

Untersuchungen zur Ausrichtung einer CCD-Kamera am MST-Prototyp

BACHELORARBEIT

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



eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
Institut für Physik
Humboldt-Universität zu Berlin

von
Herrn Jan-Lukas Krieg
geboren am 09.01.1995 in Berlin

Betreuung:

1. *Dr. Ullrich Schwanke*

eingereicht am: 1. M 2019

Widmung

Hier folgt dann eine Widmung.

Contents

1	γ-Astronomie	2
1.1	Entstehung hochenergetischer Strahlung	2
1.2	Quellen hochenergetischer Strahlung	2
1.3	Detektion von Strahlung	3
1.3.1	Luftschauer	3
1.3.2	Cherenkov Strahlung	4
1.3.3	Bodengestützte Detektion der Cherenkovstrahlung	4
2	Das Cherenkov Telescope Array	6
2.1	Design-Konzept	6
2.1.1	Teleskoptypen	6
2.1.2	Arrays	7
2.2	Prototyp in Adlershof	7
2.2.1	Kameras des MST	7
2.2.2	Bestimmung der Bildkoordinaten durch astrometry.net	8
3	Pointingmodell	9
3.1	Koordinaten	9
3.2	Entwicklung von Pointingmodellen	9
3.3	Pointingmodell mit zwei Parametern	10
3.3.1	Vorhersage der CCD-Koordinaten in Abhängigkeit der Drive-Koordinaten	10
3.3.2	Vorhersage der Drive-Koordinaten in Abhängigkeit der CCD-Koordinaten	11
3.4	Erweiterung des Modells auf vier Parameter	11

List of Figures

1.1	Der Cherenkoeffekt: Ein geladenes Teilchen durchfliegt ein dielektrisches Medium mit einer Geschwindigkeit über der der Lichtgeschwindigkeit im Medium und erzeugt Wellenfronten.	4
1.2	Detektion hochenergetischer Strahlung: Das in die Atmosphäre eintretende Photon erzeugt einen elektromagnetischen Luftschauder (oben rechts) der wiederum Cherenkovlicht erzeugt, welches am Boden mit IACTs detektiert werden kann. Ein Detektionsbild ist unten links zu sehen.	5
2.1	Die drei verschieden großen Teleskope des CTA: links die drei Varianten des SMT, in der Mitte das MST und rechts das LST	7
2.2	Der geplante Aufbau der Arrays auf La Palma und in der Atacamawüste: Auf La Palma werden zunächst nur die beiden größeren Teleskoptypen am Krater des Vulkans errichtet. In der Atacamawüste werden alle drei Teleskoptypten verwendet. Aufgrund der großen freien Fläche kann hier auch ein großer Bereich symmetrisch abgedeckt werden.	8
3.1	Die verwendeten Koordinaten	9

List of Tables

1 γ -Astronomie

Die Astronomie ist die Wissenschaft des Universums und beschreibt die Bewegung und Eigenschaften von Himmelskörpern wie Planeten oder Galaxien, interstellarer Materie und Strahlung. Betrachtete man früher nur Licht im optisch sichtbaren Bereich, so sind im 20. Jahrhundert einige zusätzliche Quellen dazugekommen. Dazu zählen die von Viktor Hess durch Ballonversuche entdeckte kosmische Strahlung, die Röntgen-/bzw die Gammastrahlung sowie die Neutrinoastronomie. Die γ -Astronomie beschäftigt sich mit Photonen im Bereich ab einer Energie von 100 GeV [?]. Photonen haben den Vorteil, dass sie nicht wie geladene Teilchen durch elektromagnetische Felder abgelenkt werden und somit ihre Quelle leichter detektiert werden kann. Zudem sind sie auch noch deutlich leichter zu detektieren als Neutrinos. Da die Energie dieser Gammastrahlung so hoch ist, können sie nicht thermischen Ursprungs sein sondern kommen aus anderen Quellen, deren Untersuchung das Ziel der Hochenergie-Gamma-Astronomie (VHE - Very High Energy) ist.

1.1 Entstehung hochenergetischer Strahlung

inverser Comptoneffekt

Durch den Comptoneffekt können hochenergetische Photonen einen Teil ihres Impulses und Energie an ein freies Elektron übergeben. Dieser Prozess kann auch invers ablaufen und somit kann ein niederenergetisches Photon, zum Beispiel aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund ($E=66\text{meV}$), durch einen Stoß mit einem Elektron eine hohe Energie bekommen.

Bremstrahlung

Durchfliegen hochenergetische Teilchen Materie, so kann es vorkommen, dass diese eng an den Atomen vorbeifliegen und abgelenkt werden. Durch diese Ablenkung werden Photonen abgestrahlt.

