

Die technische Performance des Hamburger Robotischen Teleskops



Diplomarbeit
von
Marco Mittag

Universität Hamburg
Department Physik
Institut
Hamburger Sternwarte

vorgelegt am 11.10.2006 in Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Theorie	9
2.1	Pointing Modell	9
2.1.1	Klassisches Pointing Modell	9
2.1.2	Pointing Modell des HRT	15
2.2	Korrektur und Umrechnung der Koordinaten	16
2.2.1	Eigenbewegung der Sterne	16
2.2.2	Präzessionsbewegungen der Erde	17
2.2.3	Aberration	20
2.2.4	Refraktion	22
2.2.5	Geschwindigkeitsschwankung der Erde	23
2.2.6	Koordinatentransformation von RA/DEC in Az/Alt	26
2.2.7	Zusammenfassung	27
2.3	Berechnung des Pointing Modells	30
2.3.1	Bestimmung der Pointingparameter	30
2.3.2	Bestimmung der Fehler und der Korrelationskoeffizienten	31
2.4	Nachführungsoszillation	32
3	Das Hamburger Robotische Teleskop	35
3.1	Technische Daten	35
3.2	Gesamtsystemaufbau des HRT	37
3.2.1	Central Control System (CCS)	37
3.2.2	Teleskop	37
3.2.3	Adapter	37
3.2.4	Spektrograph und CCD	37
3.2.5	Archiv	37
3.2.6	Wolkenmonitor und Wetterstation	37
3.2.7	Scheduler	38
3.3	Wissenschaftliche Vorhaben	38
4	Durchführung	39
4.1	Pointing Modell Messung	39
4.2	Trackingtest	40
4.3	Oszillationstest	40

5	Auswertung des Pointing Modells	43
5.1	Bestimmung des Fehlers der Einzelmessung σ	43
5.1.1	Refraktion	43
5.1.2	Seeingbedingter Abweichungsfehler	45
5.1.3	Eigenbewegung der Sterne	45
5.1.4	Koordinatenfehler	46
5.1.5	Zusammenfassung	47
5.2	Bestimmung der Parameter des Pointing Modells	47
5.2.1	Berechnung der Parameter	47
5.2.2	Korrelation der Parameter	49
5.2.3	Fehlerbetrachtung und Zusammenfassung	50
5.3	Untersuchung der Residuen	50
5.4	Analyse des Pointing Modells des HRT	52
5.4.1	Offsets ohne Pointing Modell	52
5.4.2	Herkunft der zusätzlichen Parameter	52
5.4.3	Höhenkorrekturgleichung	54
5.4.4	Azimutkorrekturgleichung	56
5.4.5	Zusammenfassung	58
5.5	Temperaturabhängigkeit der Parameter	59
5.5.1	Methode	59
5.5.2	Ergebnis	59
5.5.3	Schlussfolgerung	61
5.6	Alternative Berechnung der Azimutkorrektur	62
5.6.1	Neue Berechnungsgleichung der Parameter	62
5.6.2	Modellrechnungen	63
5.6.3	Vergleich der Ergebnisse der beiden Gleichungen	64
5.6.4	Temperaturabhängigkeit der Parameter	67
5.6.5	Zusammenfassung	68
5.7	Kapitelzusammenfassung	69
5.7.1	Zusammenfassung zum Pointing Modell	69
5.7.2	Vorschläge zur Optimierung des Pointing Modells	70
6	Auswertung der Trackingtests	71
6.1	Methode	71
6.2	Ergebnis	72
6.2.1	Vergleich von Trackingmessungen	73
6.2.2	Trackingverlustraten im Höhenverlauf	78
6.2.3	Mittlere Trackingverlustrate in den 4 Quadranten des Azimuts	79
6.2.4	Vergleich mit den Verlustraten aus der Endabnahme des HRT	80
6.3	Schlussfolgerung	80
7	Auswertung des Oszillationstests	83
7.1	Methode	83
7.2	Ergebnis	84
7.3	Schlussfolgerung	87

8	Untersuchung der Schwankungen in der Nachführung	89
8.1	Methode	89
8.2	Ergebnis	90
8.2.1	Wahrscheinlichkeit einer Schwankung	90
8.2.2	Mittlere Schwankungsstärke	92
8.3	Schlussfolgerung	93
9	Gesamtzusammenfassung	95
A	Tabellen	97
B	Abbildungen	101
	Literaturliste	121

Kapitel 1

Einleitung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll die technische Performance des HRT untersucht und wenn möglich verbessert werden. Hierbei steht im Mittelpunkt das Pointing- und Trackingverhalten des Teleskops. Dieses wird durch das sogenannte Pointing Modell wesentlich bestimmt.

Für ein gutes Pointing- und Trackingverhalten des Teleskops ist es daher sehr wichtig ein möglichst exaktes Pointing Modell zu bestimmen. Dieses ist nicht nur für das genaue Anfahren des Teleskops auf ein Objekt verantwortlich, sondern mit einem exakten Pointing Modell könnten die Trackingverlusten klein gehalten werden. Dies könnte eine Guidingkamera überflüssig machen und würde eine Verringerung der Störanfälligkeit des Teleskops bedeuten. Oder sollte die Nachführung des Teleskops mit Hilfe der Guidingkamera ausfallen, könnte die Nachführung des Teleskops durch reines Tracking ausreichend gut sein. Hierdurch könnte man trotz des Ausfalles der Guidingkamera den Beobachtungsbetrieb im beschränkten Maße fortsetzen. Die Beschränkung läge hier, aufgrund der Trackingverluste, in der Zeit der Beobachtung.

Durch eine eventuelle Verbesserung des Pointing Modells soll nicht nur das Pointing- und Trackingverhalten verbessert werden, sondern es soll auch eine Langzeitstabilität des Modells erreicht werden. Hierdurch müsste man seltener eine Pointingmessung durchführen und das neue Modell einstellen, was eine Verringerung der Systempflege zur Folge hat. Desweiteren sollte eine Überprüfung von weiteren Eigenschaften des HRT durchgeführt werden. Dazu gehörten Trackingtests und die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Nachführungsoszillation. In diesem Zusammenhang konnte auch eine Untersuchung der Kurzzeit-Schwankungen in der Nachführung durchgeführt werden.

Die zeitliche Entwicklung der Nachführungsoszillation ist auch für den zukünftigen Beobachtungsbetrieb von Interesse, da diese Oszillation auch Auswirkungen auf die optische Auflösung der Aufnahmen haben könnte.

Kapitel 2

Theorie

2.1 Pointing Modell

Bei der Konstruktion und Aufstellung eines Teleskops entstehen in der Regel Fehler, die bewirken, dass das Objekt welches man beobachten möchte, nicht im Zentrum des Gesichtsfeldes des Teleskops ist. Diese Fehler müssen nun, mit Hilfe einer Korrektur an den Sollkoordinaten für Azimut und Höhe, ausgeglichen werden und somit gilt:

$$\begin{aligned} az' &= az + \Delta az \\ h' &= h + \Delta h. \end{aligned}$$

Hierbei sind az und h die wahren Objektkoordinaten. Diese Korrekturen, Δaz und Δh , der Koordinaten nennt man Pointing¹ Modell. Das Pointing Modell ist als ein Stellmodell zu verstehen, dass das Teleskop auf das Objekt ausrichtet. Es ist daher sehr wichtig, ein möglichst genaues Pointing Modell zu erstellen, da dieses für das genaue Positionieren des Teleskops auf ein Objekt verantwortlich ist.

2.1.1 Klassisches Pointing Modell

Im klassischen Pointing Modell beschreiben die einzelnen Parameter die geometrischen Fehler, die bei einem "idealen"² Teleskop auftreten können. Es sind insgesamt 11 Parameter die im folgenden beschrieben werden [11][13].

2.1.1.1 AN - Verkipfung der Azimutachse nach Norden

Die Azimutachse des Teleskops ist leicht in Richtung Norden verkippt, wie in der Abbildung (2.1) graphisch dargestellt. Mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie erhält man folgenden Zusammenhang für AN:

Der Punkt S stellt den Stern dar, der bei den korrekten Azimut- und Höhenkoordinaten ($A=az, h$) steht. Durch die Verkipfung der Azimutachse steht der Stern aber für uns bei ($A'=az', h'$). N und W stehen für Norden und Westen, Z bezeichnet den Zenit und P ist der Pol der Azimutachse, der nach Norden um den Winkel θ verkippt ist. Die Strecken

¹engl: to point: stellen, zeigen, weisen, richten auf

²ideal: alle Fehler sind, bis auf die durch die Aufstellung und Konstruktion entstanden sind, ausgeschlossen

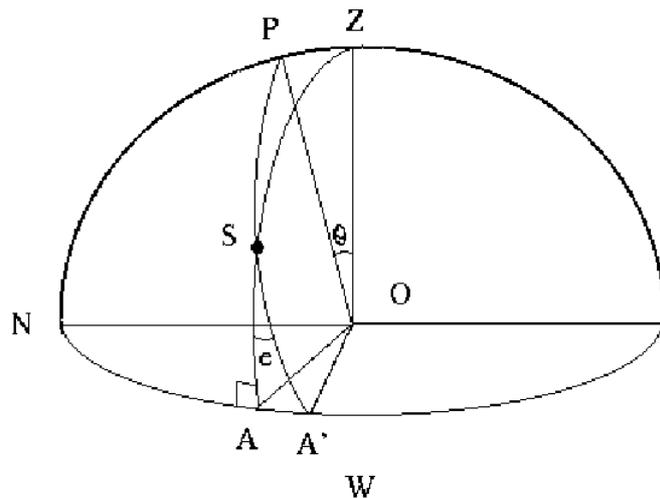


Abbildung 2.1: Darstellung der Azimutverkipfung nach Norden, Original aus [13]

$\overline{AS}=h$, $\overline{A'S}=h'$, $\overline{SZ}=90^\circ-h$ und $\overline{SP}=90^\circ-h'$. Für das Dreieck ASA' und dem Winkel $\angle ASA'=e$ gilt der Sinussatz:

$$\frac{\sin(\overline{azaz'})}{\sin(h')} = \frac{\sin(e)}{\sin(90^\circ)} \Rightarrow \sin(\overline{azaz'}) = \sin(h') \cdot \sin(e) \quad (2.1)$$

Für das Dreieck SPZ gilt:

$$\frac{\sin(e)}{\sin(\theta)} = \frac{\sin(\angle PZS)}{\sin(\overline{SP})} = \frac{\sin(360^\circ - az)}{\sin(90^\circ - h')} = \frac{-\sin(az)}{\cos(h')} \quad (2.2)$$

Nun wird die Gleichung (2.1) in die Gleichung (2.2) eingesetzt und man erhält durch umstellen:

$$\sin(\overline{azaz'}) = -\sin(\theta) \cdot \sin(az) \cdot \tan(h') \quad (2.3)$$

Für kleine Winkel gilt z. B. $\sin(\theta) = \theta$ und $\theta = AN$. Die Azimutkorrektur ist im allgemeinen aus geometrischen Gründen höhenabhängig, sie ist $\propto \cos(h)$ und wie noch bei NPAE gezeigt wird, kann man $h=h'$ setzen. Mit $\overline{azaz'} \cdot \cos(h) = \Delta az$ erhält man für die Azimutkorrektur:

$$\Delta az = -AN \cdot \sin(az) \cdot \sin(h). \quad (2.4)$$

Die Höhenkorrektur erhält man ebenfalls aus dem Dreieck SPZ , indem man die Strecke \overline{SP} auf \overline{SZ} projiziert. Man unterteilt \overline{SZ} in zwei Teile, einmal $\overline{SB}=\overline{SZ} \cdot \cos(e)$ und \overline{BZ} . Die Strecke \overline{BZ} ergibt sich wie folgt:

$$\overline{BZ} = AN \cdot \cos(\angle PZS) = AN \cdot \cos(360^\circ - az) = AN \cdot \cos(az). \quad (2.5)$$

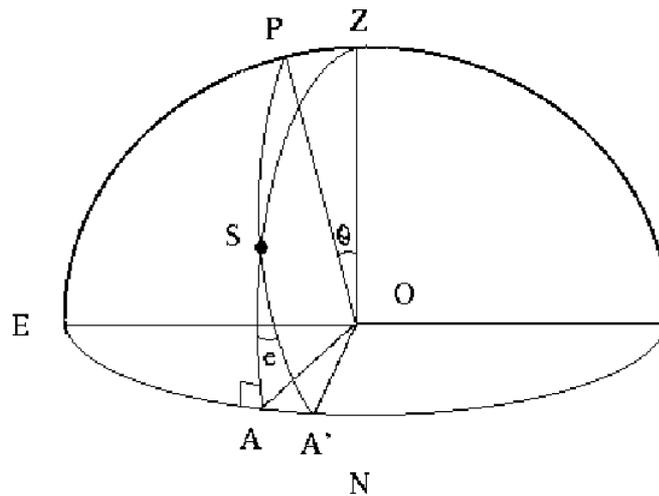


Abbildung 2.2: Darstellung der Azimutverkipfung nach Osten, Original aus [13]

Die Strecke \overline{BZ} ist gleich der gesuchten Höhenänderung und somit ist die Höhenänderung gegeben durch:

$$\Delta h = AN \cdot \cos(\text{az}). \quad (2.6)$$

2.1.1.2 AE - Verkipfung der Azimutachse nach Osten

Den Korrekturterm bzw. den Parameterterm für AE erhält man durch eine ähnliche Rechnung wie für AN, wobei die gleichen sphärischen Dreiecke benutzt werden, siehe Abbildung (2.2). Hierbei werden N und W durch E und N ersetzt, wobei E für Osten³ steht. Man erhält nun für die Azimutkorrektur:

$$\Delta \text{az} = AE \cdot \cos(\text{az}) \cdot \sin(h). \quad (2.7)$$

Für die Höhenkorrektur erhält man:

$$\Delta h = AE \cdot \sin(\text{az}) \quad (2.8)$$

2.1.1.3 NPAE - Höhen- und Azimutachse stehen nicht senkrecht aufeinander

Wenn die Höhen- und Azimutachse des Teleskops nicht senkrecht zueinander sind, kommt es bei der Bewegung bzw. Drehung einer der beiden Achsen auch zu einer Bewegung der anderen Achse. In der Abbildung (2.3) ist dieser Effekt graphisch dargestellt. Z bezeichnet

³E: internationale Bezeichnung für Osten

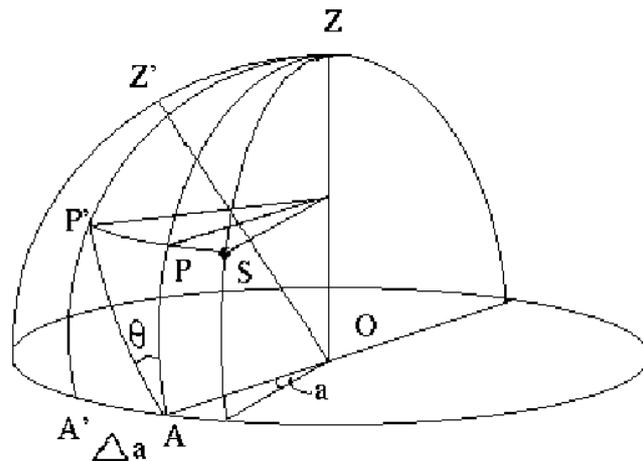


Abbildung 2.3: Höhen- und Azimutachse stehen nicht senkrecht aufeinander, Original aus [13]

den echten Zenit, die Strecke $\overline{OZ'}$ und die Höhenachse stehen im rechten Winkel aufeinander und der Winkel $ZOZ'=\theta=\text{NPAE}$. Der Stern S ist im wahren System (Z) durch eine Drehung um den Azimut a, sowie mit der wahren Höhe h im Punkt P gegeben. Im System, das um den Winkel θ verkippt ist, ist P' der entsprechende Punkt. Für das Dreieck AP'P gilt folgendes: $\overline{AP}=h$, $\overline{AP'}=h'$, $\overline{P'P}=\Delta\text{az}$, der Winkel $P'PA=90^\circ$ und der Winkel $PAP'=\theta$. Die Azimutkorrektur erhält man mit Hilfe des Sinussatzes und findet folgende Beziehung:

$$\frac{\sin(\Delta\text{az})}{\sin(\theta)} = \frac{\sin(h')}{\sin(90^\circ)}. \quad (2.9)$$

Somit ergibt sich:

$$\Delta\text{az} = \text{NPAE} \cdot \sin(h) \quad (2.10)$$

Für die Höhenkorrektur kann man ebenfalls den Sinussatz verwenden und bekommt:

$$\frac{\sin(h')}{\sin(90^\circ)} = \frac{\sin(h)}{\sin(90^\circ - \theta)} = \frac{\sin(h)}{\cos(\theta)} \quad (2.11)$$

Da der Winkel $\theta \ll 1$ folgt für $\cos(\theta)=1$. Somit erhält man $h'=h$, und $\Delta h=0$.

2.1.1.4 BNP - Strahlrichtung ist nicht senkrecht zur Höhenachse

Stehen Strahlrichtung und Höhenachse nicht senkrecht aufeinander, siehe Abbildung (2.4), kommt es zu einem Offset in der Azimutkoordinate. Es gilt:

$$\text{az}' - \text{az} = -\theta. \quad (2.12)$$

Dieser Winkel θ geht direkt als Offset in die Azimutkorrektur ein:

$$\Delta\text{az} = -\text{BNP}. \quad (2.13)$$

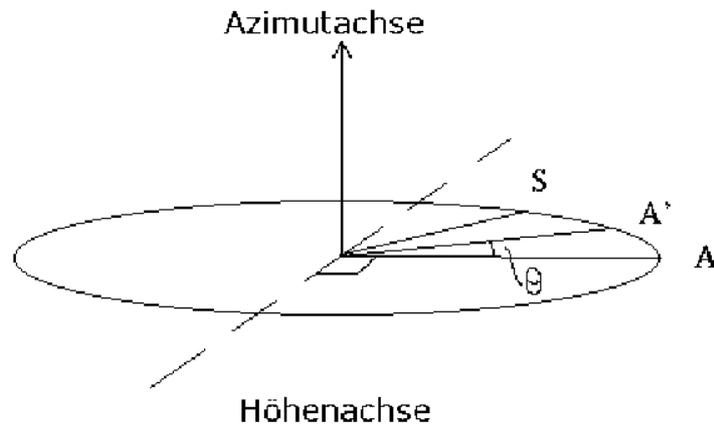


Abbildung 2.4: Strahlrichtung ist nicht senkrecht zur Höhenachse, Original aus [13]

2.1.1.5 TF - Durchbiegung der Tubusmontierung

Sobald der Tubus des Teleskops nicht in Richtung des Zenits zeigt, bewirkt die Gravitation der Erde eine Durchbiegung der Tubusmontierung, so dass das Teleskop nicht auf A, sondern auf B zeigt, siehe Abbildung (2.5). Den Ablenkungswinkel θ bzw. die Auswirkung auf die Höhe erhält man:

$$\Delta h = TF \cdot \cos(h). \quad (2.14)$$

Hierbei muss man annehmen, dass dieser Effekt linear in der Normalkomponente der Gravitationskraft, die auf den Tubus wirkt, ist. Auch wird vorausgesetzt, dass die Durchbiegung der Tubusmontierung im kompletten Höhenbereich gleichmäßig ist.

2.1.1.6 AOFF - Azimut Encoder-Offset

Der Azimut Encoder-Offset beschreibt die Dejustage des Azimutencoders beim Einbau. Das heißt, wenn die Achse auf den wahren Azimutwert eingestellt ist und diese nun am Encoder gemessen wird, wird eine Abweichung vom wahren Azimutwert festgestellt. Diese Winkelabweichung wird als Encoder-Offset bezeichnet. Somit ergibt sich für den Azimut Encoder-Offset:

$$\Delta az = AOFF \cdot \cos(h). \quad (2.15)$$

2.1.1.7 EOFF - Höhen Encoder-Offset

Der Höhen Encoder-Offset beschreibt den gleichen Fehler wie AOFF, jedoch hier für den Höhenencoder. Dieser Offset geht direkt in die Höhenkorrekturgleichung ein:

$$\Delta h = EOFF. \quad (2.16)$$

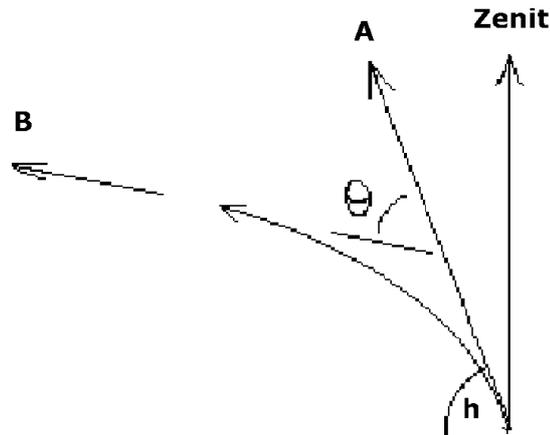


Abbildung 2.5: Durchbiegung der Tubusmontierung, Original aus [13]

2.1.1.8 Encoderdeformation

Die Encoderscheiben sollten im idealen Fall eine Kreisform haben und zentrisch eingebaut sein. Dies ist im allgemeinen jedoch nicht der Fall. Daher müssen diese Abweichungen mit berücksichtigt werden. Nimmt man an, dass die Scheibe nicht zentrisch eingebaut ist oder von der Kreisform abweicht, kommt es zu einem Offset, der die Form einer 360° Welle hat. Da man aber die Phasenlage dieser Welle nicht kennt, benötigt man den Sinus- sowie den Cosinusanteil dieser Welle. Es ist auch die Höhenabhängigkeit des Fehlers der Azimutencoderscheiben zu beachten. Man erhält für die Azimutkorrektur:

$$\Delta_{az} = AES \cdot \sin(az) \cdot \cos(h) + AEC \cdot \cos(az) \cdot \cos(h). \quad (2.17)$$

Für die Höhenkorrektur:

$$\Delta_{az} = EES \cdot \sin(h) + EEC \cos(h). \quad (2.18)$$

Hierbei beschreiben die Parameter AES und EES den Sinusanteil und AEC und EEC den Cosinusanteil der 360° Korrekturwelle.

2.1.1.9 Zusammenfassung

Die Parameter und deren Terme können nun zu den beiden klassischen Korrekturgleichungen zusammengefasst werden. Die Azimutkorrekturgleichung lautet:

$$\begin{aligned} \Delta_{az} &= az' - az \\ &= -BNP + NPAE \cdot \sin(h) - AN \cdot \sin(az) \cdot \sin(h) + AE \cdot \cos(az) \cdot \sin(h) \\ &\quad + AOFF \cdot \cos(h) + AES \cdot \sin(az) \cdot \cos(h) + AEC \cdot \cos(az) \cdot \cos(h) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Um den Korrekturwert am Azimutencoder zu erhalten, muss die Azimutkorrektur durch den Cosinus der Höhe dividiert werden. Somit erhält man:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{azEncoder}} &= \frac{\text{az}' - \text{az}}{\cos(h)} \\ &= \text{AOFF} - \text{AN} \cdot \sin(\text{az}) \cdot \tan(h) + \text{AE} \cdot \cos(\text{az}) \cdot \tan(h) \\ &\quad + \text{NPAE} \cdot \tan(h) - \frac{\text{BNP}}{\cos(h)} + \text{AES} \cdot \sin(\text{az}) + \text{AEC} \cdot \cos(\text{az}) \quad (2.20)\end{aligned}$$

Die Höhenkorrekturgleichung lautet:

$$\begin{aligned}\Delta h &= h' - h \\ &= \text{EOFF} + \text{AN} \cdot \cos(\text{az}) + \text{AE} \cdot \sin(\text{az}) \\ &\quad + \text{TF} \cdot \cos(h) + \text{EES} \cdot \sin(h) + \text{EEC} \cdot \cos(h) \\ &= \text{EOFF} + \text{AN} \cdot \cos(\text{az}) + \text{AE} \cdot \sin(\text{az}) \\ &\quad + \text{EES} \cdot \sin(h) + (\text{EEC} + \text{TF}) \cdot \cos(h) \quad (2.21)\end{aligned}$$

2.1.2 Pointing Modell des HRT

Das Pointing Modell des HRT basiert auf dem klassischen Modell, welches in der Diplomarbeit von Daniel Plaza [11] hergeleitet und wobei die Encoder Deformation nicht berücksichtigt wurde. Zudem ist es in dieser zu einem Vorzeichendreher der Parameter AN und AE gekommen. Dieser hat jedoch keine Auswirkung auf die Berechnung des Pointing Modells und den Betrag der Parameter, sondern nur auf die Vorzeichen. Dieser Vorzeichenfehler wurde damals nicht erkannt und wurde so in der Steuerungssoftware des Teleskops mit übernommen. Dies hat zur Folge, dass dieser Vorzeichenfehler in der Software zur Berechnung der Modellparameter zu berücksichtigen ist. Die Anpassung des klassischen Modells an das HRT wurde durch Dr. Hempelmann⁴ durchgeführt. Die beiden Korrekturgleichungen wurden voneinander entkoppelt, so dass die Parameter AN und AE für jede Gleichung separat bestimmt werden. Somit lauten AN und AE in der Azimutkorrekturgleichung AN_A und AE_A und in der Höhenkorrekturgleichung AN_E und AE_E. Weiterhin wurden zusätzliche Parameter c1 bis c5 in der Höhenkorrekturgleichung eingefügt. Die Parameter c1 und c2 sind die Amplituden, A₁ und A₂, sowie die Phasen einer 180° Welle und die Parameter c3 und c4 sind die Amplituden, A₁ und A₂, sowie die Phasen einer 120° Welle im Azimut. Die allgemeinen Gleichungen für die Amplitude A und Phase φ einer Welle lauten:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (2.22)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \quad (2.23)$$

Der Parameter c5 wird durch den Cosinus der Höhe dividiert, was zu einer Divergenz bei Höhe 90° führt. Somit lauten die Gleichungen für das HRT wie folgt:

⁴deutscher Astronom an der Hamburger Sternwarte

Die Azimutkorrekturgleichung:

$$\begin{aligned}\Delta az &= az' - az \\ &= -BNP + NPAE \cdot \sin(h) + AN_A \cdot \sin(az) \cdot \sin(h) - AE_A \cdot \cos(az) \cdot \sin(h) \\ &\quad + AOFF \cdot \cos(h) + AES \cdot \sin(az) \cdot \cos(h) + AEC \cdot \cos(az) \cdot \cos(h),\end{aligned}\quad (2.24)$$

die Azimutkorrekturgleichung am Azimutencoder:

$$\begin{aligned}\Delta az_{\text{Encoder}} &= \frac{az' - az}{\cos(h)} \\ &= AOFF + AN_A \cdot \sin(az) \cdot \tan(h) - AE_A \cdot \cos(az) \cdot \tan(h) \\ &\quad + NPAE \cdot \tan(h) - \frac{BNP}{\cos(h)} + AES \cdot \sin(az) + AEC \cdot \cos(az),\end{aligned}\quad (2.25)$$

die Höhenkorrekturgleichung:

$$\begin{aligned}\Delta h &= h' - h \\ &= EOFF + AN_E \cdot \cos(az) + AE_E \cdot \sin(az) \\ &\quad + EES \cdot \sin(h) + (EEC+TF) \cdot \cos(h) \\ &\quad + \frac{c5}{\cos(h)} + c1 \cdot \sin(2 \cdot az) + c2 \cdot \cos(2 \cdot az) \\ &\quad + c3 \cdot \sin(3 \cdot az) + c4 \cdot \cos(3 \cdot az)\end{aligned}\quad (2.26)$$

2.2 Korrektur und Umrechnung der Koordinaten

Mit Hilfe des Pointing Modells werden nur die Teleskopfehler, also technische Fehler, die ein Misspointing verursachen, berücksichtigt und korrigiert. Die natürlichen Effekte auf die Koordinaten sind im Pointing Modell nicht enthalten. Diese Effekte können aber einen erheblichen Einfluss auf das Pointingverhalten ausüben und dadurch zu einem Misspointing führen. Daher müssen die natürlichen Effekte auf die Koordinaten auch berücksichtigt und kompensiert werden.

Es ist für die Berechnung und die Fehleranalyse des Pointing Modells notwendig, alle Einflüsse zu kennen und deren Auswirkungen zu betrachten. Der Gesamtfehler setzt sich aus der geometrischen Summe der Einzelfehler zusammen und fließt als Varianz σ^2 in die χ^2 -Minimierung ein. Diese Effekte werden nun im folgenden beschrieben.

2.2.1 Eigenbewegung der Sterne

Nicht nur die Erdbewegungen müssen korrigiert werden, sondern, da die Sterne sich ebenfalls bewegen, muss auch diese Bewegung der Sterne kompensiert werden. Diese Bewegung ist die sogenannte Eigenbewegung μ der Sterne, auch proper motion⁵ (p.m.) genannt. Es ist die Bewegung der Sterne an der Himmelshalbkugel und wird in Bogensekunden pro Jahr oder in Millibogensekunden pro Jahr angegeben[5].

Man unterscheidet die Absolute und die Relative Eigenbewegung. Die Absolute Eigenbewegung erhält man aus der direkten Positionsmessung z. B. am Meridiankreis und der

⁵engl.: für Eigenbewegung

Reduktion auf eine einheitliche Epoche. Die Relative Eigenbewegung bestimmt man mit Hilfe von Aufnahmen eines Sterns, die man miteinander vergleicht. Aus ihr wird die Eigenbewegung, relativ zu anderen Sternen mit unterschiedlichen Eigenbewegungen, abgeleitet. Dazu müssen die Aufnahmen in einem möglichst großen zeitlichen Abstand gemacht werden. Die Eigenbewegung der Sterne wurde durch Edmond Halley⁶ 1718 entdeckt[6]. Die Beträge der Eigenbewegungen der Sterne sind in der Regel sehr klein. Es gibt jedoch Sterne, wenn auch nicht viele (ca. 500), die eine Eigenbewegung von größer als $1''$ a^{-1} besitzen. Die größte Eigenbewegung hat der Stern names Barnard's Stern mit einer Eigenbewegung von[5]:

$$\begin{aligned}\mu_{RA} &\approx -0'',799 \text{ a}^{-1} \\ \mu_{DEC} &\approx 10'',34 \text{ a}^{-1}\end{aligned}$$

Die Zahlenwerte der Eigenbewegung von Barnard's Stern stammen aus dem Simbad Katalog, sie sind dort in Millibogensekunden pro Jahr angegeben.

2.2.2 Präzessionsbewegungen der Erde

Durch die Zentrifugalkraft, die durch die Erdrotation entsteht, kommt es zu einer Abplattung der Erde. Den so verformten Erdkörper kann man sich als eine Zusammensetzung aus einer Kugel und einem Wulst am Äquator vorstellen. Deshalb kann man die rotierende Erde auch als einen Kreisel betrachten, der äußeren Kräften, durch Sonne, Mond und Planeten, ausgesetzt ist. Diese äußeren Kräfte versuchen die Rotationsachse zu kippen. Das resultierende Drehmoment steht senkrecht auf der Ebene des Drehpunkts und den angreifenden Kräften. Ein Kreisel kippt nicht um, sondern verlagert seine Rotationsachse in Richtung des resultierenden Drehmoments. Diese Bewegung der Rotationsachse wird Präzession genannt. Der Effekt der Präzession wird im folgenden genauer beschrieben.[4]

2.2.2.1 Lunisolar-Präzession

Es gibt verschiedene Arten der Präzession, die wichtigste ist die Lunisolar-Präzession. Sie wird durch die Anziehungskräfte der Sonne und des Mondes verursacht, die versuchen, die Äquatorebene in die Ekliptikebene⁷ zu ziehen. Diese Bewegung hat die Form eines Kegels, der auch Präzessionskegel genannt wird. Er hat einen Öffnungswinkel von $23,5^\circ$. Da in erster Näherung die Rotationsachse gegen die Erdbahn konstant ist, ist der Öffnungswinkel des Präzessionskegels auch gleich der Neigung der Ekliptik $\varepsilon=23,5^\circ$. Die Umlaufperiode beträgt ca. 25700 a. Hierdurch ist der Himmelspol nicht konstant, sondern wandert mit dieser Periode auf einem Kreis um den Pol der Ekliptik. Ebenso verändert sich die Lage der Äquatorebene zur Ekliptikebene, was eine Verlagerung des Frühlingspunkts zur Folge hat. Der Frühlingspunkt, der auch Widderpunkt genannt wird, ist einer der beiden Punkte auf der Ekliptik in der sich die Sonne im Moment der Tagundnachtgleiche⁸ befindet. Dies geschieht zum Frühlingsanfang, zum Herbstanfang heißt dieser Punkt Herbstpunkt, oder auch Waagepunkt.[7] Der Frühlingspunkt wandert in die entgegengesetzte Richtung der jährlichen Bewegung der Sonne. Diese Wanderung wird auch Lunisolar-Präzession p_0 genannt und beträgt $p_0 \approx 50'',4 \text{ a}^{-1}$. Der Effekt der Lunisolar-Präzession wurde schon von

⁶engl. Astronom *08.11.1656 in Haggerston; †14.01.1742 in Greenwich

⁷Ekliptik: scheinbare jährliche Bahn der Sonne auf der Himmelskugel

⁸den 21. März und 23. September

Hipparch⁹ im Jahr 130 v. Chr. entdeckt.

Bis jetzt wurden nur die Anziehungskräfte der Sonne und des Mondes betrachtet. Man kann die Ekliptikebene der Erde auch als einen Kreisel ansehen. Die Planeten die auf etwas anderen Bahnebenen die Sonne umkreisen, üben ein Drehmoment auf diese aus, was zu einer Präzessionsbewegung der Ekliptik führt. Diese heißt auch Planetenpräzession p_p und ist wesentlich langsamer als die Lunisolar-Präzession. Die Wanderung des Frühlingspunkts entlang des Äquators beträgt $p_p = 0'',125 \text{ a}^{-1}$. Zudem ändert sich die Schiefe der Ekliptik mit einer Periode von 40000 a zwischen $21,9^\circ$ und $24,3^\circ$ [4].

Zudem gibt es noch die sogenannte geodätische Präzession oder de Sitter¹⁰-Präzession, welche ein Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie ist. Der Einfluss der geodätischen Präzession ist jedoch sehr klein, sie beträgt nur $0'',02 \text{ a}^{-1}$ [8].

Durch die Lunisolar-Präzession und Planetenpräzession verändern sich laufend die Sternkoordinaten, Rektaszension (α) und Deklination (δ), da sich Grundkreis und Nullpunkt verschieben. Es ist daher notwendig die Epoche anzugeben, auf welche sich die Sternkoordinaten beziehen. Die genaue Berechnung der Koordinaten Rektaszension und Deklination unter Berücksichtigung der Präzession erfolgt wie folgt, entnommen aus [1]:

$$T = \frac{JD_0 - 2451545,0}{36525} \quad (2.27)$$

$$t = \frac{JD - JD_0}{36525}. \quad (2.28)$$

Hierbei ist T das Zeitintervall, in julianischen Jahrhunderten, die zwischen dem julianischen Datum Epoche J2000 und dem julianischen Datum der Epoche in der die Koordinaten angegeben sind. Auch t gibt ein Zeitintervall in julianischen Jahrhunderten an. Hier wird die Differenz zwischen dem julianischen Datum der Beobachtung und dem julianischen Datum der Epoche, in der die Koordinaten abgegeben sind, berechnet. Als nächstes erfolgt die allgemeine Berechnung der Werte von ζ , z und θ :

$$\zeta = (2306'',2181 + 1'',39656 \cdot T - 0'',000139 \cdot T^2) \cdot t + (0'',30188 - 0'',000344 \cdot T) \cdot t^2 + 0'',017998 \cdot t^3 \quad (2.29)$$

$$z = (2306'',2181 + 1'',39656 \cdot T - 0'',000139 \cdot T^2) \cdot t + (1'',09468 + 0'',000066 \cdot T) \cdot t^2 + 0'',018203 \cdot t^3 \quad (2.30)$$

$$\theta = (2004'',2109 - 0'',85330 \cdot T - 0'',000217 \cdot T^2) \cdot t - (0'',42665 + 0'',000217 \cdot T) \cdot t^2 - 0'',041833 \cdot t^3 \quad (2.31)$$

Sind die Koordinaten aus der Epoche J2000, vereinfachen sich diese Gleichungen wie folgt:

$$\zeta = 2306'',2181 \cdot t + 0'',30188 \cdot t^2 + 0'',017998 \cdot t^3 \quad (2.32)$$

$$z = 2306'',2181 \cdot t + 1'',09468 \cdot t^2 + 0'',018203 \cdot t^3 \quad (2.33)$$

$$\theta = 2004'',2109 \cdot t - 0'',42665 \cdot t^2 - 0'',041833 \cdot t^3 \quad (2.34)$$

Mit den Werten von ζ , z und θ ist es nun möglich die korrigierten Koordinaten von Rektaszension α und Deklination δ zu bestimmen. Es ist jedoch notwendig, bevor die Berechnung

⁹*190 v. Chr. ;†120 v. Chr. griechischer Astronom

¹⁰*06.05.1872 in Sneek;†20.11.1934 in Leiden niederländischer Astronom

erfolgt, die Eigenbewegung, siehe Abschnitt (2.2.1), der Objekte noch zu berücksichtigen. Die Gleichungen lauten wie folgt:

$$A = \cos(\delta_0) \cdot \sin(\alpha_0 + \zeta) \quad (2.35)$$

$$B = \cos(\theta) \cdot \cos(\delta_0) \cdot \cos(\alpha_0 + \zeta) - \sin(\theta) \cdot \sin(\delta_0) \quad (2.36)$$

$$C = \sin(\theta) \cdot \cos(\delta_0) \cdot \cos(\alpha_0 + \zeta) + \cos(\theta) \cdot \sin(\delta_0) \quad (2.37)$$

$$(2.38)$$

Die Rektaszension ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \tan(\alpha - z) &= \frac{A}{B} \\ \Rightarrow \alpha &= \arctan\left(\frac{A}{B}\right) + z \end{aligned} \quad (2.39)$$

Die Deklination erhält man:

$$\begin{aligned} \sin(\delta) &= C \\ \Rightarrow \delta &= \arcsin(C) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Befindet sich der Stern in der Polnähe, kann die Deklination wie folgt bestimmt werden:

$$\cos(\delta) = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (2.41)$$

$$\Rightarrow \delta = \arccos\left(\sqrt{A^2 + B^2}\right) \quad (2.42)$$

2.2.2.2 Nutation

Die Nutation ist eine Überlagerung von periodischen Schwankungen des Pols. Die astronomische Nutation hat hierbei den Hauptanteil. Es ist die Nutationsbewegung, die durch den Mond verursacht wird. Da die Mondbahn eine Neigung von ca. 5° hat, kommt es durch die Anziehungskräfte der Sonne zu einer Präzessionsbewegung der Mondachse. Die Folge ist eine Drehung der Mondbahnebene, sowie der Knotenpunkte¹¹ bzw. der Knotenlinie. Diese Drehung der Knotenpunkte hat eine Periode von 18,6 a. Durch die Variation der Mondbahnebene variiert auch das vom Mond ausgeübte Drehmoment auf die Erde. Es kommt somit zu einer Überlagerung der Lunisolar-Präzession mit einer Periode von 18,6 a. Die Bahn dieser Nutationsbewegung beschreibt wie die Präzessionsbewegung einen Kegel, dieser hat einen Öffnungswinkel von ca. $8''$. Eine weitere Nutationsbewegung, die aber wesentlich kleiner ist, ist die sogenannte Polschwankung die im Abschnitt (2.2.5) näher beschrieben wird, da sie dort eine größere Rolle spielt als hier.[4][5]

Die Korrektur des Nutationseffekts für die Koordinaten Rektaszension und Deklination wird folgendermassen berechnet, entnommen aus dem [1].

Die Nutation kann in zwei Komponente aufgespalten werden, einmal parallel und einmal senkrecht zur Ekliptik. Die Komponente parallel zur Ekliptik wird als $\Delta\psi$, die Länge der Nutation, und die senkrechte Komponente als $\Delta\varepsilon$, die Schiefe der Nutation, bezeichnet. Zu Beginn muss das julianische Jahrhundert T von der Epoche J2000 bestimmt werden.

$$T = \frac{\text{JDE} - 2451545}{36525} \quad (2.43)$$

¹¹Schnittpunkte der Mondbahn mit der Erdbahn

JDE ist das julianische Ephemeris Tag und basiert auf der Terrestrischen Dynamischen Zeit TDT. Der Unterschied zwischen JD und JDE ist minimal. Nun muss Ω , die Länge des aufsteigenden Nullpunkts der mittleren Mondbahn zur Ekliptik, und L und L' , die mittleren Längen, von der Sonne und dem Mond bestimmt werden. Dies erfolgt folgendermassen:

$$\Omega = 125.04452 - 1934.136261 \cdot T + 0,0020708 \cdot T^2 + \frac{T^3}{450000} \quad (2.44)$$

$$L = 280^\circ,4665 + 36000^\circ,7698 \cdot T \quad (2.45)$$

$$L' = 218^\circ,3165 + 481267^\circ,8813 \cdot T \quad (2.46)$$

Nun können die Werte $\Delta\psi$ und $\Delta\varepsilon$ wie folgt bestimmt werden, wobei die Terme T^2 und T^3 aus der Gleichung (2.44) vernachlässigt werden können:

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= -17'',20 \cdot \sin(\Omega) - 1'',32 \cdot \sin(2 \cdot L) \\ &\quad - 0'',23 \cdot \sin(2 \cdot L') + 0'',21 \cdot \sin(2 \cdot \Omega) \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon &= 9'',20 \cdot \cos(\Omega) - 0'',57 \cdot \cos(2 \cdot L) \\ &\quad + 0'',10 \cdot \cos(2 \cdot L') - 0'',9 \cdot \cos(2 \cdot \Omega) \end{aligned} \quad (2.48)$$

Die mittlere Schiefe der Mondbahn ε_0 ergibt sich wie folgt:

$$\varepsilon_0 = 84381'',448 - 46'',8150 \cdot T - 0'',00059 \cdot T^2 + 0'',001813 \cdot T^3 \quad (2.49)$$

Somit ergibt sich die wahre Schiefe der Ekliptik:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (2.50)$$

Nun kann die Nutationskorrektur α_1 und δ_1 , der Koordinaten Rektaszension α und Deklination δ berechnet werden. Die Gleichungen lauten:

$$\alpha_1 = (\cos(\varepsilon) + \sin(\varepsilon) \cdot \sin(\alpha) \cdot \tan(\delta)) \cdot \Delta\psi - (\cos(\alpha) \cdot \tan(\delta)) \cdot \Delta\varepsilon \quad (2.51)$$

$$\delta_1 = (\sin(\varepsilon) \cdot \cos(\alpha)) \cdot \Delta\psi + \sin(\alpha) \cdot \Delta\varepsilon \quad (2.52)$$

2.2.3 Aberration

Dieser Effekt ist jedem schon aufgefallen und zwar bei Regen. Wenn der Regen senkrecht vom Himmel fällt und man steht, merkt man dies. Bewegt man sich, scheint es aber, dass der Regen schräg von vorn fällt. Beim Licht ist es genauso, dieser Effekt heißt Aberration und entsteht durch die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit. Dieser Effekt des Lichts wurde von James Bradley¹² 1728 entdeckt. Die Aberration bzw. der Aberrationswinkel α beschreibt die scheinbare Ortsverlagerung in die Bewegungsrichtung des Beobachters, die durch die Geschwindigkeit des Lichtes und die Bewegung des Beobachters hervorgerufen wird. Für den Winkel α gilt:

$$\tan(\alpha) \approx \alpha = \frac{\vec{v}}{c} \cdot \sin(\gamma) \quad (2.53)$$

Der Winkel γ ist der Winkel zwischen \vec{v} und \vec{c} . Hierbei gilt die Annahme das $\vec{v} \ll \vec{c}$, was auf die Erdbewegung bzw. deren Geschwindigkeit zutrifft. Es gibt drei verschiedene Arten

¹²*1692;†1762 englischer Astronom und Geistlicher

der Aberration.[5]

Die jährliche Aberration wird durch die Geschwindigkeit \vec{v} der Erde um die Sonne verursacht.[5]

Die tägliche Aberration entsteht durch die Rotationsgeschwindigkeit der Erde.[5]

Die säkulare Aberration ist auf die Bewegung der Sonne bzw. auf die Bewegung des ganzen Sonnensystems um das galaktischer Zentrum zurückzuführen.[5][7]

Zur Korrektur der Koordinaten Rektaszension und Deklination muss nur der Effekt der jährlichen Aberration berücksichtigt werden, da die Effekte der täglichen Aberration und der säkularen Aberration auf die Koordinaten nicht relevant sind. Die Berechnung wurde aus [1] entnommen.

