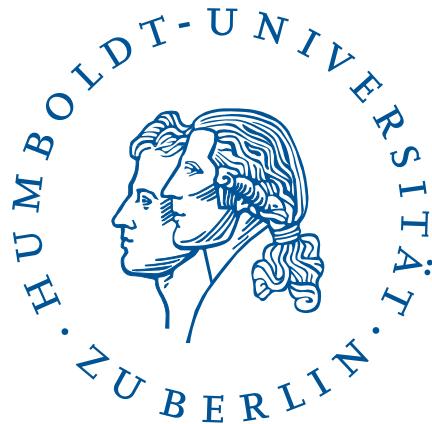


# **Titel der Arbeit**

## **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. *Prof. Dr. Thomas Lohse*
2. *Priv.-Doz. Dr. K. Hennig*

eingereicht am: *10. Februar 1999*

# **Widmung**

Hier folgt dann eine Widmung.

# Contents

<b>1</b>	<b><math>\gamma</math>-Astronomie</b>	<b>2</b>
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
<b>2</b>	<b>Das Cherenkov Telescope Array</b>	<b>6</b>
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	Koordinatens des MST . . . . .	8
2.2.3	Bestimmung der Bildkoordinaten durch astronometry.net . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Pointingmodell</b>	<b>10</b>
3.1	Entwicklung von Pointingmodellen . . . . .	10
3.2	Vereinfachtes Pointingmodell mit zwei Parametern . . . . .	10

# List of Figures

1.1	Der Cherenkoeffekt: Ein geladenes Teilchen durchfliegt ein dielektrisches Medium mit einer Geschwindigkeit ueber der der Lichtgeschwindigkeit im Medium und erzeugt Wellenfronten. . . . .	4
1.2	Detektion hochenergetischer Strahlung: Das in die Atmosphaere 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 Atacamawueste: Auf La Palma werden zunaechst nur die beiden groesseren Teleskoptypen am Krater des Vulkans errichtet. In der Atacamawueste werden alle drei Teleskoptypten verwendet. Aufgrund der grossen freien Flaeche kann hier auch ein grosser Bereich symmetrisch abgedeckt werden. . . . .	8
2.3	Die verwendeten Koordinaten . . . . .	8

## **List of Tables**

# 1 $\gamma$ -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 Roentgen-/bzw die Gammastrahlung sowie die Neutrinoastronomie. Die Gammaastronomie beschäftigt sich mit Photonen im Bereich von bis . 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 ( $E$ ), 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. Folgende Quellen sind bekannt:

### 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

### 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  $10^6 \text{ km}$  auf ca  $20 \text{ km}$  entsteht ein Neutronenstern, der sich aufgrund der Drehimpulserhaltung sehr schnell dreht. Solche Konstrukte nennt man Pulsare. Durch die schnelle Rotation entstehen starke elektromagnetische Felder, die geladene Partikel beschleunigen können. Pulsare strahlen ungefähr  $10^{42} \text{ eV/s}$  ab.

### Binäre Systeme

Befindet sich ein Neutronenstern oder Pulsar in einem System mit einem normalen Stern, entsteht durch absaugen von Materie eine Akkretionsscheibe um den Neutronenstern beziehungsweise um den Pulsar. Da die Materie in diesem System durch Gravitation beschleunigt wird, werden Energien der Größenordnung  $10^{19} \text{ eV}$  erzeugt.

### Dunkle Materie

Dunkle Materie gehört zu den größten Fragen der heutigen Physik. Man hofft, dass durch VHE-Astronomie Erkenntnisse gewonnen werden, die Theroien zur dunklen Materie (wie zum Beispiel WIMPS) entweder bestätigen oder widerlegen können.

## 1.3 Detektion von Strahlung

Prinzipiell laesst sich zwischen bodengestuetzter und satellitengestuetzter Gammaastronomie unterscheiden. Durch den Einsatz von Satelliten vermeidet man den stoerenden Einfluss der Erdatmosphaere, muss dafuer Abstriche in der Groesse der Detektoren machen und mit hohen Kosten kalkulieren. Hier soll sich nur mit der bodengestuetzten Variante beschaeftigt werden, die günstiger ist und nicht in der Größe beschränkt ist. Dazu verwendet man sogenannte IACTS (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes), die die Strahlung nur indirekt detekieren.

