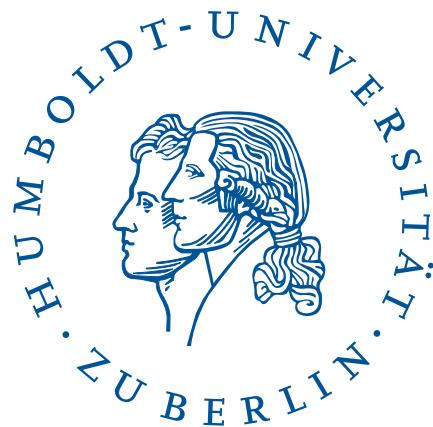


# **Titel der Arbeit**

## **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 . . . . .                                   | 3        |
| 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 . . . . . | 8        |
| <b>3</b> | <b>Pointingmodell</b>   | <b>9</b> |
| 3.1      | Koordinatens des MST . . . . .                                  | 9        |
| 3.2      | Kameras des MST . . . . .                                       | 9        |
| 3.3      | Entwicklung von Pointingmodellen . . . . .                      | 9        |
| 3.4      | Vereinfachtes Pointingmodell für feste Azimutwerte . . . . .    | 9        |

# List of Figures

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 1.1 | Der Cherenkoweffekt . . . . .   | 4 |
| 1.2 | Detektion hochenergetischer Strahlung . . . . .   | 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 |

## **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 Photonen so hoch ist, können sie nicht thermischen Ursprungs sein sondern kommen aus anderen Quellen, deren Untersuchung das Ziel der Hochenergie-Gamma-Astronomie 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.

### Zerfall von schweren Teilchen

Zerfallen schwerere Teilchen in Photonen, so wird die Ruheenergie dieses Teilchens in kinetische Energie der Photonen umgewandelt. Ein Beispiel hierfür ist der Zerfall des neutralen Pions, die häufig bei der Kollision von Atomkernen entstehen. Das Pion hat eine Ruhemasse von 135 MeV und zerfällt fast ausschließlich in zwei Photonen, die dann eine Energie von ungefähr 68 MeV haben.

### Materie-Antimaterie-Annihilation

Bei der Kollision von Materie mit Antimaterie vernichten sich die beiden Teilchen und es entstehen Neue. Diese können Photonen sein oder Teile, die wiederum in Photonen zerfallen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Elektron-Positron-Annihilation. Besitzen die beiden Teilchen keine kinetische Energie, so zerfallen sie in zwei Photonen mit der Energie  $E=511\text{keV}$ .

### 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.

## 1.2 Quellen hochenergetischer Strahlung

Ziel VHE-Astronomie ist es die Quellen hochenergetischer Gammastrahlung zu erforschen. Folgende Quellen sind bekannt:

### Schwarze Löcher

Schwarze Löcher sind Überreste von Supernovae massiver Sterne -> aktive Kerne

### Supernova Überreste

Supernovae

## 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

Hochenergetische Photonen koennen auch nach Prinzipien erzeugt werden, die man heute noch nicht versteht. So koennte es moeglich sein, dass hochenergetische Photonen durch den Zerfall von Partikeln der dunklen Materie stammen. Die Supersymmetrie sagt zum Beispiel den Zerfall von schweren WIMPS in Photonen vorraus. Durch Detektion solcher Ereignisse liesse sich auf neue Physik schliessen.

## 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.

### 1.3.1 Luftschauder

Treten hochenergetische Photonen in die Materie ein, so wechselwirken sie mit dieser ueber Paarbildung. Das entstehende Elektron bzw Positron verliert daraufhin Energie durch Bremsstrahlung, worauf die entstehenden Photonen wieder durch Paarbildung wechselwirken koennen. Somit steigt die Anzahl der Teilchen exponentiell an und die durchschnittliche Energie nimmt exponentiell ab, bis die Teilchen ionisierend sind und der Schauer verschwindet. Die entstehenden Teilchen lassen sich nicht direkt nachweisen, da der Schauer bereits in einer Hoehe von ca  $10\text{ km}$  verschwindet. Neben elektromagnetischen Schauern existieren noch hadronische und myonische Schauern. Hadronische Schauer entstehen wenn hochenergetische Hadronen in die Atmosphaere 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 sich Teilchen in Materie schneller als Photonen bewegen und lasst sich analog zum Überschallknall erklären. Das geladene Teilchen polarisiert auf seiner Trajektorie die einzelnen Atome, die somit Licht sphaerisch abstrahlen. Da sich das Teilchen allerdings schneller als das Licht bewegt, entsteht ein Kegel konstruktiver Interferenz. Somit entsteht ein Lichtblitz, der sich kegelfoermig mit dem Oeffnungswinkel

$$\theta = \arccos \left( \frac{1}{\beta n} \right) \quad (1.1)$$

ausbreitet. Fuer Luft (in Bodennaehe) ergibt sich somit ein maximaler Oeffnungswinkel von