Zur Bestimmung der Korrektur benötigt man die Aberrationskonstante $\kappa = 20'' , 49552$, die wahre geometrische Länge der Sonne \odot , die Exzentrizität e der Erdumlaufbahn, sowie die Länge des Perihel's¹³ π der Erdumlaufbahn. Eine gute Näherung für die wahre geometrische Länge der Sonne \odot erhält man wie folgt:

$$T = \frac{JD_0 - 2451545,0}{36525} \quad (2.54)$$

$$L_0 = 280^\circ,4665 + 36000^\circ,7698 \cdot T + 0^\circ,0003032 \cdot T^2 \quad (2.55)$$

$$M = 357^\circ,52911 + 35999^\circ,05029 \cdot T - 0^\circ,0001537 \cdot T^2 \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} C = & + (1^\circ,914602 - 0^\circ,004817 \cdot T - 0^\circ,000014 \cdot T^2) \cdot \sin(M) \\ & + (0^\circ,019993 - 0^\circ,000101 \cdot T) \cdot \sin(2 \cdot M) \\ & + 0^\circ,000289 \cdot \sin(3 \cdot M) \end{aligned} \quad (2.57)$$

Hierbei ist T die Zeit, in julianischen Jahrhunderten, die zwischen der Beobachtung und dem julianischen Datum der Epoche J2000 vergangen ist. L_0 ist die mittlere geometrische Länge der Sonne, M die mittlere Abweichung der Sonne und C das Zentrum der Sonne. Die wahre geometrische Länge der Sonne erhält man:

$$\odot = L_0 + C \quad (2.58)$$

Die Exzentrizität e der Erdumlaufbahn und die Länge des Perihel's π ergeben sich wie folgt:

$$e = 0,016708634 - 0,000042037 \cdot T - 0,0000001267 \cdot T^2 \quad (2.59)$$

$$\pi = 102^\circ,93735 + 1^\circ,71946 \cdot T + 0^\circ,00046 \cdot T^2 \quad (2.60)$$

Die Korrekturen der Koordinaten Rektaszension und Deklination für die Aberration lauten wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_2 = & - \kappa \cdot \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\odot) \cdot \cos(\varepsilon) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\odot)}{\cos(\delta)} \\ & + e \cdot \kappa \cdot \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\pi) \cdot \cos(\varepsilon) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\pi)}{\cos(\delta)} \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \Delta\delta_2 = & - \kappa \cdot [\cos(\odot) \cdot \cos(\varepsilon) \cdot (\tan(\varepsilon) \cdot \cos(\delta) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\delta)) \\ & + \cos(\alpha) \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\odot)] \\ & + e \cdot \kappa \cdot [\cos(\pi) \cos(\varepsilon) \cdot (\tan(\varepsilon) \cdot \cos(\delta) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\delta)) \\ & + \cos(\alpha) \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\pi)] \end{aligned} \quad (2.62)$$

¹³sonnennächster Punkt einer exzentrischen Planetenbahn

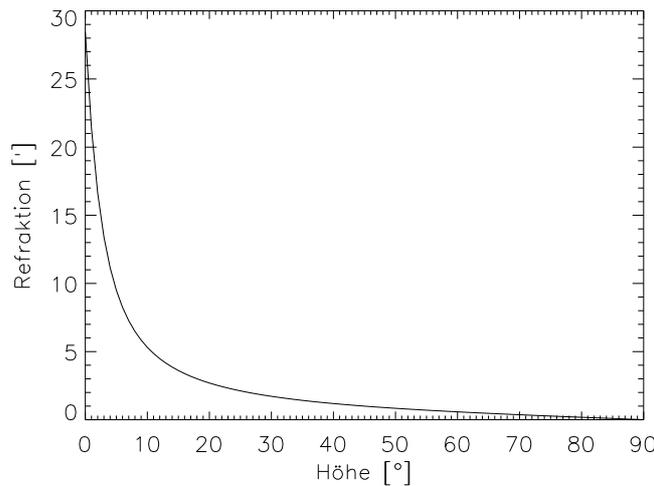


Abbildung 2.6: Darstellung der Refraktion

2.2.4 Refraktion

Bei einem Übergang von einem optisch dünneren in ein optisch dickeres Medium wird der Strahlengang des Lichts gebrochen. Das heißt das Licht bzw. die Strahlung, welche ein Objekt ausstrahlt, wird beim Übergang aus dem Weltall in die Erdatmosphäre, in Richtung Erdoberfläche, gebrochen. Dieser Effekt heißt Refraktion. Hierbei gilt das Snellius'sche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{oder} \quad n_i \cdot \sin(\alpha_i) = \text{const} \quad (2.63)$$

Die Winkel α sind der Einfallswinkel bzw. der Ausfallswinkel des Strahls, n ist der Brechungsindex, wobei der Brechungsindex von der Wellenlänge λ abhängig ist. Die Erdatmosphäre besteht aber nicht aus einer, sondern aus n verschiedenen Luftschichten, deren Dichte zur Erdoberfläche hin zunimmt. Die Strahlung wird somit an jeder Luftschicht erneut gebrochen. Die Dichte der Luftschicht, welche die optischen Eigenschaften und somit den Brechungsindex bestimmt, hängt zudem noch von Temperatur und Luftdruck ab, was eine genaue Berechnung extrem schwierig macht.[4]

Mit der Annahme, dass der Lichtstrahl an jeder der n Luftschichten gleich stark bzw. kontinuierlich gebrochen wird und mit der Annahme, dass die auftretenden Diskontinuitäten sich im Mittel aufheben, liefert die folgende Näherung eine recht genaue Beschreibung des Refraktionseffekts [1]:

$$\Delta h(P,T,h)['] = \frac{P_{\text{Luft}}[\text{hPa}]}{T[\text{K}]} \cdot \frac{283[\text{K}]}{1010[\text{hPa}]} \cdot \left(\frac{1.02}{\tan\left(h + \frac{10.3}{h+5.11}\right)} + 0,0019279 \right). \quad (2.64)$$

Hierbei ist h die wahre Höhe in Grad, T die Temperatur und P der Luftdruck am Beobachtungsstandort. In der Abbildung (2.6) ist der Effekt der Refraktion, bei einer Temperatur von $T=291,3$ K und Luftdruck von $P=1020,9$ hPa, in Abhängigkeit der Höhe dargestellt. Man kann deutlich sehen, dass bei größer werdender Zenitdistanz bzw. abnehmender Höhe

auch der Effekt der Refraktion immer größer wird. Bei maximaler Zenitdistanz ist der Wert der Refraktion ca. 30', dieser Wert ist etwas kleiner als der Sonnendurchmesser, der ca. 32' beträgt. Das bedeutet, wenn die Sonne scheinbar den Horizont erreicht, steht sie eigentlich schon fast unter dem Horizont.[5]

2.2.5 Geschwindigkeitsschwankung der Erde

Die Rotations- bzw. die Winkelgeschwindigkeit der Erde gehorcht dem folgenden Zusammenhang:

$$\vec{\omega} = 2\pi \frac{\vec{r}}{T}. \quad (2.65)$$

Sie hängt also von den Koordinaten der Polhöhe (\vec{r}) und der Rotationszeit (T) ab. Die Polhöhe (\vec{r}) setzt sich aus den Polkoordinaten in x- und y-Richtung zusammen und beschreibt die momentane Lage der Rotationsachse der Erde, bezogen auf den IRES Referenzpol¹⁴. Die x-Achse liegt in Richtung des Nullmeridians und die y-Achse 90° West. [14] Die Rotationslaufzeit (T) ist die Zeit, die die Erde für eine Umdrehung um ihre Rotationsachse benötigt. Diese Zeit ist die UT1-Zeit (siehe Zeitskalen). Die Polkoordinaten und die UT1-Zeit bilden somit die drei Parameter der Winkelgeschwindigkeit der Erde. Im folgenden soll nun der Zusammenhang der drei Parameter mit der Geschwindigkeitsschwankung der Erde näher erläutert werden.

2.2.5.1 Schwankung der Rotationsdauer

Die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}(\vec{r}, T)$ der Erde ist nicht konstant, sie nimmt kontinuierlich ab. Diese kontinuierliche Abnahme der Geschwindigkeit hat ihre Ursache in der Gezeitenreibung durch den Mond und bewirkt eine Verlängerung der Gesamttageslänge von durchschnittlich ca. $4.4 \cdot 10^{-8}$ s pro Tag. Daher wurden bis jetzt nur positive Schaltsekunden eingefügt, dies wird im Zusammenhang der Zeitskalen noch erklärt. Neben dieser kontinuierlichen Abnahme der Winkelgeschwindigkeit gibt es außerdem noch reguläre und irreguläre Schwankungen der Winkelgeschwindigkeit, die z. B. durch Laubfall verursacht werden.[7]

2.2.5.2 Polhöhwenschwankung

Diese Schwankung gehört kinematisch zur Klasse der Nutation. Die Hauptnutationen wurden im Abschnitt (2.2.2) behandelt.

Bei der Polhöhwenschwankung schwankt die Rotationsachse (kinematischer Nordpol) der Erde im erdfesten Bezugssystem. Die Ursache der Schwankung, die auch Polhöhwenschwankung oder Polbewegung genannt wird, ist die nicht Übereinstimmung der Figurenachse bzw. die Hauptträgheitsachse (geometrischer Nordpol) mit der Rotationsachse der Erde. Die Drehung der Achsen umeinander hat eine Periode von ca. 430 Tagen und eine Amplitude von ca. 0",3. Die Polbewegung ist von weiteren Schwankungen überlagert, wobei es eine jährliche Periode gibt, die wahrscheinlich auf jahreszeitliche Schwankungen zurückzuführen ist, wie z. B. Schneebedeckung und Verlagerung von Gebieten mit hohem und

¹⁴mittlere Rotationsachse der Erde

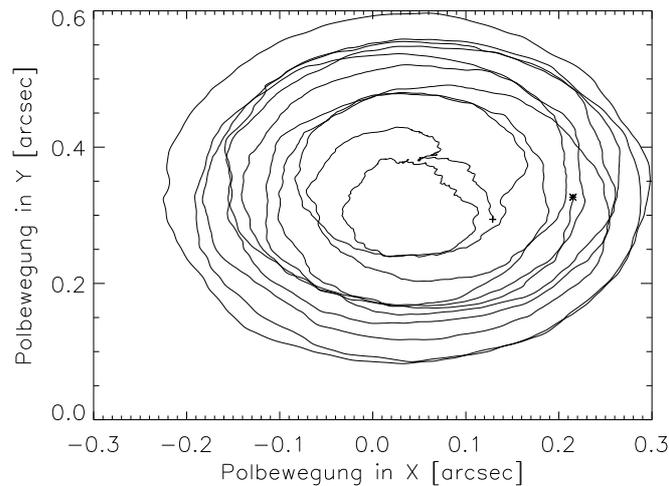


Abbildung 2.7: Darstellung der Polbewegung

niedrigem Luftdruck. Durch die Verschiebung der Kontinentalplatten oder Masseverlagerung durch Erdbeben kann es auch zu weiteren Schwankungen kommen. Eine Verlagerung der Rotationsachse und damit eine Wanderung des geographischen Pols heißt auch Polwanderung. In der Abbildung (2.7) ist die Polbewegung vom 13.01.1993 bis 06.07.2006 als Linie dargestellt, wobei der Stern den Beginn und das Kreuz das Ende dieses Zeitraumes markiert. Hier kann man die Amplitude der Schwankung sehr schön erkennen.

Die Polschwankung wurde schon von Leonhard Euler¹⁵ mit einer Periode von etwa 300 Tagen für die starre Erde vorhergesagt. Sie wurde von Friedrich Küster¹⁶ entdeckt und diese wurde von Seth Carlo Chandler¹⁷ genauer untersucht. Er erkannte, dass die Schwankung eine Periode von ca. 430 Tagen hat. Sie wird daher auch Chandler-Periode genannt. Der Unterschied zwischen den Perioden Eulers und Chandlers kann mit der Verformbarkeit und dem inhomogenen Aufbau des Erdkörpers erklärt werden.[5][7][14]

2.2.5.3 Die Folge der Geschwindigkeitsschwankung der Erde

Durch die Schwankungen der Winkelgeschwindigkeit kommt es zu einer Zeitschwankung bzw. einem Zeitfehler. Dieser verursacht einen Fehler in der Umrechnung der Koordinaten des Äquator-System (Rektaszension (RA), Deklination (DEC)) ins Horizontsystem (Azimut (Az), Höhe (Alt)). Durch diesen Fehler kann es dann zu einem Misspointing kommen.

2.2.5.3.1 Zeitskalen

Beginnen möchte ich mit der UT-Zeitskala. Die UT-Zeit ist eine Weltzeit, die aus astro-

¹⁵*1707;†1783 schweizer Mathematiker

¹⁶*1856;†1936 Professor für Astronomie in Bonn

¹⁷*1846;†1913 amerikanischer Amateur Astronom

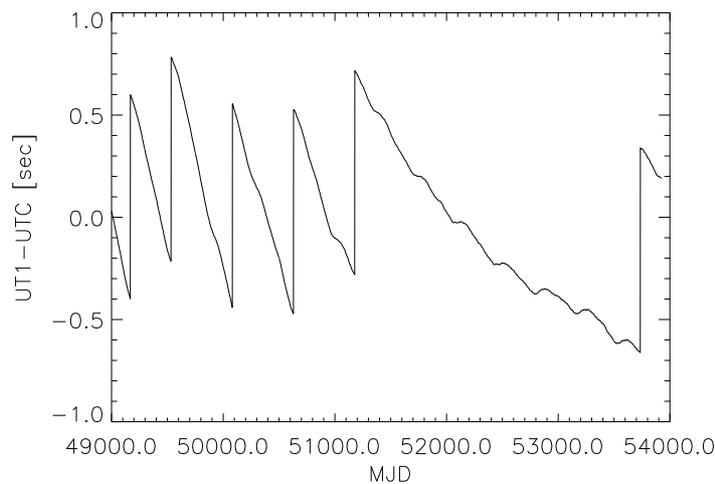


Abbildung 2.8: Verlauf von UT1-UTC

nomischen Beobachtungen gewonnen wird. Darunter werden drei verschiedene Zeiten zusammengefasst, die aufeinander aufbauen.

UT0 ist die Zeit, die aus der astronomischen Zeitbestimmung abgeleitet wird. Sie ist der Phasenwinkel der Erdrotation bezüglich des Nullmeridians zum Frühlingspunkt.

UT1 ist die UT0-Zeit mit einer Korrektur gegen die Polbewegung. Sie stellt also den wahren Phasenwinkel der Erdrotation bezüglich des Frühlingspunkts dar, da hier die Polschwankung und somit die wahre Erdrotation berücksichtigt wird.

UT2 ist die UT1-Zeit mit einer Korrektur gegen die jahreszeitlichen Schwankungen der Erdrotation.

Die UTC-Zeit ist die Zeitskala, die im täglichen Leben verwendet wird. Sie wird koordinierte Weltzeit genannt und ist die Referenzzeit von der aus die Zeitzonen¹⁸ der Erde bestimmt werden. Sie basiert auf der Atomzeit, einer kontinuierlich fortlaufenden Zeitskala. Da aber die Rotationsgeschwindigkeit der Erde nicht konstant ist, kommt es zu einem Unterschied zwischen UTC und der UT-Zeit. Daher muss die UTC-Zeit der UT-Zeit angepasst werden. Die Differenz zwischen UT1-UTC darf per Definition nicht mehr als 0.9 Sekunden betragen. Sollte die Differenz größer als 0.9 Sekunden werden, wird eine positive oder negative Schaltsekunde eingefügt. Bis heute wurden jedoch nur positive Schaltsekunden eingefügt. In der Abbildung (2.8) ist die Differenz zwischen UT1-UTC für den Zeitraum vom 13.01.1993 bis 06.07.2006 vs. MJD¹⁹ aufgetragen.

[5][12]

Die TAI-Zeit; die Internationale Atomzeit, ist eine kontinuierlich fortlaufende Zeitskala, deren Zeit sich nicht ändert.

Die TDT-Zeit; die Terrestrische Dynamische Zeit basiert auf der Atomzeit und hängt mit der TAI-Zeit folgendermassen zusammen:

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^{\text{s}},184.$$

¹⁸Zone oder Gebiet der Erde wo die gleiche Zeit gilt

¹⁹MJD = JD-2400000.5; JD = Julianisches Datum bei 0 Uhr UT

Mit dieser Zeit werden astronomische Ereignisse berechnet.

Die GPS-Zeit; das GPS steht für Global Position System und ist wie die TAI-Zeit eine kontinuierlich fortlaufende Zeitskala, basierend auf der Atomzeit.[1][3]

2.2.5.3.2 Die Zeit des HRT

Das Global Position System überträgt sein Zeitsignal, welches das HRT empfängt und hierdurch immer eine aktuelle Atomzeit besitzt. Aus dieser kann nun die UTC-Zeit bestimmt werden. Der Unterschied zwischen der UTC-Zeit zu der GPS-Zeit und der TAI-Zeit liegt in ganzzahligen Sekunden. Die Differenz zwischen den Zeiten beträgt (Stand 01.01.2006):

$$\begin{aligned} \text{UTC-GPS} &= -14 \text{ sec.} \\ \text{UTC-TAI} &= -33 \text{ sec} \end{aligned}$$

Die Differenz $\Delta\text{UT} = \text{UT1-UTC}$ wird durch Messung der Polschwankung bestimmt, die Werte werden im Internet veröffentlicht²⁰. Durch Extrapolation wird sie auch vorausberechnet, aber durch irreguläre Schwankungen können diese Werte wieder hinfällig werden. Die Differenz zwischen UT1 und UTC wird in der Steuerungssoftware des Teleskops fest eingestellt. Dieser Wert wird zur Umrechnung der Rektaszension und Deklination (RA/DEC) in Azimut und Höhe (Az/Alt) gebraucht.

Die UT1-Zeit kann man aus der GPS-Zeit erhalten, indem man von der GPS-Zeit 14s abzieht und somit die UTC-Zeit erhält. Addiert man nun die in der Steuerungssoftware eingestellte Differenz UT1-UTC und die aus der GPS-Zeit erhaltene UTC-Zeit, bekommt man die UT1-Zeit. Es ist somit zwingend notwendig, eine möglichst genaue Differenz zwischen UT1 und UTC in der Steuerungssoftware einzustellen um eine möglichst genaue Umrechnung von Rektaszension und Deklination in Azimut und Höhe zu erhalten. Eine Einstellung des aktuellen Wertes für ΔUT in der Steuerungssoftware des Teleskops soll in der Zukunft automatisch erfolgen.

2.2.6 Koordinatentransformation von RA/DEC in Az/Alt

Die Umrechnung der Koordinaten Rektaszension und Deklination in Azimut und Höhe ist orts- und zeitabhängig, entnommen aus [3].

Zur Umrechnung wird die lokale mittlere Sternzeit benötigt. Hierzu muss man als erstes das julianische Datum für 0 Uhr UT-Zeit bestimmen. Dies erfolgt durch:

$$\begin{aligned} \text{JD} &= \text{INT}(365,25 \cdot (\text{Jahr} + 4716)) + \text{INT}(30,6001 \cdot (\text{Monat} + 1)) + \\ &\quad \text{Tag} + (2 - \text{INT}(\frac{\text{Jahr}}{100}) + \text{INT}(\frac{\text{Jahr}}{4 \cdot 100})) - 1524,5 \end{aligned} \quad (2.66)$$

INT ist die Abkürzung für englisch intger: ganze Zahl. Als nächster Schritt muss das julianische Datum T in julianische Jahrhunderte berechnet werden und zwar wie folgt:

$$T = \frac{(\text{JD} - 2451545,0)}{36525} \quad (2.67)$$

Man geht hier vom julianischen Datum der Epoche J2000 (JD=2451545,0) aus. Nun wird die mittlere Sternzeit von Greenwich bei 0 Uhr UT-Zeit bestimmt:

$$\begin{aligned} \text{MGST}_0 &= (24110,54841 + 8640184,812866 \cdot T + 0,093104 \cdot T^2 - \\ &\quad 0,0000062 \cdot T^3) \text{ mod } 24 \end{aligned} \quad (2.68)$$

²⁰<http://maia.usno.navy.mil/>

Nun folgt die Berechnung der mittleren Sternzeit von Greenwich zur Zeit der Beobachtung. Dies erfolgt durch:

$$\text{MGST} = (\text{MGST}_0 + 1,00273790935 \cdot \text{UT}) \bmod 24 \quad (2.69)$$

Nun kann die mittlere lokale Sternzeit bestimmt werden und zwar wie folgt:

$$\text{MLST} = (\text{MGST} + \frac{\lambda}{15} + 24) \bmod 24 \quad (2.70)$$

Die Variable λ steht für die geographische Länge des Beobachtungsortes. Zur Umrechnung von Rektaszension und Deklination in Azimut und Höhe wird noch der Stundenwinkel α benötigt. Der kann mit der mittleren lokalen Sternzeit sowie der Rektaszension wie folgt berechnet werden:

$$\alpha_{\text{Stundenwinkel}} = (\text{MLST} - \alpha_{\text{korrr}} + 24) \bmod 24 \quad (2.71)$$

Jetzt kann man aus Stundenwinkel und Deklination den Azimut und die Höhe des Objektes bestimmen.

Für den Azimut lautet die Umrechnung:

$$\text{az} = \arctan \left(\frac{\sin(\alpha_{\text{Stundenwinkel}})}{\cos(\alpha_{\text{Stundenwinkel}}) \cdot \sin(\varphi) - \tan(\delta_{\text{korrr}}) \cdot \cos(\varphi)} \right). \quad (2.72)$$

Mit φ wird die geographische Breite des Beobachtungsortes bezeichnet. Hierbei muss man eine Fallunterscheidung durchführen, da der Arcustangens mehrdeutig ist. Hierbei ist der Azimut = 0° im Norden.

1. Ist der Zähler größer Null und der Nenner kleiner als Null ist der Azimut = $\text{az} + 360^\circ$.
2. Sind Zähler und Nenner größer Null ist der Azimut = $\text{az} + 180^\circ$.
3. Sind Zähler und Nenner kleiner Null ist der Azimut = az .
4. Ist der Zähler gleich Null und der Nenner ungleich Null ist der Azimut = 0° .
5. Ist der Nenner gleich Null so gibt es keine Lösung.

Die Höhe erhält man durch:

$$h = \arcsin(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta_{\text{korrr}}) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta_{\text{korrr}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{Stundenwinkel}})) \quad (2.73)$$

2.2.7 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die Einflüsse beschrieben, deren Korrekturen in den Koordinaten berücksichtigt werden müssen. Diese Korrekturen werden zum Teil direkt in den Objektkoordinaten, Rektaszension und Deklination, berücksichtigt, bis auf die Refraktion und die Rotationsgeschwindigkeitsschwankung der Erde. Die Korrektur der Refraktion Δh wird erst nach der Umrechnung von RA/DEC in Az/Alt an die Koordinaten angebracht. Der Einfluss der Rotationsgeschwindigkeitsschwankung der Erde fließt in die Umrechnung von Rektaszension und Deklination in Azimut und Höhe ein, wenn hierbei das ΔUT zur Bestimmung der Sternzeit verwandt wird. Im folgenden soll anhand eines konkreten Beispiels die Korrektur der Koordinaten gezeigt werden.

Für die Rechnung habe ich die Hamburger Sternwarte als Ort der Beobachtung, sowie den 08.09.2006 um 23.00 Uhr MESZ als Zeitpunkt der Beobachtung gewählt. Die Koordinaten der Hamburger Sternwarte, Standort des HRT, lautet: geographische Breite $\varphi = 53^\circ 28' 49'' ,79$ und geographische Länge $\lambda = 10^\circ 14' 31'' ,19$. Diese Koordinaten werden durch das HRT-GPS geliefert. Die Sternkoordinaten des zu beobachtenden Objekts lauten:

$$\begin{aligned} \text{RA: } \alpha_{2000} &= 0^{\text{h}} 40^{\text{m}} 30^{\text{s}},4405 \\ \text{DEC: } \delta_{2000} &= +56^{\circ} 32' 14'',392 \end{aligned}$$

Die Eigenbewegungen des Sterns lauten

$$\begin{aligned} \mu_{\text{RA}} &= 0'',05036 \text{ a}^{-1} \\ \mu_{\text{DEC}} &= -0'',03217 \text{ a}^{-1} \end{aligned}$$

Die Koordinaten der Epoche J2000 und die Eigenbewegung des Objekts mit dem Namen α Cassiopeia oder HD3712, ist aus dem Simbad Katalog entnommen. Um die genaue Position des Sterns zu erhalten, müssen nun die Korrekturen der Koordinaten durchgeführt werden. Die Korrektur der Eigenbewegung der Objekte fließt in der Präzessionskorrektur mit ein. Nun kann man die Präzessionskorrektur der Koordinaten, wie im Abschnitt (2.2.2.1) beschrieben, durchführen. Zuerst muss man das julianische Datum t bestimmen. Man erhält:

$$t=0,066868583 \text{ in julianischen Jahrhunderten oder } 6,6868583 \text{ in julianischen Jahren.}$$

Mit t in julianischen Jahren kann nun die Eigenbewegung der Sterne auf die Koordinaten addiert werden und man erhält die folgende Werte:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0^{\text{h}} 40^{\text{m}} 30^{\text{s}},4405 + 0'',05036 \text{ a}^{-1} \cdot 6,6868583\text{a} = 0^{\text{h}} 40^{\text{m}} 30^{\text{s}},77725 = 10^{\circ},128239 \\ \delta_0 &= +56^{\circ} 32' 14'',392 + (-0'',03217 \text{ a}^{-1} \cdot 6,6868583\text{a}) = +56^{\circ} 32' 14'',176884 = 56^{\circ},537271 \end{aligned}$$

Man erhält mit $t=0,066868583$ die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} \zeta &= 154'',21489 = 0^{\circ},042837463 \\ z &= 154'',21843 = 0^{\circ},042838454 \\ \theta &= 134'',01685 = 0^{\circ},037226893 \\ A &= 0,097369578 \\ B &= 0,54218708 \\ C &= 0,83459712 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten erhält man nun:

$$\begin{aligned} \alpha-z &= 10^{\circ},181034 \\ \alpha &\approx 10^{\circ},223872 = 0^{\text{h}} 40^{\text{m}} 53^{\text{s}},7293 \\ \delta &\approx 56^{\circ},573911 = 56^{\circ} 34' 26'',0796 \end{aligned}$$

Im folgenden werden die beiden Korrekturwerte der Nutation, wie im Abschnitt (2.2.2.2) beschrieben, bestimmt:

Man erhält die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} T &= 0,066830938 \\ \Omega &= 355^{\circ},71157 \\ L &= 167^{\circ},78694 \\ L' &= 0^{\circ},017420544 \\ \Delta\psi &= 1'',8005593 \\ \Delta\varepsilon &= 8'',8442533 \\ \varepsilon_0 &= 84384'',576 = 23^{\circ},440160 \\ \varepsilon &= 84393'',420 = 23^{\circ},442617 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten erhält man:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_1 &= -11'',342399 \\ \Delta\delta_1 &= 2'',2747521\end{aligned}$$

Die Berechnung der beiden Korrekturwerte der Aberration werden, wie im Abschnitt (2.2.3) dargestellt, durchgeführt. Es ergeben sich die folgenden Werte:

$$\begin{aligned}T &= 0,066868583 \\ L_0 &= 167^\circ,78694 \\ M &= 244^\circ,73463 \\ C &= -1^\circ,7156616 \\ \odot &= 166^\circ,07128 \\ e &= 0.016705801 \\ \pi &= 103^\circ,05233\end{aligned}$$

Hieraus ergeben sich nun die Korrekturwerte:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_2 &= 31'',580340 \\ \Delta\delta_2 &= -1'',381029\end{aligned}$$

Um den Korrekturwert der Rektaszension an der Himmelsposition zu erhalten, muss man den $\Delta\alpha_2$ -Wert noch mit dem Cosinus der Deklination multiplizieren. Der Korrekturwert an der Himmelsposition lautet $\approx 17'',4$. Die jeweiligen zwei Korrekturwerte der Koordinaten werden nun mit den Koordinaten addiert:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{korr}} &= \alpha + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 = 10^\circ,229493 \approx 0^{\text{h}} 40^{\text{m}} 55^{\text{s}},1 \\ \delta_{\text{korr}} &= \delta + \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 = 56^\circ,574158 \approx 56^\circ 34' 27'',0\end{aligned}$$

Im nächsten Schritt erfolgt die Umrechnung von RA/DEC in Az/Alt, siehe Abschnitt (2.2.6). Die Werte zur Umrechnung lauten:

$$\begin{aligned}JD &= 2453986,5 \\ T &= 0,066844627 \\ \text{MGST}_0 &= 6^{\text{h}},3122623 \approx 6^{\text{h}} 18^{\text{m}} 44^{\text{s}},14 \\ \text{MGST} &= 3^{\text{h}},3697574 \approx 3^{\text{h}} 22^{\text{m}} 11^{\text{s}},13 \\ \text{MLST} &= 6^{\text{h}},9351239 \approx 6^{\text{h}} 56^{\text{m}} 6^{\text{s}},55 \\ \alpha_{\text{Stundenwinkel}} &= 6^{\text{h}},2531577 = 93^\circ,7973655\end{aligned}$$

Hieraus ergeben sich für:

$$\begin{aligned}\text{Zähler des Arguments im Arcustangens der Gleichung (2.72)} &= 0,9978045 \\ \text{Nenner des Arguments im Arcustangens der Gleichung (2.72)} &= -0,9548502 \\ \Rightarrow az &= 313^\circ,73982 \\ h &= 40^\circ,46768646\end{aligned}$$

Nun muss die Korrektur der Refraktion an die Höhenkoordinate addiert werden, um die scheinbare Höhe zu erhalten. Hierbei nehme ich eine Temperatur von $T=291,3$ K und einen Luftdruck von $P=1020,9$ hPa an. Man erhält nach der Gleichung (2.64), den folgenden Korrekturwert:

$$\Delta h = 1',166657267 \approx 0^\circ,01944429$$

Die Höhe lautet nun:

$$h = 40^\circ,46768646 + 0^\circ,0194429 \approx 40^\circ,49871$$

Die Koordinaten, in Azimut und Höhe, an dem sich der Stern befindet, und die in die Steuerungssoftware eingestellt werden müssen lauten:

az	=	313° ,73982	=	313°44' 23" ,352
h	=	40° ,49871	=	40°29' 55" ,356

2.3 Berechnung des Pointing Modells

2.3.1 Bestimmung der Pointingparameter

Die Gleichungen des Pointing Modells sind linear in ihren Parametern, aber nicht linear in Höhe und Azimut. Als Beispiel, wie die Berechnung der Parameter erfolgen kann, soll kurz die χ^2 -Minimierung vorgestellt werden, entnommen aus [2]. Die Korrekturgleichungen werden als:

$$y = y(x_i; a) \quad (2.74)$$

dargestellt. Hierbei ist x_i der Messwert in Abhängigkeit von Höhe und Azimut, und $a = a_k$ $k=1,2,\dots,M$ stellt den Satz der gesuchten Parameter dar. Das χ^2 ist definiert [2]:

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - y(x_i; a)}{\sigma_i} \right]^2. \quad (2.75)$$

Wobei y_i der Messwert des Offsets ist und das σ_i den Fehler des einzelnen Messwertes darstellt. Aufgrund der quadratischen Form des χ^2 kann man annehmen, dass das χ^2 ein Minimum besitzt. Das χ^2 kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$\chi^2(a) \approx \gamma - d \cdot a + \frac{1}{2} a \cdot D \cdot a. \quad (2.76)$$

Diese Form erhält man mit Hilfe der Taylorentwicklung. Hierbei ist d ein M -dimensionaler Vektor und D eine $M \times M$ Matrix. Den Vektor d erhält man:

$$d = \frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = -2 \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - y(x_i; a)]}{\sigma_i^2} \frac{\partial y(x_i; a)}{\partial a_k} \quad (2.77)$$

Die Matrix D ist die zweifache Ableitung oder auch die Hessematrix der χ^2 -Minimierung und sieht wie folgt aus:

$$D = \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l} = 2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\frac{\partial y(x_i; a)}{\partial a_k} \frac{\partial y(x_i; a)}{\partial a_l} - [y_i - y(x_i; a)] \frac{\partial^2 y(x_i; a)}{\partial a_k \partial a_l} \right]. \quad (2.78)$$

Besitzt man eine gute Näherung, kann man mit Hilfe des aktuellen Parametersatz a_{cur} zu dem neuen, im Minimum liegenden, Parametersatz a_{min} in nur einem Schritt kommen und zwar:

$$a_{\text{min}} = a_{\text{cur}} + D^{-1} \cdot [-\nabla \chi^2(a_{\text{cur}})]. \quad (2.79)$$

Hat man hingegen eine schlechte Näherung, muss man durch Iteration versuchen, den Parametersatz a_{\min} zu finden. Dies geschieht wie folgt:

$$a_{\text{next}} = a_{\text{cur}} - c \times \nabla \chi^2(a_{\text{cur}}). \quad (2.80)$$

Die Konstante c muss so gewählt werden, dass man nicht zu weit vom Minimum weg springt.

2.3.2 Bestimmung der Fehler und der Korrelationskoeffizienten

Die Fehler sowie die Korrelationskoeffizienten können aus der Hessematrix der χ^2 -Minimierung bzw. aus deren Informationsmatrix gewonnen werden. Die Informationsmatrix ist gegeben durch [2]:

$$\alpha_{kl} \equiv \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l} \quad (2.81)$$

In unserem Fall vereinfacht sich die Informationsmatrix, da die zweite Ableitung des Pointing Modells nach den Parametern a_k und a_l verschwindet. Dadurch erhält man die folgende Form der Informationsmatrix:

$$\alpha_{kl} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_k} \frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_l} \right] \quad (2.82)$$

Der Klammerterm ist im Anhang in den Tabellen (A.2) und (A.4) dargestellt. Das Summensymbol sowie das σ^2 fehlen in den Tabellen, da sie für alle Matrixelemente gelten. Aus der inversen Informationsmatrix erhält man die sogenannte Kovarianzmatrix, und es gilt:

$$\alpha_{kl}^{-1} \equiv C. \quad (2.83)$$

Aus der Kovarianzmatrix können die Fehler der einzelnen Parameter, sowie die Korrelationskoeffizienten bestimmt werden. Der 1σ Standardfehler ergibt sich für die einzelnen Parameter aus:

$$\sigma_{\text{Parameter}} \equiv \sqrt{C_{ii}}. \quad (2.84)$$

Da die einzelnen Parameter einen Fehler besitzen, ist der Korrekturwert auch mit einem Fehler behaftet. Dieser Fehler ergibt sich aus der Fehlerfortpflanzung und ist wie folgt definiert:

$$s \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (s_{x_i})^2}. \quad (2.85)$$

Man erhält, aus der Definition (2.85) und den Korrekturgleichungen (2.24, 2.25 und 2.26), die Fehlergleichung für den Korrekturwert, unter der Annahme, dass die Höhe und der Azimut fehlerlos sind. Jedoch ist der Fehler von der Position abhängig und die Gleichungen sehen folgendermassen aus:

Für die Azimutkorrekturgleichung:

$$s_{\text{Azkorrgl}}(az, h) = \sqrt{s_{\text{BNP}}^2 + \sin^2(h) \cdot s_{\text{NPAE}}^2 + \sin^2(az) \cdot \sin^2(h) \cdot s_{\text{ANA}}^2} \\ \sqrt{+ \cos^2(az) \cdot \sin^2(h) \cdot s_{\text{AEA}}^2 + \cos^2(h) \cdot s_{\text{AOFF}}^2} \\ \sqrt{+ \sin^2(az) \cdot \cos^2(h) \cdot s_{\text{AES}}^2 + \cos^2(az) \cdot \cos^2(h) \cdot s_{\text{AEC}}^2}, \quad (2.86)$$

die Azimutkorrekturgleichung am Azimutencoder:

$$s_{\text{Azkorrgl}}(\text{az}, \text{h}) = \sqrt{\frac{s_{\text{AOff}}^2 + \sin^2(\text{az}) \cdot \tan^2(\text{h}) \cdot s_{\text{ANa}}^2 + \cos^2(\text{az}) \cdot \tan^2(\text{h}) \cdot s_{\text{AEa}}^2}{\sqrt{+\tan^2(\text{h}) \cdot s_{\text{NPAE}}^2 + \frac{1}{\cos^2(\text{h})} \cdot s_{\text{BNP}}^2}} \sqrt{+\sin^2(\text{az}) \cdot s_{\text{AES}}^2 + \cos^2(\text{az}) \cdot s_{\text{AEC}}^2}, \quad (2.87)$$

und die Höhenkorrekturgleichung:

$$s_{\text{Hökorrgl}}(\text{az}, \text{h}) = \sqrt{\frac{s_{\text{EOff}}^2 + \cos^2(\text{az}) \cdot s_{\text{ANe}}^2 + \sin(\text{az}) \cdot s_{\text{AEe}}^2}{\sqrt{+\sin^2(\text{h}) \cdot s_{\text{EES}}^2 + \cos^2(\text{h}) \cdot s_{\text{(EEC+TF)}}^2}} \sqrt{+\frac{1}{\cos^2(\text{h})} \cdot s_{\text{c5}}^2 + \sin^2(2 \cdot \text{az}) \cdot s_{\text{c1}}^2 + \cos^2(2 \cdot \text{az}) \cdot s_{\text{c2}}^2}} \sqrt{+\sin^2(3 \cdot \text{az}) \cdot s_{\text{c3}}^2 + \cos^2(3 \cdot \text{az}) \cdot s_{\text{c4}}^2} \quad (2.88)$$

Die Korrelationsmatrix und somit die Korrelationskoeffizienten werden wie folgt berechnet:

$$s_{ij} \equiv \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}} \sqrt{C_{jj}}}. \quad (2.89)$$

Sie gibt die Stärke der Korrelation der einzelnen Parameter zueinander an. Der Wert des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen -1 und 1. Ein negativer Wert bedeutet eine Antikorrelation. Der Wert der Korrelation der Parameter mit sich selbst muss 1 betragen.

2.4 Nachführungsoszillation

Die genaue Ursache dieser Oszillation wird von der Herstellerfirma des Teleskops, Firma Halfmann, nicht preisgegeben. Folgendes ist jedoch bekannt: Die Ursache dieser Oszillation ist wahrscheinlich eine Rückkopplung zwischen der Steuerung der Achsantriebe und den Encodern. Diese kann wie folgt entstehen:

Die Drehwinkel der Achsen des Teleskops werden an den Encodern abgelesen. Dies erfolgt mittels eines Lesekopfs, der die Markierungen an der Encoderscheibe abliest und somit den Drehwinkel des Teleskops bestimmt. Zwischen den Markierungen am Encoder befindet sich eine sinusförmige und eine cosinusförmige Signalperiode um die Position zwischen den Markierungen zu messen. In der Nachführung des Teleskops kann der jeweilige Achsantrieb etwas zu schnell bzw. auch etwas zu langsam laufen. Hierdurch verkürzt oder verlängert sich die Periode des Sinus-Cosinus-Signales und die Geschwindigkeit wird an den Encoderstrichen korrigiert. Man kann vereinfacht annehmen, dass der Antrieb solange gestoppt ist, bis die Soll- und Ist-Positionen wieder übereinstimmen. Dieser Vorgang kann sich während der gesamten Beobachtung wiederholen. Trägt man dies in ein Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm ein, wobei die Geschwindigkeit die des Achsantriebs und t die Zeit ist, erhält man unter dieser vereinfachten Vorstellung eine Schwingung, die eine Rechteckform hat, ein Beispiel siehe Abbildung (2.9). In dem Beispiel wurde angenommen, dass der Achsantrieb doppelt so schnell ist, wie die korrekte Nachführungsgeschwindigkeit. Die

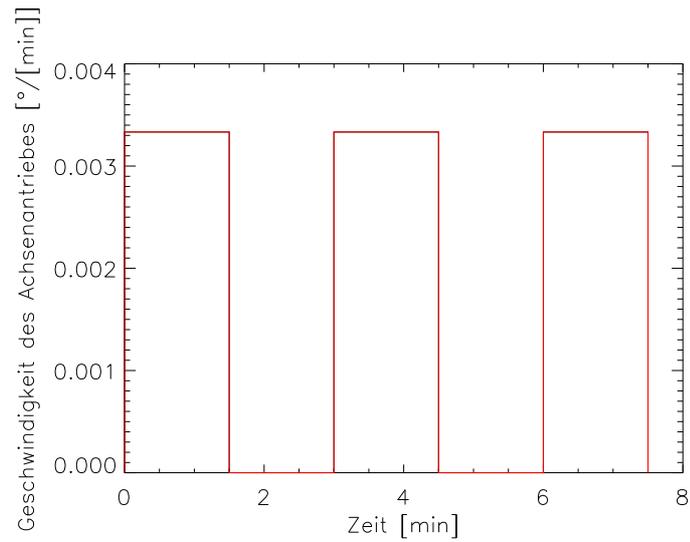
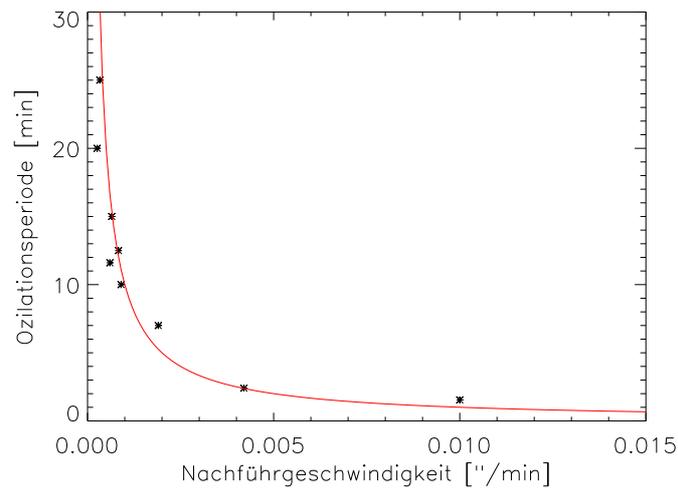


Abbildung 2.9: Beispiel einer Rechteckschwingung

Periode P dieser Schwingung entspricht der Zeit, die vom Auseinanderlaufen bis zur wieder Übereinstimmung der Soll- und Ist-Position verstreicht. Sie ist proportional zur Inversen der Nachführungsgeschwindigkeit v , siehe Abbildung (2.10), die Proportionalitätskonstante ist gleich der Encoderkonstanten c . Somit gilt die Beziehung [15]:

$$P = \frac{c}{v} . \quad (2.90)$$

Abbildung 2.10: Periode P vs. Nachführungsgeschwindigkeit, Datensatz von A. Hempelmann

Die Konstante c ergibt sich aus 360° dividiert durch die Anzahl der Teilstriche des Encoders. Der Encodertyp ERA 180 besitzt 36000 Teilstriche, damit ist die Encoderkonstante $0,01^\circ$, was $36''$ entspricht. Die Linie in der Abbildung (2.10) stellt den Verlauf nach der Gleichung (2.90), mit der Encoderkonstanten $c=0,01^\circ$ dar.