Zerfälle und Annihilation

Hochenergetische Photonen können auch durch Zerfälle massiver Teilchen entstehen, wobei die Ruhemasse des Teilchen in kinetischer Energie der Photonen umgewandelt wird. So zerfällt das neutrale Pion zum Beispiel zu 98,8% [3] in zwei Photonen und setzt dabei eine Ruhemasse von $E_0 = 135\text{MeV}$ [3] um. Eine weitere Möglichkeit ist die Annihilation von Materie und Antimaterie. Auch hier wird die Ruheenergie der Teilchen in kinetische Energie umgewandelt. So entstehen bei der Elektron-Positron-Annihilation zwei Photonen mit der Energie $E = 511\text{keV}$. Diese Energien liegen allerdings noch weit unter der Grenze der VHE.

1.2 Quellen hochenergetischer Strahlung

Ziel VHE-Astronomie ist es die Quellen hochenergetischer Gammastrahlung zu erforschen.

Supernova Überreste

Hat ein Stern mit ausreichender Masse seinen Wasserstoff- und Heliumvorrat verbrannt und somit sein Lebensende erreicht, kollabiert dieser und es entsteht ein kompaktes Objekt, wie zum Beispiel ein Neutronenstern, der mit der ihn umgebenden Materie interagieren kann.

Schwarze Löcher

Schwarze Löcher sind Objekte mit einer Gravitationskraft, die so stark ist, dass auch Photonen, die sich hinter dem Ereignishorizont befinden nicht entkommen können. Durch die starke Anziehung entsteht eine Akkretionsscheibe in der große elektromagnetische Felder herrschen, durch die wiederum hochenergetische Photonen entstehen können.

Aktive Galaxien und aktive galaktische Kerne

Da schwarze Löcher zu den hellsten Gammaquellen gehören und sich in der Regel im Zentrum einer Galaxie befinden, können diese überstrahlen. Häufig werden diese als stellare Objekte wargenommen. AGNs haben eine Masse von rund 100 Millionen Sonnenmassen. Zu den AGNs gehören auch Blazare und Quasare.

Pulsare

Kollabieren die Überreste einer Supernova von einem Durchmesser von ca 10^6 km auf ca 20 km entsteht ein Neutronenstern, der sich aufgrund der Drehimpulserhaltung sehr schnell dreht. Solche Konstrukte nennt man Pulsare. Bleibt der magnetische Fluss durch die Oberfläche erhalten, entstehen große Magnetfelder ($\mathcal{O}(10^8 \text{ T})$)[2]. In diesem rotierenden Magnetfeld können geladene Teilchen durch die Lorentzkraft auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die ihre Energie wiederum an Photonen abgeben können.

Binäre Systeme

Befindet sich ein Neutronenstern oder Pulsar in einem System mit einem normalen Stern, entsteht durch Absaugen von Materie eine Akkretions Scheibe um den Neutronenstern beziehungsweise um den Pulsar. Durch diese Plasmabewegungen entstehen elektromagnetische Felder, in denen Teilchen Energien in der Größenordnung 10^{19} eV [2] erhalten.

Dunkle Materie

Da die VHE-Astronomie sich mit Energien beschäftigt, die in keinem Experiment auf der Erde realisiert werden können, erhofft man sich auch Erkenntnisse zu ungeklärten Fragen der Physik, wie zum Beispiel zur dunklen Materie.

1.3 Detektion von Strahlung

Prinzipiell lässt sich zwischen bodengestützter und satellitengestützter γ -Astronomie unterscheiden. Durch den Einsatz von Satelliten vermeidet man den störenden Einfluss der Erdatmosphäre, muss dafür allerdings Abstriche in der Größe der Detektoren machen und mit hohen Kosten kalkulieren. Hier soll sich nur mit der bodengestützten Variante beschäftigt werden, die günstiger ist und nicht in der Größe beschränkt ist. Dazu verwendet man sogenannte IACTS (Imaging Atmosphaeric Cherenkov Telescopes), die die Strahlung nur indirekt detektieren.

1.3.1 Luftschauder

Die Atmosphäre ist nur für Photonen im optischen und radio Bereich durchsichtig. Treten hochenergetische Photonen in die Atmosphäre ein, wechselwirken sie mit dieser über Paarbildung. Das entstehende Elektron bzw Positron ist ebenfalls hochenergetisch und verliert hauptsächlich durch Bremstrahlung Energie, worauf die entstehenden Photonen wieder durch Paarbildung wechselwirken können. Die Strahlungslängen für Paarbildung und Bremsstrahlung sind ungefähr gleich lang, sodass die Anzahl der Teilchen mit absteigender Höhe exponentiell zunimmt, wohingegen die durchschnittliche Energie der Teilchen exponentiell abnimmt. Der Luftschauder endet, in einer Höhe von ungefähr 10km [?], wenn die Teilchen niederenergetisch sind und die restliche Energie über Ionisation verlieren.

$$E_n = \frac{E_0}{2^n} \quad (1.1)$$

Neben den oben beschriebenen elektromagnetischen Schauern existieren noch hadronische und myonische Schauer. Hadronische Schauer entstehen wenn hochenergetische Hadronen in die Atmosphäre eindringen. Durch die Wechselwirkung von Hadronen entstehen häufig Pionen, die wiederum in Photonen zerfallen, wodurch wiederum ein elektromagnetischer Schauer entsteht, der allerdings einen anderen Ursprung hat. Entstehen Myonen in einem Schauer, so besteht das Problem, dass diese kaum Energie abgeben und bei hoher Geschwindigkeit den Erdboden erreichen. Somit gibt nur ein Teil des Schauers die Energie ab und die Messung weicht von der Realität ab.