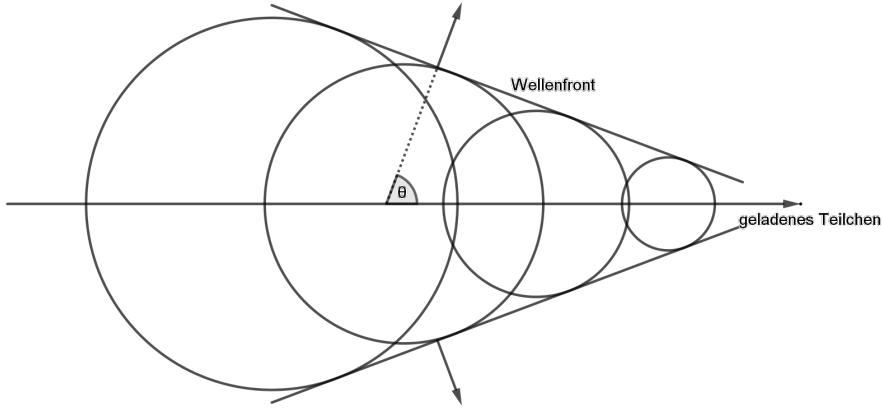


Figure 1.1: Der Cherenkoeffekt: Ein geladenes Teilchen durchfliegt ein dielektrisches Medium und erzeugt Wellenfronten.

### 1.3.3 Bodengestützte Detektion der Cherenkovstrahlung

Da aufgrund der Atmosphäre weder das primaere Photon noch die Teilchen des Luftschauers detektiert werden können, versucht man die Cherenkovstrahlung, die durch den Luftschauer entsteht zu detektieren. Dazu muss eine grosse Fläche abgedeckt werden, da selbst bei vertikaler Einstrahlung der Schauer einen Durchmesser von ca 250m haben kann. Somit ergeben sich Flächen der Grossenordnung von  $10^4 - 10^5 m^2$ . Um diese Flächen abdecken zu können, verwendet man Teleskope mit effektiven Flächen von ungefähr  $100m^2$  (VERITAS). Häufig bestehen die Reflektoren aus vielen einzelnen Spiegeln um die Kosten zu drücken. Im Brennpunkt der Spiegel befindet sich der Cherenkovdetektor der in der Regel aus vielen Photomultipliern (PMTs) besteht. Somit erhält man effektiv eine Kamera mit einer typischen Auflösung von ca 2000 Pixeln. Die Auflösung ist im Vergleich zu CCD Kameras einerseits eher gering, da die Cherenkov Kamera in der Lage sein muss einzelne Photonen zu detektieren und andererseits dauern Cherenkovschauer nur wenige Nanosekunden, die wiederum zeitlich aufgelöst werden müssen. Zusätzlich müssen die Teleskope elektromagnetische Schauer von hadronischem Schauer unterscheiden und dürfen nicht durch Hintergrundeffekte wie zum Beispiel Sternenlicht gestört werden.