### 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 Bremsstrahlung Energie, worauf die entstehenden Photonen wieder durch Paarbildung wechselwirken koennen. Die Strahlungslängen für Paarbildung und Bremsstrahlung sind ungefähr gleich lang, sodass die Anzahl der Teilchen mit absteigender Höhe exponentiell zunimmt, wohingegend die durchschnittliche Energie der Teilchen exponentiell abnimmt. Der Luftschauder endet, in einer Höhe von ungefähr 10km [?], wenn die Teichen 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 haufig Pionen, die wiederum in Photonen zerfallen, wodurch wiederum ein elektromagnetischer Schauer entsteht, der allderdings 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 Realitaet 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 sphaerisch 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

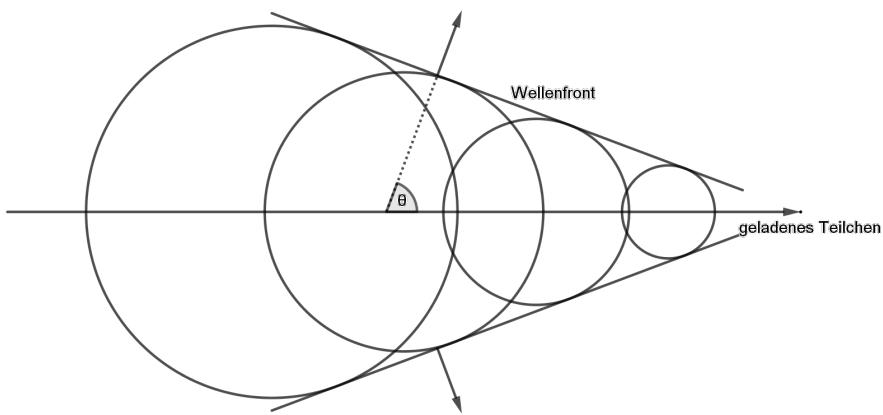


Figure 1.1: Der Cherenkoeffekt: Ein geladenes Teilchen durchfliegt ein dielektrisches Medium mit einer Geschwindigkeit über der Lichtgeschwindigkeit im Medium und erzeugt Wellenfronten.

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 Atmosphärische 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  $10\text{ns}$ [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