1.3.2 Cherenkov Strahlung

Cherenkov Strahlung tritt auf, wenn geladene Teilchen in Materie schneller als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium bewegen. Hierbei polarisiert das geladene Teilchen auf seiner Trajektorie die einzelnen Atome, die Licht sphärisch abstrahlen. Wäre das Teilchen langsamer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit in diesem Medium, würden die Wellen destruktiv interferieren und man würde keine makroskopischen Effekte beobachten. Da sich das Teilchen allerdings schneller als das Licht bewegt, entsteht ein Kegel konstruktiver Interferenz, und ein Lichtblitz breitet sich kegelförmig mit dem Öffnungswinkel

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\beta n}\right) \quad (1.2)$$

aus. Für Luft (in Bodennähe) ergibt sich somit ein maximaler Öffnungswinkel von. Da allerdings die Dichte der Luft in der relevanten Höhe kleiner ist, ist auch der Brechungsindex näher an 1 und der Cherenkovwinkel beträgt noch ungefähr $\theta = 1^\circ$ [2] Aus dem Winkel lässt sich die Geschwindigkeit

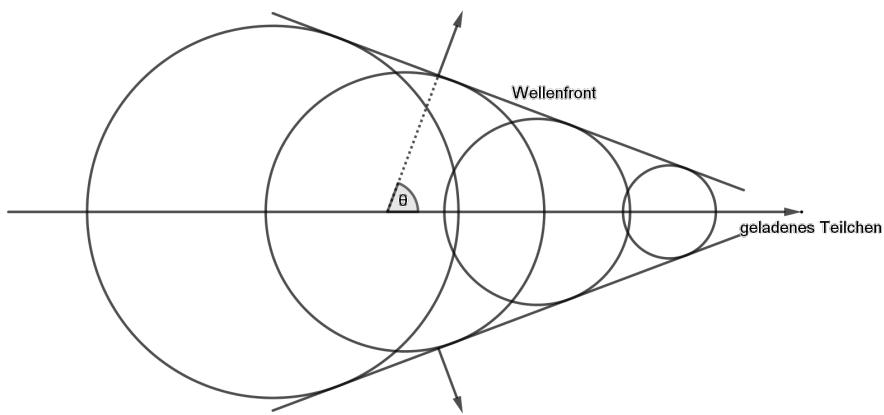


Figure 1.1: Der Cherenkoeffekt: Ein geladenes Teilchen durchfliegt ein dielektrisches Medium mit einer Geschwindigkeit über der der Lichtgeschwindigkeit im Medium und erzeugt Wellenfronten.

des Teilchens rekonstruieren und bei bekannter Masse des Teilchens (in elektromagnetischen Schauern entstehen Elektronen als geladene Teilchen) auch der Impuls und die Energie.

1.3.3 Bodengestützte Detektion der Cherenkovstrahlung

Ziel der bodengestützten Variante ist es das Cherenkovlicht der sekundären Teilchen aus dem elektromagnetischen Schauer zu detektieren. Bei einem Cherenkovwinkel von $\theta = 1^\circ$ in 10km Höhe und senkrechter Einstrahlung ergibt sich ein Lichtpool am Boden mit einem Durchmesser von 250m [?]. Somit müssen effektive Flächen in der Größenordnung von 10^4 bis $10^5 m^2$ abgedeckt werden um den gesamten Schauer zu detektieren. Typischerweise entstehen bei einem VHE-Photon $10^8 - 10^9$ Photonen, die innerhalb von wenigen Nanosekunden abgegeben werden. Am Boden hat man somit typische Intensitäten von $10^3 \frac{1}{m^2}$ die detektiert werden müssen. Dazu verwendet man Abbildende Cherenkovteleskope (IACTS - Imaging Atmosphaeric Cherenkov Telescopes), die aus einem Reflektor und einem Detektor bestehen. Der Reflektor besteht aus einem oder häufig aus mehreren Spiegeln, die das Cherenkovlicht in der Brennebene bündeln. Bei großen Teleskopen muss der Reflektor parabolisch sein und bei kleineren wird darauf häufig aus Kostengründen verzichtet, da jeder einzelne Spiegel eine individuelle Brennweite braucht. Als Detektor wird eine Cherenkovkamera verwendet, die eine typische Auflösung von 2000 Pixeln und Zeitauslösung 10ns[1] hat. Da die Auflösung im Vergleich zu CCD Kameras eher gering ist, liegt daran, dass der Detektor sehr wenige Photonen in einer sehr kurzen Zeit detektiert werden müssen. Dazu verwendet man Photomultiplier. Aus den aufgenommenen Daten

lässt sich mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen die Richtung und die Energie des detektierten Photons rekonstruieren.