Kapitel 3

Das Hamburger Robotische Teleskop



Abbildung 3.1: Das Hamburger Robotische Teleskop, entnommen [15]

3.1 Technische Daten

Das Hamburger Robotische Teleskop oder kurz HRT, siehe Abbildung (3.1), ist ein 1,2 Meter Spiegelteleskop, mit einem Cassegrain-Nasmyth Fokus und einer Brennweite von 9,6

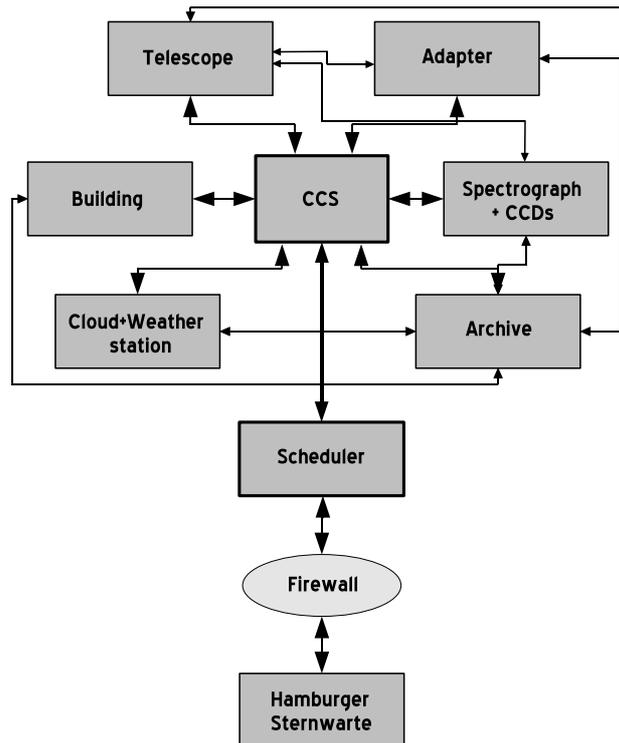


Abbildung 3.2: Aufbau des Gesamtsystems des HRT, Original von J. Gonzales Perez

Meter. Es wurde von der Firma Halfmann entwickelt und 2002 gebaut. Das Teleskop hat eine Alt/Az-Gabelmontierung und benutzt daher die Koordinaten des Horizontsystems. Bei dieser Art der Montierung muß die Nachführung, also die Korrektur der Erddrehung, in zwei Achsen erfolgen. Dies ist möglich durch den Einsatz moderner Rechentechnik. Ein Vorteil dieser Montierungsart ist der relativ geringe Aufwand, wenn das Teleskop zu einem anderen Standort transportiert wird und dort zum Einsatz kommt.

Die Mechanik der beiden Achsenlager des Teleskops ist verschieden. Das Höhenlager des HRT ist mechanisch, das Azimutlager hingegen hydraulisch.

Das HRT besitzt Direktantriebe für die Steuerung der Höhen- und Azimutachsen. Die Drehwinkel der Achsen werden mit Hilfe von Encodern¹ bestimmt.

Die Optik des HRT wurde von der Firma Carl Zeiss Jena GmbH hergestellt. Sie besteht aus einem Primärspiegel, dem M1, dem Sekundärspiegel, dem M2, und einem Umlenkspiegel im Tubus, dem M3. Der Strahlengang geht durch die Höhenachse und endet an der Instrumentenplattform an der rechten Seite des Teleskopes.

Diese Plattform ist ein Bildfeldderrotator, der sich mit dem Höhenwinkel dreht, so dass das Objekt sich theoretisch immer an der gleichen Stelle im Bild befindet. An diese Instrumentenplattform ist zur Zeit nur eine CCD-Kamera, Typ ST7, angeflanscht, jedoch ist vorgesehen, dort den Adapter des Spektrographen HEROS² anzufianschen.[15]

¹Winkelmessgerät, Höhen- und Azimutencoder vom Typ: ERA 180 von der Firma Heidenhain

²HEROS: ein Echelle-Spektrograph, der als Dauerleihgabe von der Universität Heidelberg kommt

3.2 Gesamtsystemaufbau des HRT

Wie der Name des Teleskops verrät, ist es für einen vollautomatischen Betrieb konzipiert. In der Abbildung (3.2) ist das gesamte System des HRT schematisch dargestellt. Das Gesamtsystem des HRT setzt sich aus einzelnen Untersystemen zusammen, die hier nur kurz vorgestellt werden sollen, entnommen aus [16].

3.2.1 Central Control System (CCS)

Die CCS (Zentrales Kontrollsystem) ist, wie der Name verrät, die zentrale Steuerungssoftware des HRT-Systems. Es steuert und überwacht die anderen Teilsysteme des HRT's während der Beobachtung.

3.2.2 Teleskop

Das Teleskop wird mit der Steuerungssoftware, PILAR, entwickelt von der Firma 4PI Systeme GmbH, gesteuert. PILAR ist für das Positionieren und für die Nachführung des Teleskops verantwortlich. Außerdem wird hierüber der Status des Teleskops wie z. B. die Position überprüft.

3.2.3 Adapter

Der Adapter und seine Steuerungssoftware sind für das Finden und Positionieren eines Sterns, sowie für Fokussieren und für das Guiding³ zuständig. Zudem wird hier das Sternen- und Kalibrationslicht in die Lichtfaser, die zum Spektrographen führt, eingekoppelt.

3.2.4 Spektrograph und CCD

Diese Einheit ist für die Aufnahmen der Sternspektren verantwortlich. In diesem Untersystem befindet sich die Software zur Steuerung der Belichtung, Auslesung und Abspeicherung von zwei 2000 x 2000 Pixel CCD-Aufnahmen. Der Spektrograph besitzt keine weiteren Steuerungselemente.

3.2.5 Archiv

Im Archiv sollen die wissenschaftlichen Daten, wie z. B. die Sternspektren, abgespeichert werden. Weiterhin sollen die Systemprotokolle, die Auskunft über den Systemstatus während einer Beobachtung geben können, hier abgespeichert werden.

3.2.6 Wolkenmonitor und Wetterstation

Mit Hilfe des Wolkenmonitors soll die Bedeckung des Nachthimmels kontrolliert werden. Die Umweltdaten, die zur Beobachtung benötigt werden, wie die Temperatur, soll die Wetterstation liefern.

³engl: guide: Führer, vt. führen

3.2.7 Scheduler

Der Scheduler⁴ enthält die Liste von Objekten mit den entsprechenden Koordinaten, die beobachtet werden sollen, sowie Angaben die zur Beobachtung eines Objekts notwendig sind, wie z. B. die Belichtungszeit und Anzahl der Aufnahmen.

3.3 Wissenschaftliche Vorhaben

Das Teleskop soll zur Beobachtung und Überwachung der Aktivität von kühlen Sternen eingesetzt werden. Unter dieser Zusammenfassung sind verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen vorgesehen.

Zum einen ist die Nachfolgebeobachtung von Röntgenquellen und Simultanbeobachtung mit Satelliten-Observatorien vorgesehen. Desweiteren soll mit dem Teleskop die Rotationsperiode und die differentielle Rotation von Sternen gemessen werden. Ein weiteres Vorhaben ist die Beobachtung und Überwachung von Sternflecken. Mit dem Teleskop soll auch nach Exoplaneten und braunen Zwergen, als Begleiter eines Sterns, gesucht werden. Mit dem Teleskop und dem Echelle-Spektrographen HEROS sollen hochaufgelöste Sternspektren aufgenommen werden.[15]

⁴engl: schedule: Liste, Plan, Programm

Kapitel 4

Durchführung

4.1 Pointing Modell Messung

In diesem Abschnitt möchte ich kurz die Messprozedur vorstellen, die zur Bestimmung der Sternkoordinaten und deren Offsets, also deren Abweichung vom Zentrum der optischen Achse, benutzt wurde. Aus diesen Daten wurden die Pointingparameter bestimmt. Der Messbereich an der Himmelshalbkugel betrug in Höhe ca. 20° bis ca. 89° und im Azimut 0° bis 360° . Im Azimutbereich von $90^\circ \pm 2^\circ$ kann aus technischen Gründen nicht gemessen werden, da dort eine Stopeinrichtung ans Teleskop angebracht ist. Sie soll verhindern, dass das Teleskop sich in einer Richtung um mehr als 360° drehen kann und somit verhindern, dass die Kabel abgedreht bzw. beschädigt werden.

Als erster Schritt wurden die Umweltdaten, Temperatur und Luftdruck in der Steuerungssoftware "PILAR 2" eingestellt. Im Anschluss wurde ein neuer Fokus für das Teleskop mit dem Programm "FOCUS" bestimmt und ebenfalls in der Steuerungssoftware eingestellt. Da sich während der Nacht der Fokus des Teleskops, aufgrund von Temperaturschwankungen veränderte, wurde der Fokus immer wieder wie oben beschrieben neu eingestellt. Die Messmethode sah wie folgt aus:

Als erstes wurde ein Objekt mit Hilfe der IRAF-Prozedur "BUSCA" ausgesucht. Hier gab man die gewünschten Azimut- und Höhenkoordinaten ein, den Radius in dem sich das Objekt befinden soll, sowie den Tag und die UT-Zeit. Das Programm gab nun eine Liste von möglichen Objekten, die aus dem Hipparcos-Input-Katalog stammen, aus. Aus dieser Liste war es nun möglich, sich ein Objekt auszuwählen und seine Koordinaten in RA/DEC in die Steuerungssoftware einzugeben und das Teleskop auf dieses Objekt zu richten. Hierbei wurde meist ein Objekt mit einer Helligkeit von etwa 9 mag^1 benutzt. Zur Kontrolle wurde noch ein Bild, mit der IRAF-Prozedur "TAKEIM" mit einer Belichtungszeit von 10 s aufgenommen, was eigentlich nicht nötig ist und in der Automatikprozedur nicht mehr erfolgt. Im Anschluss wurden mit Hilfe des Programms "ACQUIRE" die Azimut- und Höhenoffsets bestimmt. Das Acquireprogramm richtet das Teleskop genau auf das Objekt aus, indem es die Abweichung von der Sollposition bestimmt und die Offsets der Steuerungssoftware übergibt, die dann das Teleskop neu ausrichtet. Die Sollposition ist ungleich dem Bildzentrum der CCD. Um das Zentrum zu finden, haben A. Hempelmann und J. Gonzalez Perez das Teleskop auf ein Objekt gerichtet und im Anschluss den Dero-tator gedreht. Wäre das Objekt im Zentrum, würde es sich nicht bewegen. Liegt es aber

¹magnitude: Maß für die Helligkeit eines Objektes

nicht im Zentrum, so ist auf dem CCD-Bild eine Lichtspur in Kreisform zu sehen. Der Mittelpunkt dieses Kreises ist nun die Sollposition. Dieser liegt bei den Pixelwerten $x=461$ und $y=315$. (A. Hempelmann, persönliche Mitteilung) Diese Bildkoordinaten werden für das Programm "ACQUIRE" benötigt, welches für die Feinausrichtung des Teleskops zuständig ist.

Nun wurden die Azimut- und Höhenkoordinaten des Sterns, sowie deren Offsets vom Bildschirm per Hand in eine Tabelle übertragen. Dieses wurde nun solange durchgeführt bis die gesamte Himmelshalbkugel abgedeckt war.

Im Laufe dieser Arbeit wurde eine Automatikprozedur entwickelt und getestet, die diese Pointingmessung ausführt. Diese IRAF-Prozedur "POINTING" kann man, als eine sehr primitive Form des CCS betrachten, die Kommandos an das Teleskop sendet und verschiedene Programme aufruft. Die Positionsliste ist eine einfache Form des Schedulers. Diese Positionsliste ist eher eine Regionenliste in Azimut und Höhe. In der Prozedur "POINTING" wird mit Hilfe von "BUSCA" und der Position aus dieser Positionsliste das erste Objekt, welches eine Helligkeit von größer 9 mag hat und in einem Radius von 2° liegt, ausgewählt. Als Wetterstation wurde die Wetterstation Bergedorf verwendet, wobei hier die Daten manuell entnommen wurden. Die Programme, "ACQUIRE", "FOCUS" und "BUSCA", sowie das Kommando "MOVETELE", zum Anfahren des Teleskops auf ein Objekt, wurden durch J. Gonzalez Perez im Rahmen der Robotik-Software-Entwicklung beigesteuert.

Es wurde außerdem eine Optimierung der Positionsliste durchgeführt, um eine bessere Abdeckung der horizontnahen Bereiche zu erhalten.

4.2 Trackingtest

Es wurden in der Testphase und zur Endabnahme des Teleskops ausführliche Trackingtests mit der Steuerungssoftware "PILAR 1" und "PILAR 2" durch A. Hempelmann und J. Gonzalez Perez durchgeführt. Es ist nun zu überprüfen, ob sich mit der Einführung von "PILAR 3" Veränderungen im Trackingverhalten ergeben haben. Die Trackingtests wurden mit der neuen Steuerungssoftware des Teleskops "PILAR 3" wie folgt durchgeführt: Zu Beginn wurde die Temperatur, der Luftdruck und der Fokus, mit Hilfe von Programmen in der Steuerungssoftware eingestellt. Nun wurde mit Hilfe von "BUSCA" ein Stern ausgewählt. Nachdem das Teleskop den Stern angefahren hatte, wurde mit "ACQUIRE" der Stern zentriert. Im Anschluß wurden 100 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 10 s aufgenommen. Die Auslesezeit der CCD-Kamera (ST7) betrug 15 s. Die Objekte wurden willkürlich ausgewählt, wobei darauf geachtet wurde, dass sie gleichmäßig am Himmel verteilt waren.

4.3 Oszillationstest

Der Oszillationstest ist ein Spezialfall des Trackingtests und wurde noch mit der alten Steuerungssoftware des Teleskops "PILAR 2" durchgeführt. Die Tests mit "PILAR 3" sind hier nicht mehr mit eingegangen, da ich eine Vermischung der Daten vermeiden wollte.

Zu Beginn des Oszillationstests wurde, wie im Abschnitt (4.1) beschrieben, die Temperatur, der Luftdruck und der Fokus neu eingestellt. Der Unterschied zu dem Trackingtest ist,

dass die Objekte, die zur Messung benutzt werden, sich alle in der Nähe des Himmelspols befinden. Sie wurden aus der Liste (A.1) ausgewählt. Warum gerade diese Objekte gewählt wurden, wird in einem späteren Abschnitt (7.1) noch kurz erläutert werden. Die Position des ausgesuchten Objekts sollte ca. 3 Stundenwinkel betragen. Nachdem ein Objekt aus dieser Liste ausgewählt wurde, war die Messung die gleiche wie bei dem Trackingtest.

Kapitel 5

Auswertung des Pointing Modells

5.1 Bestimmung des Fehlers der Einzelmessung σ

Zur Bestimmung der Parameter nach der Methode der χ^2 Minimierung ist es erforderlich zunächst die Varianz σ^2 zu bestimmen. In die Varianz σ^2 fließen alle Fehlerquellen ein, die ein Misspointing verursachen und nicht im Pointing Modell berücksichtigt werden. Diese Effekte wurden in dem Abschnitt (2.2) betrachtet.

Die hier angegebenen Fehlerwerte wurden für Pointingmessungen vom 10.06.2006 ermittelt.

Die Einflüsse der Präzession, Nutation und Aberration sind sehr gut bekannt und können in der Steuerungssoftware so gut kompensiert werden, dass der verbleibende Fehler so klein ist, dass er keine Rolle mehr spielt.

5.1.1 Refraktion

Der Effekt der Refraktion ist ebenfalls gut bekannt und kann deshalb in der Steuerungssoftware auch gut korrigiert werden. Jedoch wurde in der Anzeige der Steuerungssoftware "PILAR 2" ein Fehler bei der Berechnung der Refraktion beobachtet. Nach Rücksprache mit Michael Ruder von 4PI Systeme GmbH, Herstellerfirma der Steuerungssoftware, tritt dieser Fehler bei der Rückrechnung vom Horizontsystem in das Äquatorsystem auf. Sollte dieser Fehler jedoch nicht in der Rückrechnung auftreten, sondern schon in der Berechnung des Refraktionsfehlers, käme es zu einem Misspointing. Dieser Fehler würde jedoch durch den Parameter der Tubus Durchbiegung TF kompensiert werden. Hierdurch würde TF größer oder kleiner sein, als die Tubusdurchbiegung tatsächlich ist. Dies führt zu einer Verfälschung des Parameters (EEC+TF), was wiederum einen Einfluss auf den Parameter EES hat, da die Parameter EES und (EEC+TF) stark miteinander korreliert sind, wie in Abschnitt (5.4) noch gezeigt wird. Wo dieser Berechnungsfehler nun auftritt, konnte jedoch nicht geklärt werden.

Unabhängig vom oben genannten Berechnungsfehler der Refraktion, kann es während einer Messung zu einem Refraktionsfehler kommen, da die Werte der Temperatur sowie des Luftdrucks, die vor der Beobachtung vom Beobachter eingestellt wurden, im Regelfall nicht konstant sind. Man benötigt daher für die Bestimmung des Refraktionsfehlers den Fehler in Temperatur und Luftdruck. Für längere Messzeiten kann man diesen aus den Minimal- und Maximalwerten errechnen. Bei kürzeren Messzeiten kann man hingegen diesen Fehler

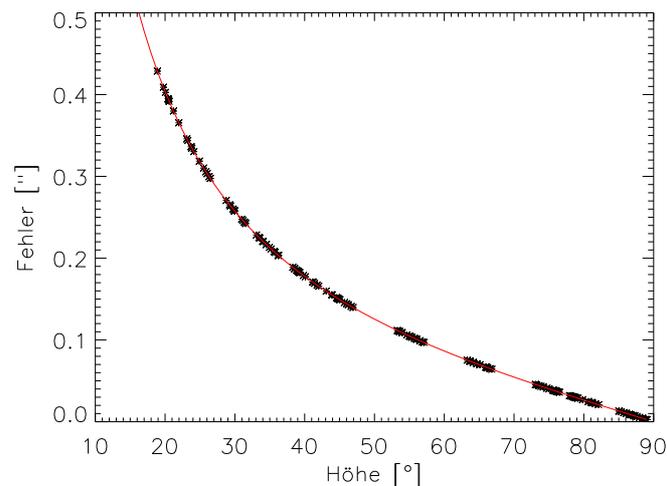


Abbildung 5.1: Darstellung des Refraktionsfehlers: die Sternchen stellen die Refraktionsfehler der einzelnen Messpunkte vs. Höhe dar, die Linie den allgemeinen Verlauf des Refraktionsfehler vs. Höhe

aus den Genauigkeitsangaben der Messgeräte für Temperatur und Luftdruck erhalten. Da der hierdurch entstehende Refraktionsfehler von Temperatur und Luftdruck abhängig ist, ist das σ^2 ebenfalls davon abhängig.

Da für die einzelnen Messpunkte die Temperatur- und Luftdruckwerte nicht zur Verfügung standen, wurden die Durchschnittswerte der Gesamtmessung, sowie die Abweichung vom Durchschnittswert der Temperatur und des Luftdrucks vom Maximalwert als jeweilige Fehler benutzt. Jedoch wird der erzeugte Fehlerwert mit dieser Methode größer, als er in Wirklichkeit ist. Die Werte für Temperatur und Luftdruck betragen:

	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert
Temperatur	290,6 K	292,0 K	(291,3±0,7) [K]
Luftdruck	1020,2 hPa	1021,6 hPa	(1020,9±0,7) [hPa]

Da die Refraktion von der Höhe abhängig ist, variiert der Refraktionsfehler ebenfalls mit der Höhe und somit auch das σ^2 . Der Refraktionsfehler der einzelnen Messungen wird mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung (2.85), basierend auf der Gleichung (2.64), bestimmt. In der Abbildung (5.1) ist der Fehler in Abhängigkeit von der Höhe dargestellt. Der Mittelwert des Refraktionsfehlers beträgt:

$$\bar{\sigma}_{\text{Refraktion}} \approx (0,14 \pm 0,01) ["]$$

Der Fehler der Refraktion ist ein Fehler in der Höhe. Dieser Höhenfehler fließt jedoch nicht direkt ein, sondern über die Korrekturgleichungen (2.25 & 2.26). Um nun den Fehler zu bestimmen, müssen diese nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (2.85) nach der Höhe abgeleitet werden. Die Parameter werden hier als fehlerlos angenommen, wobei dies eine Idealisierung ist. Die Fehler, die in die Varianzen der beiden Korrekturgleichungen mit einfließen, sind in den Abbildungen (5.2 & 5.3) dargestellt. Die Mittelwerte betragen:

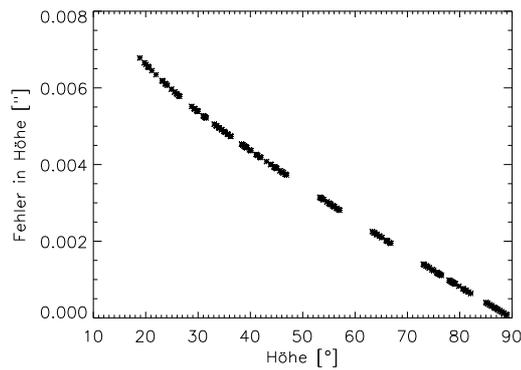


Abbildung 5.2: Fehler der einzelnen Messpunkte in Höhe

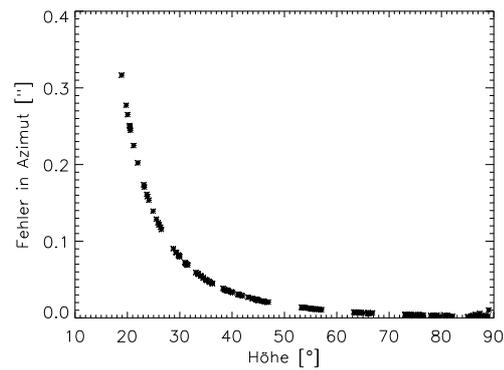


Abbildung 5.3: Fehler der einzelnen Messpunkte in Azimut

	für Azimut	für Höhe
$\bar{s}_{\text{Refraktion}}$	$\approx(0,042\pm0,005)$ ["]	$\approx(0,0032\pm0,0002)$ ["]

5.1.2 Seeingbedingter Abweichungsfehler

Im Kapitel (8) wird gezeigt, dass es eine seeingbedingte Abweichung gibt. Der Fehler dieser Abweichung muss hier mit berücksichtigt werden. Es ist jedoch extrem schwierig diesen Fehler zu bestimmen, da das Seeing, z. B. durch die Höhenabhängigkeit bei den einzelnen Objekten unterschiedlich ist. Man kann aber eine Abschätzung des Fehlers, der durch diese Abweichung entsteht, vornehmen. Die Grundlage hierfür bilden die beiden empirisch gefundenen Gleichungen (8.3 & 8.4). Mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung, nach (2.85), kann nun ein Fehler bestimmt werden. Da jedoch das Seeing für die einzelnen Objekte nicht bekannt ist, muss eine Abschätzung des mittleren Seeings und dessen Fehler erfolgen. Das mittlere Seeing habe ich auf $(2,85\pm0,6)$ ["] abgeschätzt. Dazu habe ich die Anzahl der Messung vs. Seeing aus Kapitel (8), siehe Abbildung (5.4), benutzt und den 1σ Fehler benutzt.

	für Azimut	für Höhe
$s_{\text{Seeingabweichung}}$	$\approx(0,30\pm0,05)$ ["]	$\approx(0,224\pm0,048)$ ["]

5.1.3 Eigenbewegung der Sterne

In "BUSCA" sind die Eigenbewegungen der Sterne nicht mit berücksichtigt (J. Gonzalez-Perez, pers. Mitteilung). Es ist daher nötig, hier einen Fehler abzuschätzen. Dazu wurde der Betrag der Eigenbewegungen der Sterne der Größenklassen von 9,0 bis kleiner 10,0, aus dem Hipparcos-Input-Katalog mit der Epoche J2000, gemittelt und im Anschluss die Standardabweichung als Fehler der Eigenbewegung bestimmt. Weiterhin habe ich angenommen, dass die Eigenbewegung in Rektaszension gleich der Eigenbewegung im Azimut, sowie die Eigenbewegung in Deklination gleich der Eigenbewegung in Höhe ist. Diese Annahmen sind eigentlich nur im Meridian gültig, aber für eine Abschätzung der Größenordnung ist dies ausreichend. Die so bestimmten Werte lauten:

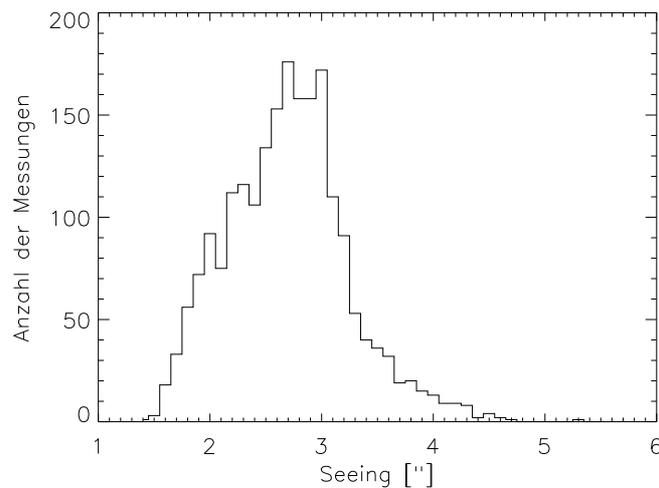


Abbildung 5.4: Histogramm des Seeing

	für Azimut	für Höhe
Mittelwert der Eigenbewegung	$\approx 0",058 \text{ a}^{-1}$	$\approx 0",032 \text{ a}^{-1}$
Fehler der Eigenbewegung	$\approx 0",12 \text{ a}^{-1}$	$\approx 0",1 \text{ a}^{-1}$

Diese Werte müssen noch mit t , der Anzahl der Jahre, in julianischen Jahren, seit dem Jahr 2000, multipliziert werden. Für den 11.06.2006 um 0 Uhr UT erhält für $t \approx 6,44 \text{ a}$ und die folgenden Werte:

	für Azimut	für Höhe
Mittelwert der Eigenbewegung	$\approx 0",37$	$\approx 0",21$
Fehler der Eigenbewegung	$\approx 0",77$	$\approx 0",64$

Im Einzelfall kann es durch die Nichtberücksichtigung der Eigenbewegung der Sterne zu einem starken Misspointing kommen, sowie hierdurch zu einem sehr hohen Offset. Dies kann die vereinzelt auftretenden starken Abweichungen in den Residuen¹ erklären. Tritt eine solche Abweichung auf, wird das betreffende Objekt aus der Datentabelle entfernt und das Pointing Modell neu gerechnet. Somit wird dieser Fehler durch das Entfernen des Objekts aus der Datenliste doch noch berücksichtigt. Dies gilt jedoch nur für die erkannten extremen Rausfaller.

5.1.4 Koordinatenfehler

Durch die Änderung des ΔUT , siehe Abschnitt (2.2.5.3.2), wird ein Zeit- bzw. Koordinatenfehler verursacht. Dies ist ein systematischer Fehler und kann theoretisch maximal $0,9 \text{ s}$ also $13",5$ betragen. Da der Koordinatenfehler ein systematischer Fehler ist, fließt dieser nicht in die Varianz mit ein. Dieser Koordinatenfehler wird durch die Parameter der Korrekturgleichungen nur teilweise kompensiert.

¹Restwert bzw. Differenz zwischen Messwert und mit dem neuen Parameter berechneten Wert

5.1.5 Zusammenfassung

Die Varianz σ^2 setzt sich aus der Summe der Quadrate der hier betrachteten Einzelfehler zusammen. Das σ ist die geometrische Summe der Einzelfehler. Somit erhält man die folgenden Werte:

Fehler	Fehlerwert für die Azimutkorrekturgleichung	Fehlerwert für die Höhenkorrekturgleichung
\bar{s} Refraktion	$\approx 0'' ,042$	$\approx 0'' ,0032$
s Seeingabweichung	$\approx 0'' ,30$	$\approx 0'' ,224$
s Fehler der Seeingabweichung	$\approx 0'' ,05$	$\approx 0'' ,048$
s Eigenbewegung	$\approx 0'' ,37$	$\approx 0'' ,21$
s Fehler der Eigenbewegung	$\approx 0'' ,77$	$\approx 0'' ,64$
σ^2	$\approx 0'' ,82$	$\approx 0'' ,61$
σ	$\approx 0'' ,91$	$\approx 0'' ,78$

Die genaue Bestimmung der einzelnen Fehler ist nicht möglich, da die notwendigen Informationen zum Teil nicht vorhanden sind. Bei der Bestimmung des Refraktionsfehlers fehlen die Fehler der Parameter der Korrekturgleichungen, so dass der Fehler der Refraktion zu klein bestimmt ist. Bei der seeingbedingten Abweichung benötigt man für jede Position das Seeing, welches nicht vorhanden ist bzw. nur unter einem beträchtlichen Aufwand (per Hand) aus den Aufnahmen zu ermitteln ist. Durch die Abschätzung des Seeings wird die Abweichung und der Fehler der Abweichung, die durch das Seeing verursacht wird, etwas zu groß. Die Eigenbewegung der Sterne und deren Fehler ist eine reine Abschätzung.

Die größte Auswirkung auf die Varianz ist meiner Meinung nach das nicht Vorhandensein der Parameterfehler des Pointing Modells, welches in der Steuersoftware des Teleskops stand, als die Messung durchgeführt wurde. Hierdurch wird die Varianz zu klein, was eine Auswirkung auf den Wert des χ^2 hat. Bei einer zu kleinen Varianz wird der Wert des χ^2 zu groß und der Fehler der Parameter der Korrekturgleichungen somit zu klein.

5.2 Bestimmung der Parameter des Pointing Modells

5.2.1 Berechnung der Parameter

Die Parameter der Korrekturgleichungen (2.25 und 2.26) wurden durch eine χ^2 -Minimierung und mit Hilfe der IDL-Routine "POWELL" durchgeführt. Diese Minimierung wurde zweimal durchgeführt, wobei man bei der zweiten die Residuen der ersten Minimierung als Messdaten annahm. Hierdurch wurde eine Korrektur an die, durch die erste Minimierung erhaltenen, Parameter angebracht. Die Fehler der einzelnen Parameter wurden, wie in Abschnitt (2.3.2) beschrieben, bestimmt. Die Parameter sowie deren Fehler aus der Pointingmessung vom 10.06.2006 lauten:

AOFF:	$\approx (-0,06636 \pm 0,00006) [^\circ]$	EOFF:	$\approx (-0,2182 \pm 0,0003) [^\circ]$
AN _A :	$\approx (-0,00129 \pm 0,000004) [^\circ]$	AN _E :	$\approx (-0,000755 \pm 0,00002) [^\circ]$
AE _A :	$\approx (0,00363 \pm 0,000004) [^\circ]$	AE _E :	$\approx (0,003703 \pm 0,00002) [^\circ]$
NPAE:	$\approx (0,0144 \pm 0,0001) [^\circ]$	EES:	$\approx (-0,0110 \pm 0,0003) [^\circ]$
BNP:	$\approx (0,0835 \pm 0,0001) [^\circ]$	(EEC+TF) :	$\approx (0,0277 \pm 0,0002) [^\circ]$
AES:	$\approx (-2,7e^{-5} \pm 3,1e^{-5}) [^\circ]$	c5:	$\approx (7,7e^{-5} \pm 0,3e^{-5}) [^\circ]$
AEC:	$\approx (-1,1e^{-5} \pm 3,3e^{-5}) [^\circ]$	c1:	$\approx (0,00328 \pm 0,00002) [^\circ]$
		c2:	$\approx (-0,00037 \pm 0,00002) [^\circ]$
		c3:	$\approx (-0,00079 \pm 0,00002) [^\circ]$
		c4:	$\approx (-0,00015 \pm 0,00002) [^\circ]$

Da die Parameter fehlerbehaftet sind, sind die Korrekturwerte Δaz und Δh ebenfalls mit Fehlern behaftet. In den Abbildungen (B.1, B.2, B.3 & B.4) sind die Korrekturwerte Δaz und Δh mit ihren Fehlern nach (2.87 und 2.88) dargestellt. In der Abbildung (B.1), sind die Azimutkorrekturwerte mit ihren Fehlern multipliziert mit $\cos(h)$ gegen Azimut aufgetragen, man kann eine Struktur in den Fehlerbalken erkennen. Man kann sehen, dass die Fehler mit der Höhe kleiner werden. Außerdem ist die Größe des Fehlerwerts auch vom Azimut abhängig. Bei Azimut 0° , 180° und 360° werden die Fehler minimal, bei 90° und 270° maximal. In den Fehlern der Höhenkorrekturwerte ist eine solche Struktur nicht zu erkennen. Diese Struktur in den Fehlerwerten kann man auf die Struktur der Azimutkorrekturgleichung, siehe Abschnitt (5.4.4), zurückführen.

Die χ^2 -Werte für die beiden Korrekturgleichungen, die man nach (2.75) erhält, sind:

für die 1. Minimierung der Azimutkorrekturgleichung:	≈ 1975
für die 2. Minimierung der Azimutkorrekturgleichung:	≈ 1676
für die 1. Minimierung der Höhenkorrekturgleichung:	≈ 905
für die 2. Minimierung der Höhenkorrekturgleichung:	≈ 905

Die χ^2 -Werte sind viel zu hoch. Die Werte müssten bei 150 für die Azimutkorrekturgleichung und 147 für die Höhenkorrekturgleichung liegen, damit die Wahrscheinlichkeit, dass das Modell korrekt ist bei 68 Prozent liegt. Es zeigt, dass entweder die Einzelfehler zu klein bestimmt wurden oder dass die Residuen weitere unbekannte Terme enthalten, die nicht berücksichtigt werden, so dass sie noch zu groß sind. Als Folge davon sind die Fehler der Parameter ebenfalls zu klein bestimmt. Aber auch die Residuen geben Auskunft wie gut die Minimierung war. In den Abbildungen (B.9, B.10, B.11 & B.12) sind die Residuen nach der zweiten Minimierung dargestellt. Die Standardabweichungen der Residuen, die sich nach den Minimierungen ergaben, lauten:

Standardabweichung für die Azimutresiduen 1. Minimierung :	$\approx 3'',17$
Standardabweichung für die Azimutresiduen 2. Minimierung :	$\approx 2'',0$
Standardabweichung für die Höhenresiduen 1. Minimierung :	$\approx 1'',67$
Standardabweichung für die Höhenresiduen 2. Minimierung :	$\approx 1'',67$

Trotz der zu klein bestimmten Fehler der Parameter sind die Fehlerwerte der Parameter AES und AEC größer als der Parameterwert. Dies ließe den Schluss zu, dass die Parameterwerte mit Null konsistent sind und somit aus dem Pointing Modell entfernt werden könnten. Um dies zu überprüfen habe ich eine Modellrechnung durchgeführt, in der diese Parameter aus dem Pointing Modell entfernt wurden. Hätten diese Parameter einen Einfluss, so müßte dies zu einer kleineren Standardabweichungen der Residuen, sowie zu

kleineren χ^2 -Werten führen.

Die Modellrechnung, in der die Parameter AES und AEC aus der Azimutkorrekturgleichung entfernt wurden ergab:

χ^2 für die 1. Minimierung der Azimutkorrekturgleichung:	≈ 1690
χ^2 für die 2. Minimierung der Azimutkorrekturgleichung:	≈ 1688
Standardabweichung für die Azimutresiduen 1. Minimierung:	$\approx 2'',93$
Standardabweichung für die Azimutresiduen 2. Minimierung:	$\approx 2'',04$

Die Werte aus der Modellrechnung ergeben eine geringfügige Verschlechterung der Standardabweichung der Residuen nach der 2. Minimierung. Die Residuen, die sich ergaben, sind in den Abbildung (B.13 und B.14) dargestellt.

Eine weitere Frage ist, wie die Parameter zueinander korreliert sind, also wie stark sie voneinander abhängen.

5.2.2 Korrelation der Parameter

	AOFF	AN _A	AE _A	NPAE	BNP	AES	AEC
AOFF	1,0						
AN _A	-0,3683	1,0					
AE _A	0,0023	-0,1694	1,0				
NPAE	0,9039	-0,3090	-0,0172	1,0			
BNP	-0,9090	0,3210	0,0147	-0,9997	1,0		
AES	0,1000	-0,4892	0,0703	0,1123	-0,1169	1,0	
AEC	0,0304	0,0406	-0,4646	0,0629	-0,0620	-0,0038	1,0

Tabelle 5.1: Korrelationsmatrix der Azimutkorrekturgleichung

In der Tabelle (5.1) ist die Korrelationsmatrix für die Azimutkorrekturgleichung dargestellt. Man stellt fest, dass die Parameter NPAE und AOFF stark miteinander korreliert sind. Im Gegensatz dazu sind die Parameter NPAE und BNP sehr stark antikorreliert. Auch sind die Parameter AN_A und AES, sowie AE_A und AEC antikorreliert.

Die Korrelationsmatrix für die Höhenkorrekturgleichung ist in der Tabelle (5.2) dargestellt. Aus ihr kann man ablesen, dass die Parameter EES und (EEC+TF) sehr stark miteinander korreliert sind. Der Parameter c5 ist ebenfalls mit den Parametern EES und (EEC+TF) korreliert. Eine starke Antikorrelation besteht zwischen EOFF mit EES und (EEC+TF) und eine nicht so starke Antikorrelation mit c5.

	EOFF	AN _E	AE _E	EES	(EEC+TF)	c5	c1	c2	c3	c4
EOFF	1,0									
AN _E	-0,043	1,0								
AE _E	-0,145	0,013	1,0							
EES	-0,990	0,043	0,130	1,0						
(EEC+TF)	-0,983	0,025	0,146	0,953	1,0					
c5	-0,595	-0,009	0,160	0,514	0,649	1,0				
c1	0,012	-0,105	-0,028	-0,010	-0,010	-0,023	1,0			
c2	0,064	-0,093	0,026	-0,069	-0,042	0,039	-0,008	1,0		
c3	-0,018	0,008	0,021	0,017	0,013	-0,003	-0,038	-0,133	1,0	
c4	-0,060	0,187	-0,020	0,072	0,036	0,009	0,011	-0,076	0,009	1,0

Tabelle 5.2: Korrelationsmatrix der Höhenkorrekturgleichung

Wieso die Parameter der Azimut- und der Höhenkorrekturgleichung so korreliert sind, wird im Abschnitt "Analyse des Pointing Modells (5.4)" noch verdeutlicht werden.

5.2.3 Fehlerbetrachtung und Zusammenfassung

Aufgrund der zu klein bestimmten Varianz sind die Fehler der Parameter zu klein bestimmt. Sie bilden somit nur untere Grenzen der Genauigkeit, was nicht optimal und der Sinn der Fehlerangabe ist. Aufgrund des Fehlens der Parameterfehler, der in der Steuerungssoftware eingestellten Pointing Parameter, ist eine genauere Fehlerbestimmung nicht möglich. Dies wirft die Frage auf, ob die χ^2 -Minimierung hier sinnvoll ist oder nicht, da die χ^2 -Statistik, aufgrund der Unsicherheiten und fehlenden Informationen zu den einzelnen Fehlern der Messungen, nicht korrekt ist.

Die Standardabweichungen der Azimutresiduen von $2''{,}0$ und der Höhenresiduen von $1''{,}67$ zeigen, dass dieses Modell theoretisch ein recht gutes Pointingverhalten aufweist. In der Modellrechnung zur Überprüfung der Notwendigkeit von AES und AEC in der Azimutgleichung wurde festgestellt, dass sich der Wert des χ^2 und der Standardabweichung der Residuen gegenüber der 1. Minimierung verbessert, jedoch gegenüber der 2. Minimierung verschlechtert hat. Meiner Meinung nach sind die Parameter AES und AEC notwendig und dürfen nicht aus dem Pointing Modell entfernt werden. Auch konnte die starke Korrelation zwischen den Parameter NPAE und AOFF in der Azimutkorrekturgleichung und die starke Antikorrelation zwischen BNP und NPAE sowie AOFF festgestellt werden. Außerdem sind die Parameter EES und (EEC+TF) aus der Höhenkorrekturgleichung stark miteinander korreliert und mit EOFF antikorreliert. Eine recht starke Korrelation besteht auch zwischen c5 mit EES sowie mit (EEC+TF).

5.3 Untersuchung der Residuen

Bei dieser Untersuchung der Residuen wurden Effekte gesucht, die sich auf das Pointingverhalten auswirken könnten. Hierfür kann man die Residuen zweidimensional oder dreidimensional plotten und analysieren. In der Abbildung (5.5) sind die Residuen des Azimutoffsets vs. Azimut zu sehen. Als erstes sieht man eine deutliche Abweichung bzw. einen lokalen Effekt bei ca. 225° . Diese Abweichung bedeutet, dass dort ein Pointingfehler von bis zu ca. 7 Bogensekunden auftreten kann. Außerdem sieht man eine starke Abweichung von ca. 120° bis 160° , sowie von ca. 20° bis ca. 50° und von ca. 280° bis ca. 320° zwei nicht so starke Abweichungen. In der 3-D Darstellung, siehe Abbildung (5.7), kann man dies, auch höhenabhängig, sehr gut sehen. Aus diesen Abweichungen kann man eine weitere Welle oder eine Überlagerung von Wellen in Azimutrichtung vermuten, welche nicht in der Azimutkorrekturgleichung vorhanden ist. Die rote Linie in der Abbildung (5.5) stellt den Fit einer Überlagerung von einer 180° und einer 120° Welle dar. Man kann erkennen, dass zwei Maxima und ein Minimum in etwa mit den Abweichungen zusammenfallen.

Bei der Analyse der Residuen der Höhenoffsets vs. Azimut, siehe Abbildung (5.6), zeigt sich noch eine 90° Welle. Zur Veranschaulichung wurde ein Fit einer 90° Welle in die Darstellung eingezeichnet. Diese 90° Welle ist in der Höhenkorrekturgleichung noch nicht enthalten. In der 3-D Darstellung, siehe Abbildung(5.8), kann man die 90° Welle ebenfalls sehr gut erkennen.