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

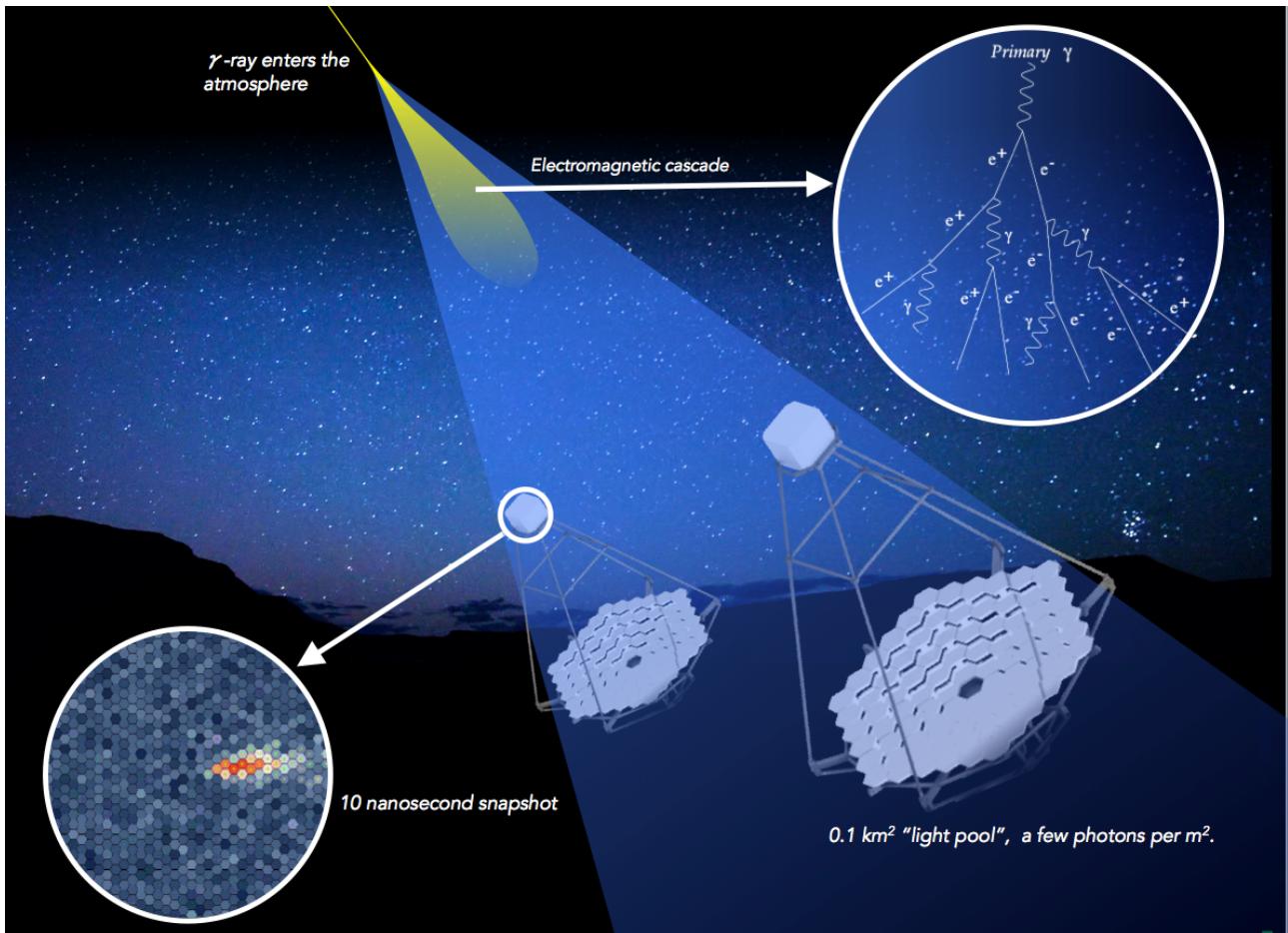


Figure 1.2: Detektion hochenergetischer Strahlung: Das in die Atmosphaere eintretende Photon erzeugt einen elektromagnetischen Luftschauder (oben rechts) der wiederum Cherenkovlicht erzeugt, welches am Boden mit IACTs detektiert werden kann. Ein Detektionsbild ist unten links zu sehen.

## 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 Sensitivitaet um eine Groessenordnung im Vergleich zur aktuellen Generation (H.E.S.S., VERITAS und MAGIC)
- Verbesserung der Winkelaufloesung auf  $0,1^\circ$  bei 0,1TeV und  $0,05^\circ$  bei 1TeV
- Verbesserung der Energieaufloesung 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 Himmels (nord+sued)

### 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

Fuer das CTA werden drei Teleskope unterschiedlicher Groesse entwickelt

##### Small Sized Telescope (SMT)

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 Sensitivitaetsbereich von 150GeV bis 5TeV deckt es den Kernbereich des CTAs ab.

##### Large Sized Telescope (LST)

Die groessten Teleskope des CTA werden einen Reflektordurchmesser von 23m um auch Strahlung niedriger Energie zu detektieren. Da aufgrund der Groesse eine Bauweise aus Stahl zu schwer waere, werden diese Teleskope aus kohlefaserverstaerktem 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 starker verbiegen, was das Pointing erschwert. Aufgrund der Groesse 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 koennen wird jeweils eine Anlage auf der Nordhalbkugel un der Suedhalbkugel errichtet.

#### suedliche Hemnisphaere

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

#### noerdliche Hemnisphaere

Auf der spanischen Insel La Palma wird die noerdliche Anlage errichtet. Hier steht eine kleinere Flaeche zur Verfuegung 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.