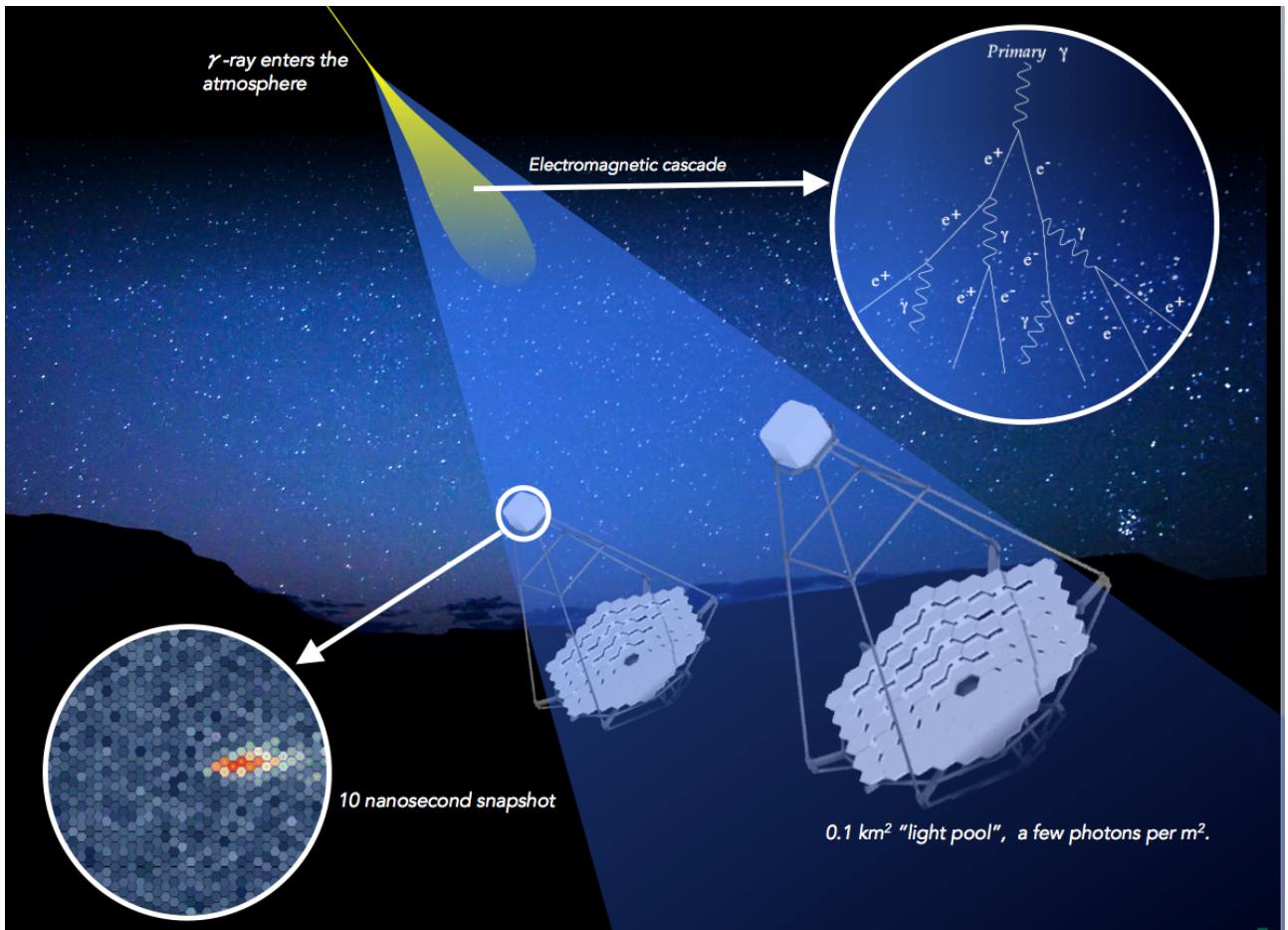


Figure 1.2: Detektion hochenergetischer Strahlung: Das in die Atmosphäre eintretende Photon erzeugt einen elektromagnetischen Luftschauer (oben rechts) der wiederum Cherenkovlicht erzeugt, welches am Boden mit IACTs detektiert werden kann. Ein Detektionsbild ist unten links zu sehen.

2 Das Cherenkov Telescope Array

Mit dem Bau des Cherenkov Telescope Arrays (CTA) werden verschiedene Ziele verfolgt [4]:

- Abdeckung des Energiebereichs von 30GeV bis 100TeV
- Verbesserung der Sensitivität um eine Größenordnung im Vergleich zur aktuellen Generation (H.E.S.S., VERITAS und MAGIC)
- Verbesserung der Winkelauflösung auf $0,1^\circ$ bei 0,1TeV und $0,05^\circ$ bei 1TeV
- Verbesserung der Energieauflösung auf 25% bei 50GeV und 10% bei 1TeV
- Entdeckung einer großen Anzahl von Quellen bekannter Klassen
- Entdeckung neuer Quellen (zum Beispiel Quellen GRBs)
- Abdeckung des gesamten (nördlichen und südlichen) Himmels

2.1 Design-Konzept

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, hat man sich für ein Arraykonzept entschieden, dass aus drei unterschiedlich großen Teleskoptypen besteht und an zwei Standorten errichtet wird.