Berücksichtigt man nun die zusätzlichen Wellen in den Korrekturgleichungen (2.25 & 2.26) erhält man die folgenden Werte für die Standardabweichungen der Residuen:

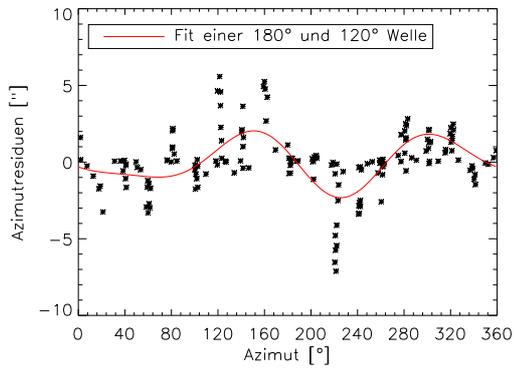


Abbildung 5.5: Azimutresiduen vs. Azimut mit Fit der 180° & 120° Welle

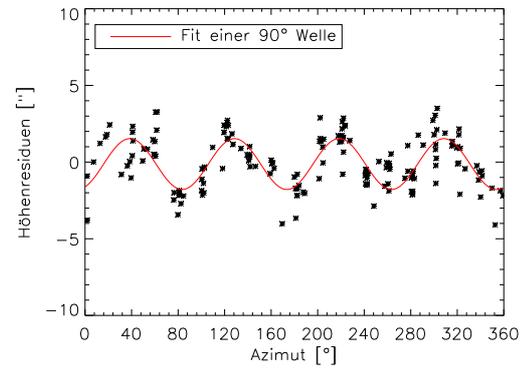


Abbildung 5.6: Höhenresiduen vs. Azimut mit Fit der 90° Welle

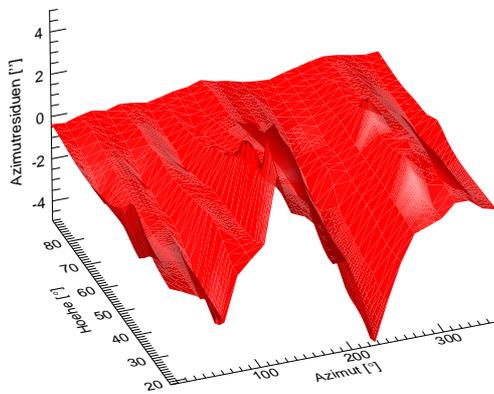


Abbildung 5.7: 3-D Plot der Azimutresiduen

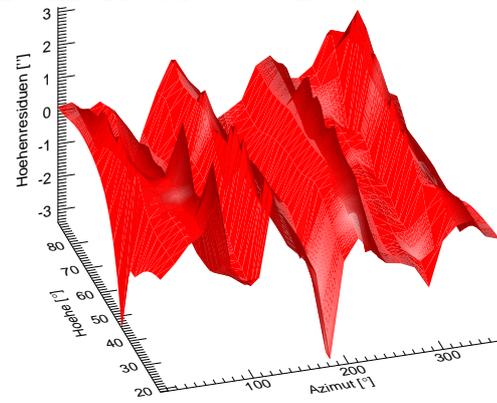


Abbildung 5.8: 3-D Plot der Höhenresiduen

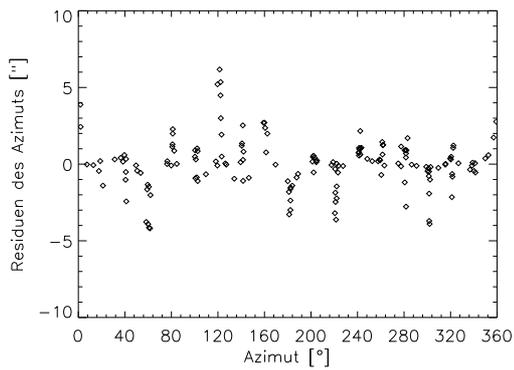


Abbildung 5.9: Azimutresiduen vs. Azimut unter Berücksichtigung der 180° & 120° Welle

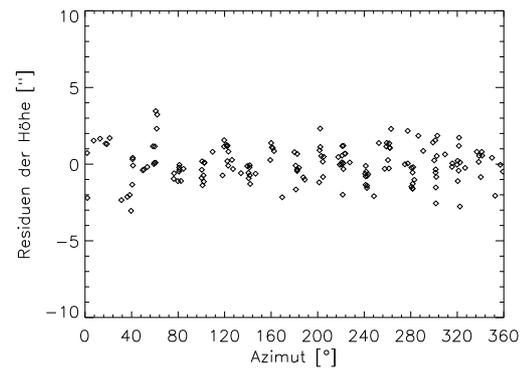


Abbildung 5.10: Höhenresiduen vs. Azimut unter Berücksichtigung der 90° Welle

	Azimutresiduen	Höhenresiduen
Standardabweichung der Residuen 1. Minimierung:	$\approx 2''{,}60$	$\approx 1''{,}15$
Standardabweichung der Residuen 2. Minimierung:	$\approx 1''{,}67$	$\approx 1''{,}15$

Die Residuen vs. Azimut sind in den Abbildungen (5.9 & 5.10) dargestellt. Man kann in der Abbildung (5.9) immer noch recht starke Abweichungen in den Azimutresiduen bei 60° , 120° , 170° , 225° und 300° Azimut sehen. Es läßt sich daher vermuten, dass die Ursache dieser Abweichungen noch andere Gründe haben muss, als die Überlagerung der zwei Wellen. In den Höhenresiduen, siehe Abbildung (5.10), ist keine klare Wellenstruktur mehr zu erkennen.

5.4 Analyse des Pointing Modells des HRT

5.4.1 Offsets ohne Pointing Modell

In den Offsets ohne Pointing Modell sind alle Fehler enthalten, und man kann sich den Verlauf der Offsets in Abhängigkeit von Azimut und Höhe ansehen. Die Offsets ohne Pointing Modell sind in den Abbildungen (B.5, B.7, B.6 & B.8) dargestellt.

Man sieht z. B., dass der Offset für den Azimut mit zunehmender Höhe abnimmt, der Höhenoffset hingegen mit größer werdender Höhe anwächst. Man kann auch sehr schön eine Wellenform der Höhenoffsets vs. Azimut erkennen.

5.4.2 Herkunft der zusätzlichen Parameter

Die Herkunft der empirisch durch Dr. Hempelmann gefundenen, zusätzlichen Parameter in der Höhenkorrekturgleichung konnte auf zwei unterschiedlichen Wegen nachgewiesen werden. Der eine Nachweis erfolgte durch eine Relativmessung der Azimutebene des Teleskops zur Horizontebene mit einer Präzisionswasserwaage. Dabei wurde die Azimutverkipfung AN und AE um 360° , in einem Intervall von 30° gemessen. An die Messpunkte wurde erst eine 360° Welle angefügt und im Anschluß um eine 180° und 120° Welle erweitert. Wie man in der Abbildung (5.11) sieht, passt der Fit sehr gut zu den ermittelten Daten.

Der zweite Nachweis erfolgte mit Hilfe der Höhenoffsets ohne Pointing Modell. Wie in Abschnitt (5.4.1) erwähnt, ist im Verlauf der Höhenoffsets vs. Azimut eine Welle zu sehen. Diese hat die Form einer Welle, die sich aus mehreren sich überlagernden Wellen, mit verschiedener Periode, zusammensetzt. Fittet man eine Kurve, die sich aus einer 360° , 180° und 120° Welle zusammensetzt an, wird der Verlauf hervorragend wiedergegeben, wie man in der Abbildung (5.12) sieht.

Die Teilamplituden der 360° Welle sind die Parameter AN_E und AE_E . Die 180° und 120° Welle sind zusätzliche Wellen in der Azimutebene, die im klassischen Pointing Modell nicht enthalten sind. Diese gehen als c1 bis c4 Parameter im Pointing Modell des HRT ein. Um zu verdeutlichen, dass es diese zusätzlichen Wellen in der Azimutebene gibt, sollen zwei Modellrechnungen durchgeführt werden. In der ersten Rechnung soll die Höhenkorrekturgleichung ohne die c1 bis c4 Parameter gerechnet werden. In den Residuen müßte nun eine 180° und 120° Welle zu finden sein. In der Abbildung (5.13) kann man dies sehr gut erkennen. Es ist eine, durch mehrere Wellen überlagerte, Struktur zu sehen. Der Fit in der Abbildung (5.13) zeigt, dass sie aus einer 180° und einer 120° Welle besteht. In der

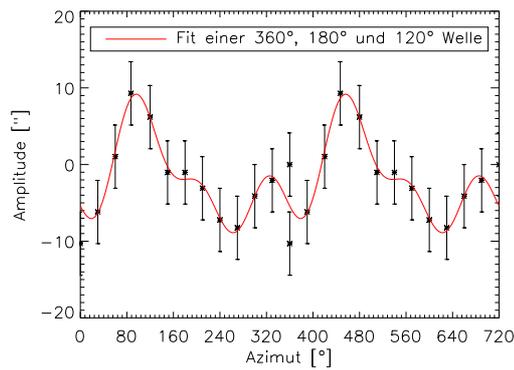


Abbildung 5.11: Messung der Verkipfung AN und AE vom 23.12.2005

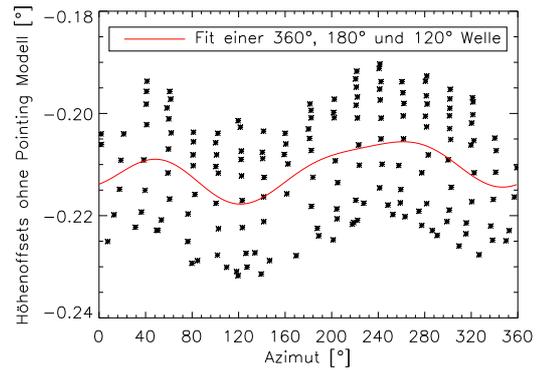


Abbildung 5.12: Höhenoffset ohne Pointing Modell vs. Azimut mit Fit der Welle

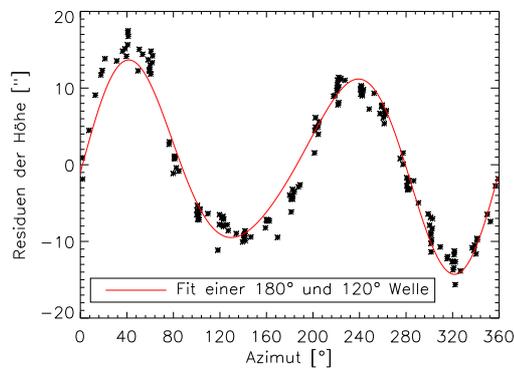


Abbildung 5.13: Höhenkorrekturgleichung ohne c1 bis c4 Parameter

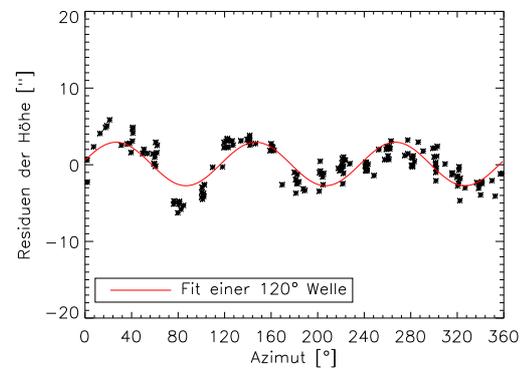


Abbildung 5.14: Höhenkorrekturgleichung ohne c3 und c4 Parameter

zweiten Modellrechnung wurden die Parameter $c1$ und $c2$ wieder in die Höhenkorrekturgleichung eingeführt. Nun müßte noch eine 120° Welle zu sehen sein. Die Residuen dieser Rechnung sind in der Abbildung (5.14) dargestellt. Man kann in der Abbildung (5.14) sehr gut eine 120° Welle erkennen.

Man kann also annehmen, dass in der Azimutebene eine zusätzliche 180° und 120° Welle existiert. Die Amplituden der 180° und 120° Welle gehen als die $c1$ bis $c4$ Parameter in die Höhenkorrekturgleichung ein. Die Herkunft dieser Wellen ist jedoch nicht klar und könnte folgende Ursache haben:

Eine Möglichkeit ist, dass diese Wellen im hydraulischen Azimutlager entstehen. Hierbei muss man wissen, wie das Azimutlager arbeitet. Es funktioniert, indem Öl durch Düsen gedrückt wird, die die Azimutebene des Teleskops geringfügig anheben, so dass ein dünner Film entsteht, worauf die Azimutebene praktisch schwimmt. Ist die Öffnung der Düsen nicht exakt gleich, variiert der Druck und die Azimutebene wird unterschiedlich stark angehoben. Dies könnte auch zu diesen Fehlern führen.

Die Ursache des $c5$ Parameters konnte bis jetzt noch nicht festgestellt werden. Jedoch wirkt er sich am stärksten im Zenit aus, siehe Abbildung (B.15).

Die Entkopplung der Korrekturgleichungen und somit die Parameter AN_A , AE_A , AN_E

und AE_E sind eine Folge des Vorzeichenfehlers bei der Herleitung der Parameter AN und AE in der Diplomarbeit von Daniel Plaza [11]. Zur Entkopplung der Korrekturgleichungen möchte ich an dieser Stelle A. Hempelmann zitieren:

”Der Vorzeichenfehler betrifft nur die Azimutgleichung aber nicht die Höhengleichung. Dadurch ergeben sich (um das Vorzeichen) verschiedene AN, AE für Azimut und Höhe. Das von Plaza [11] abgeleitete Pointingmodell wurde Basis der Teleskopsteuersoftware der Fa. Halfmann, d. h. der Vorzeichenfehler wurde dort übernommen. In den Zwischentests in Hamburg wurde von A. Hempelmann und J. Gonzalez Perez bemerkt, dass eine wesentliche Steigerung der Pointinggenauigkeit erreicht werden konnte, wenn AN und AE als verschieden in Azimut und Höhe angenommen werden. Daraufhin wurden AN und AE in der Teleskopsteuersoftware durch die Fa. Halfmann entkoppelt. Dies war ein rein empirischer Ansatz, eine theoretische Begründung konnte nicht gegeben werden. Dies ist in der vorliegenden Diplomarbeit somit nachträglich gelungen. Eine Rückkorrektur der Software wurde bei den vielen Teleskopen, die Halfmann inzwischen gebaut hat und der Komplexität der Software einen erheblichen betriebswirtschaftlichen Aufwand bedeuten. Eine Verbesserung der Pointinggenauigkeit ist dadurch jedoch nicht zu erwarten. Deshalb möge man es unter pragmatischen Gesichtspunkten - zumindest bis zu einem evtl. generellen Upgrade - dabei belassen und vom spezifisch Halfmann’schen Pointingmodell sprechen.”

5.4.3 Höhenkorrekturgleichung

5.4.3.1 Struktur der Gleichung

Die Höhenkorrekturgleichung beschreibt die Höhenkorrektur in Abhängigkeit von Höhe und Azimut. Im folgenden soll untersucht werden, welche Parameter für den Höhen- und Azimutverlauf verantwortlich sind. Diese sollen in zwei Wellen zusammengefasst werden, die den jeweiligen Verlauf beschreiben. In der Höhenkorrekturgleichung kann man schon eine solche Struktur erahnen. Mit Hilfe von Modellrechnungen konnten diese Wellen, die die Verläufe in Höhe und Azimut beschreiben, ermittelt werden. Dazu wurde ein Pointing Modell nur mit der Höhenwelle bzw. nur mit Azimutwelle gerechnet. In den entsprechenden Residuen sollte man nun den Verlauf der fehlenden Welle erkennen können.

Die entsprechenden Residuen, die die Verläufe darstellen, sind in den Abbildungen (5.15 & 5.16) zu sehen. Die beiden Wellen, die für die Verläufe in Höhe und Azimut verantwortlich sind, haben die Form:

$$\text{Höhenwelle:} \quad EOFF + EES \cdot \sin(h) + ((EEC + TF)) \cdot \cos(h) + \frac{c5}{\cos(h)} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Azimutwelle :} \quad & EOFF + AN_E \cdot \cos(az) + AE_E \cdot \sin(az) \\ & + c1 \cdot \sin(2 \cdot az) + c2 \cdot \cos(2 \cdot az) \\ & + c3 \cdot \sin(3 \cdot az) + c4 \cdot \cos(3 \cdot az). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Die Konstante EOFF ist sowohl die Konstante in der Höhenwelle als auch in der Azimutwelle. Die Residuen der Modellrechnung mit der Azimutwelle, Gleichung (5.1) ist in der Abbildung (5.15) dargestellt. Vergleicht man den Verlauf der Offsets ohne Pointing Modell in Höhe, die als rote Quadrate in der Abbildung dargestellt sind, stellt man fest, dass der Verlauf in Höhe gleich ist. Somit ist die fehlende Höhenwelle (5.1) für den Höhenverlauf verantwortlich. Die Bedeutung des $c5$ Terms für die Höhenwelle ist schwierig zu

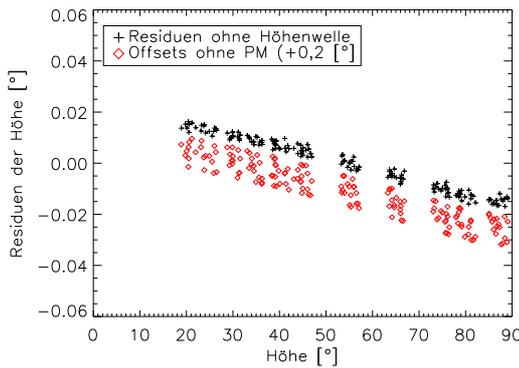


Abbildung 5.15: Modellrechnung mit der Azimutwelle

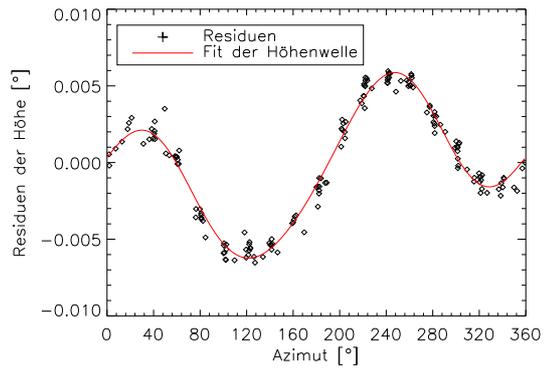


Abbildung 5.16: Modellrechnung mit der Höhenwelle

beschreiben, da die Herkunft unbekannt ist. Man kann aber sagen, dass der c_5 Parameter eine höhenabhängige Korrektur der Konstante der Höhenwelle ist. Der Einfluß auf die Konstante ist bei Höhe 0° am geringsten, durch den eins durch Cosinusverlauf wächst die Bedeutung dieses Parameters mit der Höhe.

In der Abbildung (5.16) sind die Residuen der Modellrechnung mit der Höhenwelle zu sehen. Man erkennt in der Abbildung, dass die Residuen eine zusammengesetzte Wellenstruktur aufweist. Ein direkter Vergleich mit den Offsets ohne Pointing Modell, siehe Abbildung (B.7), ist jedoch aufgrund der Dimensionen nicht möglich. Man kann jedoch die Azimutwelle, Gleichung (5.2), in die Residuen fitten. Die rote Linie in der Abbildung stellt diesen Fit der Azimutwelle, Gleichung (5.2), dar und man sieht, dass dieser Fit die Wellenstruktur einer zusammengesetzten 360° , 180° und 120° Welle sehr gut widerspiegelt. Damit bestätigt sich, dass die 180° und 120° Wellen real existieren und die Erweiterung des "klassischen" Pointing Modells um die c_1 bis c_4 Terme gerechtfertigt ist.

Die Parameter c_1 bis c_4 der Welle sind die Amplituden der Sinus- und Cosinusanteile einer 180° und 120° Azimutwelle. Diese überlagern die 360° Azimutwelle bzw. sind Oberwellen der 360° Azimutwelle.

5.4.3.2 Korrelation der Parameter

Da bei der Messung eines Pointing Modells der horizontnahe Bereich von 0° bis 20° Höhe nicht abgedeckt werden kann (wegen dem Gebäude), ist die Frage wie die Korrelation der Parameter ist, wenn die Messung die gesamte Himmelshalbkugel abdecken würde? Dazu habe ich eine theoretische Koordinatenliste erstellt, die die Himmelshalbkugel abdeckt. Das Koordinatengitter besteht aus theoretischen Positionen, die in Höhe von 0° bis 90° alle 10° und im Azimut von 0° bis 355° alle 5° liegen. In der Tabelle (5.3) ist diese theoretische Korrelationsmatrix abgebildet. Man sieht in der Tabelle (5.3), dass nur die Parameter, die zu der Höhenwelle und somit die für den Höhenverlauf verantwortlichen Parameter, miteinander korreliert oder antikorreliert sind. Die Parameter der Azimutwelle können eindeutig bestimmt werden, so dass sie nicht voneinander abhängig sind.

Die beiden Parameter EES und (EEC+TF) sind sehr stark miteinander korreliert und mit EOFF stark sowie mit c_5 schwächer antikorreliert. EOFF und c_5 sind ebenfalls miteinander korreliert, was die Interpretation des c_5 Parameters, als Korrektur zu EOFF erhärtet.

	EOFF	AN _E	AE _E	EES	(EEC+TF)	c5	c1	c2	c3	c4
EOFF	1,0									
AN _E	0,00	1,0								
AE _E	0,00	0,00	1,0							
EES	-0,97	0,00	0,00	1,0						
(EEC+TF)	-0,98	0,00	0,00	0,92	1,0					
c5	0,50	0,00	0,00	-0,40	-0,53	1,0				
c1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,0			
c2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	1,0		
c3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,0	
c4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,0

Tabelle 5.3: Modellkorrelationsmatrix der Höhenkorrekturgleichung

Da EOFF die Konstante der Höhenwelle ist, muss diese auch abhängig von den Parametern EES und (EEC+TF) sein. Das gleiche gilt auch für c5, die eine höhenabhängige Korrektur von EOFF darstellt. Die sehr starke Korrelation zwischen diesen Parametern ist durch den abgedeckten Höhenbereich zu erklären. Der Bereich der Höhenwelle ist nur ein Viertel einer ganzen Welle und zwar von 0° bis 90° . Hierdurch hängen die Parameter stark voneinander ab. Die Parameter EES und (EEC+TF) beschreiben zudem die Amplitude und Phasenlage der Höhenwelle.

Vergleicht man die Korrelationskoeffizienten aus der Messung, siehe Tabelle (5.2), mit diesen theoretischen Werten, siehe Tabelle (5.3), kann man eine Änderung der Korrelation zwischen dem c5 Parameter und EES sowie (EEC+TF) feststellen, von korreliert zu antikorreliert. Außerdem stellt man fest, dass die Korrelation zwischen c5 und EOFF sich ebenfalls geändert hat, von antikorreliert zu korreliert. Bedenkt man jedoch die Bereiche, die die Korrelationsmatrizen abdecken, gibt es in der theoretischen Himmelsabdeckung gleichviele horizontnahe wie zenitnahe Messpunkte, im Gegensatz zur Messung, in der es bedeutend weniger horizontnahe gibt. Dies kann die Änderung der Korrelationsbezeichnungen erklären. Der c5 Parameter hat in Zenitnähe einen größeren Einfluss auf der Höhenverlauf, im horizontnahen Bereich ist dieser jedoch nur gering, praktisch gleich Null.

5.4.4 Azimutkorrekturgleichung

5.4.4.1 Struktur der Gleichung

Wie für die Höhenkorrekturgleichung, siehe Abschnitt (5.4.3.1), sollen auch hier, die für die Verläufe in Höhe und Azimut verantwortlichen Parameter ermittelt und in zwei Wellen zusammengefasst werden. Bei der Azimutkorrekturgleichung (2.25), die zur Bestimmung der Korrekturwerte benutzt wird, ist es schwierig, eine so genaue Struktur wie bei der Höhenkorrekturgleichung zu erkennen. Bedenkt man jedoch, dass man mit dieser Gleichung (2.25) die Korrekturwerte am Azimutencoder bestimmt, also aus Sicht des Azimutencoders bei Höhe 0° , ist diese Unklarheit der Struktur zu verstehen. Multipliziert man die Gleichung (2.25) mit dem $\cos(h)$, erhält man die Azimutkorrekturgleichung (2.24). Mit dieser Gleichung erhält man die Korrekturwerte, so wie sie an der Himmelshalbkugel wären. Sie sind somit an der Himmelshalbkugel und nicht am Azimutencoder verteilt.

Die Wellen in Höhe und Azimut konnten mit Hilfe von Modellrechnungen ermittelt werden. Diese Modellrechnungen wurden in gleicher Form wie in Abschnitt (5.4.3.1) durchgeführt.

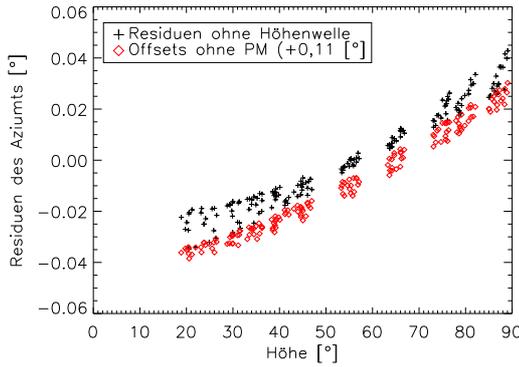


Abbildung 5.17: Modellrechnung mit Azimutwelle

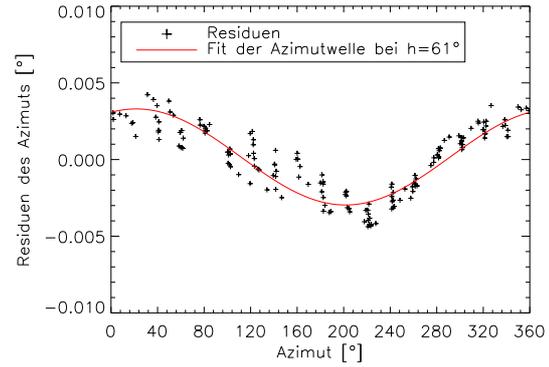


Abbildung 5.18: Modellrechnung mit Höhenwelle

Die ermittelten Wellen haben die Form:

$$\text{Höhenwelle:} \quad -\text{BNP} + \text{NPAE} \cdot \sin(h) + \text{AOFF} \cdot \cos(h). \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Azimutwelle:} \quad & -\text{BNP} + [\text{AN}_A \cdot \sin(h) + \text{AES} \cdot \cos(h)] \cdot \sin(\text{az}) \\ & + [-\text{AE}_A \cdot \sin(h) + \text{AEC} \cdot \cos(h)] \cdot \cos(\text{az}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

In den Abbildungen (5.17 & 5.18) sind die Residuen dieser Modellrechnungen abgebildet. In der Abbildung (5.17) ist der Höhenverlauf und der Höhenverlauf der Offsets ohne Pointing Modell dargestellt. Man erkennt, dass die beiden Verläufe identisch sind, und somit ist die Höhenwelle (5.3) bzw. die Parameter der Höhenwelle für den Höhenverlauf verantwortlich.

Sie ist eine 360° Welle in Höhe, deren Amplitude aus den Parametern, NPAE und AOFF besteht.

Der Verlauf der Residuen in der Abbildung (5.18) weist eindeutig eine 360° Welle in Azimutrichtung auf. Ein Vergleich mit den Offsets ohne Pointing Modell ist, wie bei der Höhenkorrekturgleichung, aus Dimensionsgründen nicht möglich, siehe Abbildung (B.5). Fittet man nun aber die Azimutwelle (5.4) bei einer Höhe von ca. 61° in die Residuen, erhält man den Verlauf, der als rote Linie in der Abbildung (5.18) dargestellt ist. Man sieht, dass der Fit den Verlauf sehr gut wiedergibt. Daher bestimmt also die Azimutwelle nach (5.4) den Verlauf in Azimutrichtung.

Die beiden Teilamplituden der Azimutwelle (5.4) setzen sich aus jeweils einer höhenabhängigen 360° Welle zusammen. Bedenkt man jedoch die Bedeutung der Parameter AN_A , AE_A , AES und AEC sowie deren Einfluss auf die Korrekturwerte, wird klar, wieso diese Struktur entsteht. Dies soll kurz anhand der Einflüsse von AN_A und AES verdeutlicht werden.

Die Azimutverkipfung nach Norden, die durch den Parameter AN_A beschrieben wird, ist im Zenit maximal und nimmt bei abnehmender Höhe immer mehr ab. In Höhe 0° verschwindet die Azimutverkipfung und ist gleich 0. Der Sinusanteil der Encoderdeformation, der durch den Parameter AES beschrieben wird, hat seinen maximalen Einfluss auf den Korrekturwert bei minimaler Höhe, also bei Höhe 0° und nimmt mit zunehmender Höhe ab. Im Zenit verschwindet dieser Einfluss und wird 0.

Man kann die gegenseitige Beeinflussung der beiden Parameter auch wie folgt beschreiben: In der Höhe 45° ist der Einfluss, den die beiden Parameter beschreiben gleich, das heisst

die Parameterterme sind gleich. Oberhalb einer Höhe von 45° wird der durch den Parameter AES beschriebene Einfluss auf den Korrekturwert zu einer Korrektur des Parameters AN_A . Unterhalb von der Höhe 45° ist dies umgekehrt.

Der Parameter BNP übt sowohl im Höhenverlauf als auch im Azimutverlauf einen Einfluss aus, daher sind die Verläufe in Höhe und Azimut miteinander gekoppelt.

5.4.4.2 Korrelation der Parameter

Wie bei der Höhenkorrekturgleichung im Abschnitt (5.4.3.1) soll auch hier die theoretische Korrelation der Parameter über die gesamte Himmelshalbkugel betrachtet werden. Dazu wurden die gleichen theoretischen Koordinaten verwendet, wie in Abschnitt (5.4.3.1). In der Tabelle (5.4) sind die theoretischen Korrelationskoeffizienten der Parameter dargestellt. Es zeigt sich, dass die Parameter AOFF und NPAE, also die Amplituden der Höhenwelle,

	AOFF	AN_A	AE_A	NPAE	BNP	AES	AEC
AOFF	1,0						
AN_A	0,00	1,0					
AE_A	0,00	0,00	1,0				
NPAE	0,91	0,00	0,00	1,0			
BNP	-0,97	0,00	0,00	-0,97	1,0		
AES	0,00	-0,60	0,00	0,00	0,00	1,0	
AEC	0,00	0,00	-0,60	0,00	0,00	0,00	1,0

Tabelle 5.4: Korrelationsmatrix der Azimutkorrekturgleichung

sehr stark miteinander korreliert sind. Diese hohe Korrelation ist darauf zurückzuführen, dass man nur ein Viertel der 360° Welle in Höhe, 0° bis 90° Höhe, als Messbereich hat. Hierdurch hängen die Parameter stark voneinander ab, da sie Amplitude und Phasenlage der Höhenwelle beschreiben. Hierdurch kann die starke Korrelation bei der realen Messung erklärt werden. Da dort der Messbereich noch kleiner ist (zwischen 20° bis 90° Höhe) ist die Korrelation der Parameter noch etwas stärker, siehe Tabelle (5.1). Die starke Antikorrelation des Parameters BNP gegenüber NPAE und AOFF ist ebenfalls durch den beschränkten Messbereich zu erklären. Man sieht in der Abbildung (5.17), dass weder ein Maximum noch ein Minimum in der Welle existiert, so dass der Parameter schlecht bestimmt wird.

Die Parameter der Azimutwelle AN_A , AE_A , AES und AEC sind eindeutig und gut bestimmt. Daher gibt es keine Korrelation zwischen AN und AE sowie AES und AEC. Die Antikorrelationen zwischen AN_A und AES, sowie zwischen AE_A und AEC ist dadurch zu erklären, dass sie sich in Höhe gegenseitig beeinflussen.

5.4.5 Zusammenfassung

Die Korrekturgleichungen des Pointing Modells des HRT sind im Gegensatz zu dem des klassischen Modells nicht miteinander gekoppelt. Die beiden Korrekturgleichungen stellen Flächen dar, deren Seiten die Höhe und der Azimut sind. Wie gezeigt wurde, kann man die Höhen- und Azimutverläufe durch Wellen beschreiben. Die Höhen- und Azimutwellen sind miteinander an den Konstanten gekoppelt.

In der Azimutkorrekturgleichung bestehen die Teilamplituden der 360° Welle im Azimut

aus einer 360° Welle in Höhe, dies macht die Azimutkorrekturgleichung im ganzen komplexer als die Höhenkorrekturgleichung.

5.5 Temperaturabhängigkeit der Parameter

Anfang September 2005 wurde eine Pointingmessung durchgeführt und das berechnete Modell in der Steuerungssoftware des Teleskops eingestellt. Im Laufe des Herbstes 2005 wurde eine zunehmende Verschlechterung des Pointingverhaltes beobachtet. Es wurde daher Anfang Dezember 2005 eine neue Pointingmessung vorgenommen und ein neues Modell berechnet. Man konnte feststellen, dass sich die Pointingparameter AOFF, NPAE und BNP zwischen den Pointingmessungen sehr stark verändert haben.

ΔAOFF	$\approx -13'',0$
ΔNPAE	$\approx -38'',4$
ΔBNP	$\approx -69'',2$

5.5.1 Methode

Da diese beiden Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten bzw. bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden, könnte man annehmen, dass vielleicht eine Temperaturabhängigkeit der Parameter eine Ursache der Veränderung ist.

Um dies zu untersuchen, wurden im Laufe des Jahres 2006 mehrere Pointingmessungen durchgeführt und die Parameter auf ihre Temperaturabhängigkeit untersucht. Im Zuge dieser Untersuchung wurde auch eine automatische Pointingprozedur geschrieben und im Laufe dieser Zeit getestet und weiterentwickelt.

Für diese Auswertung wurden nur die Pointingmessungen und deren Ergebnisse, die mit Hilfe der automatischen Messprozedur durchgeführt worden sind, verwendet. Als erstes wurden, stichpunktartig die Offsets ohne Pointing Modell bei verschiedenen Positionen auf eine Temperaturabhängigkeit überprüft, in dem man sie vs. Messtemperatur aufgetragen hat. Als zweites wurden die Parameter der Pointing Modelle aus den verschiedenen Pointingmessungen auf ihre Temperaturabhängigkeit untersucht.

5.5.2 Ergebnis

Von den Positionen Azimut 40° , 160° sowie 240° und Höhe 40° und 80° , wurden die Offsets ohne Pointing Modell gegen die mittlere Messtemperatur aufgetragen. Diese sind in den Abbildungen (5.19, bis 5.22 & B.16 bis B.23) dargestellt.

Man kann sehr gut eine Änderung der Azimutoffsets mit der mittleren Temperatur sehen. Bei den Höhenoffsets ist eine Änderung mit der Temperatur bei der Höhe 40° gut zu erkennen, jedoch in der Höhe 80° ist eine Abhängigkeit von der Temperatur bei der Position $az \approx 40^\circ$ $h \approx 80^\circ$, siehe Abbildung (5.21), nicht zu erkennen, im Gegensatz zur Position $az \approx 160^\circ$ $h \approx 80^\circ$, siehe Abbildung (B.18). Die meisten Messungen wurden bei Temperaturen größer 10°C durchgeführt, was eine Auswirkung auf eine Aussage über den Verlauf bei niedrigen Temperaturen hat. Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Offsets linear abhängig von der Temperatur sind.

Die Änderung der Offsets mit der Temperatur ist auch unterschiedlich stark ausgeprägt, wie man in den Abbildungen sieht. Die Azimutwerte änderten sich von der tiefsten durch-

schnittlichen Messtemperatur von -5.2°C zur maximalen durchschnittlichen Messtemperatur von $24,2^{\circ}\text{C}$ um ca. $40''.0$, während in den Höhenoffsets die Schwankung zwischen dem minimalen und maximalen Wert nur ca. $10''.0$ beträgt. Das zeigt auch, dass die Azimutoffsets und somit auch die Azimutkorrekturgleichung wesentlich stärker von der Temperatur abhängen als die Höhenoffsets bzw. die Höhenkorrekturgleichung.

Da die Offsets ohne Pointing Modell und somit auch die Korrekturgleichungen temperaturabhängig sind, müssen einige Parameter der beiden Korrekturgleichungen auch eine entsprechende Temperaturabhängigkeit zeigen. In den Abbildungen (B.24 bis B.40) sind die Parameter gegen die Temperatur aufgetragen. Man kann für die Parameter der Höhenkorrekturgleichung, siehe Abbildung (B.31 bis B.40), sehr gut die Abhängigkeit von der Temperatur erkennen, wobei der Parameter $c5$ temperaturunabhängig ist. Als Beispiel ist in der Abbildung (5.23) die Änderung des Parameters EOFF vs. Temperatur dargestellt. Für die Parameter der Azimutkorrekturgleichung, z. B. AOFF, ist eine Temperaturabhängigkeit nicht eindeutig, wie man in den Abbildungen (B.24 bis B.30) sieht. In der Abbildung (5.24) ist als Beispiel der Verlauf der Parameterwerte von AOFF vs.

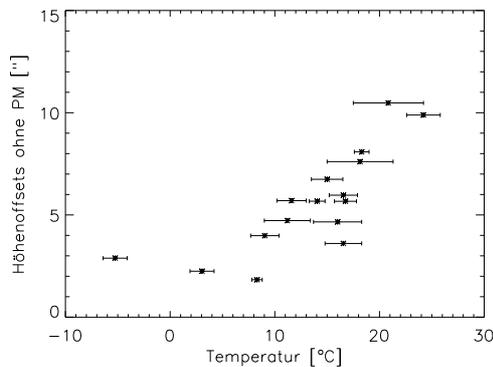


Abbildung 5.19: Temperaturverlauf der Höhenoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 40 h \approx 40

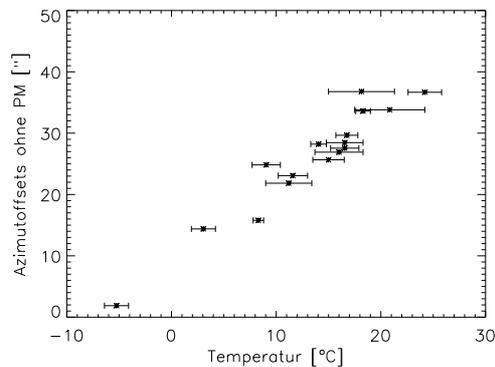


Abbildung 5.20: Temperaturverlauf der Azimutoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 40 h \approx 40

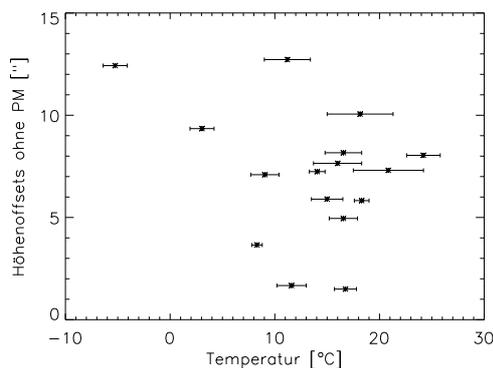


Abbildung 5.21: Temperaturverlauf der Höhenoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 40 h \approx 80

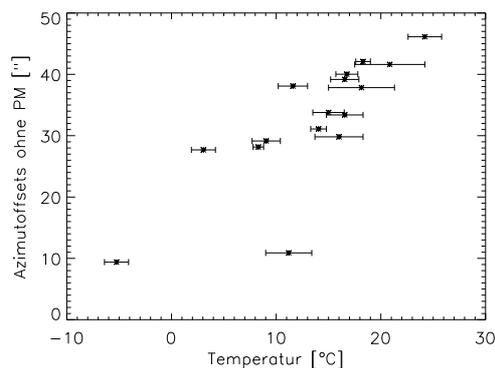


Abbildung 5.22: Temperaturverlauf der Azimutoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 40 h \approx 80

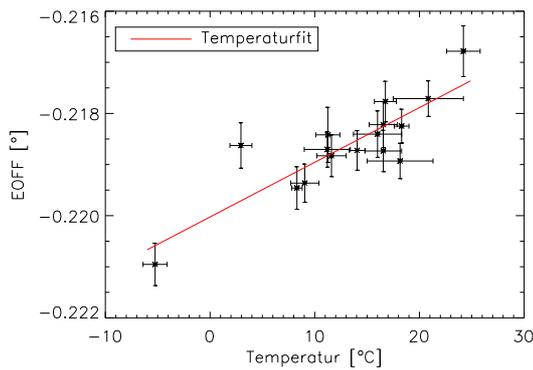


Abbildung 5.23: Temperaturverlauf des Parameters EOFF

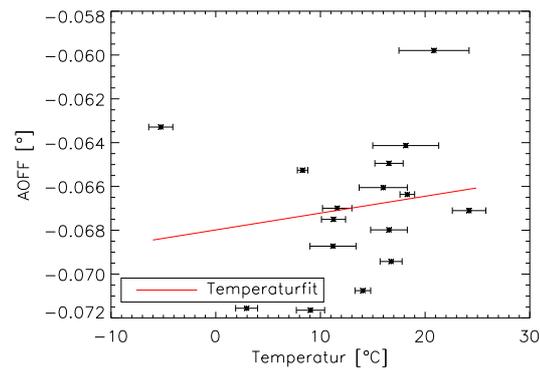


Abbildung 5.24: Temperaturverlauf des Parameters AOFF

Temperatur zu sehen. Hier ist eine starke Streuung der Parameterwerte mit der Temperatur zu erkennen. Diese tritt auch bei NPAE und BNP auf, wodurch es unmöglich ist, eine genaue Aussage über den Temperaturverlauf zu treffen. Um die Abhängigkeit der Parameter von der Temperatur zu bestimmen, habe ich eine Gerade in die Verläufe der Parameter in Abhängigkeit der Temperatur gefittet. Die Gleichungen der Parameter, die ich so bestimmt habe, sind in der Tabelle (5.5) dargestellt. Aus diesen Gleichungen geht der Temperaturverlauf der Parameter des Pointing Modells hervor. Für die Parameter AOFF, NPAE und BNP der Azimutkorrekturgleichung bestätigt sich, dass man keine eindeutige Aussage über den Temperaturverlauf machen kann, da die Fehler der Steigung, aufgrund der starken Streuung, größer sind als die Steigung selbst. Somit kann eine Konstanz in der Temperatur bei diesen Parametern nicht ausgeschlossen werden. Diese starke Streuung in den Parameterwerten mit der Temperatur, ist womöglich auf die hohe Korrelation dieser Parameter zurückzuführen, siehe Abschnitt (5.4.4). Es stellt sich jedoch die Frage, wieso in den Parametern der Höhenkorrekturgleichung, die ebenfalls den Höhenverlauf bestimmen, eindeutig eine Temperaturabhängigkeit zu finden ist, obwohl sie ebenfalls so stark miteinander korreliert sind.