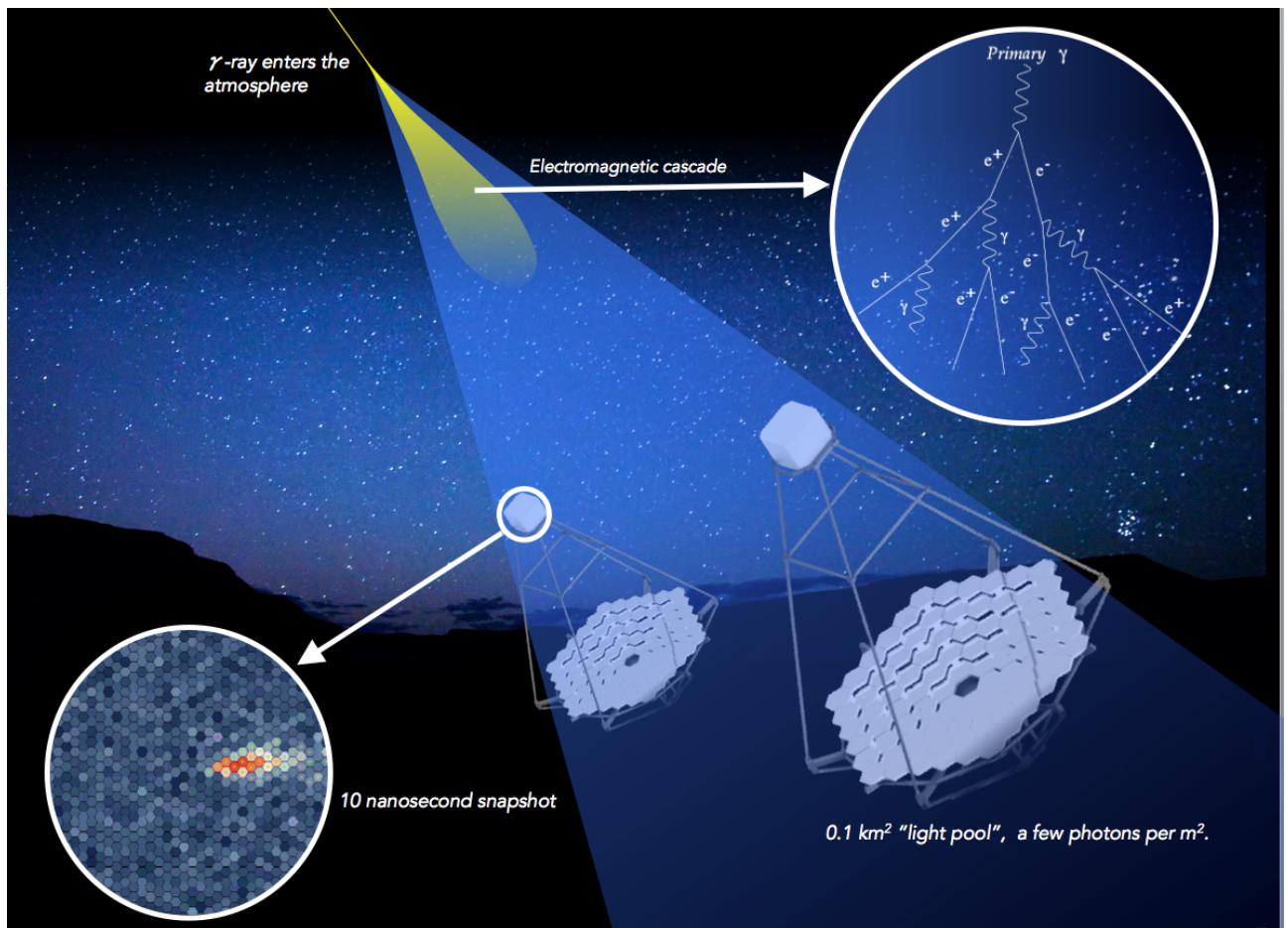


Figure 1.2: Detektion hochenergetischer Strahlung

## 2 Das Cherenkov Telescope Array

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

- Verbesserung des Sensitiviteatslevels um eine Grossenordnung auf 1TeV
- Erhoehung der Detektionsflaeche/Photonenrate->Zugang zu kurzeitigen Ereignissen
- Erhoehung der Winkelaufloesung/des Sichtfeldes
- Energieabdeckung von 20GeV bis 300TeV
- Verbesserung des Vermessungsfaehigkeit, Ueberwachungsfaehigkeit und Flexibilitaet->gleichzeitige Beobachtung von Objekten in verschiedenen Feldern
- Datenproduktion und Tools auf fuer nicht Experten
- Abdeckung des gesamten Himmels (nord+sued)

### 2.1 Design-Konzept

Um sowohl die suedliche als auch die noerdliche Hemnisphaere abzudecken, wird das CTA in der Atacamawueste in Chile und auf der zu Spanien gehoerenden Insel La Palma errichtet.

#### 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 kohlefaserstaerktem 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.