2.1.1 Teleskoptypen

Für das CTA werden drei Teleskope unterschiedlicher Größe entwickelt

Small Sized Telescope (SST)

Das kleinste Teleskop ist sensitiv im Bereich von 1TeV bis 300TeV und wird eingesetzt um Schauer grosser Energie zu detektieren. Momentan werden drei verschiedene Varianten entwickelt, die zu einem harmonisiert werden sollen. Das SST 1M ist eine kleinere Variante des MST und SST-2M ASTRI und das SST-2M GCT basieren auf dem Prinzip eines Schwarzschild-Couder Designs. Das SST soll einen Reflektordurchmesser von ca. 4m haben.

Medium Sized Telescope (MST)

Das MST basiert auf einem modifiziertem Davies-Cotton-Design und hat einen Durchmesser von 12m. Mit einem Sensitivitätsbereich von 150GeV bis 5TeV deckt es den Kernbereich des CTAs ab.

Large Sized Telescope (LST)

Die größten Teleskope des CTA werden einen Reflektordurchmesser von 23m um auch Strahlung niedriger Energie zu detektieren. Da aufgrund der Größe eine Bauweise aus Stahl zu schwer wäre, werden diese Teleskope aus kohlefaser verstärktem Kunststoff gebaut. Das hat zum Vorteil, dass die Teleskope zwar leichter werden, aber es hat auch den Nachteil, dass die Bauteile durch Bewegung des Teleskops stärker verbiegen, was das Pointing erschwert. Aufgrund der Größe dieser Teleskope reicht es nicht mehr die Reflektoren dieser Teleskope sphärisch zu bauen, sondern parabolisch. Hierbei steigt der Aufwand, da jeder einzelne Spiegel eine individuelle Brennweite hat.



Figure 2.1: Die drei verschieden großen Teleskope des CTA: links die drei Varianten des SMT, in der Mitte das MST und rechts das LST

2.1.2 Arrays

Um den gesamten Himmel abdecken zu können wird jeweils eine Anlage auf der Nordhalbkugel und der Südhalbkugel errichtet.

südliche Hemisphäre

Die größere der beiden Anlagen wird in der Atacamawüste in Chile errichtet und besteht aus allen drei Teleskoptypen, die auf einer Fläche von 4km^2 verteilt sind 2.2, um so den gesamten Energiebereich des CTAs abzudecken

nördliche Hemisphäre

Auf der spanischen Insel La Palma wird die nördliche Anlage errichtet. Hier steht eine kleinere Fläche zur Verfügung und es wird auf die kleinen Teleskope verzichtet, wodurch der Energiebereich auf 20GeV bis 20TeV begrenzt ist.

2.2 Prototyp in Adlershof

In Adlershof wurde 2012 vom DESY ein Prototyp des MSTs errichtet um den mechanischen Aufbau zu testen, Pointingmodelle zu entwickeln und um die einzelnen Spiegel zu testen und auszurichten.

2.2.1 Kameras des MST

Der Prototyp des MST besitzt drei Kameras in der Mitte des Reflektors. Die Sky-CCD, für die im hier folgenden ein Pointingmodell entwickelt wird, ist schräg montiert, sodass sie am Detektorarm vorbei guckt um Bilder des Nachthimmels aufzunehmen. Aus diesen Bildern lassen sich mithilfe der Astrometry-Software die Koordinaten der Kamera bestimmen, die als die wahren Koordinaten angenommen werden.