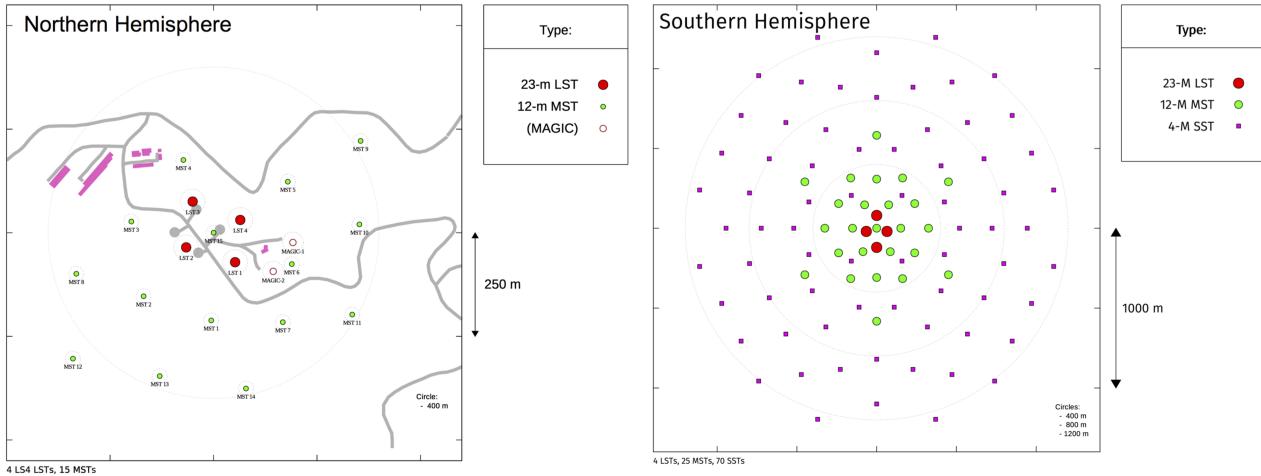


Figure 2.2: Der geplante Aufbau der Arrays auf La Palma und in der Atacamawueste: Auf La Palma werden zunaechst nur die beiden groesseren Teleskoptypen am Krater des Vulkans errichtet. In der Atacamawueste werden alle drei Teleskoptypten verwendet. Aufgrund der grossen freien Flaeche kann hier auch ein grosser Bereich symmetrisch abgedeckt werden.

### 2.2.2 Koordinatens des MST

Das MST benutzt ein Koordinatensystem aus zwei Winkeln und aehnelt den Kugelkoordinaten. Der Azimutwinkel ( $az$ ) beschreibt die Auslenkung in der Ebenenen und lauft von  $-180^\circ$  bis  $180^\circ$ , wobei es fuer  $az = 0^\circ$  in Richtung Norden ausgerichtet ist. Der Elevationswinkel  $el$  lauft von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  wobei  $el = 90^\circ$  dem Zenit entspricht. Da es bei der Entwicklung von Pointingmodellen von Vorteil sein kann, wenn man in kartesischen Koordinaten rechnet, wurde hier die Konvention verwendet, dass Nordrichtung der x-Richtung, die Westrichtung der y-Richtung und die Zenitrichtung der z-Richtung entspricht.