Es ist zwar eine leichte Temperaturabhängigkeit von AN_A , AE_A sowie AEC festzustellen, wobei die Streuung in den Werten und somit die Fehler der Steigung recht groß sind. Bei einem 3σ Fehler ist hier ebenfalls eine Konstanz in der Temperatur nicht ausgeschlossen. Es verwundert, dass man in den Azimutoffsets ohne Pointing Modell eine recht starke Abhängigkeit von der Temperatur eindeutig sieht und diese in den Parametern nicht. Für die Parameter EOFF, EES, (EEC+TF), c_1 und c_2 der Höhenkorrekturgleichung ist der Wert der Steigung im Temperaturverlauf größer als der 3σ Fehler. Im Gegensatz zu den restlichen Parametern der Höhenkorrekturgleichung, dort ist der Wert des 3σ Fehlers größer als die Steigung. Somit ist dort eine Temperaturkonstanz möglich.

5.5.3 Schlussfolgerung

Es wurde mit Hilfe von zwei verschiedenen Untersuchungen die Abhängigkeit des Pointing Modells von der Temperatur untersucht.

Es konnte eine Abhängigkeit der Höhenoffsets ohne Pointing Modell sowie der Parameter der Höhenkorrekturgleichung von der Temperatur gezeigt werden. Somit kann man sagen,

Parameter	Temperaturgleichung der Parameter
AOFF:	$\approx (-0,068 \pm 0,002) [^\circ] + (7,7^{-5} \pm 11,6^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AN _A :	$\approx (-0,0014 \pm 0,0003) [^\circ] + (3,3^{-5} \pm 2,0^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AE _A :	$\approx (0,0034 \pm 0,0002) [^\circ] - (2,3^{-5} \pm 1,4^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
NPAE:	$\approx (-0,001 \pm 0,003) [^\circ] + (0,0001 \pm 0,0002) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
BNP:	$\approx (0,085 \pm 0,004) [^\circ] - (0,00016 \pm 0,00024) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AES:	$\approx (-0,0008 \pm 0,0005) [^\circ]$
AEC:	$\approx (5,9^{-5} \pm 48,6^{-5}) [^\circ] - (3,7e^{-5} \pm 3,3e^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
EOFF:	$\approx (-0,22 \pm 0,0002) [^\circ] + (0,00011 \pm 0,00002) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AN _E :	$\approx (-0,0010 \pm 0,0002) [^\circ] + (3,3e^{-5} \pm 1,3e^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AE _E :	$\approx (0,0039 \pm 0,0001) [^\circ] - (1,6e^{-5} \pm 0,7e^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
EES:	$\approx (-0,0089 \pm 0,0002) [^\circ] - (0,0001 \pm 0,00002) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
(EEC+TF):	$\approx (0,0258 \pm 0,0003) [^\circ] + (9,9e^{-5} \pm 2,2e^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
c5:	$\approx (6,7e^{-5} \pm 0,3^{-5}) [^\circ]$
c1:	$\approx (0,0029 \pm 0,0001) [^\circ] - (1,8^{-5} \pm 0,5^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
c2:	$\approx (-0,00059 \pm 0,00005) [^\circ] - (1,3^{-5} \pm 0,3^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
c3:	$\approx (-0,00010 \pm 0,00004) [^\circ] - (0,7^{-5} \pm 0,3^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
c4:	$\approx (-0,00022 \pm 0,00002) [^\circ] - (0,3^{-5} \pm 0,1^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$

Tabelle 5.5: Gleichungen zum Temperaturverlauf der Parameter

dass die Höhenkorrekturgleichung nicht nur von Azimut und Höhe abhängt, sondern auch von der Temperatur. Man könnte hierdurch auch die Gleichungen des Temperaturverlaufes, siehe Tabelle (5.5), an Stelle der Parameter in die Korrekturgleichung einsetzen und damit die Temperaturabhängigkeit berücksichtigen.

Für die Azimutoffsets ohne Pointing Modell konnte bei den untersuchten Positionen, eine in etwa gleich starke Temperaturabhängigkeit festgestellt werden. Diese starke Abhängigkeit von der Temperatur ist jedoch in den Parametern nicht zu finden, was einen Widerspruch darstellt. Eine Temperaturabhängigkeit der Azimutkorrekturgleichung konnte somit nicht gezeigt werden, was jedoch eine Abhängigkeit von der Temperatur nicht ausschließt.

Während dieser Untersuchung wurde die Automatik der Pointingmessung getestet. Hierdurch kam es zu unterschiedlichen Messmethoden, z. B. wurde bei einigen Messungen die Temperatur aktualisiert und bei anderen nicht. Die zum Teil starke Streuung in den Parameterwerten könnte man hierdurch erklären. Auch ist die Positionsliste nicht identisch. Hierbei variiert deutlich die Anzahl der Messpunkte an der Himmelshalbkugel. Zum Anfang betrug die Liste ca. 117 Positionen. Durch die Optimierung der Positionsliste wurde sie auf ca. 170 Positionen erweitert.

5.6 Alternative Berechnung der Azimutkorrektur

5.6.1 Neue Berechnungsgleichung der Parameter

Aufgrund der Analyse des Pointing Modells, insbesondere der Azimutkorrektur, möchte ich eine Änderung der Berechnung der Parameter der Azimutkorrekturgleichung vorschla-

gen.

Zur Zeit wird dies noch auf Basis der Gleichung (2.25) durchgeführt. Mit dieser Gleichung werden die Korrekturwerte direkt am Encoder, also bei Höhe Null bestimmt. Mein Vorschlag lautet, die Berechnung der Parameter auf Basis der Gleichung (2.24) durchzuführen. Der Unterschied zu der jetzigen Berechnung ist, dass die Offsets am ganzen Himmel verteilt sind und den wahren Korrekturwert darstellen. Aufgrund der Steuerung des Teleskops wird jedoch der Azimutoffset am Encoder benötigt. Deshalb muss der jeweilige Korrekturwert noch durch $\cos(h)$ dividiert werden. In der Steuerungssoftware kann deshalb weiterhin die Gleichung (2.25) benutzt werden.

Man könnte argumentieren, da man die Korrekturwerte am Encoder benötigt, könnte man die Gleichung (2.25) als Basis zur Bestimmung der Parameter benutzen. Jedoch werden bei dieser Gleichung (2.25) die Einflüsse der Parameter auf den Korrekturwert in Höhe falsch beschrieben. Dies kann man mit einem Vergleich der Grenzwerte der beiden Gleichungen (2.25 und 2.24) leicht zeigen.

In Höhe 0° sind beide Gleichungen natürlich identisch. Aber mit zunehmender Höhe werden die Einflüsse der einzelnen Parameter auf den Korrekturwert unterschiedlich beschrieben und bei Höhe 90° sind die Unterschiede am deutlichsten. Nach der Gleichung (2.25) gehen die Parameterterme von AN_A , AE_A und $NPAE$ ins Unendliche, da:

$$\lim_{h \rightarrow 90^\circ} = \tan(90^\circ) = \infty.$$

Der Parameter BNP wird ebenfalls unendlich, da:

$$\lim_{h \rightarrow 90^\circ} = \frac{-1}{\cos(90^\circ)} = -\infty.$$

Die Encoderparameter AES und AEC bleiben mit der Höhe konstant.

Bei der Gleichung (2.24) ist der Parameter BNP konstant und die Encoderparameter AES und AEC verschwinden, da:

$$\lim_{h \rightarrow 90^\circ} = \cos(90^\circ) = 0.$$

Die Grenzwerte der Parameterterme von AN_A , AE_A und $NPAE$ sind:

$$\lim_{h \rightarrow 90^\circ} = \sin(90^\circ) = 1.$$

Bei der Gleichung (2.25) werden die Encoderparameter und deren Fehler mit der Höhe als konstant angenommen, was sie eigentlich nicht sind. Der Einfluss dieser Parameter muss jedoch mit der Höhe kleiner werden. Auch sind die Einflüsse von AN_A , AE_A und $NPAE$ mit der Höhe in der Gleichung (2.25) zu stark berücksichtigt. Der Parameter BNP ist höhenunabhängig, was er aber mit der (2.25) nicht ist. Plottet man den Verlauf der Azimutoffsets gegen die Höhe, so kann man ein $-\frac{1}{\cos(h)}$ Verlauf erkennen, siehe Abbildung (B.41). Man kann somit sagen, dass dieser Term den Höhenverlauf bestimmt, was jedoch nicht der Fall ist, wie in Abschnitt (5.4.4.1) schon gezeigt wurde. Die Gleichung (2.25) ist bei Höhe 90° zudem divergent, im Gegensatz zur Gleichung (2.24).

5.6.2 Modellrechnungen

In einer Modellrechnung zur Bestimmung der Parameter auf Basis der Gleichung (2.24) brauchte die Minimierung nur einmal durchgeführt zu werden, im Gegensatz zur jetzigen Berechnung bei der zwei Minimierungen durchgeführt werden. Die Parameter lauten:

AOFF:	$\approx (-0,0658 \pm 0,0002) [^\circ]$
AN _A :	$\approx (-0,001 \pm 0,00005) [^\circ]$
AE _A :	$\approx (0,00359 \pm 0,00005) [^\circ]$
NP _{AE} :	$\approx (0,0021 \pm 0,0003) [^\circ]$
BNP:	$\approx (0,0843 \pm 0,0003) [^\circ]$
AES:	$\approx (-0,0006 \pm 0,00006) [^\circ]$
AEC:	$\approx (-3,5e^{-5} \pm 6,9e^{-5}) [^\circ]$

Der χ^2 -Wert und die Standardabweichung der Residuen die man erhält lauten wie folgt:

χ^2 der Minimierung der Azimutkorrekturgleichung:	≈ 1629
Standardabweichung der Azimutresiduen:	$\approx 2'',81$

Die Residuen sind in den Abbildungen (B.42 & B.43) dargestellt. Die Fehler von AEC sind deutlich größer als der Parameterwert. Wie in Abschnitt (5.2) wurden Modellrechnungen durchgeführt, um zu prüfen ob dieser Parameter mit Null konsistent ist. Die χ^2 -Werte und die Standardabweichung der Residuen lauten:

χ^2 der Minimierung der Azimutkorrekturgleichung:	mit AEC	ohne AEC
Standardabweichung der Azimutresiduen:	$\approx 1628,58$	$\approx 1628,84$
	$\approx 2'',81$	$\approx 2'',81$

In den Abbildungen (B.44 & B.45) sind die Residuen dargestellt. Beim Vergleich der Werte der Standardabweichung der Azimutresiduen ist keine Veränderung des Betrages festzustellen, jedoch ist eine sehr kleine Verschlechterung im χ^2 -Wert festzustellen. Dies zeigt, dass AEC zwar sehr kleinen Einfluss auf die Azimutkorrektur hat, aber nicht weggelassen werden darf.

Im Azimutverlauf der Residuen, siehe Abbildung (B.42), ist deutlich eine Wellenstruktur zu sehen. Berücksichtigt man nun die in Abschnitt (5.3) gefundene 180° und die 120° Welle in der Azimutkorrekturgleichung, erhält man die folgende Standardabweichung der Azimutresiduen:

Standardabweichung der Azimutresiduen:	$\approx 1'',9$
--	-----------------

Die Residuen dieser Modellrechnung sind in den Abbildungen (B.46 & B.46) dargestellt.

5.6.3 Vergleich der Ergebnisse der beiden Gleichungen

In diesem Abschnitt sollen nun die Parameter, die man mit den Basisgleichungen (2.25 & 2.24), erhält und somit das theoretische Pointingverhalten verglichen werden.

5.6.3.1 Vergleich der Residuen

Die Residuen, die sich aus den Parametern ergeben, die man mit Hilfe der beiden Gleichungen (2.24 & 2.25) erhält, weisen deutliche Unterschiede auf. Vergleicht man nun den Höhenverlauf der Residuen, siehe Abbildungen (B.43 & 5.26), kann man sehen, dass bei den Residuen der jetzigen Basisgleichung (2.25) die Streuung mit der Höhe abnimmt. In den Residuen der Basisgleichung (2.24) ist die Streuung über den gesamten Verlauf in etwa gleich stark.

Auch die Residuen im Azimutverlauf sind klar unterschiedlich. Vergleicht man sie, ist

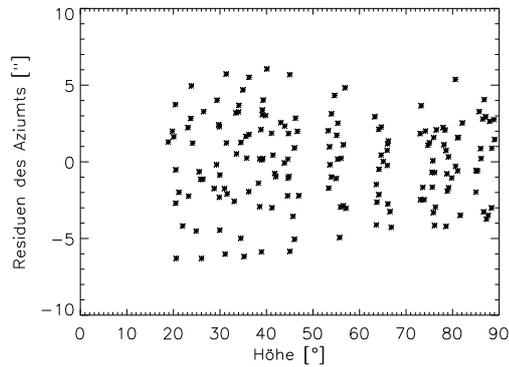


Abbildung 5.25: Azimutresiduen vs. Höhe mit der Basisgleichung (2.24)

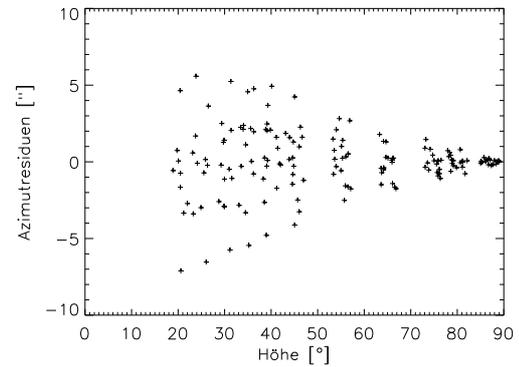


Abbildung 5.26: Azimutresiduen vs. Höhe mit der Basisgleichung (2.25)

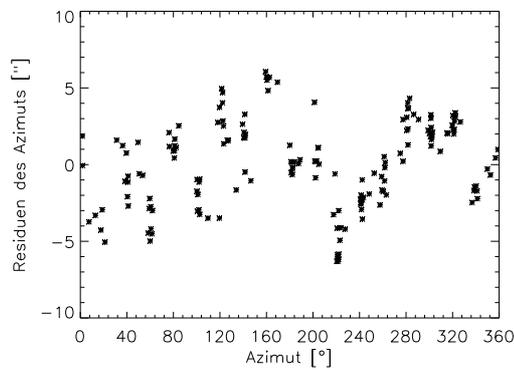


Abbildung 5.27: Azimutresiduen vs. Azimut mit der Basisgleichung (2.24)

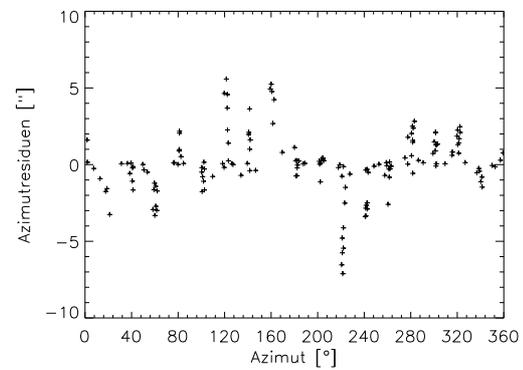


Abbildung 5.28: Azimutresiduen vs. Azimut mit der Basisgleichung (2.25)

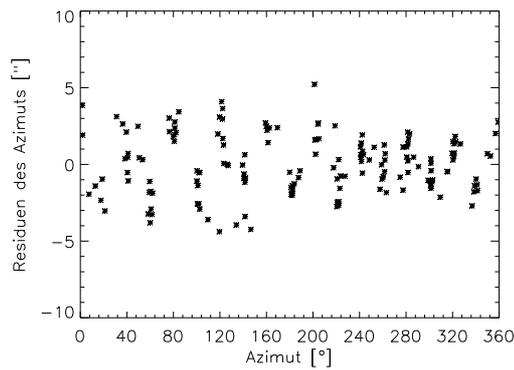


Abbildung 5.29: Azimutresiduen vs. Azimut mit der Basisgleichung (2.24) mit 180° und 120° Welle

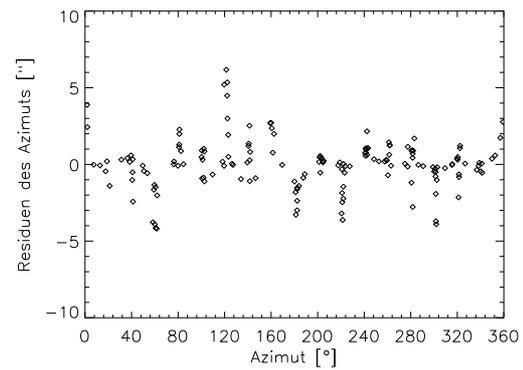


Abbildung 5.30: Azimutresiduen vs. Azimut mit der Basisgleichung (2.25) mit 180° und 120° Welle

zu erkennen, dass die Streuung in der Abbildung (B.42) größer ist als in der Abbildung (5.28), jedoch ist in der Abbildung (B.42) die 180° und 120° Welle im Azimut klarer zu erkennen. Man sieht auch, dass die Maxima und Minima der Welle übereinstimmen, doch würde man sie in der Abbildung (5.28) als Anomalien ansehen. Wenn die beiden Wellen mit berücksichtigt werden, siehe Abbildung (5.29 & 5.30), ist die Wellenstruktur in der Abbildung (5.29) verschwunden. In der Abbildung (5.30) sind noch Anomalien zu sehen, die nicht zu erklären sind.

5.6.3.2 Vergleich des theoretischen Pointingverhaltens

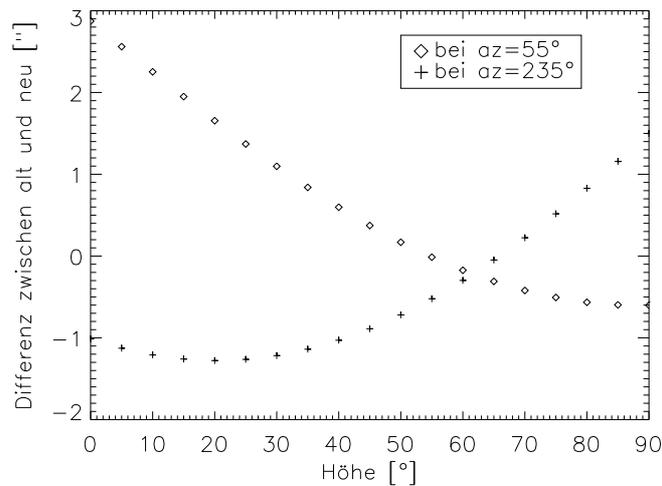


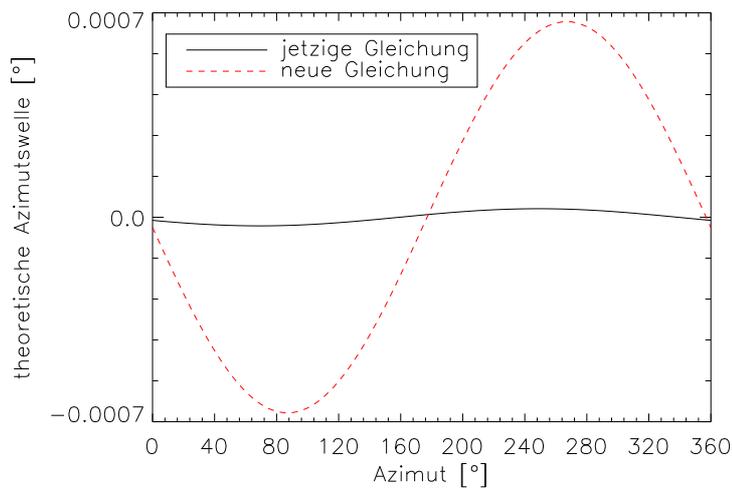
Abbildung 5.31: Differenz zwischen den Korrekturwerten

Im folgenden soll das theoretische Pointingverhalten verglichen werden, dass sich aus den beiden Parametersätzen ergibt. Hierbei wurden die theoretischen Korrekturwerte für die gesamte Himmelshalbkugel, im Azimut alle 5° von 0° bis 355° und in Höhe alle 5° von 0° bis 90° , mit den beiden Parametersätzen berechnet.

In der Abbildung (B.48) sind die Korrekturwerte vs. Azimut dargestellt. Aus der Abbildung kann man schliessen, dass das Pointingverhalten sich kaum ändern würde, da der Unterschied zwischen den Werten nicht allzu groß ist. Um dies zu verdeutlichen ist in der Abbildung (5.31) bei zwei Azimutpositionen $az=55^\circ$ und $az=235^\circ$ die Differenz zwischen den Korrekturwerten aufgetragen. Die maximale Differenz bei diesen beiden Positionen ist bei $az=55^\circ$ und $h=0^\circ$ zu finden, dort beträgt der Unterschied bei den Korrekturwerten ca. $2''{,}9$.

5.6.3.3 Vergleich der Parameter AES und AEC

Der größte Unterschied im Pointingverhalten ist in Horizontnähe zu finden, in der Abbildung (B.48) ist dies jedoch nicht klar zu erkennen. In diesem Höhenbereich wird der Azimutverlauf durch die Parameter AES und AEC bestimmt, siehe Abschnitt (5.4.3.1). In Höhe 0° wird der Azimutkorrekturwert durch die Konstante und den Parameter AES

Abbildung 5.32: Azimutwellen in der Höhe 0°

und AEC bestimmt. Die Amplitude der Azimutswelle setzt sich aus den Parametern AES und AEC zusammen. Vergleicht man nun die Azimutswelle ohne Konstante kann man sofort den Unterschied erkennen, siehe Abbildung (5.32). Die mit der Basisgleichung (2.25) bestimmte Amplitude ist wesentlich kleiner, als die, die mit der Basisgleichung (2.24) bestimmt wurde. Es ist außerdem eine Phasenverschiebung von ca. 20° zwischen den Wellen zu erkennen. Dies beweist, dass die Parameter AES und AEC bei der Berechnung der Parameter mit der Basisgleichung (2.25) nicht korrekt berücksichtigt werden. Sie wurden hier als zu klein bestimmt.

5.6.4 Temperaturabhängigkeit der Parameter

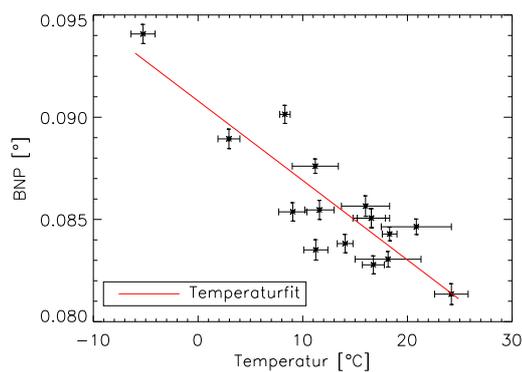


Abbildung 5.33: Temperaturverlauf von BNP, berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

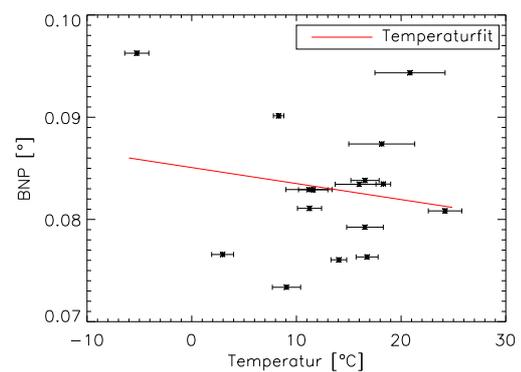


Abbildung 5.34: Temperaturverlauf von BNP, berechnet mit der Basisgleichung (2.25)

Um die Parameter, die mit der Azimutkorrekturgleichung (2.24) berechnet wurden, auf ihre Temperaturabhängigkeit zu untersuchen, wurden wie in Abschnitt (5.5) die Parameter vs. Temperatur aufgetragen. Man kann hier, in den Abbildungen (B.49 bis B.55) ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit erkennen, wobei sie hier zum Teil klarer zu sehen ist. Vergleicht man die Abbildungen (5.33 & 5.34) miteinander, ist in Abbildung (5.33) deutlicher die Abhängigkeit von der Temperatur zu erkennen als in Abbildung (5.34). Um die Temperaturabhängigkeit der Parameter zu bestimmen, habe ich, wie in Abschnitt (5.5), eine Gerade in die Verläufe der Parameter in Abhängigkeit der Temperatur gefittet. Die so ermittelten Gleichungen lauten, siehe Tabelle (5.6):

Parameter	Temperaturgleichung der Parameter
AOFF:	$\approx (-0,0652 \pm 0,0003) [^\circ] - (4,1^{-5} \pm 2,2^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AN _A :	$\approx (-0,0016 \pm 0,0002) [^\circ] + (3,9^{-5} \pm 1,2^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AE _A :	$\approx (0,0034 \pm 0,0001) [^\circ] - (1,1^{-5} \pm 0,8^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
NPAE:	$\approx (-0,0040 \pm 0,0006) [^\circ] - (0,0001 \pm 0,00004) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
BNP:	$\approx (0,0908 \pm 0,0008) [^\circ] - (0,00039 \pm 0,00006) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AES:	$\approx (-0,00008 \pm 0,0002) [^\circ] - (2,5e^{-5} \pm 1,3e^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$
AEC:	$\approx (0,0004 \pm 0,0002) [^\circ] - (1,9e^{-5} \pm 1,1e^{-5}) \frac{[^\circ]}{[^\circ\text{C}]} \cdot t [^\circ\text{C}]$

Tabelle 5.6: Gleichungen zum Temperaturverlauf der Parameter

Betrachtet man die Fehler der Steigungen der Geraden, so ist für die Parameter BNP trotz eines 3σ Fehlers, der Fehler kleiner als die Steigung. Man kann hier davon ausgehen, dass der Parameter BNP temperaturabhängig ist. Für die anderen Parameter ist bei einem 3σ Fehler der Fehler größer als die Steigung, was wiederum eine Temperaturkonstanz nicht ausschließen läßt. Berücksichtigt man dieses Ergebnis und das Ergebnis aus dem Abschnitt (5.5), wo eine Temperaturabhängigkeit der Offsets ohne Pointing Modell gefunden wurde, ist somit der Widerspruch für die Azimutkorrekturgleichung aufgehoben. Die Streuung in den Parametern AOFF und NPAE, kann zum Teil durch die Korrelation erklärt werden.

5.6.5 Zusammenfassung

In der jetzigen Berechnung der Parameter mit der Basisgleichung (2.25) werden die Einflüsse der Encoderparameter AES und AEC nicht korrekt berücksichtigt, da ihr Einfluss in der Höhe als konstant angenommen wird. Dies hat wiederum einen Einfluss auf die Bestimmung der restlichen Parameter. Zudem ist die Gleichung (2.25) bei Höhe 90° divergent. In Wirklichkeit ist die Azimutkorrektur nirgends divergent.

Es konnte auch eine Temperaturabhängigkeit des Parameters BNP gezeigt werden. Bei den restlichen Parameter ist jedoch bei einem 3σ Fehler eine Konstanz in der Temperatur nicht ausgeschlossen.

Daher schlage ich vor, dass die Berechnung der Parameter nach der Basisgleichung (2.24) erfolgen soll. Die Gleichung (2.25) zur Berechnung der Offsets am Encoder braucht vorläufig in der Steuerungssoftware noch nicht geändert werden. Zudem möchte ich die Erweiterung der Azimutkorrekturgleichung (2.24) um die 180° und 120° Welle vorschlagen, um eine weitere Verbesserung des Pointingverhaltens zu erreichen.

5.7 Kapitelzusammenfassung

5.7.1 Zusammenfassung zum Pointing Modell

Zum Abschluss dieses Kapitels möchte ich die Ergebnisse noch einmal kurz zusammenfassen. Das Pointing Modell des HRT besteht aus zwei Korrekturgleichungen, die nicht miteinander gekoppelt sind. Die beiden Korrekturgleichungen bestehen wiederum aus zwei Wellen in Richtung Azimut und Höhe. Diese beiden Wellen sind jedoch miteinander gekoppelt. Weiterhin wurden eine 90° Welle in Richtung Azimut in den Residuen der Höhenkorrekturgleichung sowie eine 180° und 120° Azimutwelle in den Residuen der Azimutgleichung festgestellt. Diese Wellen werden noch nicht in den Korrekturgleichungen berücksichtigt, was jedoch geändert werden sollte. Außerdem konnte eine Temperaturabhängigkeit des Pointing Modells festgestellt werden. Hierdurch wird das Pointing Modell, was bis jetzt nur von Höhe und Azimut abhängig war, auch noch von der Umgebungstemperatur abhängig. Zum Thema der Temperaturabhängigkeit der Parameter möchte ich an dieser Stelle technische Erklärungsversuche von A. Hempelmann zitieren:

”Technisch gesehen ist am ehesten die BNP Änderung mit der M3 Spiegelhalterung zu erklären. Durch Temperaturexpansion der Spiegelhalterung sollte es zu einer Änderung des Kippwinkels (von 45°) kommen, was zu einer Verkippung der optischen Achse führt. Lösungsvorschlag für zukünftige Teleskope: Halterung aus Invar fertigen. Die M2 und M1 Halterungen sind dagegen achsensymmetrisch aufgebaut, was bei der Ausdehnung zu keiner Verkippungen führen sollte, es sei denn es gibt geringe Materialunterschiede z. B. der Tubusstangen gegeneinander.

NPAE: wäre vielleicht durch Unterschiede in der Ausdehnung der beiden Gabelholme zu erklären. Die Gabeln sind große Metallmassen großer geometrischer Ausdehnung, wie das zu ändern wäre, sehe ich nicht.

EOFF: vielleicht die Halterung des Lesekopfs am Encoder.”

Was bis jetzt noch nicht erwähnt wurde, ist die Tatsache, dass für die Bestimmung der Offsets noch relevant ist, von wo aus ein Objekt angefahren wird, ob aus Richtung Zenit oder Horizont. Man kann einen Unterschied in den Offsets feststellen, wenn man ein Objekt vom Zenit oder vom Horizont aus anfährt, dazu ist hier ein Beispiel dargestellt:

Richtung	Zenit	Horizont
Azimut:	0.6679758 [°]	0.6749808 [°]
Höhe:	53.9104658 [°]	53.9064823 [°]
Azimutoffset:	-0.0058245 [°]	-0.0057385 [°]
Höhenoffset:	0.0019549 [°]	0.0021452 [°]

In den Koordinaten ist ein kleiner Unterschied festzustellen, jedoch ist dieser nicht von Bedeutung. Dieser Unterschied kommt durch die kleine Zeitdifferenz zustande, die durch das Anfahren des Teleskops entsteht.

Die Objektliste bzw. die Positionsliste ist ebenfalls für die Bestimmung der Parameter und somit auch für das Pointing Modell wichtig. Diese Liste sollte die gesamte Himmelskugel abdecken, das heißt auch, dass es in etwa gleich viele horizontnahe Messpunkte gibt. In diesem Bereich haben die Parameter AES und AEC der Azimutkorrekturgleichung einen grösseren Einfluss auf die Korrektur, als die Parameter AN_A und AE_A .

5.7.2 Vorschläge zur Optimierung des Pointing Modells

Zum Abschluss kann man sagen, dass das Pointing Modell noch optimiert werden kann, zum einen durch die Erweiterung der drei Wellen in den entsprechenden Korrekturgleichungen, durch Umstellung der Basisgleichung zur Berechnung der Parameter von der Gleichung (2.25) auf die Gleichung (2.24), sowie durch die ständige Optimierung der Positionsliste und der Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit. Um jedoch die Temperaturabhängigkeit des Pointing Modells zu berücksichtigen, sollte man die Abhängigkeit der Parameter von der Temperatur nochmals bestimmen. Zum einen wurden in der neuen Steuerungssoftware "PILAR 3" die Korrekturgleichungen von Höhe auf Zenitdistanz umgestellt. Desweiteren ist, meiner Meinung nach, die Verwendung der hier gefundenen Abhängigkeiten nicht optimal, da verschiedene Messprozeduren und Positionslisten verwandt worden sind. Ein weiterer Punkt ist, dass hier nur ein Datenpunkt unter Null Grad Celsius liegt, was eine Auswirkung auf die Glaubwürdigkeit hat. Desweiteren sollten nur Messungen verwandt werden, in denen die Messtemperatur nicht stark variiert, da die Temperaturabhängigkeit auch eine Auswirkung auf die Pointingmessung hat. Die Messtemperatur sollte nicht, wie in dieser Untersuchung, von der Wetterstation Bergedorf genommen werden, sondern von der zukünftigen Wetterstation des Teleskops, um die genaue Umgebungstemperatur zu erhalten.

Bis zur Erstellung dieses temperaturabhängigen Pointing Modells kann man Pointing Modelle für die verschiedenen Jahreszeiten verwenden und somit die Temperaturabhängigkeit berücksichtigen. Die Messung eines Pointing Modelles würde mit der Automatik und einer Positionsliste von etwa 180 Positionen nur etwa 4 Stunden dauern.

Kapitel 6

Auswertung der Trackingtests

6.1 Methode

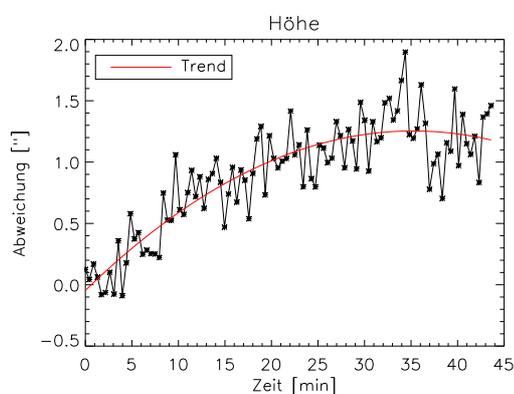


Abbildung 6.1: Rauswandern des Sternscheibchens aus dem Bildzentrum

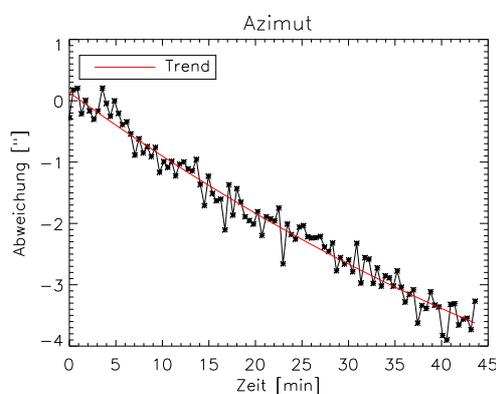


Abbildung 6.2: Rauswandern des Sternscheibchens aus dem Bildzentrum

Die Trackingtests wurden ohne Autoguider durchgeführt, um die Trackingverlustrate $v'(t)$, das Wegwandern des Sternscheibchens von der ursprünglichen Position, bei verschiedenen Positionen zu bestimmen und mit den Werten der früheren Tests, die durch A. Hempelmann ermittelt wurden, zu vergleichen.

Um die Trackingverlustrate zu bestimmen, wurde aus den 100 Aufnahmen der Messung die Abweichung vom Zentrum mit Hilfe der IRAF-Prozedur "ANALTRACK", geschrieben von J. Gonzalez Perez, bestimmt. Aus diesen wurde der Trend der Nachführung mit Hilfe der IDL-Routine "POLYFIT" ermittelt. In den Abbildungen (6.1 & 6.2) ist ein Beispiel für das Trackingverhalten des Teleskops bei Azimut 210° und Höhe 50° dargestellt. Die Szintillation in den Abweichungen wird in den nächsten Kapiteln (7 & 8) genauer untersucht.

Man erwartet eigentlich, dass der Trend der Nachführung eine gleichförmige Bewegung ist, also einer Bewegung ohne Beschleunigung entspricht. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Trends entsprachen meistens einem Polynom zweiten Grades, was bedeutet, dass es ein nicht bekanntes Beschleunigungselement in der Nachführung gibt. Die Berechnung des Trends erfolgte nun durch einen quadratischen Polynomfit, der die allgemeine Bewegungs-

gleichung darstellt.

Die mittlere Verlustrate ist die mittlere Geschwindigkeit, mit der das Sternscheibchen herauswandert. Sie wurde mit Hilfe der Parameter des Polynomfits bestimmt, indem die Geschwindigkeit für jeden Messpunkt bestimmt wurde und der Mittelwert aus diesen gebildet wurde.

6.2 Ergebnis

Für diese Auswertung wurden insgesamt 24 Trackingmessungen benutzt, wobei 22 bei verschiedenen Positionen vorgenommen wurden. Bei zwei Positionen wurde die Messung wiederholt, um sie mit der ersten zu vergleichen.

Die mittlere geometrische Summe $\bar{v}'(t)$ der Trackingverlustraten, wobei:

$$v'(t) = \sqrt{v'_{az}(t)^2 + v'_h(t)^2}$$

ist, beträgt:

Mittlere geometrische Summe: $\bar{v}'(t)$	$\approx (0,058 \pm 0,007) \frac{[^\circ]}{\text{min}}$
--	---

In den Abbildungen (6.3 & 6.4) sind die geometrischen Summen der Trackingverlustraten in Höhe und Azimut, vs. Höhe und Azimut dargestellt. Diese Werte liegen deutlich unter der angestrebten Marke von $0,2 \frac{[^\circ]}{\text{min}}$ Verlustrate, ohne eingeschalteten Autoguiders. Die mittleren Trackingverlustraten in Höhe und Azimut betragen:

	Gesamtverlustrate
Höhe: $\bar{v}'_h(t)$	$\approx (0,033 \pm 0,006) \frac{[^\circ]}{\text{min}}$
Azimut: $\bar{v}'_{az}(t)$	$\approx (0,040 \pm 0,007) \frac{[^\circ]}{\text{min}}$

Im folgenden Verlauf dieser Auswertung soll das Trackingverhalten genauer untersucht werden.

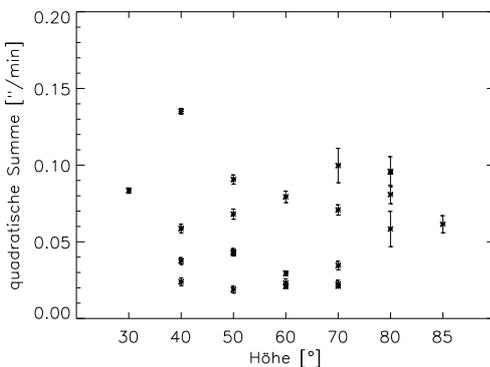


Abbildung 6.3: Die quadratische Summe der Verlustraten vs. Höhe

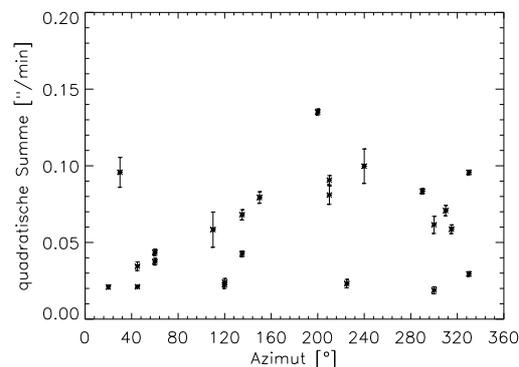


Abbildung 6.4: Die quadratische Summe der Verlustraten vs. Azimut

6.2.1 Vergleich von Trackingmessungen

6.2.1.1 Vergleich bei unterschiedlichen Pointing Modellen

Bei den Positionen Azimut 45° und Höhe 70° sowie bei Azimut 135° und Höhe 50° wurde eine Trackingmessung auch mit einem anderen Pointing Modell durchgeführt. Dieses Modell (September 2005) stammt aus dem letzten Jahr und wurde wegen der Temperaturabhängigkeit des Pointing Modells benutzt. Um dieses Modell zu benutzen, musste es noch von Höhen- auf Zenitdistanz umgestellt werden. Das Pointing Modell, was für die eigentlichen Trackingtests benutzt wurde, wurde am 19.07.2006 gemessen. Da das Pointing Modell temperaturabhängig ist, siehe Abschnitt (5.5), wurden die drei Messreihen bei einer Temperatur durchgeführt, die in etwa bei der mittleren Temperatur des jeweiligen Pointing Modells lag. Hierdurch wurde der Einfluss der Temperatur auf das Trackingverhalten minimiert. Die mittleren Temperaturen der Pointing Modelle betragen:

$$\begin{aligned} \text{Modell September 2005: } & (17,0 \pm 3,0) \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \text{Modell 19.07.2006 : } & (22,75 \pm 0,75) \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

Die Messungen erfolgten bei einer mittleren Temperatur von:
Bei Azimut 45° und Höhe 70°

$$\begin{aligned} \text{Messung vom 13.07.2006: } & (18,9 \pm 0,6) \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \text{Messung vom 21.07.2006: } & (20,7 \pm 0,2) \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \text{Messung vom 25.07.2006: } & (22,8 \pm 0,4) \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

Bei Azimut 135° und Höhe 50°

$$\begin{aligned} \text{Messung vom 14.07.2006: } & (17,9 \pm 0,3) \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \text{Messung vom 22.07.2006: } & (19,2 \pm 0,4) \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \text{Messung vom 25.07.2006: } & (21,65 \pm 0,45) \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

6.2.1.1.1 Bei Azimut 45° und Höhe 70°

Die Trackingverlustraten bei dieser Position betragen:

	Verlustrate mit dem alten Pointing Modell vom 13.07.2006	mittlere Verlustrate mit neuem Pointing Modell
Höhe: $v'_h(t)$	$\approx (0,028 \pm 0,001) \frac{''}{\text{min}}$	$\approx (0,017 \pm 0,012) \frac{''}{\text{min}}$
Azimut: $v'_{az}(t)$	$\approx (0,1147 \pm 0,0008) \frac{''}{\text{min}}$	$\approx (0,019 \pm 0,002) \frac{''}{\text{min}}$

In den Abbildungen (6.5 bis 6.10) sind die Abweichungen mit den Trends des Trackingverhaltens vs. Zeit dargestellt.