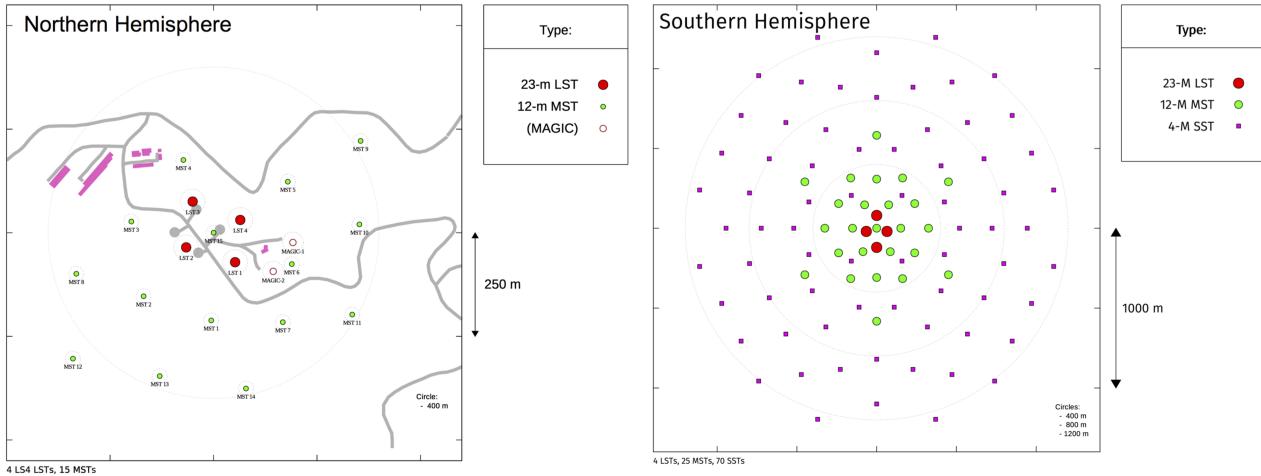


Figure 2.2: Der geplante Aufbau der Arrays auf La Palma und in der Atacamawueste: Auf La Palma werden zunaechst nur die beiden groesseren Teleskoptypen am Krater des Vulkans errichtet. In der Atacamawueste werden alle drei Teleskoptypen verwendet. Aufgrund der grossen freien Flaeche kann hier auch ein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

### 2.2.2 Koordinatens des MST

Als geeignetes Koordinatensystem für den Betrieb eines Teleskops erweist sich ein mit zwei Winkeln zu beschreibendes System, das den Kugelkoordinaten ähnelt. Der Azemutwinkel behält seinen Namen und zeigt in der Regel bei  $0^\circ$  in Richtung Norden. Der Polarwinkel behält ebenfalls seine Bedeutung und wird Elevation genannt.

### 2.2.3 Bestimmung der Bildkoordinaten durch astronomy.net

Aus den mit der Kamera aufgenommen Bildern lassen sich mithilfe der astronomy.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 Koordinatens des MST

Als geeignetes Koordinatensystem für den Betrieb eines Teleskops erweist sich ein mit zwei Winkeln zu beschreibendes System, das den Kugelkoordinaten ähnelt. Der Azemutwinkel behält seinen Namen und zeigt in der Regel bei  $0^\circ$  in Richtung Norden. Der Polarwinkel behält ebenfalls seine Bedeutung und wird Elevation genannt.

## 3.2 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.

## 3.3 Entwicklung von Pointingmodellen

Da man aus den gewünschten Koordinaten der CCD die Koordinaten des Drives bestimmen lässt, drückt man sie als Funktion voneinander aus.

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

Diese Funktionen werden so optimiert, dass die Gleichung möglichst gut erfüllt wird.

## 3.4 Vereinfachtes Pointingmodell für feste Azimutwerte

Zunächst wurde ein Datensatz (run281), bei dem die vier festen Elevationswerte am Drive eingestellt wurden, verwendet. In diesem Modell wird die Position der Kamera durch zwei Drehungen beschrieben (eine um die x-Achse und eine um die z-Achse). Somit lässt sich die Position des Drives bzw der Kamera durch die Richtungsvektoren beschreiben. Da sich diese Vektoren durch Transformationen die unabhängig von el und az sind ineinander überführen lassen, kann das Modell auch entwickelt werden, indem die Drive und CCD Koordinaten in 3.1 untereinander tauscht. Das hat zum Vorteil, dass man die Funktionen nur für eine Variable fitten muss.

Die Richtungsvektoren lassen sich durch zwei weitere Drehungen um den Elevationswinkel und den Azimutwinkel in Position bringen. Aus den resultierenden Vektoren lassen sich wiederum die wahren Azimut- und Elevationswerte bestimmen.

$$az = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad el = \arcsin(z) \quad (3.2)$$

wobei  $x, y$  und  $z$  den einzelnen Koordinaten der Vektoren entsprechen. Somit ergeben sich für dieses Modell folgende Funktionen. Hier müssen noch die beiden Winkel durch Fits am Datensatz bestimmt werden. Die Fits wurden jeweils für die vier Azimutwerte und die beiden Pointingfunktionen unabhängig durchgeführt, sodass sich für jeden Fit neue Parameter ergeben. Zusätzlich wurden konstante Fehlerbalken berechnet, die die Bedingung  $\frac{\chi^2}{dof}$  erfüllen. Diese ergeben sich durch.

# **Selbständigkeitserklärung**

Text der Selbständigkeitserklärung.