modelling the spectral energy distribution of low luminosity active galactic nuclei. https://www.usm.uni-muenchen.de/CAST/cms/media/theses/master/MA_Reb.pdf, 2017. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].

- [17] DESY: Aktive Galaxiekerne. https://astro.desy.de/gamma_astronomie/magic/agn/index_ger.html. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [18] Uni Karlsruhe: Wechselwirkung von Photonen in Materie . http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~jwagner/WS0809/Vorlesung/tp_detektoren_02.pdf. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [19] Spektrum der Wissenschaft: Paarbildung. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/paarbildung/48735>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [20] Walter Heitler. *The Quantum Theory Of Radiation*. Dover Publications, 1954.
- [21] Spektrum der Wissenschaft. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/schauer/12832>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [22] Spektrum der Wissenschaft: Moliere-Radius. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/moliere-radius/9926>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [23] Cherenkov-Effekt. <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0910/skripte/cosmics02.pdf>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [24] Max-Planck-Institut: Cherenkov-Technik. <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/telescopes/#cherenkov>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [25] ECAP: The High Energy Stereoscopic System. <https://ecap.nat.fau.de/index.php/research/gamma-ray-astronomy/h-e-s-s/>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [26] M. de Naurois. Analysis methods for Atmospheric Cerenkov Telescopes. https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/publications/proceedings/Conf_Palaiseau_2005/deNaurois.pdf. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [27] Mathieu de Naurois und Daniel Mazin. Ground-based detectors in very-high-energy gamma-ray astronomy. *ScienceDirect*, 16:610–627, 2015.
- [28] Cherenkov Telescope Array Consortium. Science with the cherenkov telescope array.
- [29] L. A. Antonelli et al. The next generation of cherenkov telescopes. a white paper for inaf.
- [30] S. Gillessen. Sub-Bogenminuten-genaue Positionen von TeV-Quellen mit H.E.S.S. <http://www.mpe.mpg.de/~ste/>.
- [31] Frank G. Pühlhofer et al. Locating TeV γ -ray Sources with Sub-Arcminute Precision: the Pointing Calibration of the HEGRA System of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes. *Astroparticle Physics*, 8:101–108, 1997.
- [32] Y. W. Wong. Characterization and Optimization of a Single-CCD Concept for the Pointing of Medium-Sized Telescopes (MSTs) for the Cherenkov Telescope Array (CTA). <https://ecap.nat.fau.de/wp-content/uploads/2018/11/ECAP-2018-027.pdf>, 2018.

- [33] Persönliches Gespräch mit Domenico Tiziani.
- [34] J. Herpich. Thesis Testing a Single-CCD-Concept for the H.E.S.S. II Pointing, 2010.
- [35] IAC: Roque de los Muchachos Observatory. <https://www.iac.es/en/observatorios-de-canarias/roque-de-los-muchachos-observatory>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [36] The Magic Telescopes. <https://magic.mpp.mpg.de>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [37] Aus Mail-Verkehr mit Markus Garczarczyk.
- [38] B.S. Acharya et al. Introducing the CTA concept. *Astroparticle Physics*, 43:3 – 18, 2013.
- [39] Facts and figures about the LHC. <https://home.cern/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [40] Home - SAOImageDS9. <http://ds9.si.edu/site/Home.html>. [Online; zuletzt abgerufen am 13. Januar 2020].
- [41] Aufbau und Funktionsprinzip eines CCD-Detektors. <https://www.astro.uni-jena.de/Teaching/Praktikum/pr2002/node242.html>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [42] A. Lehmann. Vorlesung an der FAU: Detektoren für Teilchen und Strahlung.
- [43] Wikipedia: Hotpixel. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hotpixel>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [44] Persönliches Gespräch mit Dr. Johannes Veh.
- [45] Astropy: Separations, Offsets, Catalog Matching, and Related Functionality. <https://docs.astropy.org/en/stable/coordinates/matchsep.html>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [46] Wikipedia: Kugelkoordinaten. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kugelkoordinaten>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [47] Wikipedia: Drehmatrix. <https://de.wikipedia.org/wiki/Drehmatrix>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [48] Persönliches Gespräch mit Yu Wun Wong.
- [49] Astropy: `get_moon`. https://docs.astropy.org/en/stable/api/astropy.coordinates.get_moon.html. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [50] Astropy: Astronomical Coordinate Systems. <https://docs.astropy.org/en/stable/coordinates/>. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].
- [51] Astropplan: Source code for `astropplan.moon`. https://astropplan.readthedocs.io/en/latest/_modules/astropplan/moon.html. [Online; zuletzt abgerufen am 12. Januar 2020].

Danksagung

Zum Ende dieser Arbeit dürfen natürlich **ALLE**, die mich bei der Erstellung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt haben, nicht zu kurz kommen. Deshalb geht mein besonderer Dank an:

- **Prof. Dr. Christopher van Eldik** für die Vergabe des spannenden Themas und die immer neuen Denkanstöße in den Montags-Meetings;
- meine Betreuer **Dr. Johannes Veh**, **Domenico Tiziani** und **Yu Wun Wong**, die immer für Fragen offen waren, wenn ich nicht so recht wusste, was genau zu tun ist, und die Arbeit am Ende Korrektur gelesen haben;
- **meine Eltern** dafür, dass ich immer in meinem Studium unterstützt wurde. Auch für das Finden kleiner grammatikalischer und orthografischer Fehler in dieser Arbeit;
- **meine Freunde**, die so manchen Frust, falls gefühlt mal wieder nichts funktionierte, vergessen machten.

Erklärung

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

Erlangen, den 15. Januar 2020

Fabian Richter