Die Messung vom 13.07.2006 wurde mit dem alten Pointing Modell und die beiden anderen mit dem neuen Pointing Modell vom 19.07.2006, gemessen. Eine Veränderung bzw. eine Verbesserung in den Trackingverlustraten in Höhe ist hier nicht eindeutig, da bei der Messung vom 25.07.2006 die Verlustrate in etwa gleich der vom 13.07.2006 ist. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich jedoch die Verlustraten vom 13.07.2006 und vom 21.07.2006 doch erheblich. Im Trackingverhalten der Höhe ist das Vorzeichen der Steigung der Trends

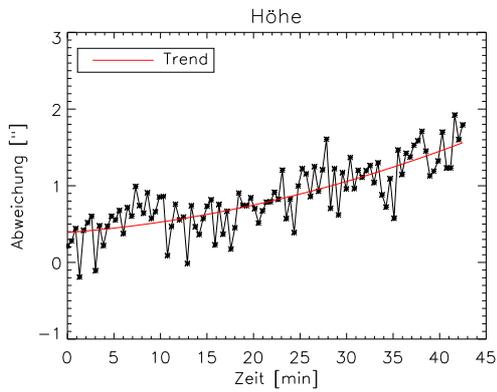


Abbildung 6.5: Höhenverlauf der Messung vom 13.07.2006

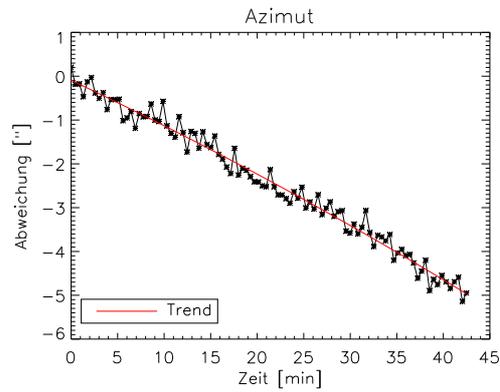


Abbildung 6.6: Azimutverlauf der Messung vom 13.07.2006

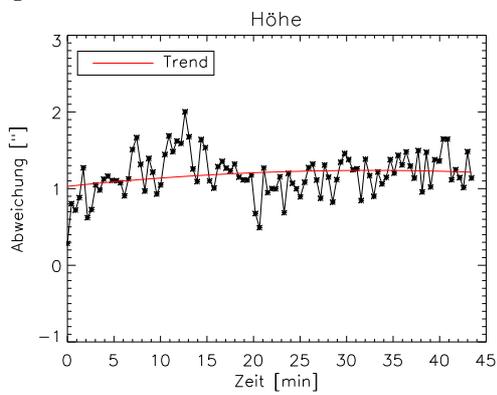


Abbildung 6.7: Höhenverlauf der Messung vom 21.07.2006

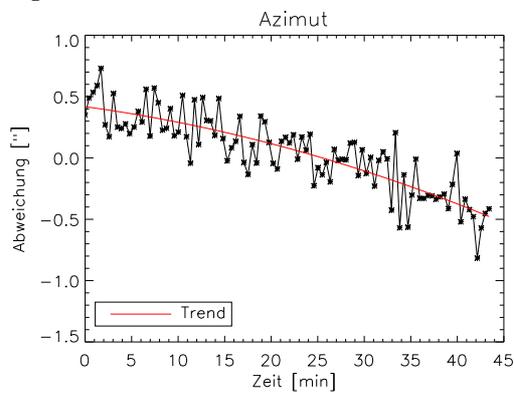


Abbildung 6.8: Azimutverlauf der Messung vom 21.07.2006

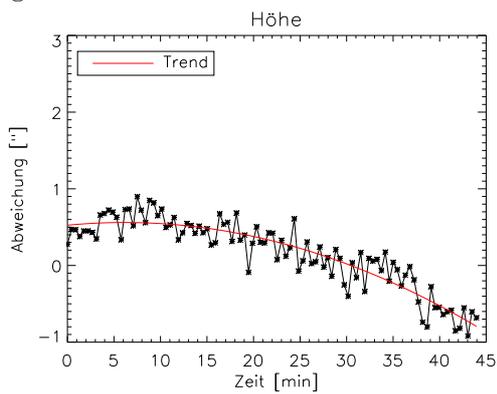


Abbildung 6.9: Höhenverlauf der Messung vom 25.07.2006

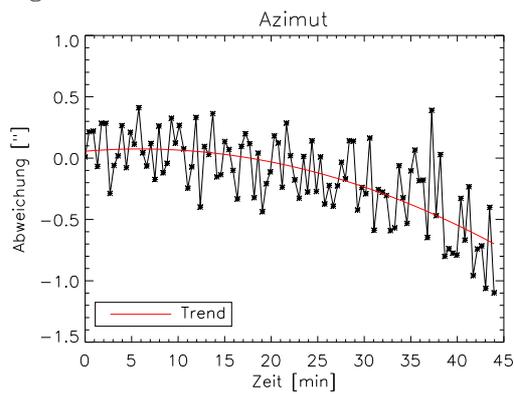


Abbildung 6.10: Azimutverlauf der Messung vom 25.07.2006

für den 13.07.2006 und 21.07.2006, siehe Abbildungen (6.6 & 6.8), positiv und für den 25.07.2006, siehe Abbildung (6.10), negativ.

Vergleicht man jedoch einzelne Abschnitte der Messungen miteinander, kann man auch Gemeinsamkeiten in den Verläufen feststellen. Wie z. B., dass das Vorzeichen der Steigung in den Abweichungen bei allen drei Messungen positiv beginnt. Dies gilt bis ca. 8 min Messzeit, danach wurde die Steigung negativ, mit Ausnahme der Messung vom 21.07.2006 wo dies erst nach ca. 12 min geschah. Nach ca. 18 min Messzeit wurde die Steigung des Verlaufs der Abweichungen nahezu konstant. Zwischen den Messungen vom 13.07.2006 und vom 25.05.2006 ändert sich erst nach ca. 14 min Messzeit das Trackingverhalten deutlich. Bis zu diesem Zeitpunkt war jedoch das Trackingverhalten ähnlich. Die Trackingverlustrate ist ab diesem Zeitpunkt bis Ende der Messung bei der Messung vom 25.06.2006, etwas größer als die vom 13.07.2006. Dies hat zur Folge, dass die gesamte Trackingverlustrate vom 25.07.2006 etwas größer ist als vom 13.07.2006.

Das Trackingverhalten bzw. die Trackingverlustrate im Azimut mit dem neuen Pointing Modell hat sich gegenüber dem mit dem alten Pointing Modell erheblich verbessert, wie man aus den Abbildung (6.6, 6.8 & 6.10) sofort sehen kann. Die Vorzeichen der Steigungen der Trends sind in den drei Azimutverläufen, die das Trackingverhalten im Azimut darstellen, gleich.

6.2.1.1.2 Bei Azimut 135° und Höhe 50°

Bei dieser Position betragen die Trackingverlustraten:

	Verlustrate mit dem alten Pointing Modell vom 14.07.2006	mittlere Verlustrate mit dem neuen Pointing Modell
Höhe: $v'_h(t)$	$\approx (0,086 \pm 0,001) \frac{[^\circ]}{[\text{min}]}$	$\approx (0,042 \pm 0,015) \frac{[^\circ]}{[\text{min}]}$
Azimut: $v'_{az}(t)$	$\approx (0,031 \pm 0,0006) \frac{[^\circ]}{[\text{min}]}$	$\approx (0,035 \pm 0,002) \frac{[^\circ]}{[\text{min}]}$

Die Abweichungen mit den Trends des Trackingverhaltens vs. Zeit sind in den Abbildungen (6.11 bis 6.16) dargestellt.

Die Messung vom 14.07.2006 ist mit dem alten Pointing Modell und die vom 22.07.2006 und vom 25.07.2006 sind mit dem neuen Pointing Modell gemessen worden. In Höhe ist eine Verbesserung der Verlustraten, in den Messungen vom 22.07.2006 und 25.07.2006 mit dem neuen Pointing Modell, gegenüber der Messung vom 14.07.2006 festzustellen. Die Vorzeichen der Steigungen in den Trends sind hier, wie bei der Position Azimut 45° und Höhe 70°, nicht gleich. Das Vorzeichen der Steigung in den Trends vom 14.07.2006 und 25.07.2006, siehe Abbildung (6.11 & 6.15), ist negativ und von 22.07.2006 positiv, siehe Abbildung (6.13). Vergleicht man jedoch einzelne Messzeiten miteinander, kann man auch wieder Gemeinsamkeiten im Trackingverhalten erkennen. Zu Beginn der Messung ist das Trackingverhalten der Messung vom 22.07.2006 ähnlich der Messung vom 14.07.2006. Nach ca. 9 min Messzeit fand jedoch ein Vorzeichenwechsel der Steigung der Abweichung statt. Bei dieser Position hat sich das Trackingverhalten im Azimut, trotz der unterschiedlichen Pointing Modelle, nicht wesentlich geändert. Die Trackingverlustraten sind im Azimut in etwa gleich geblieben. Die Vorzeichen der Steigungen in den Trends sind ebenfalls identisch, siehe Abbildungen (6.12, 6.14 & 6.16).

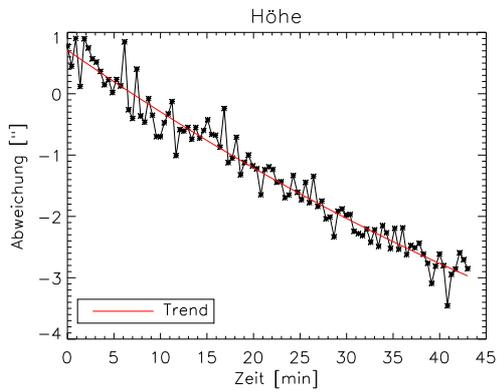


Abbildung 6.11: Höhenverlauf der Messung vom 14.07.2006

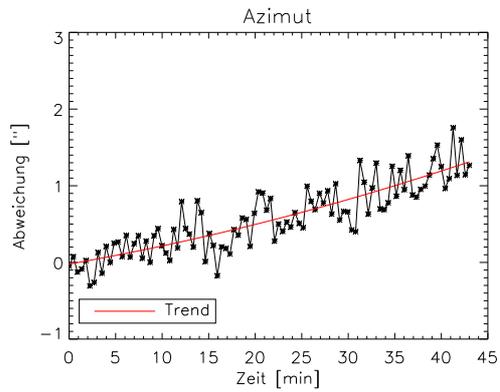


Abbildung 6.12: Azimutverlauf der Messung vom 14.07.2006

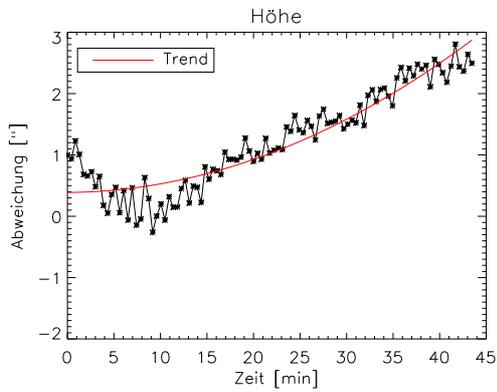


Abbildung 6.13: Höhenverlauf der Messung vom 22.07.2006

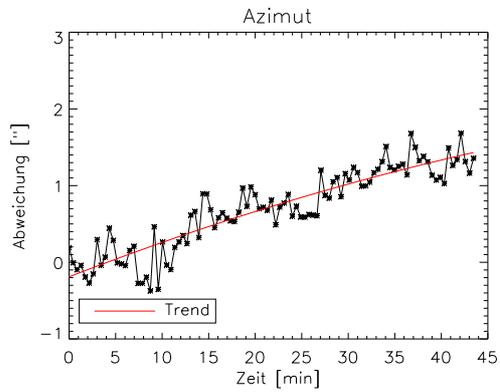


Abbildung 6.14: Azimutverlauf der Messung vom 22.07.2006

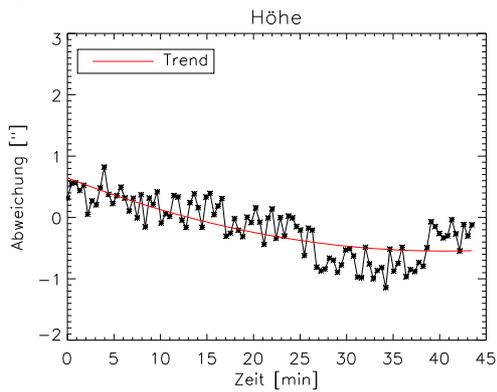


Abbildung 6.15: Höhenverlauf der Messung vom 25.07.2006

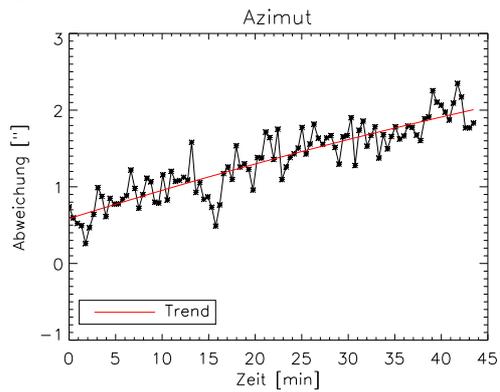


Abbildung 6.16: Azimutverlauf der Messung vom 25.07.2006

6.2.1.2 Vergleich von Messungen mit gleichem Pointing Modell

6.2.1.2.1 Bei Azimut 45° und Höhe 70°

Die Trackingverlustraten der beiden Messungen lauten:

	Verlustrate der Messung vom 21.07.2006	Verlustrate der Messung vom 25.07.2006
Höhe: $v'_h(t)$	$\approx (0,0043 \pm 0,0005) \frac{''}{\text{min}}$	$\approx (0,03 \pm 0,002) \frac{''}{\text{min}}$
Azimut: $v'_{az}(t)$	$\approx (0,0206 \pm 0,0006) \frac{''}{\text{min}}$	$\approx (0,017 \pm 0,001) \frac{''}{\text{min}}$

Vergleicht man die Messung von 21.07.2006 und die vom 25.07.2006, siehe Abbildungen (6.7 bis 6.10), miteinander, kann man Unterschiede in den Verläufen der Abweichungen und somit im Trackingverhalten erkennen. Die Ausprägungen der Unterschiede im Trackingverhalten sind für Höhe und Azimut verschieden.

In Höhe unterscheidet sich das Trackingverhalten sehr deutlich voneinander, was man schon in den deutlich unterschiedlichen Verlustraten sehen kann. Vergleicht man die Abbildungen (6.7 & 6.9) miteinander, ist der Unterschied im Trackingverhalten auch klar zu sehen. Gegenüber der Messung vom 25.07.2006 sind die Abweichungen und somit auch der Trend der Messung von 21.07.2006 nach ca.18 min Messzeit nahezu konstant. Dies bedeutet, dass die Gesamttrackingverlustrate in Höhe für die Messung vom 21.07.2006 sehr klein ist. Man sieht in der Abbildung (6.9) auch, dass zu Beginn der Messung vom 25.07.2006 die Steigung des Verlaufs leicht positiv ist und bei ca. 8 min Messzeit ein Vorzeichenwechsel der Steigung im Verlauf erfolgt. Die Steigung der Verläufe der Abweichungen beider Messungen sind in diesem Bereich positiv. Vergleicht man beide Messungen in diesem Bereich miteinander, stellt man fest, dass die Verlustrate bei der Messung vom 21.07.2006 größer ist als die vom 25.07.2006.

Im Azimut sind die Unterschiede im Trackingverhalten bei den Messungen vom 21.07.2006 und 25.07.2006 nicht sehr stark, wie man an den Verlustraten und aus den Abbildungen (6.8 & 6.10) ersehen kann. Der deutlichste Unterschied hier ist, dass die Steigung des Trends bei der Messung vom 25.07.2006, die ersten 10 min nahezu konstant geblieben ist und erst dann der Betrag der Steigung und somit die Verlustrate stieg.

6.2.1.2.2 Bei Azimut 135° und Höhe 50°

Die Trackingverlustraten der beiden Messungen lauten:

	Verlustrate der Messung vom 22.07.2006	Verlustrate der Messung vom 25.07.2006
Höhe: $v'_h(t)$	$\approx (0,057 \pm 0,003) \frac{''}{\text{min}}$	$\approx (0,027 \pm 0,002) \frac{''}{\text{min}}$
Azimut: $v'_{az}(t)$	$\approx (0,0374 \pm 0,0006) \frac{''}{\text{min}}$	$\approx (0,0327 \pm 0,0003) \frac{''}{\text{min}}$

Auch bei dieser Position findet man Unterschiede zwischen den zwei Trackingmessungen vom 22.07.2006 und 25.07.2006, siehe Abbildungen (6.13 bis 6.16). Wie bei der Position Azimut 45° und Höhe 70° sind auch hier die Unterschiede in Höhe und Azimut zwischen den Messungen unterschiedlich stark.

Auch hier unterscheiden sich die Verläufe in Höhe, siehe Abbildungen (6.13 & 6.15), stärker als im Azimut. Vergleicht man sie miteinander, stellt man fest, dass das Vorzeichen der

Steigung in den Verläufen der Abweichungen in den ersten 9 min der Messzeit gleich ist. Desweiteren ist die Steigung in diesem Bereich bei der Messung vom 22.07.2006 in etwa um den Faktor 2 größer als in der vom 25.07.2006. In der Messung vom 22.07.2006 fand in etwa zu diesem Zeitpunkt ein Vorzeichenwechsel statt. Ein Vorzeichenwechsel in der Steigung im Verlauf der Abweichungen fand ebenfalls in der Messung am 25.07.2006 statt, nach ca.33 min Messzeit.

Die Verläufe der Abweichungen im Azimut unterscheiden sich kaum voneinander, siehe Abbildungen (6.14 & 6.16), was sich in den Verlustraten niederschlägt.

6.2.1.3 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt konnte anhand von zwei Beispielen gezeigt werden, dass das Trackingverhalten und die Verlustrate vom Pointing Modell abhängig sind. Am stärksten zeigte sich dies in der Trackingverlustrate im Azimut, bei der Position Azimut 45° und Höhe 70° . Hier ist eine Verbesserung der Verlustrate um den Faktor 6 festzustellen. Auch in Höhe ist bei dieser Position eine leichte Verbesserung festzustellen. Trotz neuem Pointing Modell ist bei der Position Azimut 135° und Höhe 50° im Azimut so gut wie keine Veränderung im Trackingverhalten festzustellen. Die Verlustraten bei dieser Position sind in etwa vergleichbar. In Höhe hat es jedoch eine Verbesserung in der Verlustrate um den Faktor 2 gegeben.

Es konnte auch festgestellt werden, dass sich das Trackingverhalten in Höhe, trotz gleichem Pointing Modell, stärker ändert als im Azimut. Man muss zwar bedenken, dass die Positionen an verschiedenen Tagen nicht exakt die gleichen sind, aber doch recht dicht beieinander liegen.

6.2.2 Trackingverlustraten im Höhenverlauf

Im folgenden sollen die Trackingverlustraten in verschiedenen Höhen betrachtet werden. Hierbei wurden die mittleren Verlustraten bei bestimmten Höhen bestimmt. In den Abbildungen (6.17 & 6.18) sind diese Trackingverlustraten vs. Höhe dargestellt. Aus diesen Abbildungen kann man sehen wie gut die Verlustraten, bei unterschiedlichen Höhen, sind. Bei Höhe 30° und 85° erfolgte jeweils nur eine Trackingmessung, während bei den Höhen

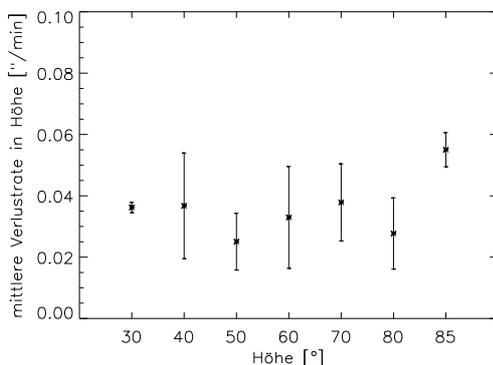


Abbildung 6.17: mittlere Verlustrate in Höhe vs. Höhe

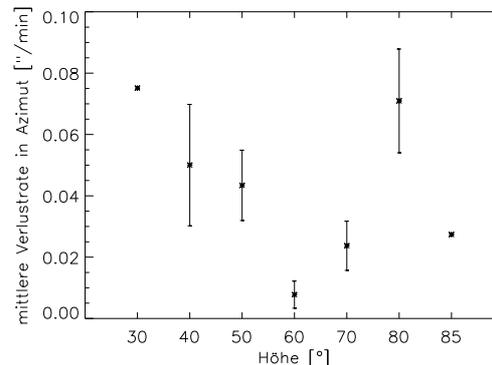


Abbildung 6.18: mittlere Verlustrate in Azimut vs. Höhe

40°, 60° und 80° jeweils 4 und bei den Höhen 50° und 70° 5 Messungen erfolgten.

Aus der Abbildung (6.17) kann man ersehen, dass die mittlere Trackingverlustrate in Höhe recht konstant im Höhenverlauf ist.

Die mittlere Trackingverlustrate im Azimut ist im Höhenverlauf nicht konstant, wie man in der Abbildung (6.18) sieht. Bei der Höhe 60° ist sie deutlich kleiner als die mittlere Gesamttrackingrate im Azimut. Das läßt den Schluß zu, dass das Pointing Modell vom 19.07.2006 bei dieser Höhe besonders gut ist. Auch die Verlustraten bei den Höhen 70° und 85° liegen unter der mittleren Gesamttrackingrate im Azimut.

6.2.3 Mittlere Trackingverlustrate in den 4 Quadranten des Azimuts

In diesem Abschnitt sollen die mittleren Verlustraten, für die 4 Quadranten des Azimuts, Nordost, Südost, Südwest und Nordwest, näher betrachtet werden. Hierzu wurden die mittleren Verlustraten der 4 Quadranten des Azimuts gebildet. Diese sind vs. Quadrant in den Abbildungen (6.19 & 6.20) dargestellt. In diese Betrachtung fließen die Messwerte der Höhen 30° und 85° nicht mit ein, da ich bei diesen Höhen nicht in jedem Quadranten des Azimuts eine Messung vorgenommen haben. Die mittlere Gesamttrackingverlustrate ohne diese beiden Höhen beträgt:

	Gesamtverlustrate
Höhe: $\bar{v}'_h(t)$	$\approx(0,032\pm 0,006) \frac{[^\circ]}{\text{min}}$
Azimut: $\bar{v}'_{az}(t)$	$\approx(0,039\pm 0,007) \frac{[^\circ]}{\text{min}}$

Aus der Abbildung (6.19) geht hervor, dass die mittlere Verlustrate in Höhe im Nordosten am besten, im Südwesten hingegen am schlechtesten ist. Im Nordosten ist die Verlustrate deutlich kleiner als die hier angegebene mittlere Gesamttrackingverlustrate.

Im Azimut, siehe Abbildung (6.20), liegt die größte Trackingverlustrate, wie in Höhe, im Südwesten. Die beste Verlustrate ist im Südosten zu finden.

Die Verlustraten in den Abbildung (6.19 & 6.19) zeigen auch, wie gut das Pointing Modell in den einzelnen Quadranten ist. Im Nordosten z. B. ist die Trackingverlustrate in Höhe, siehe Abbildung (6.19), am geringsten was zeigt, dass hier das Pointing Modell recht gut ist. Im Gegensatz zum Südwesten wo die Verlustrate in Höhe und in Azimut am größten

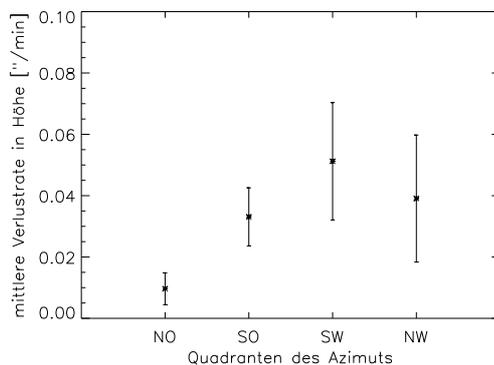


Abbildung 6.19: mittlere Verlustrate in Höhe vs. Quadrant

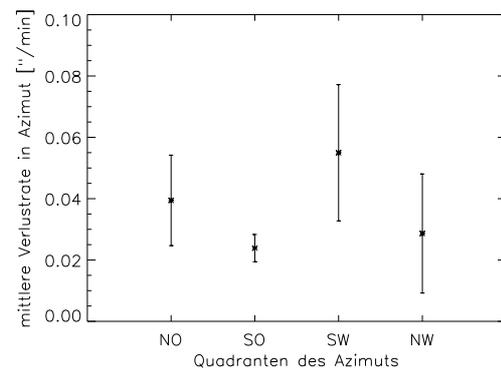


Abbildung 6.20: mittlere Verlustrate in Azimut vs. Quadrant

ist. Es zeigt sich hierdurch, dass das Pointing Modell im Südwesten, gegenüber den anderen Azimutquadranten, am schlechtesten ist.

6.2.4 Vergleich mit den Verlustraten aus der Endabnahme des HRT

Zum Abschluss sollen nun die Verlustraten aus der Endabnahme des HRT mit den Verlustraten aus diesen Messungen verglichen werden. Die Messungen wurden von A. Hempelmann durchgeführt, die einzelnen Verlustraten wurden aus [15] entnommen. Die dort angegebenen Werte für die Trackingverlustrate ist die geometrische Summe aus den Einzelwerten der Verlustraten in Höhe und Azimut. Bei diesen Messungen wurden hauptsächlich die Verlustraten bei Höhe 40° und 70° bestimmt. Die Trackingmessungen der Endabnahme und die jetzigen Messungen wurden nicht bei gleichen Azimutwerten durchgeführt. Daher ist ein Vergleich der Trackingverlustraten nur bedingt möglich. Auch ist die Anzahl der Messungen unterschiedlich. In der Endabnahme wurden 3 Messungen bei Höhe 40° und 4 bei Höhe 70° durchgeführt. Man kann jedoch die Mittelwerte der Verlustraten bei gleicher Höhe bilden und diese Werte dann miteinander vergleichen. Die Mittelwerte der Trackingverlustraten lauten nun wie folgt:

Höhe	Mittlere Verlustrate aus der Endabnahme	Mittlere Verlustrate jetzige Messungen
40°	$\bar{v}'(t) \approx (0,072 \pm 0,045) \frac{''}{\text{min}}$	$\bar{v}'(t) \approx (0,064 \pm 0,025) \frac{''}{\text{min}}$
70°	$\bar{v}'(t) \approx (0,074 \pm 0,061) \frac{''}{\text{min}}$	$\bar{v}'(t) \approx (0,050 \pm 0,015) \frac{''}{\text{min}}$

Die Mittelwerte der Verlustraten aus den jetzigen Messungen sind etwas kleiner als die aus der Endabnahme. Aber unter Berücksichtigung der Fehler ist jedoch keine deutliche Veränderung in der Verlustrate und somit im Trackingverhalten festzustellen.

6.3 Schlussfolgerung

Die Werte der geometrischen Summen der einzelnen Verlustraten in diesen Messungen liegen alle unter der geforderten Grenze von $0'',2 \text{ min}^{-1}$. Somit erfüllt das Teleskop die Anforderungen im Tracking ohne eingeschalteten Autoguider.

Aufgrund der Verlustraten und dem Vergleich der Werte der Endabnahme mit den Werten aus den jetzigen Messungen, kann man schliessen, dass sich das Trackingverhalten aufgrund der Steuerungssoftware nicht wesentlich verändert hat.

Es konnte auch gezeigt werden, dass das Trackingverhalten stark vom Pointing Modell abhängig ist, wie der Vergleich des Trackingverhaltens mit zwei unterschiedlichen Pointing Modellen ergeben hat. Auch zeigt sich in diesem Vergleich, dass das Pointing Modell vom 19.07.2006, bei den zwei Positionen, ein besseres Tracking ermöglicht, da hier die Verlustraten, bis auf eine, kleiner sind als die mit dem Pointing Modell vom September 2005.

Beim Vergleichen zweier Trackingmessungen, bei zwei Positionen, konnte festgestellt werden, dass sich in Höhe, trotz gleichem Pointing Modell, das Trackingverhalten bei annähernd gleicher Position, stärker ändert als im Azimut. Man kann daraus folgern, dass das Trackingverhalten in Höhe stärker von der Position abhängt, als das Trackingverhalten im Azimut. Aus den Abbildungen (6.17 bis 6.20), in der die Verlustraten vs. Höhe bzw. vs. Azimutquadranten dargestellt sind, geht die Qualität bzw. gehen auch die Schwachstellen im Pointing

Modell hervor. Man sieht in den Abbildungen (6.19 & 6.20) z. B., dass im Südwesten des Azimuts sowohl in Höhe als auch im Azimut, die mittlere Verlustrate am höchsten ist. Der größte Wert der geometrischen Summe der einzelnen Verlustraten in Höhe und Azimut und somit auch die höchste Verlustrate, liegt bei der Position Azimut 200° Höhe 40° , mit einer Verlustrate von $\bar{v}(t) \approx (0,135 \pm 0,002) \frac{[m]}{[min]}$. Im Abschnitt (5.3) wurden die Residuen der Pointingmessung vom 10.06.2006 untersucht. In der Abbildung (5.7) ist bei ca. 225° im Azimut eine Anomalie in den Residuen zu sehen, die mit abnehmender Höhe immer stärker wird. An dieser Position ist daher ein Misspointing zu erwarten. Diese Anomalie war ebenfalls in den Azimutresiduen des Pointing Modells vom 19.07.2006 zu finden, siehe Abbildung (B.56). Diese Anomalie im Südwesten des Azimuts wird die Ursache für die relativ hohe Verlustrate sein. Wenn diese Anomalie durch die geplante Erweiterung bzw. Umstellung des Pointing Modelles beseitigt ist, wird sich das Trackingverhalten auch hier verbessern.

Kapitel 7

Auswertung des Oszillationstests

7.1 Methode

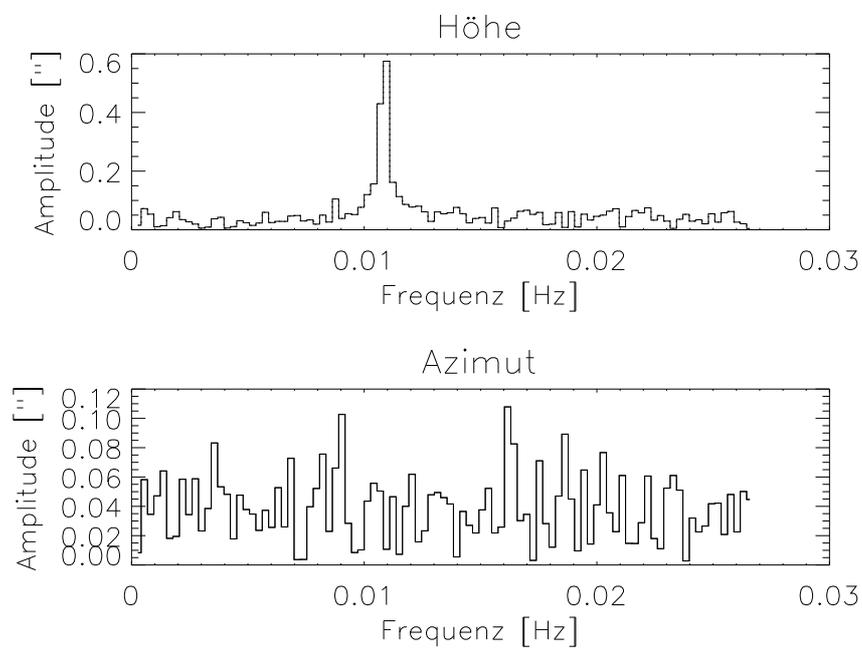


Abbildung 7.1: Fourierspektrum eines alten Oszillationstests

Während der Tests von 2002 bis 2004 wurde bei Trackingtests in Polnähe, die Nachführungsoszillation mit der Periode P , nach Gleichung (2.90) gefunden. In der Abbildung (7.1) ist ein Fourierspektrum eines Oszillationstests aus diesen Zwischentests abgebildet. Man kann eine Oszillation in der Höhennachführung, mit der Frequenz von 0,0108 Hz erkennen, was einer Periode von 1,54 min entspricht. Die Stärke der Fourieramplitude gibt Auskunft wie stark diese Oszillation ist. Sie betrug in diesem Beispiel ca. $0''{,}58$, was um den Faktor 9 größer ist als das Rauschen im Spektrum.

Nach der Überholung des Teleskops durch die Firma Halfmann sollte überprüft werden, ob diese Oszillation noch vorhanden ist und wenn ja wie stark. Für diese Tests wurden Objekte

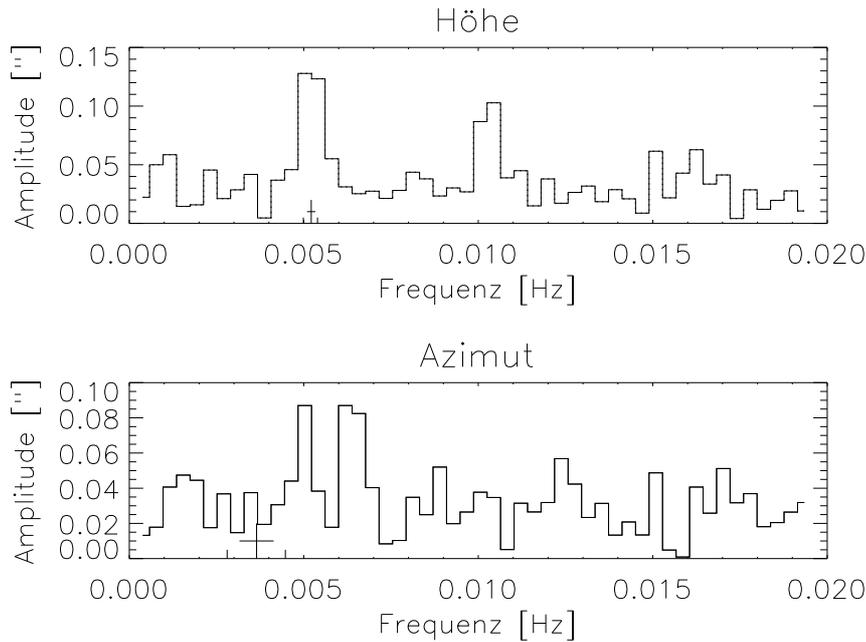


Abbildung 7.2: Fourierspektrum des Oszillationstests vom 24.01.2006

in Polnähe, siehe Tabelle (A.1), verwendet. Bei diesen Sternen ist die Nachführgeschwindigkeit nicht sehr hoch, da ansonsten die Periode bei zu hoher Nachführgeschwindigkeit zu klein wird um sie noch nachweisen zu können. Diese Nachweisgrenze wird durch die Nyquist Frequenz bestimmt, die wie folgt definiert ist[2]:

$$f_{\text{Nyquist}} = \frac{1}{2\Delta}. \quad (7.1)$$

Das Δ steht für das Messintervall in [s], welches die durchschnittliche Zeitzeit einer Messung, der Gesamtmessung ist. Es setzt sich aus der Zeit einer Aufnahme zusammen, diese wiederum aus der Belichtungs- und Auslesezeit der CCD Kamera (Typ ST7), die ca. 15 s beträgt. Mit einer Belichtungszeit der Aufnahmen von 10 s, liegt die kürzeste nachweisbare Periode bei knapp unter 1 min.

Aus der Aufnahmenserie von 100 Aufnahmen wurden die Abweichungen vom Zentrum mit Hilfe der IRAF-Prozedur "ANALTRACK", geschrieben von J. Gonzalez Perez, ermittelt. Aus diesen Abweichungen wurde der Trend der Nachführung bestimmt und dieser vom Messwert abgezogen. Diese Residuen wurden nun mit einer Fourieranalyse untersucht, ob eine Oszillation vorhanden ist. Für die Fourieranalyse wurde die IDL-Routine "FFT" verwendet.

7.2 Ergebnis

Für diese Auswertung wurden 21 Oszillationstests verwendet. Als Beispiel ist das Fourierspektrum des Oszillationstests vom 24.01.2006 in der Abbildung (7.2) dargestellt. Man

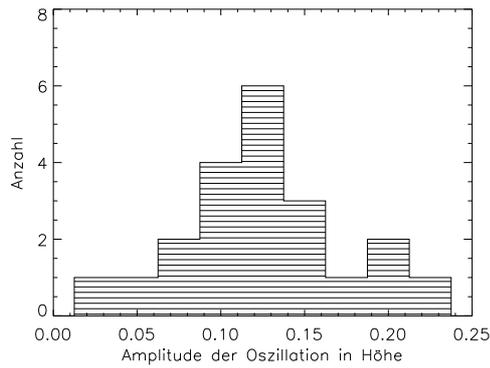


Abbildung 7.3: Histogramm der Amplituden in Höhe

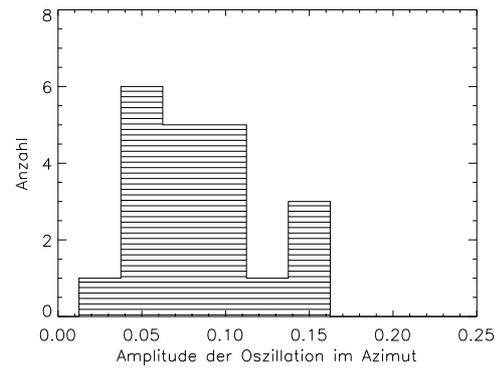


Abbildung 7.4: Histogramm der Amplituden in Azimut

kann in der Höhennachführung einen Peak bei der Frequenz 0,005 Hz erkennen, dies entspricht einer Periode von 3,3 min. Die Amplitude beträgt ca. 0",125, dies ist noch ca. 3 mal so stark, wie das Rauschen. Im Spektrum ist zusätzlich die theoretische Frequenz zu Beginn von 0,005 Hz und zu Ende der Messung von 0,0054 Hz, sowie die mittlere theoretische Frequenz von 0,0052 Hz eingezeichnet. Die theoretische Frequenz konnte wie folgt bestimmt werden:

Da man die UT-Zeit der einzelnen Aufnahmen zu Verfügung hatte, war es möglich die relative Positionsänderung zu bestimmen. Dieser Wert wurde nun durch die jeweiligen zeitlichen Änderungen dividiert und erhielt so den Wert für die mittlere Nachführungsgeschwindigkeit zwischen zwei Messungen. Man sieht in der Abbildung (7.2), dass die Stärke der Oszillation in Höhe während der gesamten Messzeit fast konstant war. Diese relative Konstanz der Oszillationsstärke ist jedoch nicht der Regelfall, im allgemeinen variiert die Oszillationsstärke während einer Messung. Es ist in der Abbildung (7.2) auch die erste Oberwelle dieser Oszillation zu erkennen und zwar bei der Frequenz 0,0104 Hz. Somit ist die Nachführungsoszillation mindestens durch die erste Oberwelle überlagert. Diese Oberwelle hat eine Amplitude von 0",11.

In den Abbildungen (7.3 & 7.4) sind die Histogramme der gemessenen Amplituden. Die mittlere Amplitude der Oszillationstests betrug für:

Höhennachführung:	$\approx (0,13 \pm 0,01)$ ["]
Azimutnachführung :	$\approx (0,088 \pm 0,008)$ ["]

Um den Wert der mittleren Amplitude am Encoder zu erhalten, muss der Wert für die Azimutnachführung noch mit dem $\cos(53^\circ,480497)$ dividiert werden. Somit lauten die mittlere Amplitude der Oszillationstests an Encoder:

Höhennachführung:	$\approx (0,13 \pm 0,01)$ ["]
Azimutnachführung :	$\approx (0,15 \pm 0,008)$ ["]

Im weiteren Verlauf dieser Auswertung wird die direkte Amplitude der Oszillationstests betrachtet und nicht die am Encoder. Das mittlere Rauschen in den Fourierspektren lag in der Höhe bei $\approx (0,072 \pm 0,003)$ ["] und im Azimut bei $\approx (0,057 \pm 0,002)$ ["].

Die zeitliche Entwicklung der Amplituden für Höhe und Azimut ist in den Abbildungen

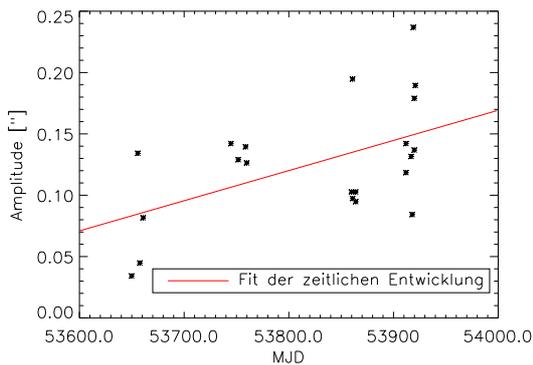


Abbildung 7.5: Zeitliche Entwicklung der Amplituden in der Höhennachführung

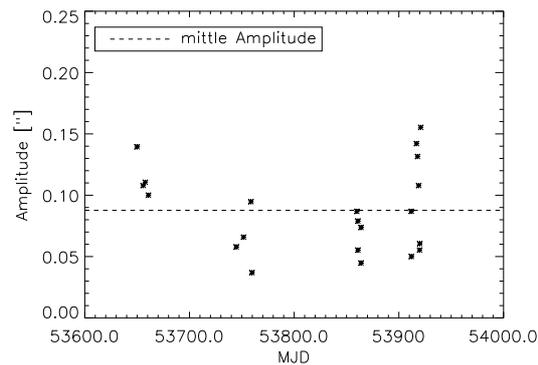


Abbildung 7.6: Zeitliche Entwicklung der Amplituden in der Azimutnachführung

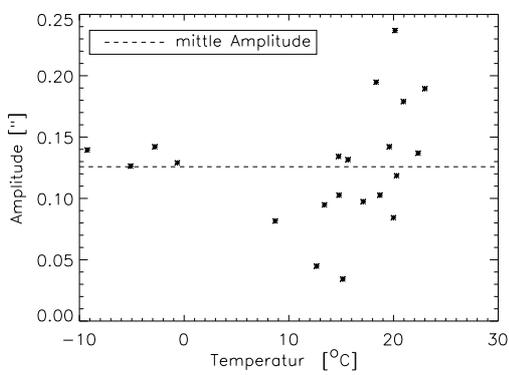


Abbildung 7.7: Temperaturverlauf der Amplituden in der Höhennachführung

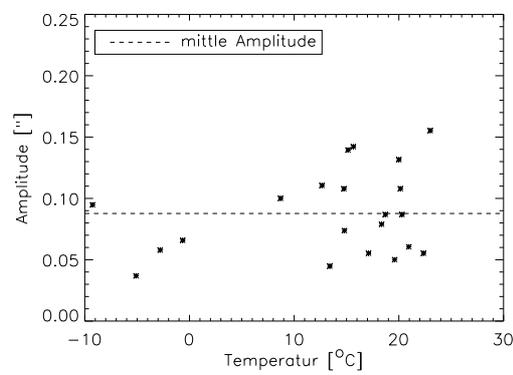


Abbildung 7.8: Temperaturverlauf der Amplituden in der Azimutnachführung

(7.5 & 7.6) dargestellt. Man sieht eine recht starke Streuung in den Amplitudenwerten für Höhe und Azimut. Trotz der Streuung in den Amplitudenwerten der Höhe ist eine Tendenz zu erkennen, dass die Oszillation an Stärke zuzunehmen scheint. Man könnte daher vermuten, dass die Amplitude der Oszillation in Höhe mit der Zeit stärker wird. Um den zeitlichen Verlauf zu erhalten, wurde mit Hilfe der IDL-Routine "POLYFIT" ein linearer Fit durchgeführt. Dieser stellt den zeitlichen Trend, als rote Linie in der Abbildung, für die Höhe in Abbildung (7.5) dar. Aus diesem Trend geht hervor, dass die Stärke der Amplitude um:

$$(0,090 \pm 0.034) \frac{''}{a}$$

ansteigen könnte. Eine zeitliche Konstanz ist jedoch bei einem Fehler von 3σ nicht auszuschließen. Die Standardabweichung der Residuen dieses Fits ist $0''.041$. Die Amplitudenstärke hingegen ist im Azimut relativ zeitlich konstant, siehe Abbildung (7.6). Die gestrichelte Linie stellt die mittlere Fourieramplitude in der Azimutnachführung dar. Da die Oszillationstests auch bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt wurden, stellte sich die Frage, ob es auch einen Zusammenhang zwischen der Stärke der Oszillation und der Temperatur gibt. Meiner Meinung nach gibt es diesen Zusammenhang nicht, bzw.

man kann keinen in den Abbildungen (7.7 & 7.8) erkennen. Der größte Teil der Messungen erfolgt bei Temperaturen zwischen 10°C und 23°C. Unter 0°C erfolgten nur 4 Messungen und zwischen 0°C und 10°C liegt nur ein Messwert. Betrachtet man die mittleren Amplituden, die in der Abbildung als gestrichelte Linie dargestellt sind, so kann man sehen, dass die Messpunkte in etwa gleich oberhalb und unterhalb dieser Linie verteilt sind. Daher würde ich sagen, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Stärke der Oszillation und der Temperatur gibt.