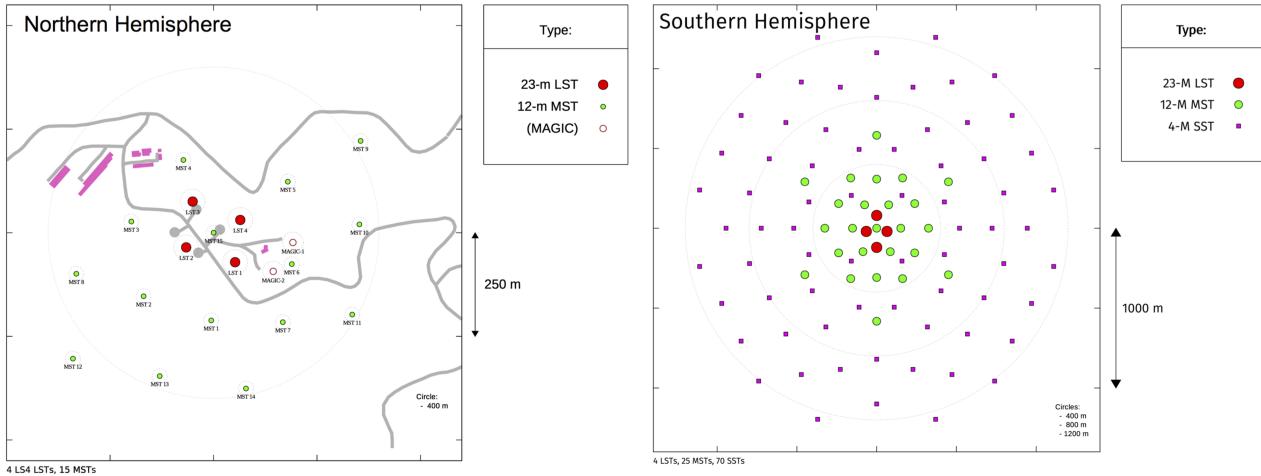


Figure 2.2: Der geplante Aufbau der Arrays auf La Palma und in der Atacamawueste: Auf La Palma werden zunächst nur die beiden grösseren Teleskoptypen am Krater des Vulkans errichtet. In der Atacamawüste werden alle drei Teleskoptypten verwendet. Aufgrund der großen freien Fläche kann hier auch ein großer Bereich symmetrisch abgedeckt werden.

2.2.2 Bestimmung der Bildkoordinaten durch **astronometry.net**

Aus den mit der Kamera aufgenommen Bildern lassen sich mithilfe der **astronometry.net** Software die einzelnen Koordinaten der Bilder und die Groesse des Bildausschnitts bestimmen. Auf den einzelnen Bildern werden Sterne erkannt, die jeweils zu Triplets zusammengeschlossen werden. Diese Triplets werden mit zwei Sternenkatalogen

- USNO-B: Ein Katalog mit ungefaehr einer Milliarde Objekten (Sterne und Galaxien)
- TYCHO-2 Ein Katalog mit den 2.5 Millionen hellsten Sternen

Die Software kommt auch mit Fehlern wie fehlenden und zu vielen Objekten klar.

3 Pointingmodell

Das Pointing von Teleskopen beschäftigt sich damit, dass das Teleskop so ausgerichtet wird, wie es erwünscht ist. Häufig ist das Problem, dass die eingestellte Position nicht exakt mit der gewünschten Position übereinstimmt. Gründe dafür können Fehler in der Präzision oder auch die Elastizität einzelner Bauteile sein. Da man die aufgenommenen Daten mit den bekannten Positionen am Himmel vergleichen kann, kann man versuchen ein Modell zu finden, welches die Fehler verkleinert oder im Idealfall sogar eliminiert.

3.1 Koordinaten

Das MST benutzt ein Koordinatensystem aus zwei Winkeln, welches den Kugelkoordinaten ähnelt. Der Azimutwinkel (az) beschreibt die Auslenkung in der Ebenen und läuft von -180° bis 180° , wobei es für $az = 0^\circ$ in Richtung Norden ausgerichtet ist. Der Elevationswinkel el läuft von 0° bis 90° wobei $el = 90^\circ$ dem Zenit entspricht. Da es bei der Entwicklung von Pointingmodellen von Vorteil sein kann, in kartesischen Koordinaten zu rechnen, wird hier die Konvention verwendet, dass Nordrichtung der x-Richtung, die Westrichtung der y-Richtung und die Zenitrichtung der z-Richtung entspricht.

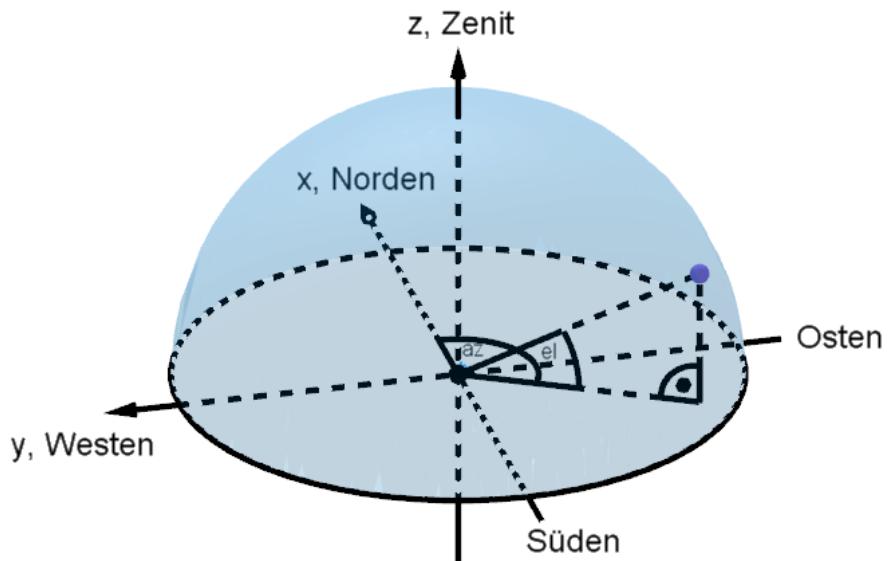


Figure 3.1: Die verwendeten Koordinaten

3.2 Entwicklung von Pointingmodellen

Da man das Teleskop so ausrichten will, das die man die gewünschte Position vorgibt (Koordinaten der CCD-Index C) und dann die Koordinaten am Drive (Index D) einstellt, sucht man nach Funktionen, die die Koordinaten des Drives in Abhängigkeit von den gewünschten Koordinaten beschreibt.