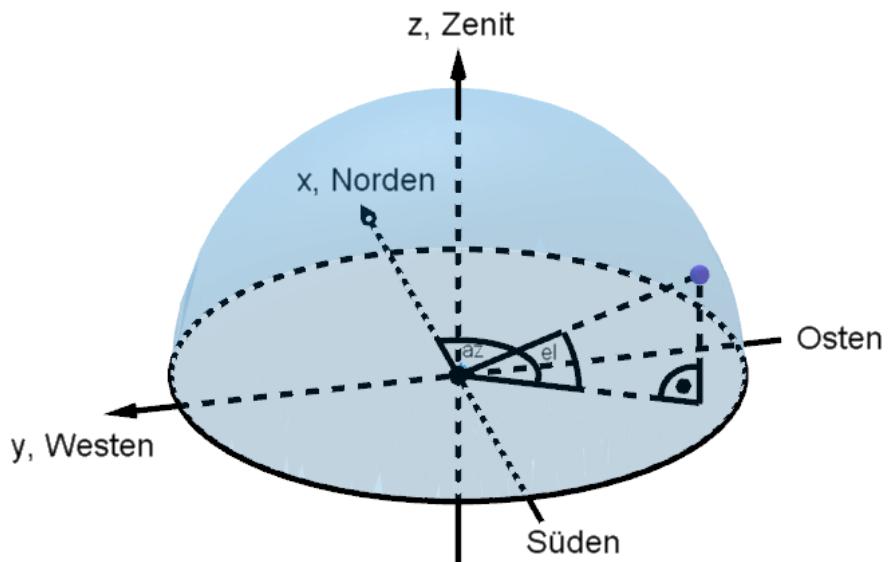


Figure 2.3: Die verwendeten Koordinaten

### **2.2.3 Bestimmung der Bildkoordinaten durch astrometry.net**

Aus den mit der Kamera aufgenommen Bildern lassen sich mithilfe der astrometry.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 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.

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

$$\begin{aligned} az_D &= f_{az}(az_C, el_C) \\ el_D &= f_{el}(az_C, el_C) \end{aligned} \quad (3.1)$$

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

$$\Delta_{az} = f_{az}(az_C, el_C) - 0 \quad \Delta_{el} = f_{el}(az_C, el_C) - 0 \quad (3.2)$$

## 3.2 Vereinfachtes Pointingmodell mit zwei Parametern

Zunächst soll ein Pointingmodell mit zwei Parametern entwickelt werden, bei dem die Kamera in der Parkposition ( $el_C = 0, az_C = 0$ ) in eine andere Richtung zeigt als das Drivesystem ( $el_D = el_0, az_D = az_0$ ). Die beiden Positionen lassen sich auch durch zwei karthesische Richtungsvektoren  $\vec{r}_D$  und  $\vec{r}_C$  beschrieben. Somit lässt sich die CCD durch einen Vektor in Richtung Norden

$$\vec{r}_C^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

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

$$T(az, el) = R_z(el)R_y(az) = \begin{pmatrix} \cos(az) & \sin(el) & 0 \\ -\sin(el) & \cos(el) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(el) & 0 & -\sin(el) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(el) & 0 & \cos(el) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$T(az, el) = \begin{pmatrix} \cos(az)\cos(el) & \sin(az) & -\cos(az)\sin(el) \\ -\cos(el)\sin(az) & \cos(az) & \sin(az)\sin(el) \\ \sin(el) & 0 & \cos(el) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Mit dieser Transformation lässt sich auch die Startposition des Drives bestimmen:

$$\vec{r}_C^0 = T(az_0, el_0) \vec{r}_D^0 = \begin{pmatrix} \cos(az_0) \cos(el_0) \\ -\cos(el_0) \sin(az_0) \\ \sin(el_0) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

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

$$\vec{r}_C = T(az, el) \vec{r}_D^0 = \begin{pmatrix} \cos(az) \cos(el) \\ -\cos(el) \sin(az) \\ \sin(el) \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

und für die Richtung des Drives

$$\vec{r}_D = T(az, el) \vec{r}_C^0 = \begin{pmatrix} \cos(az) (\cos(az_0) \cos(el) \cos(el_0) - \sin(el) \sin(el_0)) - \cos(el_0) \sin(az) \sin(az_0) \\ \sin(az) (\sin(el) \sin(el_0) - \cos(az_0) \cos(el) \cos(el_0)) - \cos(az) \cos(el_0) \sin(az_0) \\ \cos(az_0) \cos(el_0) \sin(el) + \cos(el) \sin(el_0) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

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

$$el = \arcsin(r_z) \quad (3.8)$$

und der Azimutwinkel aus dem Verhältnis von y- zu x-Komponente. Allerdings muss man hierbei beachten, in welchem der 4 Quadranten man sich befindet

$$az = \arctan(r_y, r_x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) & r_x > 0 \\ \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) + \pi & r_x < 0, r_y > 0 \\ \pm\pi & r_x < 0, r_y = 0 \\ \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right) - \pi & x < 0, r_y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & x = 0, r_y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x = 0, r_y < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Die Position der CCD ist so konstruiert, dass ihre Koordinaten mit denen in der Transformationsmatrix übereinstimmen

$$az_C = azel_C = el \quad (3.10)$$

und für die Koordinaten des Drives erhält man

$$az \quad (3.11)$$

# 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.