7.3 Schlussfolgerung

Man kann abschließend sagen, dass die Stärke der Oszillation erheblich verringert wurde. Jedoch taucht die Oszillation immer noch auf. Man könnte Aufgrund der Abbildung (7.5) vermuten, dass die Amplitude der Oszillation in Höhe mit der Zeit stärker wird. In der Azimutnachführung ist die Stärke dieser Oszillation jedoch kaum relevant und man kann sie vom Rauschen kaum unterscheiden.

Aufgrund einer möglichen zeitlichen Amplitudenentwicklung sollte man die Oszillationstests weiterhin durchführen, um das Auftreten der Oszillation im Azimut und besonders in Höhe weiter zu kontrollieren. Sollte die Stärke mit der Zeit tatsächlich zunehmen, müsste die Firma Halfmann eine Nachjustierung des Teleskopss vornehmen, sobald die Oszillationsamplitude eine noch zu definierende Toleranzgrenze überschreitet, die vom Aufstellungsort abhängt.

Bei der Nachführungsgeschwindigkeit, außerhalb der Polregion, ist die Oszillationsfrequenz größer als 1 Hz. Dies führt, bei einer Belichtungszeit von 10 s, zu einer eliptischen Aufweitung des Sternscheibchens und somit zu einer Vergrößerung des FWHM¹ der Intensitätsverteilung. Die Oszillationsamplitude muss dabei, aufgrund der Massenträgheit des Teleskops, mit zunehmender Frequenz kleiner werden, was durch Messungen am fast baugleichen Stella I Teleskop bestätigt wurde, siehe [19]. Die Stärke der Oszillationsamplitude am Pol ist deshalb eine Obergrenze und somit sind die Messungen am Pol konservativ und damit auch die beste Methode. Zur Zeit wird das FWHM, auch bei gutem Seeing, vom Seeing dominiert und nicht durch die Nachführungsozillation, siehe Kapitel (8).

¹FWHM: engl: Full-Width Half-Maximum, volle Breite bei halber Höhe

Kapitel 8

Untersuchung der Schwankungen in der Nachführung

8.1 Methode

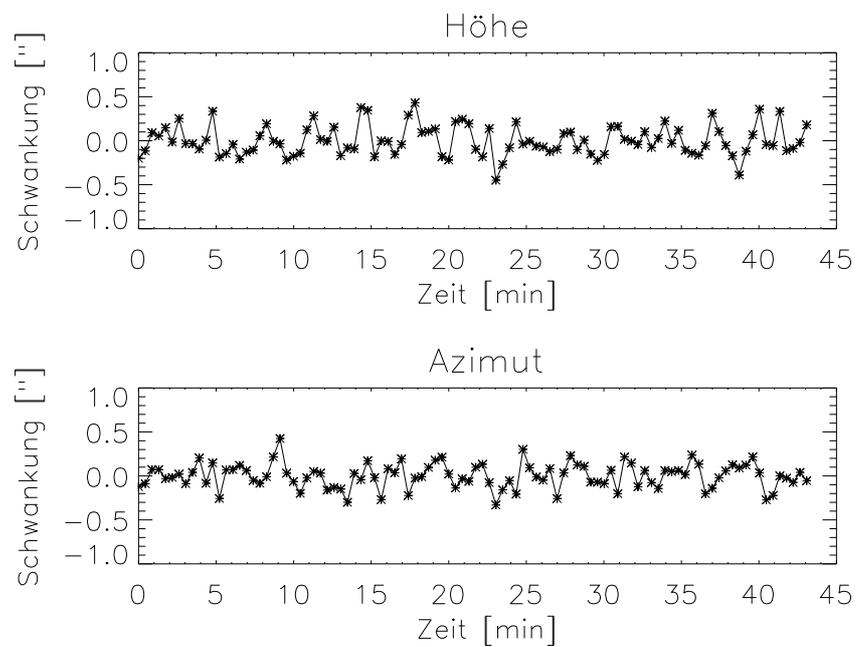


Abbildung 8.1: Residuen des Oszillationstests vom 24.01.2006

Der Oszillationstest bot gleichzeitig die Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen den Schwankungen in der Nachführung und dem des Seeings durchzuführen, da in Polnähe das Pointing Modell nicht so einen starken Einfluss auf die Nachführung hat. Die Amplitude der Nachführungsozillation (max. $0''{,}25$) ist wesentlich kleiner als das Seeing ($>1''$), daher spielt sie keine störende Rolle bei dieser Untersuchung. Eine ähnliche Untersuchung wurde schon früher von J. Gonzalez-Perez, für die Zwischentests des HRT durchgeführt,

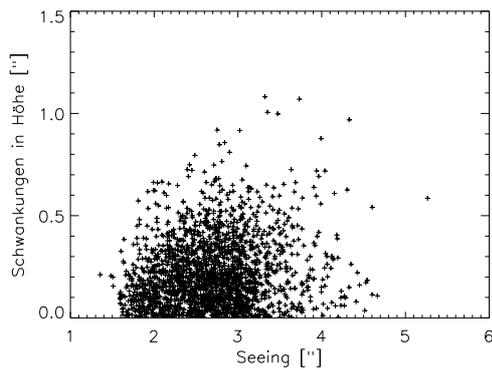


Abbildung 8.2: Schwankungen in der Höhennachführung am Encoder

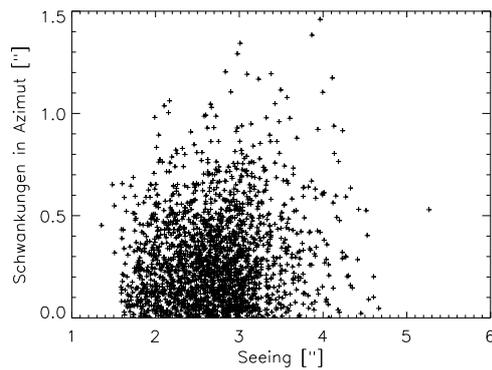


Abbildung 8.3: Schwankungen in der Azimutnachführung am Encoder

siehe [15].

Bei der jetzigen Untersuchung wurde als erstes die Wahrscheinlichkeit einer Schwankung in der Nachführung in Höhe und Azimut, in Abhängigkeit vom Seeing untersucht und als zweites die mittlere Schwankung in der Nachführung in Höhe und Azimut, in Abhängigkeit vom Seeing bestimmt. Die Schwankungen in der Nachführung sind gleich der Differenz der Messwerte der Abweichung vom Zentrum und dem Trend der Nachführung, siehe Abschnitt (7.1). Ein Beispiel ist in der Abbildung (8.1) dargestellt. Das Seeing wurde aus den Aufnahmen, mit Hilfe von IRAF und dem FWHM der Intensitätsverteilung des Sternenscheibchens, bestimmt.

Diese Daten wurden in $0'',1$ Schritten des Seeings zusammengefasst. Da dies eine statistische Auswertung ist, kommt es natürlich auf die Menge der Daten an. In der Abbildung (8.2 & 8.3) sind alle Abweichungen vs. Seeing aufgetragen. Im Bereich des Seeings von $1'',6$ bis $3'',7$ liegen 2012 Messpunkte, was ca. 96 Prozent der gesamten Messpunkte sind. Außerhalb dieses Bereichs ist es daher schwierig eine genaue Aussage über den Verlauf zu treffen, weil die Wahrscheinlichkeiten sowie die mittlere Schwankung, aufgrund der wenigen Datenpunkte verfälscht werden können.

8.2 Ergebnis

8.2.1 Wahrscheinlichkeit einer Schwankung

In den Abbildungen (8.2 & 8.3) fällt auf, dass die Streuung in der Schwankungsstärke mit dem Seeing ansteigt. Um dies zu quantifizieren, wurde folgende Wahrscheinlichkeitsuntersuchung angestellt:

Die Genauigkeitssgrenze wurde auf die Positionsgenauigkeit der Encoder von $0'',2$ festgelegt. Alle Schwankungen im Bereich kleiner als $0'',2$ sind deshalb als Encoder bedingt zu betrachten. Die Schwankungen größer als $0'',2$ haben eine andere Ursache, die natürlich auch instrumentell bedingt sein kann, wie z. B. Softwarefehler oder Lagerungenauigkeiten. Die Grenzfestlegung erfolgte aufgrund folgender Überlegung:

Auf dem Encoder befinden sich 36000 Striche pro 360° woraus sich ein Strichabstand von $0'',01$ ($36''$) ergibt. Zwischen den Strichen wird mittels eines Sinus-Cosinus-Signales der

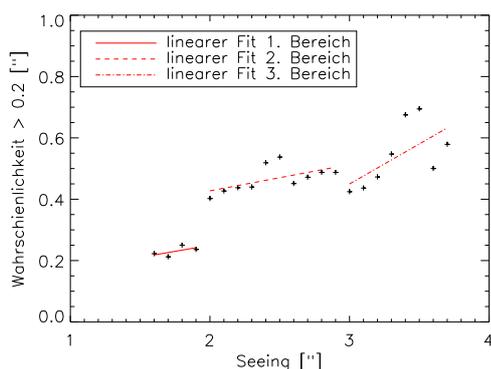


Abbildung 8.4: Wahrscheinlichkeit der Schwankung in der Höhennachführung

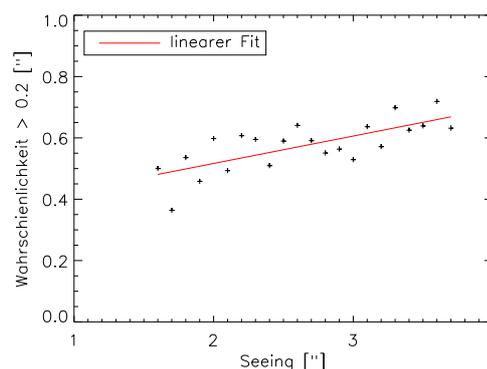


Abbildung 8.5: Wahrscheinlichkeit der Schwankung in der Azimutnachführung

Drehwinkel des Teleskops bestimmt. Dieses Signal ist laut Angaben der Firma Halfmann beim HRT 4096fach untersetzt. Es ergibt sich somit eine Signalauflösung von $\frac{2 \cdot 36''}{4096} = 0'' ,02$, wobei der Faktor 2 dem Nyquist-Theorem geschuldet ist. Die tatsächliche Auflösung hängt von der Abbildungsunschärfe des Lesekopfs ab. Der ursprünglich verwendete Lesekopf hatte, nach Angaben des Herstellers, eine Genauigkeit von 1% des Strichabstandes. Nach einem Einspruch des Projektleiters wurde ein Lesekopf mit halbiertes Unschärfe eingesetzt. Es ist des weiteren zu berücksichtigen, dass die Angaben des Encoderherstellers Heidenhain immer konservativ sind (Eigenaussage von Heidenhain). Danach ergibt sich eine Mindestauflösung von $0'' ,2$ (A. Hempelmann, pers. Mitteilung).

In den Abbildungen (8.4 & 8.5) ist die Wahrscheinlichkeit einer Schwankung am Encoder die größer als $0'' ,2$ ist vs. Seeing dargestellt. Wie man in den Abbildungen (8.4 & 8.5) sieht, nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Abweichung mit schlechter werdendem Seeing zu. Im Bereich des Seeings von $1'' ,6$ bis $3'' ,7$ habe ich im Azimut, in erster Näherung, einen linearen Zusammenhang zwischen dem Seeing und der Wahrscheinlichkeit angenommen. Für die Höhe ist der Verlauf der Wahrscheinlichkeit nicht linear, wie man in der Abbildung (8.4) sieht. Man kann das Seeing jedoch in drei Bereiche aufteilen, in denen der Verlauf in erster Näherung wieder linear ist. Diese drei Seeingbereiche sind:

	Seeingbereich	Prozentualer Anteil an der Gesamtzahl der Messpunkte
1. Bereich:	von $1'' ,6$ bis $1'' ,9$ Seeing	$\approx 9 \%$
2. Bereich:	von $2'' ,0$ bis $2'' ,9$ Seeing	$\approx 69 \%$
3. Bereich:	von $3'' ,0$ bis $3'' ,7$ Seeing	$\approx 18 \%$

Mit Hilfe der IDL-Routine "POLYFIT" wurden die Geraden an die Werte angefitet und als rote Geraden in den Abbildungen (8.4 & 8.5) dargestellt. Die somit erhaltenen Raten, um wieviel die Wahrscheinlichkeit pro $1''$ Seeing ansteigt, betragen:

	Konstante	Wahrscheinlichkeitsrate	Standardabweichung der Residuen
Höhe 1. Bereich	$\approx (0,09 \pm 0,12)$	$\approx (0,08 \pm 0,07)$ pro $1''$ Seeing	$0'' ,01$
Höhe 2. Bereich	$\approx (0,25 \pm 0,1)$	$\approx (0,09 \pm 0,04)$ pro $1''$ Seeing	$0'' ,03$
Höhe 3. Bereich	$\approx (-0,33 \pm 0,45)$	$\approx (0,26 \pm 0,13)$ pro $1''$ Seeing	$0'' ,08$
Azimut	$\approx (0,34 \pm 0,05)$	$\approx (0,09 \pm 0,02)$ pro $1''$ Seeing	$0'' ,06$

Die Fehler der Konstante im 1. und 3. Seeingbereich der Höhe sind größer als die Konstante und somit auch mit Null konsistent. Bedenkt man jedoch die Anzahl der Messpunkte in diesen beiden Bereichen, sind diesen gegenüber 2. Bereich in Höhe nicht so aussagekräftig. Vergleicht man die Konstante und die Wahrscheinlichkeitsrate aus dem 2. Seeingbereich in Höhe und Azimut miteinander, stellt man fest, dass sie, unter Berücksichtigung der Fehler, gleich sind.

8.2.2 Mittlere Schwankungsstärke

Nun ist interessant, wie stark die mittlere Schwankung der Höhe und des Azimuts vom Seeing abhängig sind. In den Abbildungen (8.6 & 8.7) sind diese mittleren Stärken, sowie ihre Standardabweichungen gegen Seeing dargestellt. Wie man sieht, nimmt erwartungsgemäß die mittlere Stärke der Schwankung in Nachführung bei schlechter werdendem Seeing zu. Aus den Abbildungen (8.6 & 8.7) wird sichtbar, dass die Stärke der Schwankung in Höhe generell stärker mit dem Seeing anwächst als im Azimut. Wie im Abschnitt (8.2.1) habe ich in erster Näherung einen linearen Zusammenhang zwischen der mittleren Schwankungsstärke und dem Seeing angenommen und das Seeing in dieselben drei Bereiche aufgeteilt, wobei diese Aufteilung wiederum nur in der Höhe zum tragen kommt.

Um die Steigungsraten zu erhalten, habe ich jeweils einen linearen Fit mit der IDL-Routine "POLYFIT" durchgeführt, die in den Abbildungen (8.6 & 8.7) als rote Linien dargestellt sind. Die Raten und die Residuen der Fits lauten:

	Konstante	Rate	Standardabweichung der Residuen
Höhe 1. Bereich	$\approx (-0,02 \pm 0,07)$ ["]	$\approx (0,09 \pm 0,04)$ $\frac{\text{mittlere Schwankung ["]}}{\text{Seeing ["]}}$	0",008
Höhe 2. Bereich	$\approx (0,11 \pm 0,03)$ ["]	$\approx (0,04 \pm 0,01)$ $\frac{\text{mittlere Schwankung ["]}}{\text{Seeing ["]}}$	0",01
Höhe 3. Bereich	$\approx (-0,24 \pm 0,19)$ ["]	$\approx (0,15 \pm 0,06)$ $\frac{\text{mittlere Schwankung ["]}}{\text{Seeing ["]}}$	0",03
Azimut	$\approx (0,13 \pm 0,03)$ ["]	$\approx (0,06 \pm 0,01)$ $\frac{\text{mittlere Schwankung ["]}}{\text{Seeing ["]}}$	0",03

Wie im Abschnitt (8.2.1), spielen meiner Meinung nach die Seeingbereiche 1 und 3 in Höhe, aufgrund der Datenmenge, keine Rolle für die Auswertung. Betrachtet man sich nun die Werte aus dem 2. Seeingbereich in Höhe und vom Azimut, stellt man fest, dass die Konstante und Steigung der mittleren Schwankung, unter Berücksichtigung der Fehler, gleich sind.

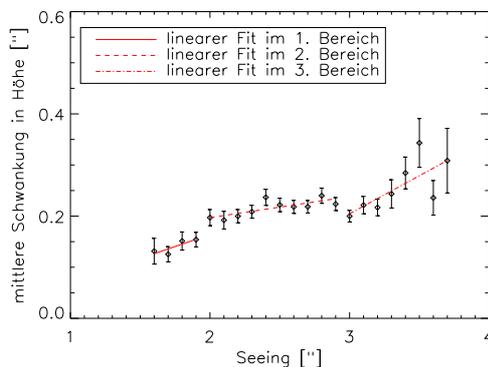


Abbildung 8.6: die mittlere Stärke der Schwankung in der Höhenachführung

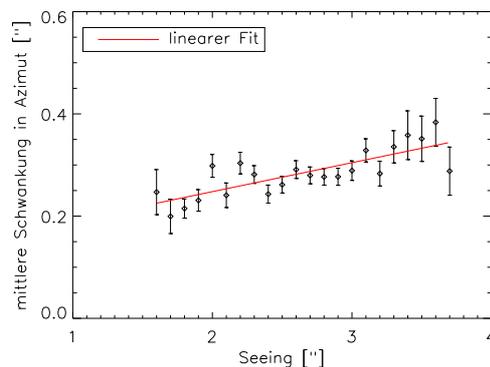


Abbildung 8.7: die mittlere Stärke der Schwankung in der Azimutachführung

8.3 Schlussfolgerung

Man kann zusammenfassend sagen, dass die Schwankungen in der Nachführung in Höhe und Azimut eindeutig vom Seeing abhängig sind. Ob diese Abhängigkeit in Höhe nun linear ist oder nicht, kann aufgrund der vorhandenen Daten noch nicht eindeutig geklärt werden. Man kann z. B. auch sehr gut ein Polynom 3. Grades in die Verläufe der Höhe einfügen. Dies ist jedoch durch nichts zu begründen, da im Azimut der Verlauf linear ist. Da in Höhe die Verläufe, siehe Abbildungen (8.4 & 8.6), nicht eindeutig sind, spiegeln die Messungen, die im Bereich von $2''{,}0$ Seeing bis $2''{,}9$ Seeing liegen, aufgrund der Datenmenge, den Zusammenhang zwischen der Schwankung in der Nachführung und dem Seeing am besten wieder. Die ermittelten Gleichungen, für die Wahrscheinlichkeit und die Stärke einer Schwankung am Höhen- und Azimutencoder in Abhängigkeit des Seeing, lauten:
Für die Wahrscheinlichkeit p einer Schwankung am:
Höhenencoder:

$$p_{\text{Höhe}} \approx (0,26 \pm 0,1) + (0,09 \pm 0,04) \frac{1}{1'' \text{ Seeing}} \cdot \text{Seeing} \quad (8.1)$$

Azimutencoder:

$$p_{\text{Azimut}} \approx (0,34 \pm 0,05) + (0,09 \pm 0,02) \frac{1}{1'' \text{ Seeing}} \cdot \text{Seeing} \quad (8.2)$$

Für die Stärke einer Schwankung Δ am:

Höhenencoder:

$$\Delta h ['] \approx (0,11 \pm 0,03) ['] + (0,04 \pm 0,01) \frac{\text{Schwankung [']}}{1'' \text{ Seeing}} \cdot \text{Seeing} \quad (8.3)$$

Azimutencoder:

$$\Delta az ['] \approx (0,13 \pm 0,03) ['] + (0,06 \pm 0,01) \frac{\text{Schwankung [']}}{1'' \text{ Seeing}} \cdot \text{Seeing} \quad (8.4)$$

Unter Berücksichtigung der Fehler, ist die Wahrscheinlichkeit der Schwankung am Encoder, sowie die Stärke einer Schwankung am Encoder in Höhe und Azimut gleich. Dies ist nicht verwunderlich, da die Encoder für Höhe und Azimut baugleich sind. Dies lässt nun die folgende Interpretation zu:

Die irregulären Ortsschwankungen im Sub-Hz-Bereich des Sternscheibchens sind auf den Einfluss der Erdatmosphäre zurückzuführen und nicht auf Nachführfehler des Teleskops. Die Konstanten der Gleichungen (8.1 & 8.2) geben Auskunft, wie viel der Schwankungen die größer als $0''{,}2$ sind, nicht durch die Erdatmosphäre verursacht werden. Für beide Encoder haben etwa 34 Prozent der Schwankungen, die größer als $0''{,}2$ sind, eine andere Ursache als der Einfluss der Erdatmosphäre.

Eine Schlussfolgerung über die Genauigkeit der Encoder, kann man aus den Konstanten der Gleichungen (8.3 & 8.4) ziehen. Die Konstanten zeigen, dass die Genauigkeit der Encoder besser ist, als der von Heidenhain angegebenen konservativen Wert von $0''{,}2$. Die Genauigkeit der Encoder liegt bei etwas unter $0''{,}13$, da in diesem Wert noch der Einfluss der Nachführungszillation vorhanden ist.

Kapitel 9

Gesamtzusammenfassung

In dieser Arbeit wurden das Pointing- und Trackingverhalten des Hamburger Robotischen Teleskopes untersucht.

Es wurde hier eine theoretische Beründung für die Entkopplung der Korrekturgleichungen des Pointing Modells gefunden. Außerdem konnte festgestellt werden, dass es noch eine 90° Azimutwelle in der Höhenkorrektur und in der Azimutkorrektur eine 180° und 120° Azimutwelle gibt, die noch nicht im Pointing Modell des HRT berücksichtigt werden. Bei der Analyse des Pointing Modells des HRT konnte gezeigt werden welche Parameter in den Korrekturgleichungen, den Höhen- und Azimutverlauf bestimmen und wie sie miteinander korreliert sind. Desweiteren ist eine Temperaturabhängigkeit des Pointing Modells festgestellt und eine vorläufige Temperaturabhängigkeit der Parameter bestimmt worden. Eine Verbesserung im Pointing- und Trackingverhalten kann, durch die Berücksichtigung der drei fehlenden Wellen im Pointing Modell, sowie durch die Umstellung von der jetzigen Basisgleichung zur Berechnung der Parameter (2.25) auf die Basisgleichung (2.24) erreicht werden. Wenn die Abhängigkeit der Parameter von der Temperatur genauer bestimmt worden ist, kann diese im Pointing Modell mit einbezogen werden. Dies würde zu einer weiteren Verbesserung im Pointing- und Trackingverhalten und zu einer möglichen Langzeitstabilität des Pointing Modells führen.

Die Trackingverlusten des Teleskops, mit ausgeschaltetem Autoguider, liegen unter dem geforderten Wert von $0'',2 \text{ min}^{-1}$.

Die Untersuchung der Kurzzeit-Schwankungen in der Nachführung ergab, dass diese durch den Einfluss der Erdatmosphäre verursacht wird. Zudem konnte man eine Aussage über die Genauigkeit der Encoder treffen. Diese liegt bei etwa $0'',13$, was unter dem von der Fa. Heidenhain angegebenen Wert von $0'',2$ liegt.

Die zeitliche Entwicklung der Nachführungsoszillation zeigt, dass die Amplitude dieser Oszillation in Höhe womöglich mit der Zeit stärker wird. Im Azimut jedoch scheint diese eher zeitlich konstant zu bleiben.

Als Ergebnis dieser beiden Untersuchungen kann man feststellen, dass die Amplitude der Nachführungsoszillation und die vom Teleskop verursachten Kurzzeit-Schwankungen in der Nachführung zur Zeit keinen Einfluss auf die optische Auflösung haben.

Anhang A

Tabellen

RA	DEC	mag
09:46:17.390	+89:34:09.96	9.035
00:39:44.657	+89:26:40.09	8.120
20:38:44.285	+89:24:23.66	8.920
02:31:48.704	+89:15:50.72	1.99
21:34:49.093	+89:13:23.56	9.830
03:40:53.743	+89:06:17.87	8.080
17:16:56.834	+89:02:15.66	6.390
01:33:50.220	+89:00:56.48	6.454
12:57:34.432	+88:57:27.43	9.74
14:31:39.534	+88:51:31.96	8.790
18:08:10.707	+88:49:22.26	8.270
11:30:15.343	+88:44:59.51	9.43
07:28:38.899	+88:38:13.01	9.30
16:22:36.518	+88:36:22.43	8.323
09:21:48.627	+88:34:12.93	7.097
01:53:47.690	+88:33:06.03	7.840
09:35:14.416	+88:30:45.15	9.60
16:09:34.793	+88:30:42.64	9.34
02:34:34.035	+88:28:15.62	8.120
07:38:59.852	+88:27:49.63	10.01

Tabelle A.1: Sternliste für den Oszillationstest

	AOFF	AN _A	AE _A	NPAE	BNP	AES	AEC
AOFF	1	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\tan(\text{h}_i)$	$\frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\sin(\text{az}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$
AN _A	$\sin(\text{az}_i)$ $\tan(\text{h}_i)$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$
AE _A	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$
NPAE	$\tan(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan^2(\text{h}_i)$	$\tan^2(\text{h}_i)$	$\frac{\tan(\text{h}_i)}{\cos(\text{h}_i)}$	$\tan(\text{h}_i)$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$	$\tan(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$
BNP	$\frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\tan(\text{h}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\frac{1}{\cos^2(\text{h}_i)}$	$\frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$	$\frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$
AES	$\sin(\text{az}_i)$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\sin^2(\text{az}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$
AEC	$\cos(\text{az}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \tan(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \frac{1}{\cos(\text{h}_i)}$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$

Tabelle A.2: Parameter der Informationsmatrix der Azimutkorrekturgleichung (2.25) ohne \sum und $\frac{1}{\sigma^2}$

	AOFF	AN _A	AE _A	NPAE	BNP	AES	AEC
AOFF	$\cos^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$
AN _A	$\sin(\text{az}_i)$ $\sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$
AE _A	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$
NPAE	$\sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin^2(\text{h}_i)$	$\sin^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{h}_i)$	$\sin(\text{h}_i)$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$
BNP	$\cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\sin(\text{h}_i)$	1	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$
AES	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\sin^2(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$	$\sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$
AEC	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \cos(\text{h}_i)$ $\cdot \sin(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cos(\text{h}_i)$	$\cos(\text{az}_i)$ $\cdot \sin(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$	$\cos^2(\text{az}_i)$ $\cdot \cos^2(\text{h}_i)$

Tabelle A.3: Parameter der Informationsmatrix der Azimutkorrekturgleichung (2.24) ohne \sum und $\frac{1}{\sigma^2}$

	EOFF	AN _E	AE _E	EES	EEC
EOFF	1	cos(az _i)	sin(az _i)	sin(h _i)	cos(h _i)
AN _E	cos(az _i)	cos ² (az _i)	cos(az _i) · sin(az _i)	cos(az _i) · sin(h _i)	cos(az _i) · cos(h _i)
AE _E	sin(az _i)	sin(az _i) · cos(az _i)	sin ² (az _i)	sin(az _i) · sin(h _i)	sin(az _i) · cos(h _i)
EES	sin(h _i)	sin(h _i) · cos(az _i)	sin(h _i) · sin(az _i)	sin ² (h _i)	sin(h _i) · cos(h _i)
EEC	cos(h _i)	cos(h _i) · cos(az _i)	cos(h _i) · sin(az _i)	cos ² (h _i) · sin(h _i)	cos ² (h _i)
c5	$\frac{1}{\cos(h_i)}$	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(az _i)	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(az _i)	$\frac{1}{\cos^2(h_i)}$ · sin(h _i)	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(h _i)
c1	sin(2 · az _i)	sin(2 · az _i) · cos(az _i)	sin(2 · az _i) · sin(az _i)	sin(2 · az _i) · sin(h _i)	sin(2 · az _i) · cos(h _i)
c2	cos(2 · az _i)	cos(2 · az _i) · cos(az _i)	cos(2 · az _i) · sin(az _i)	cos(2 · az _i) · sin(h _i)	cos(2 · az _i) · cos(h _i)
c3	sin(3 · az _i)	sin(3 · az _i) · cos(az _i)	sin(3 · az _i) · sin(az _i)	sin(3 · az _i) · sin(h _i)	sin(3 · az _i) · cos(h _i)
c4	cos(3 · az _i)	cos(3 · az _i) · cos(az _i)	cos(3 · az _i) · sin(az _i)	cos(3 · az _i) · sin(h _i)	cos(3 · az _i) · cos(h _i)
	c5	c1	c2	c3	c4
EOFF	$\frac{1}{\cos(h_i)}$	sin(2 · az _i)	cos(2 · az _i)	sin(3 · az _i)	cos(3 · az _i)
AN _E	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(az _i)	cos(az _i) · sin(2 · az _i)	cos(az _i) · cos(2 · az _i)	cos(az _i) · sin(3 · az _i)	cos(az _i) · cos(3 · az _i)
AE _E	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(az _i)	sin(az _i) · sin(2 · az _i)	sin(az _i) · cos(2 · az _i)	sin(az _i) · sin(3 · az _i)	sin(az _i) · cos(3 · az _i)
EES	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(h _i)	sin(h _i) · sin(2 · az _i)	sin(h _i) · cos(2 · az _i)	sin(h _i) · sin(3 · az _i)	sin(h _i) · cos(3 · az _i)
EEC	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(h _i)	cos(h _i) · sin(2 · az _i)	cos(h _i) · cos(2 · az _i)	cos(h _i) · sin(3 · az _i)	cos(h _i) · cos(3 · az _i)
c5	$\frac{1}{\cos^2(h_i)}$	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(2 · az _i)	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(2 · az _i)	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(3 · az _i)	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(3 · az _i)
c1	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(2 · az _i)	sin ² (2 · az _i)	sin(2 · az _i) · cos(2 · az _i)	sin(2 · az _i) · sin(3 · az _i)	sin(2 · az _i) · cos(3 · az _i)
c2	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(2 · az _i)	cos(2 · az _i) · sin(2 · az _i)	cos ² (2 · az _i)	cos(2 · az _i) · sin(3 · az _i)	cos(2 · az _i) · cos(3 · az _i)
c3	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · sin(3 · az _i)	sin(3 · az _i) · sin(2 · az _i)	sin(3 · az _i) · cos(2 · az _i)	sin ² (2 · az _i)	sin(3 · az _i) · cos(3 · az _i)
c4	$\frac{1}{\cos(h_i)}$ · cos(3 · az _i)	cos(3 · az _i) · sin(2 · az _i)	cos(3 · az _i) · cos(2 · az _i)	cos(3 · az _i) · sin(3 · az _i)	cos ² (3 · az _i)

Tabelle A.4: Parameter der Informationsmatrix des Höhenoffsets ohne \sum und $\frac{1}{\sigma^2}$