$$az_D = f_{az}(az_C, el_C) \quad (3.1)$$

$$el_D = f_{el}(az_C, el_C) \quad (3.2)$$

Ziel ist es, die Funktionen so zu optimieren, dass die Differenzen zu den gewünschten Koordinaten verschwinden.

$$\Delta_{az} = f_{az}(az_C, el_C) = 0 \quad (3.3)$$

$$\Delta_{el} = f_{el}(az_C, el_C) = 0 \quad (3.4)$$

3.3 Pointingmodell mit zwei Parametern

3.3.1 Vorhersage der CCD-Koordinaten in Abhängigkeit der Drive-Koordinaten

Zunächst soll ein Pointingmodell mit zwei Parametern entwickelt werden, bei dem das Drivesystem in der Parkposition ($el_D = 0, az_D = 0$) in eine andere Richtung zeigt als die CCD-Kamera ($el_C = el_0, az_C = az_0$). Die beiden Positionen lassen sich auch durch zwei karthesische Richtungsvektoren \vec{r}_D und \vec{r}_C beschrieben. Ausgehend von dieser Startposition wird das Teleskop beziehungsweise die Vektoren \vec{r}_D und \vec{r}_C durch orthogonale Transformationen in die gewünschte Position gebracht wird. Als Parkposition für das Drive-System erhält man mit den oben genannten Bedingung folgenden karthesischen Vektor:

$$\vec{r}_D^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Durch eine Drehung um die y-Achse mit dem Winkel el und anschließender Drehung die z-Achse um den Winkel az lässt sich aus dieser Startposition jeder Punkt auf der Einheitskugel erreichen. Die beiden Drehungen lassen sich zu einer Transformation $T(az, el)$ zusammenfassen:

$$T(az, el) = R_z(el)R_y(az) = \begin{pmatrix} \cos(az) & \sin(el) & 0 \\ -\sin(el) & \cos(el) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(el) & 0 & -\sin(el) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(el) & 0 & \cos(el) \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$T(az, el) = \begin{pmatrix} \cos(az) \cos(el) & \sin(az) & -\cos(az) \sin(el) \\ -\cos(el) \sin(az) & \cos(az) & \sin(az) \sin(el) \\ \sin(el) & 0 & \cos(el) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Unter der Annahme, dass die Kamera von vornherein in eine andere Richtung als das Drive-System zeigt, lässt sich mit dieser Transformation $T(az_0, el_0)$ aus der Startposition des Drives die Startposition der Kamera bestimmen:

$$\vec{r}_C^0 = T(az_0, el_0)\vec{r}_D^0 = \begin{pmatrix} \cos(az_0) \cos(el_0) \\ -\cos(el_0) \sin(az_0) \\ \sin(el_0) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Wendet man nun die gleiche Transformation $T(az_D, el_D)$ auf beide Startvektoren an, so erhält man für jedes Koordinatenpaar des Drives die zugehörigen Koordinaten der CCD in Abhängigkeit der Koordinaten des Drives. Für die Richtung des Drives ergibt sich

$$\vec{r}_D = T(az_D, el_D)\vec{r}_D^0 = \begin{pmatrix} \cos(az) \cos(el) \\ -\cos(el) \sin(az) \\ \sin(el) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

und für die Richtung der CCD

$$\vec{r}_C = T(az, el)\vec{r}_C^0 = \begin{pmatrix} \cos(az) (\cos(az_0) \cos(el) \cos(el_0) - \sin(el) \sin(el_0)) - \cos(el_0) \sin(az) \sin(az_0) \\ \sin(az) (\sin(el) \sin(el_0) - \cos(az_0) \cos(el) \cos(el_0)) - \cos(az) \cos(el_0) \sin(az_0) \\ \cos(az_0) \cos(el_0) \sin(el) + \cos(el) \sin(el_0) \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Aus diesen Richtungsvektoren müssen wieder die ursprünglichen Koordinaten az und el rekonstruiert werden. Die Elevation lässt sich aus der z-Komponente (Höhe) berechnen

$$el = \arcsin(r_z) \quad (3.11)$$

und der Azimutwinkel aus dem Verhältnis von y- zu x-Komponente. Da der Tangens dieses Verhältnis dem Azimuthwinkel mit einem Wertebereich von -180° bis 180° entspricht muss man als Umkehrfunktion den erweiterten arctan verwenden:

$$az = \arctan 2(r_y, r_x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) & r_x > 0 \\ \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) + \pi & r_x < 0, r_y > 0 \\ \pm\pi & r_x < 0, r_y = 0 \\ \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) - \pi & x < 0, r_y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & x = 0, r_y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x = 0, r_y < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Somit lassen sich mit 3.8 beziehungsweise mit 3.9 in Verbindung mit 3.7 die CCD-Koordinaten in Abhängigkeit der Drive-Koordinaten bestimmen:

$$el_C = \arcsin(\cos(az_0) \cos(el_0) \sin(el_D) + \sin(el_0) \cos(el_D)) \quad (3.13)$$

$$az_C = \arctan 2(\sin(az_D)(\cos(el_D) \cos(az_0) \cos(el_0) - \sin(el_D) \sin(el_0)) - \cos(az_D) \sin(az_0) \cos(el_0), \cos(az_D)(\cos(el_D) \cos(az_0) \sin(el_0) + \sin(el_D) \sin(az_0))) \quad (3.14)$$

3.3.2 Vorhersage der Drive-Koordinaten in Abhängigkeit der CCD-Koordinaten

Um die Abhängigkeiten der Drive-Koordinaten von den CCD-Koordinaten zu erhalten, muss das Gleichungssystem 3.10 3.13 nach el_D und az_D aufgelöst werden. Da die Formel 3.10 nur von el_D und el_C abhängt, kann diese unabhängig von 3.13 umgestellt werden:

$$el_D = 2 \arctan \left(\frac{\cos(el_0) \cos(az_0) - \sqrt{\cos^2(el_0) \cos^2(az_0) - \sin^2(el_0) + \sin^2(el_C)}}{\sin(el_C) + \sin(el_0)} \right) \quad (3.15)$$

Stellt man Gleichung 3.13 nach az_D um, so erhält man

$$az_D = (\sin(az_C)(\cos(el_C) \cos(az_0) \cos(el_0) - \sin(el_C) \sin(el_0)) - \cos(az_C) \sin(az_0) \cos(el_0), \cos(az_C)(\cos(el_C) \cos(az_0) \sin(el_0) + \sin(el_C) \sin(az_0))) \quad (3.16)$$

wobei hier noch el_D durch den Ausdruck 3.12 ersetzt werden muss.

3.4 Erweiterung des Modells auf vier Parameter

Unter der Annahme, dass die Skalen des Drivesystems einen Offset haben, also das der Wertebereich von el_D beispielshalber von 1° bis 91° läuft kann das Modell mit zwei additiven Konstanten el_1 und az_1 erweitert werden. Das bedeutet, das bei der Vorhersage der CCD-Koordinaten 3.10 und 3.11 ein konstanter Offset zu den Argumenten hinzugefügt wird:

$$el_C^{4par} = el_C(el_D + el_1, az_D + az_1) \quad (3.17)$$

$$az_C^{4par} = az_C(el_D + el_1, az_D + az_1) \quad (3.18)$$

wohingegen bei der Vorhersage der Drive-Koordinaten nur ein konstanter Offset zu den Funktionen 3.12 und 3.13 addiert wird.

$$el_D^{4par} = el_D(el_C, az_C) + el_1 \quad (3.19)$$

$$az_D^{4par} = az_D(el_C, az_C) + az_1 \quad (3.20)$$

Bibliography

- [1] FRANCO, A. D. ; WHITE, R. ; ALLAN, D. ; ARMSTRONG, T. ; ASHTON, T. ; BALZER, A. ; BERGE, D. ; BOSE, R. ; BROWN, A. M. ; BUCKLEY, J. ; CHADWICK, P. M. ; COOKE, P. ; COTTER, G. ; DANIEL, M. K. ; FUNK, S. ; GREENSHAW, T. ; HINTON, J. ; KRAUS, M. ; LAPINGTON, J. ; MOLYNEUX, P. ; MOORE, P. ; NOLAN, S. ; OKUMURA, A. ; ROSS, D. ; RULTEN, C. ; SCHMOLL, J. ; SCHOORLEMMER, H. ; STEPHAN, M. ; SUTCLIFFE, P. ; TAJIMA, H. ; THORNHILL, J. ; TIBALDO, L. ; VARNER, G. ; WATSON, J. ; ZINK, A.: *The first GCT camera for the Cherenkov Telescope Array.* 2015
- [2] GRUPEN, Claus: *Einstieg in die Astroteilchenphysik: Grundlagen, Messungen und Ergebnisse aktueller Forschung (German Edition).* Springer Spektrum, 2017
- [3] OLIVE, K. A. u.a.: Review of Particle Physics. In: *Chin. Phys.* C38 (2014), S. 090001. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001>. – DOI 10.1088/1674-1137/38/9/090001
- [4] VERCELLONE, Stefano ; CTA CONSORTIUM for t.: The next generation Cherenkov Telescope Array observatory: CTA. (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.04.015>. – DOI 10.1016/j.nima.2014.04.015

Selbständigkeitserklärung

Text der Selbständigkeitserklärung.