Anhang B

Abbildungen

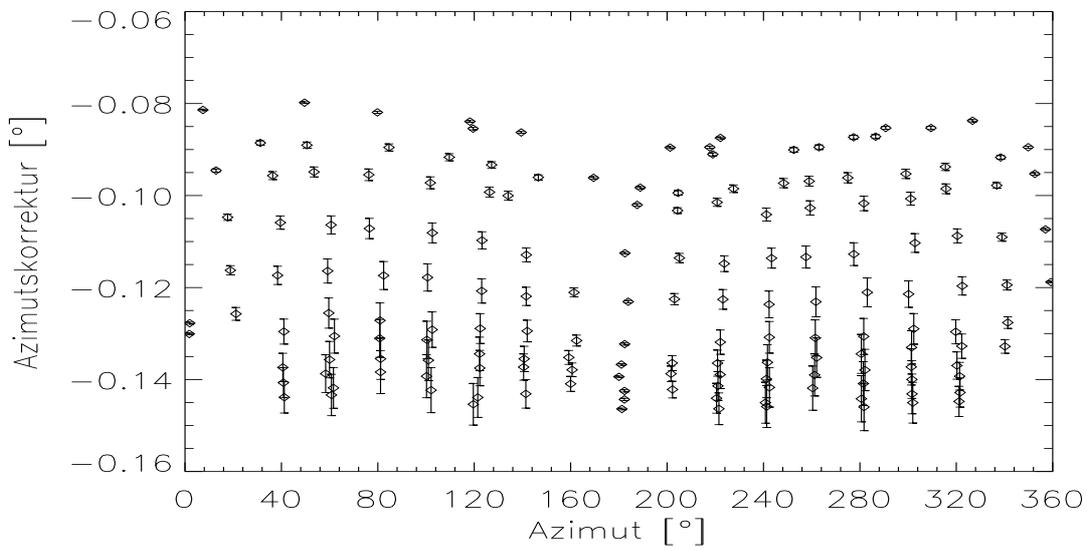


Abbildung B.1: Azimutkorrektur vs. Azimut

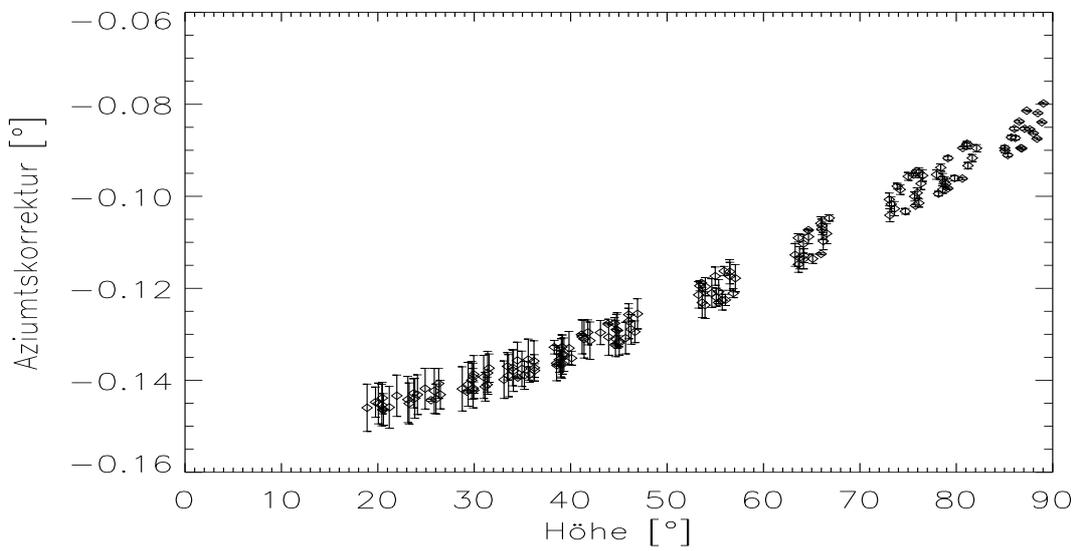


Abbildung B.2: Azimutkorrektur vs. Höhe

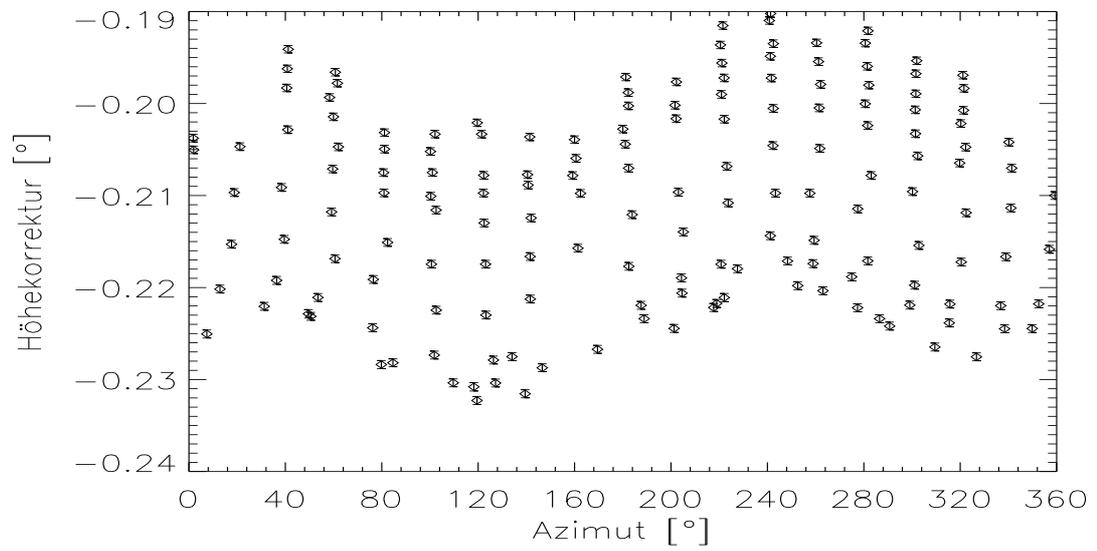


Abbildung B.3: Höhenkorrektur vs. Azimut

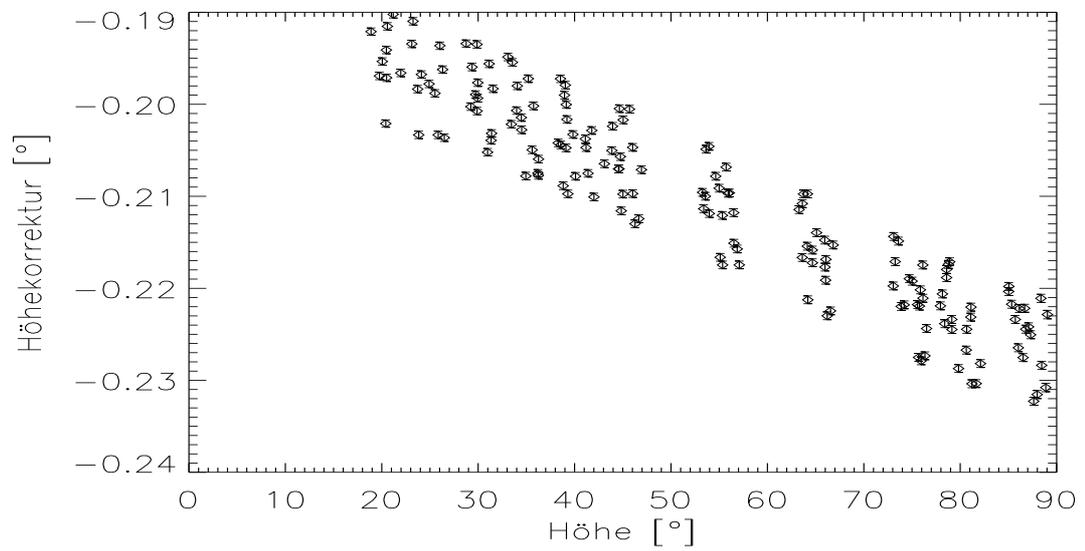


Abbildung B.4: Höhenkorrektur vs. Höhe

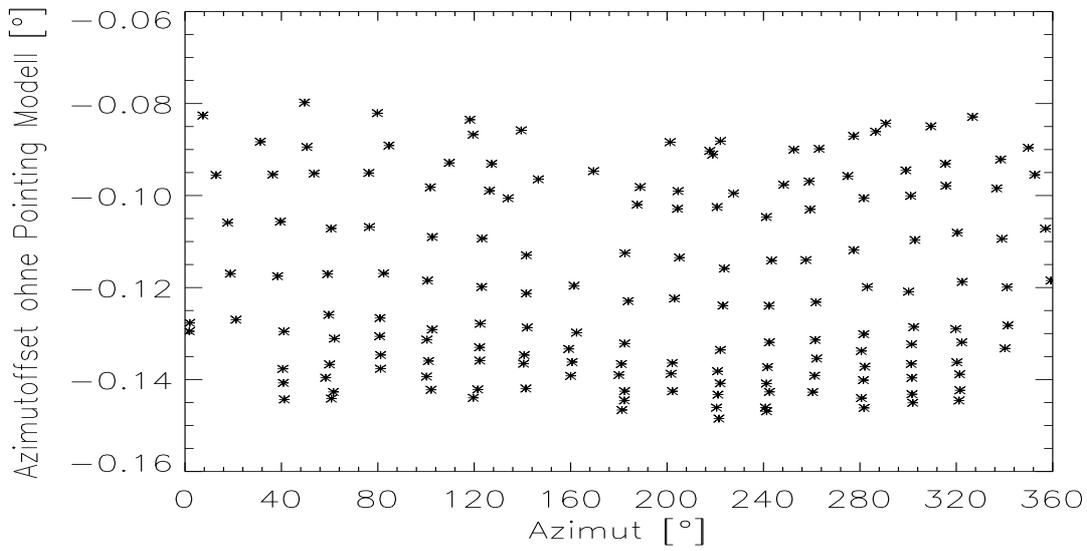


Abbildung B.5: Azimutoffsets ohne Pointing Modell vs. Azimut

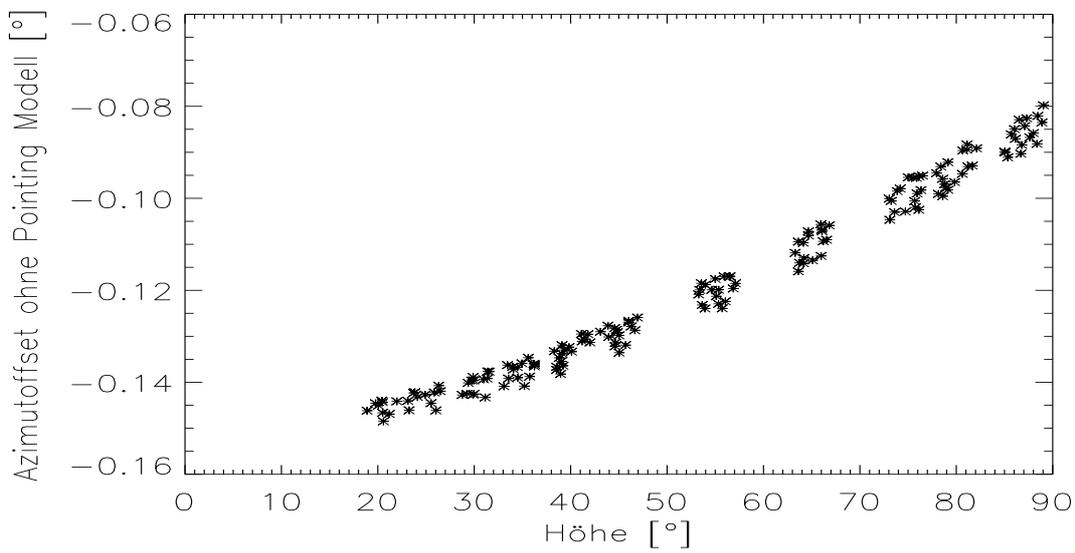


Abbildung B.6: Azimutoffsets ohne Pointing Modell vs. Höhe

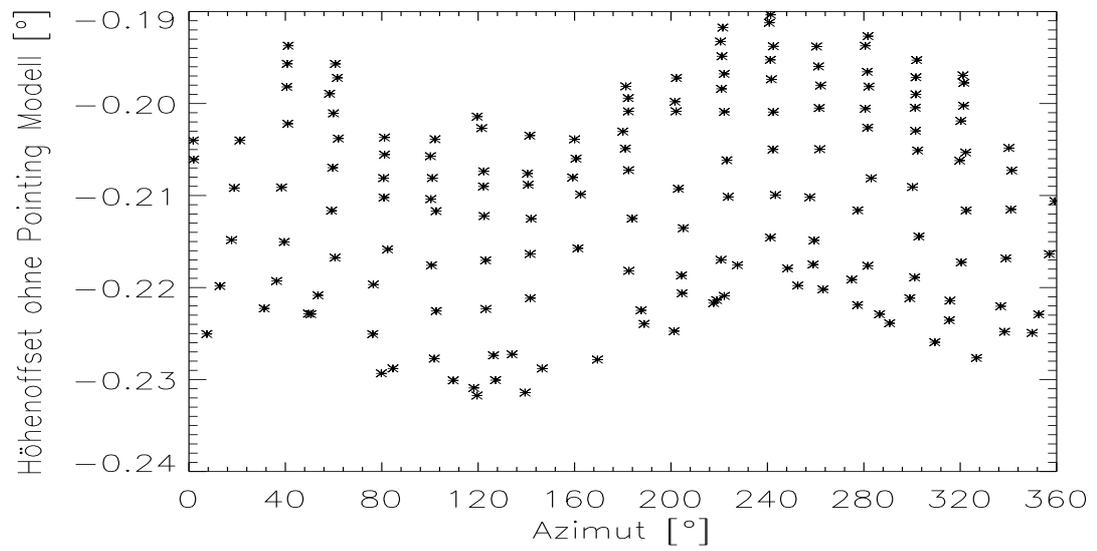


Abbildung B.7: Höhenoffsets ohne Pointing Modell vs. Azimut

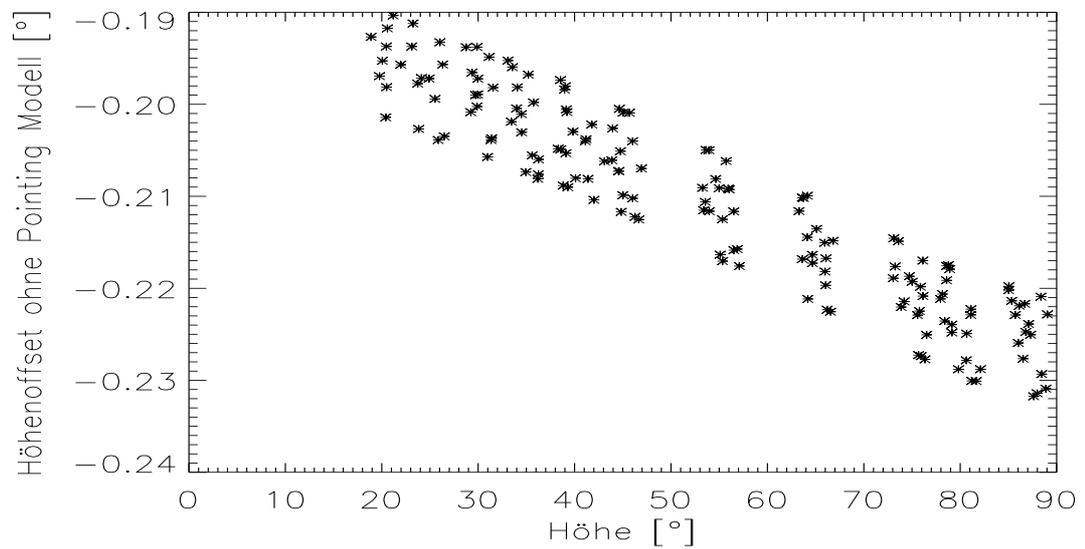


Abbildung B.8: Höhenoffsets ohne Pointing Modell vs. Höhe

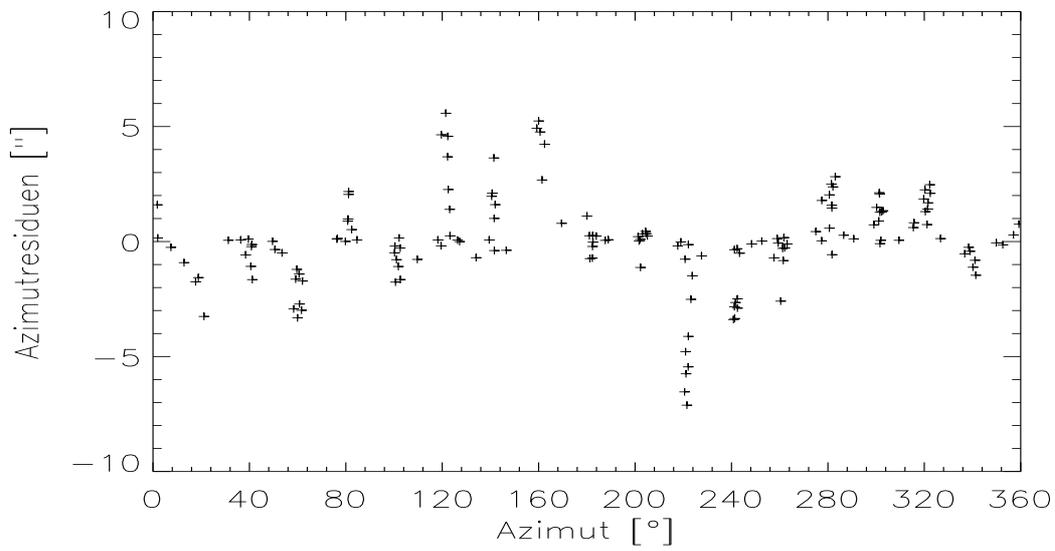


Abbildung B.9: Azimutresiduen vs. Azimut

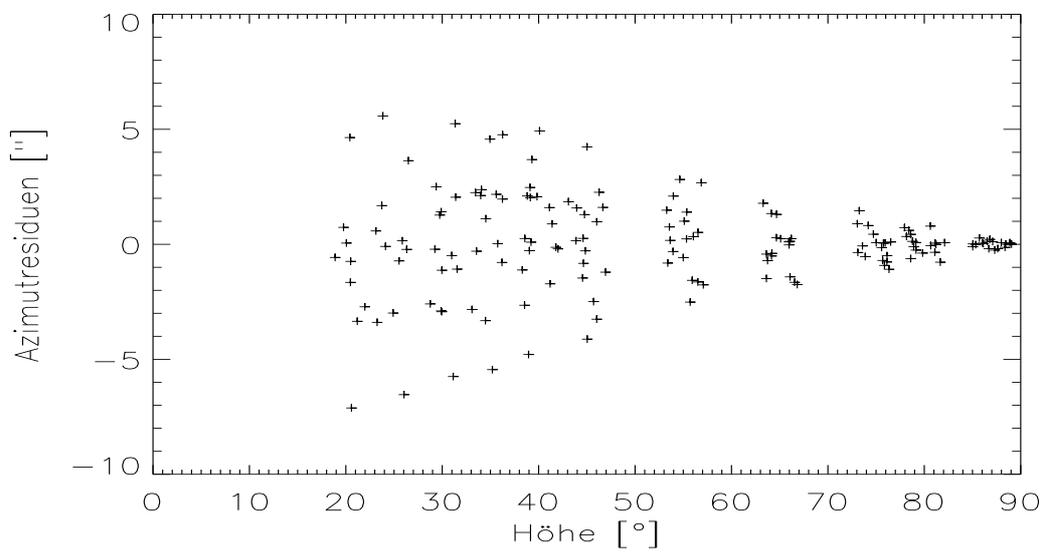


Abbildung B.10: Azimutresiduen vs. Höhe

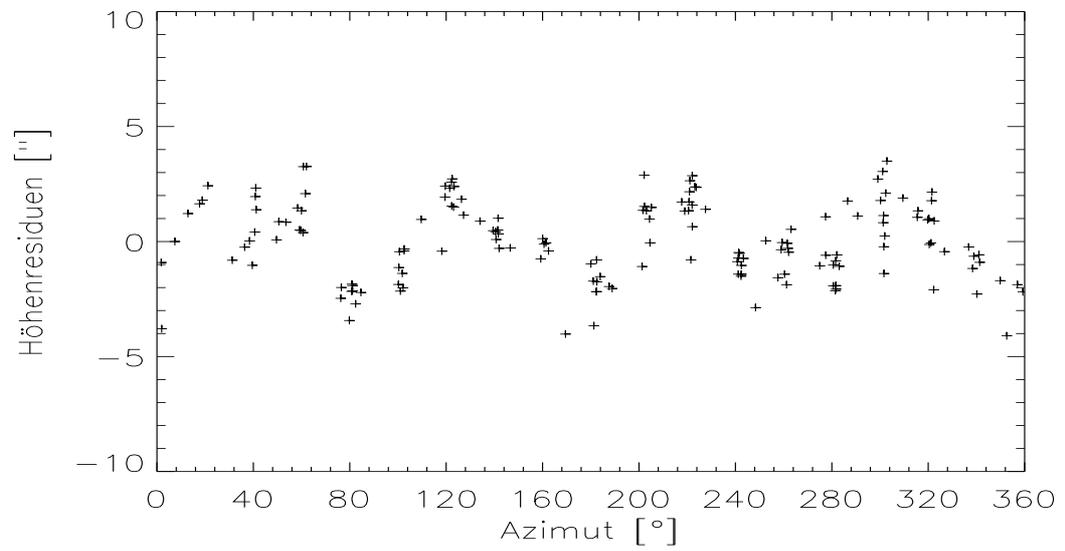


Abbildung B.11: Höhenresiduen vs. Azimut

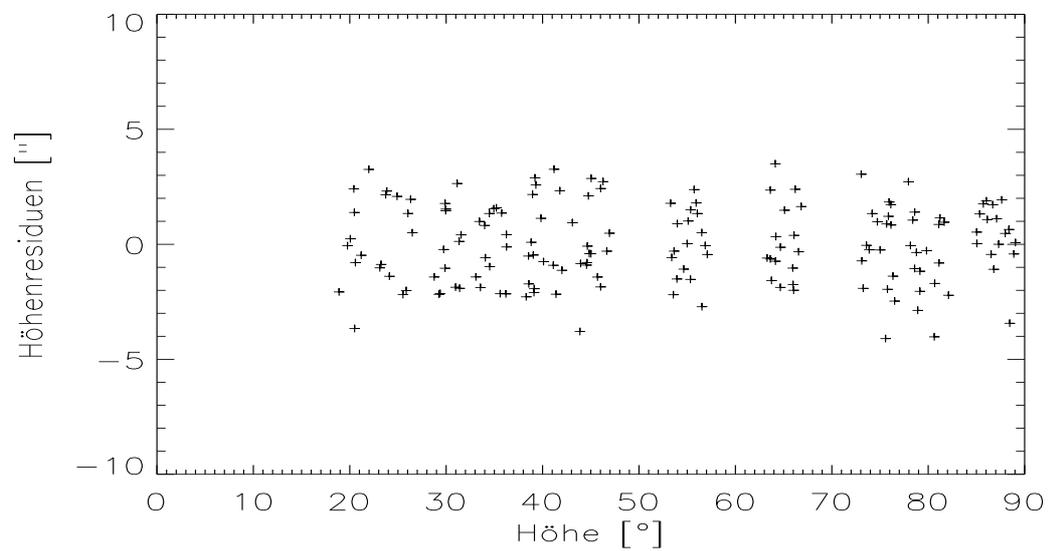


Abbildung B.12: Höhenresiduen vs. Höhe

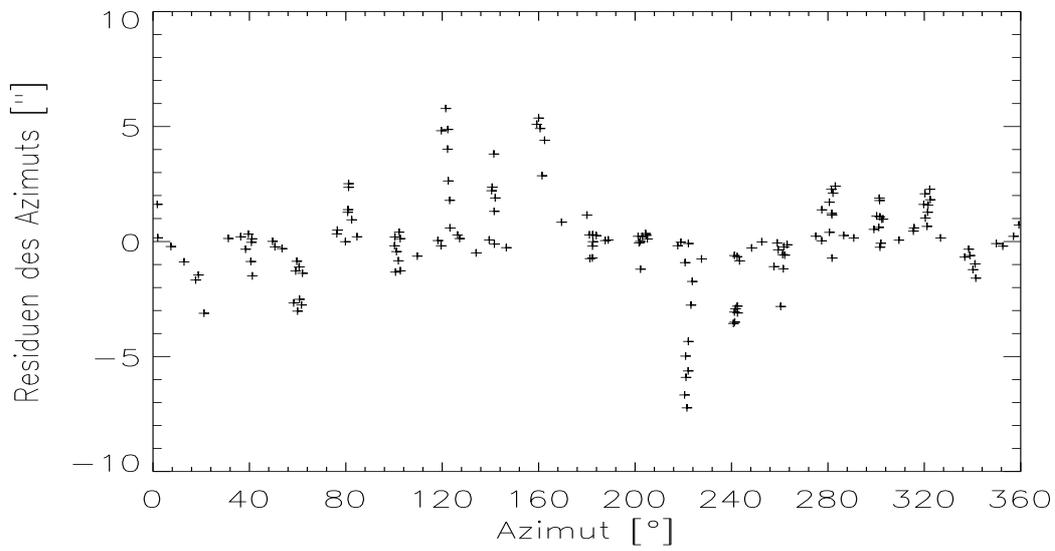


Abbildung B.13: Azimutresiduen vs. Azimut aus der Modellrechnung, ohne AES und AEC

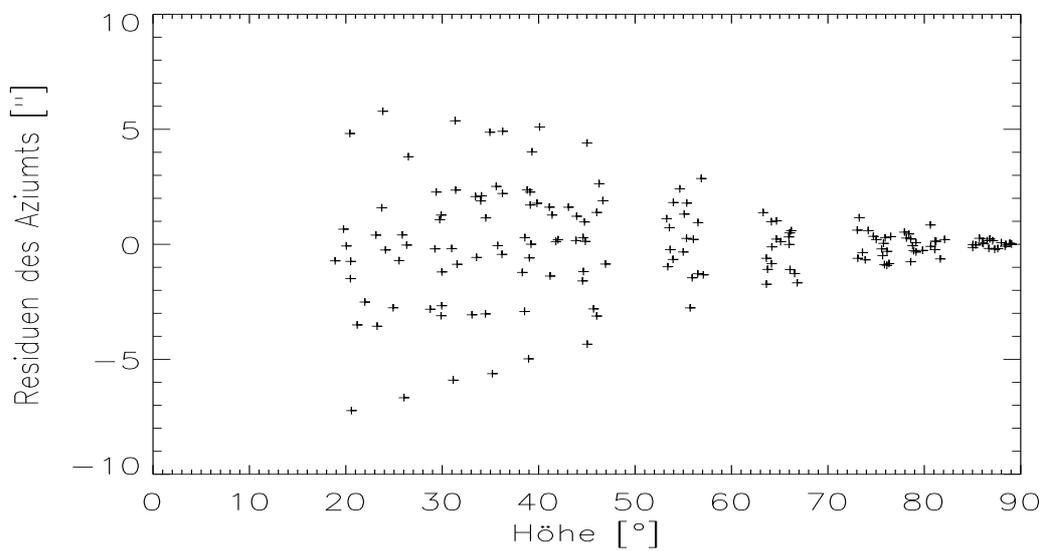


Abbildung B.14: Azimutresiduen vs. Höhe aus der Modellrechnung, ohne AES und AEC

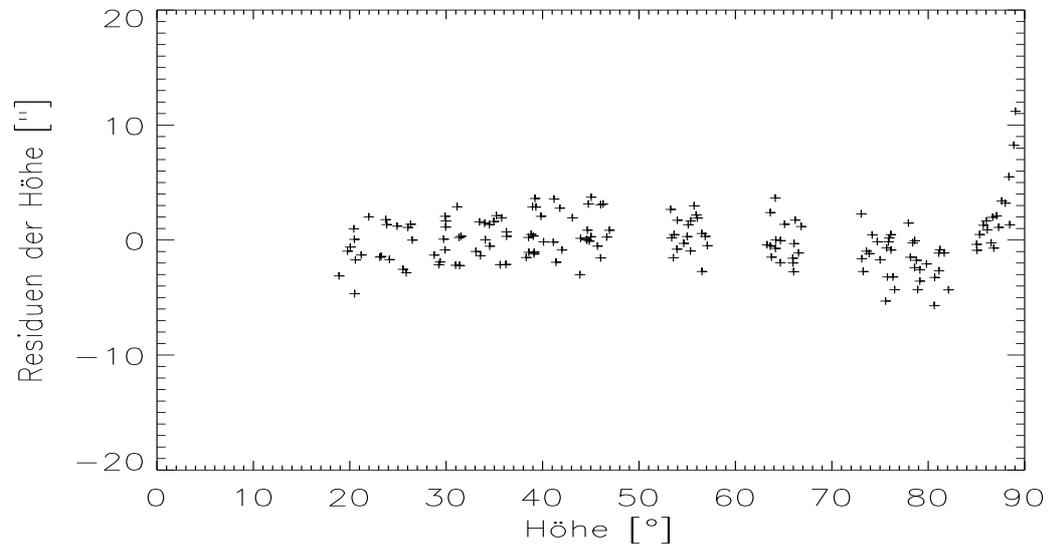


Abbildung B.15: Azimutresiduen vs. Höhe aus der Modellrechnung, ohne c5

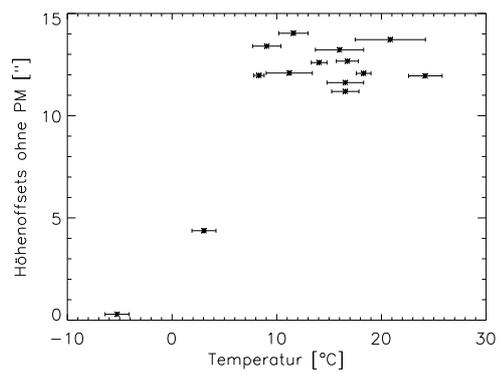


Abbildung B.16: Temperaturverlauf der Höhendiffsets ohne Pointing Modell $az \approx 160$ $h \approx 40$

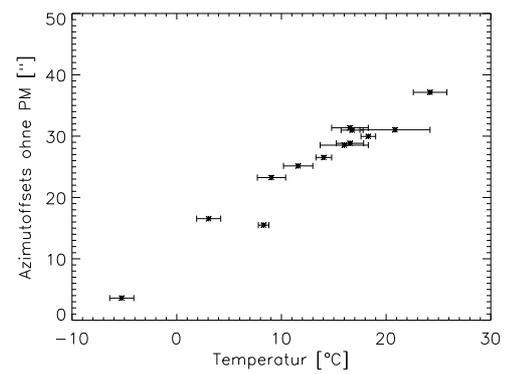


Abbildung B.17: Temperaturverlauf der Azimutdiffsets ohne Pointing Modell $az \approx 160$ $h \approx 40$

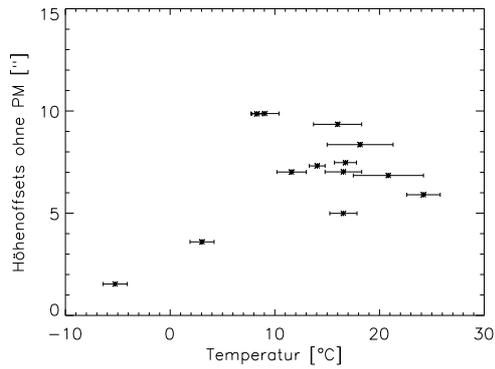


Abbildung B.18: Temperaturverlauf der Höhenoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 160 h \approx 80

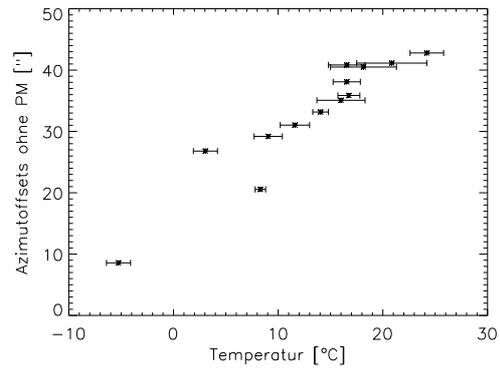


Abbildung B.19: Temperaturverlauf der Azimutoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 160 h \approx 80

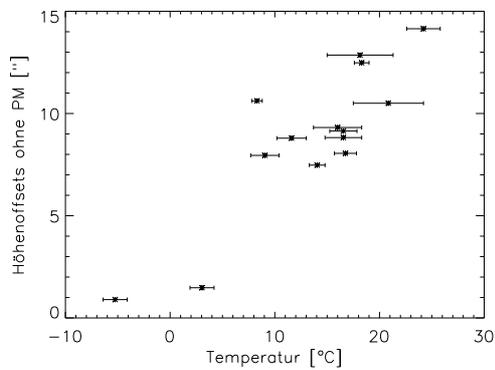


Abbildung B.20: Temperaturverlauf der Höhenoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 240 h \approx 40

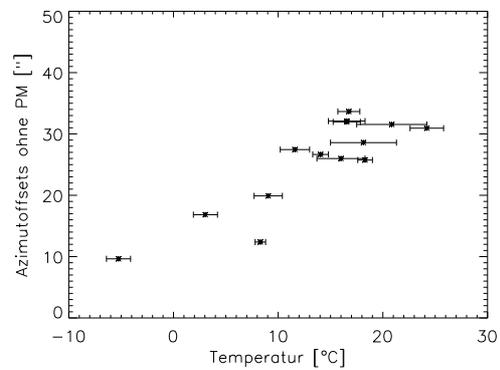


Abbildung B.21: Temperaturverlauf der Azimutoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 240 h \approx 40

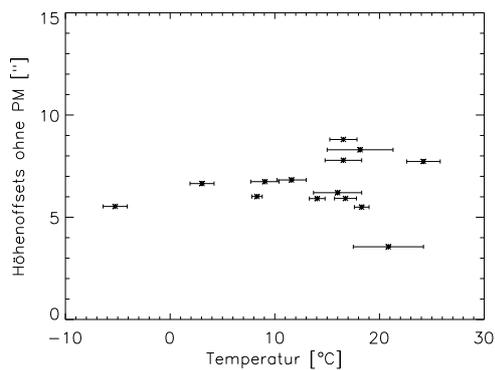


Abbildung B.22: Temperaturverlauf der Höhenoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 240 h \approx 80

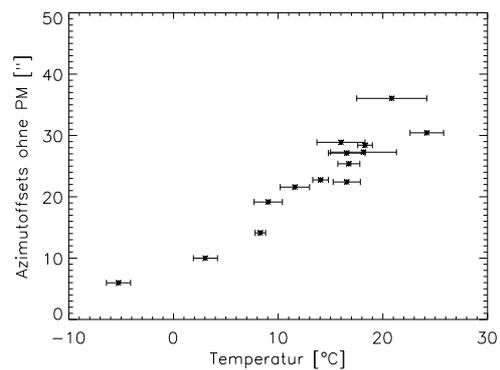


Abbildung B.23: Temperaturverlauf der Azimutoffsets ohne Pointing Modell
az \approx 240 h \approx 80

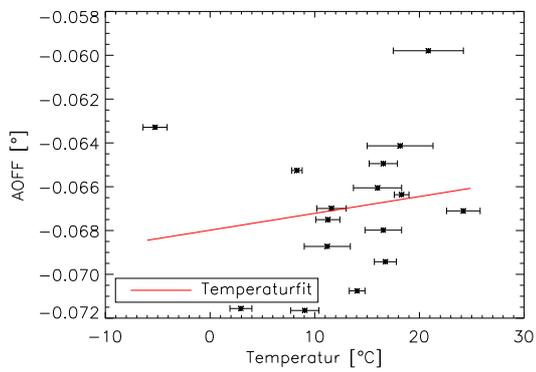


Abbildung B.24: Temperaturverlauf des Parameters AOFF

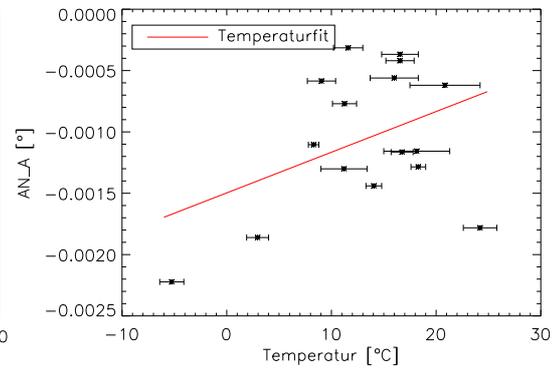


Abbildung B.25: Temperaturverlauf des Parameters AN_A

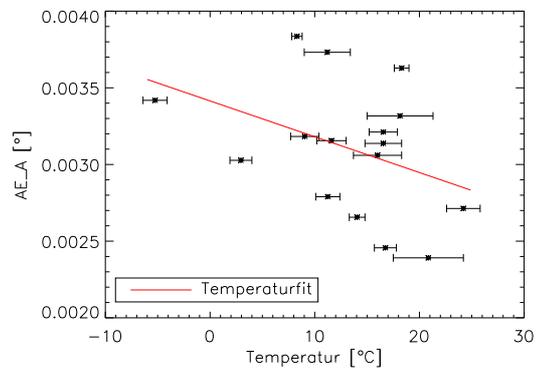


Abbildung B.26: Temperaturverlauf des Parameters AE_A

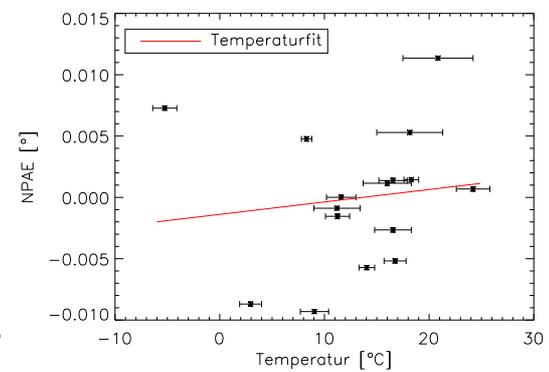


Abbildung B.27: Temperaturverlauf des Parameters NPAE

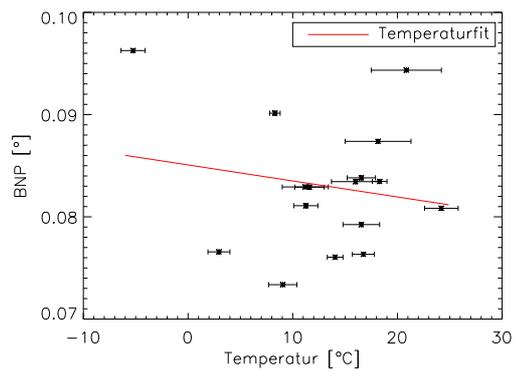


Abbildung B.28: Temperaturverlauf des Parameters BNP

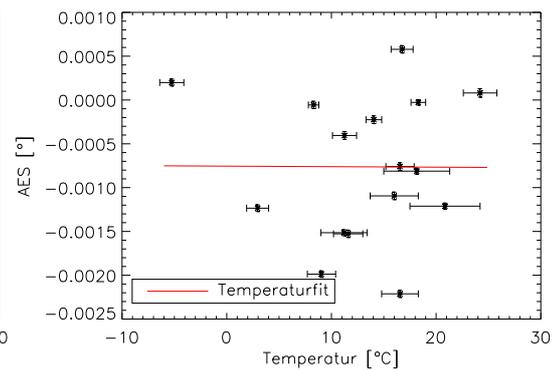


Abbildung B.29: Temperaturverlauf des Parameters AES

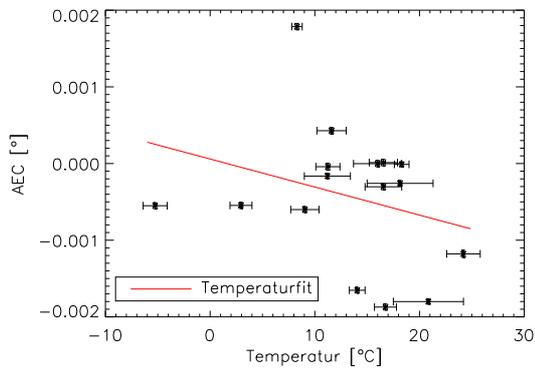


Abbildung B.30: Temperaturverlauf des Parameters AEC

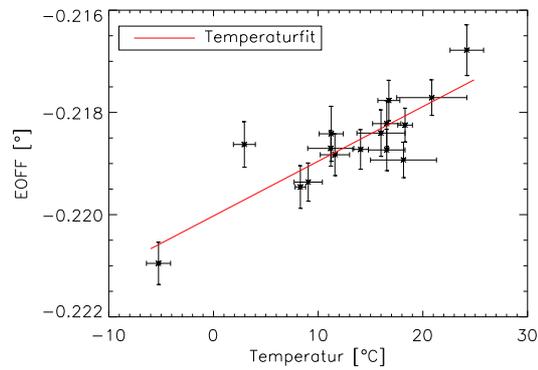


Abbildung B.31: Temperaturverlauf des Parameters EOFF

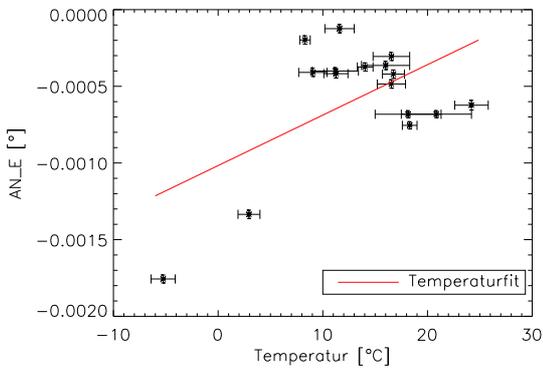
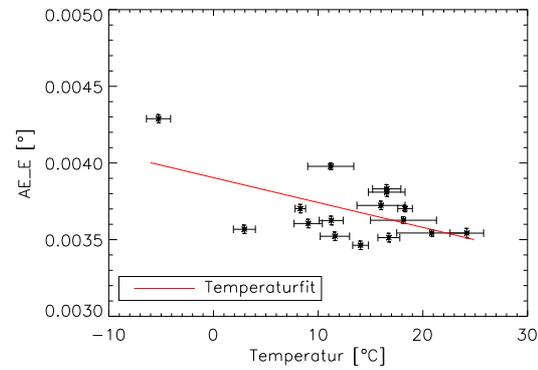
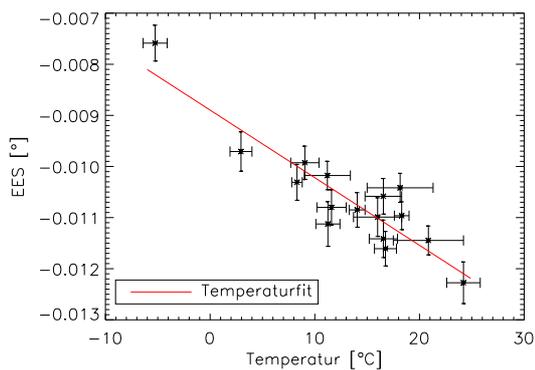
Abbildung B.32: Temperaturverlauf des Parameters AN_EAbbildung B.33: Temperaturverlauf des Parameters AE_E

Abbildung B.34: Temperaturverlauf des Parameters EES

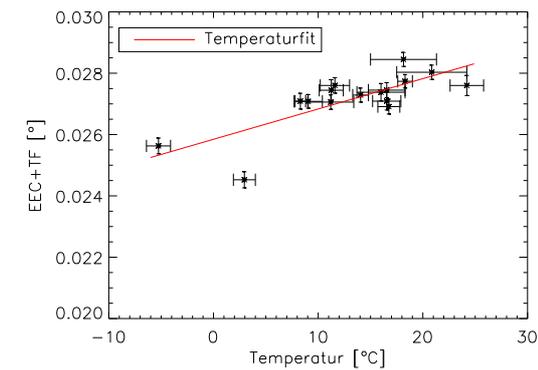
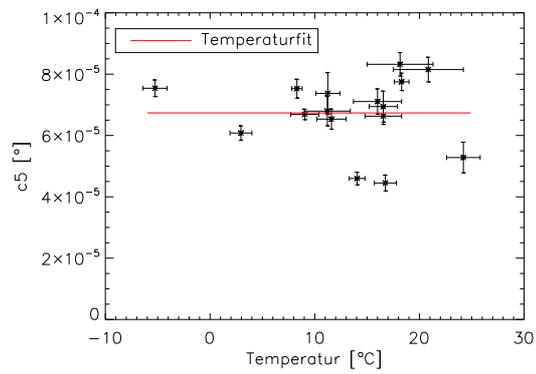
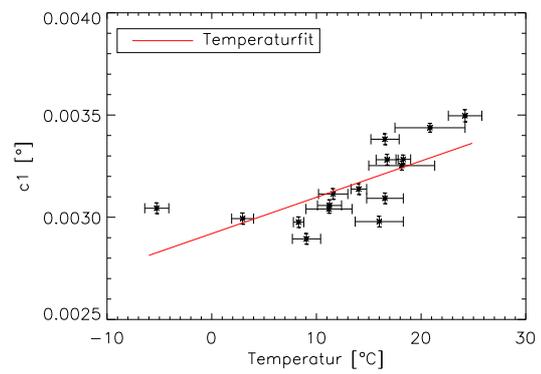
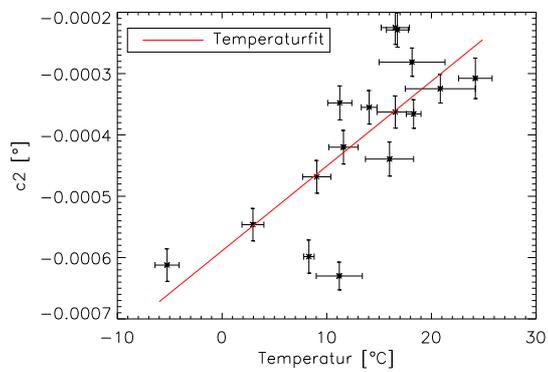
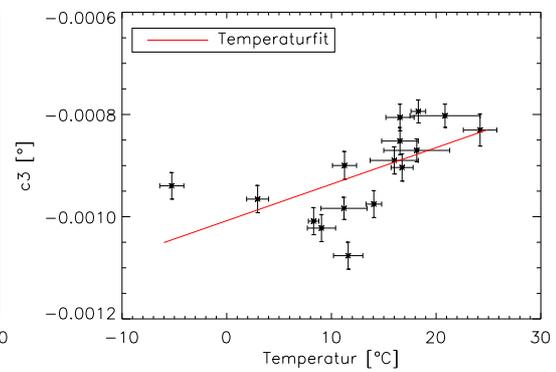
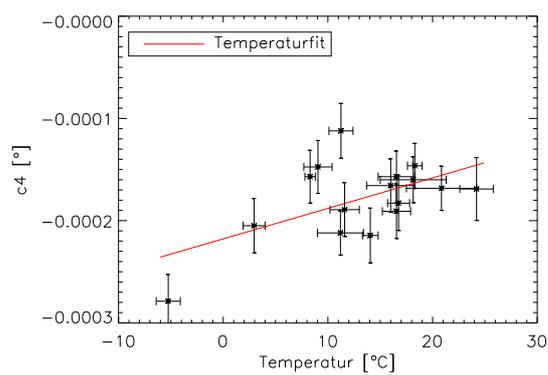


Abbildung B.35: Temperaturverlauf des Parameters EEC+TF

Abbildung B.36: Temperaturverlauf des Parameters c_5 Abbildung B.37: Temperaturverlauf des Parameters c_1 Abbildung B.38: Temperaturverlauf des Parameters c_2 Abbildung B.39: Temperaturverlauf des Parameters c_3 Abbildung B.40: Temperaturverlauf des Parameters c_3

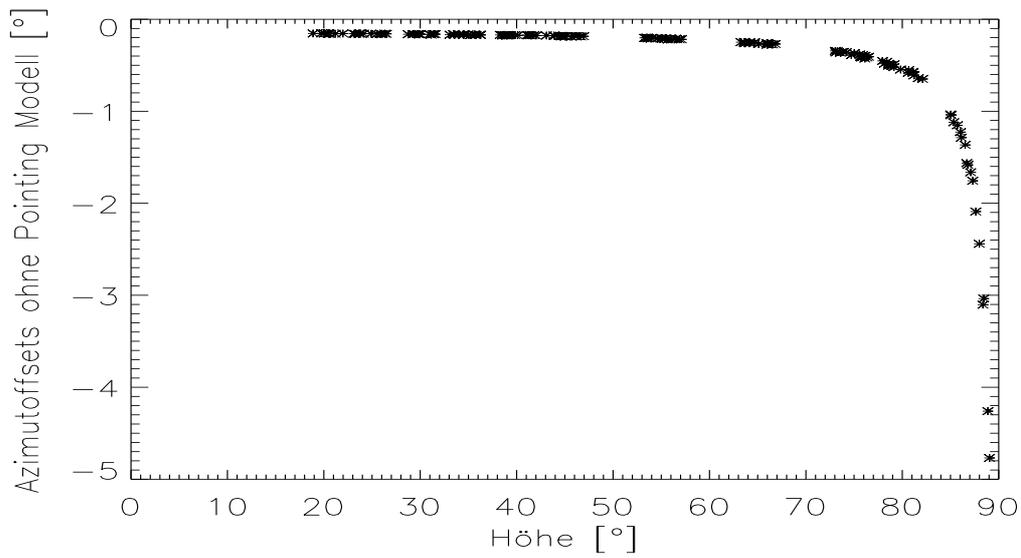


Abbildung B.41: Verlauf der Azimutoffsets ohne Pointing Modell aus sicht des Encoders vs. Höhe

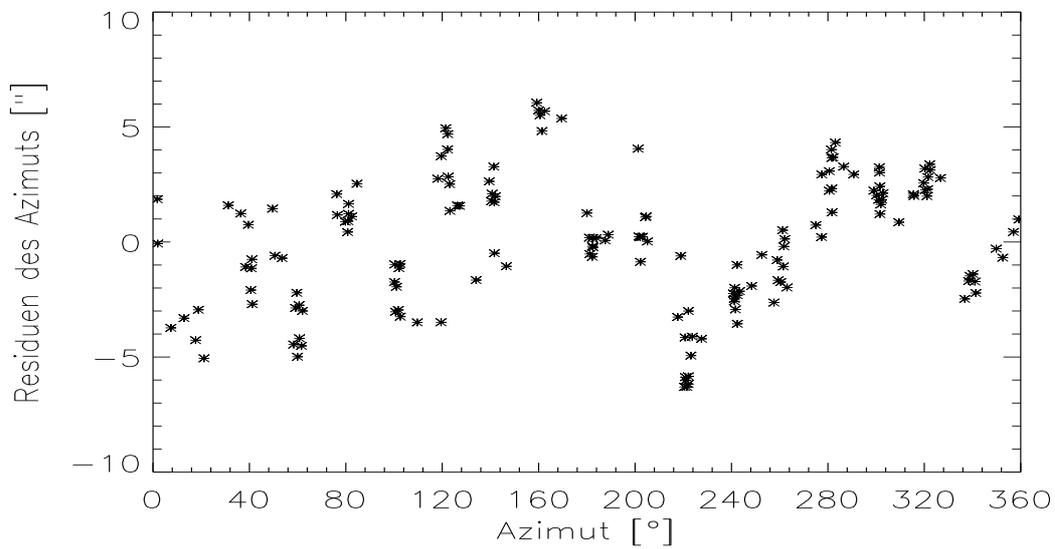


Abbildung B.42: Modellrechnung mit der Gleichung (2.24) Azimutresiduen vs. Azimut

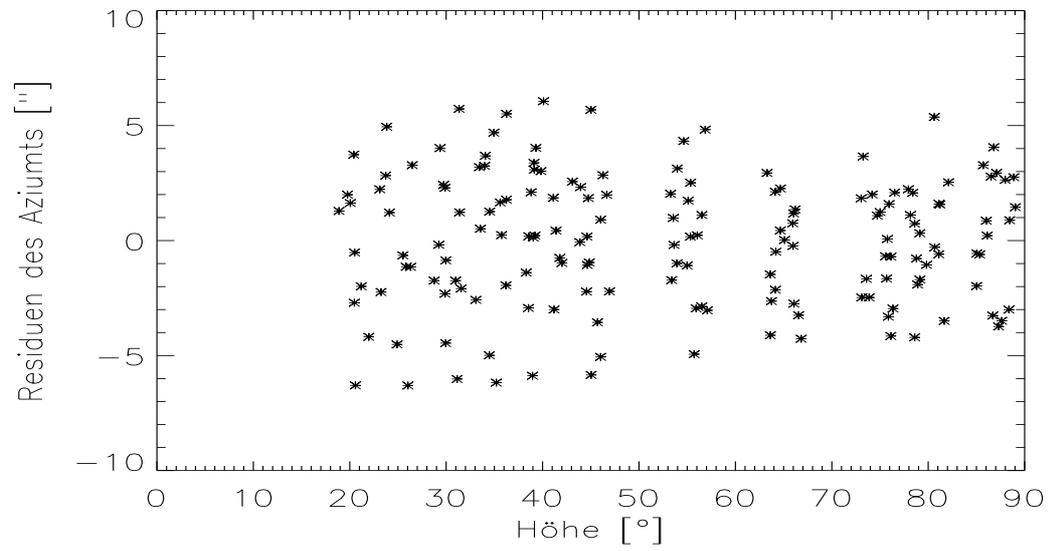


Abbildung B.43: Modellrechnung mit der Gleichung (2.24) Azimutresiduen vs. Höhe

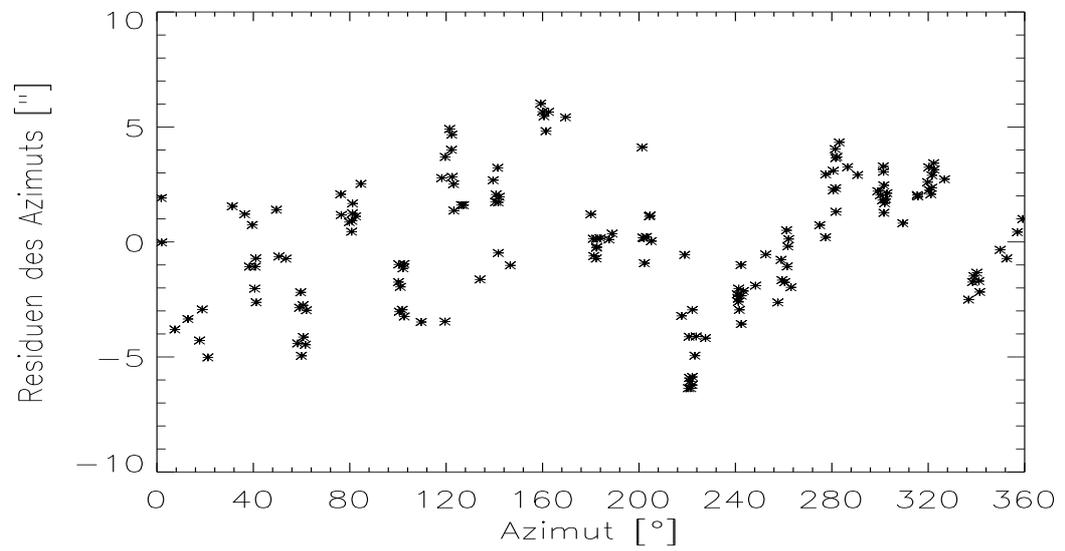


Abbildung B.44: Modellrechnung mit der Gleichung (2.24) Azimutresiduen vs. Azimut ohne AEC

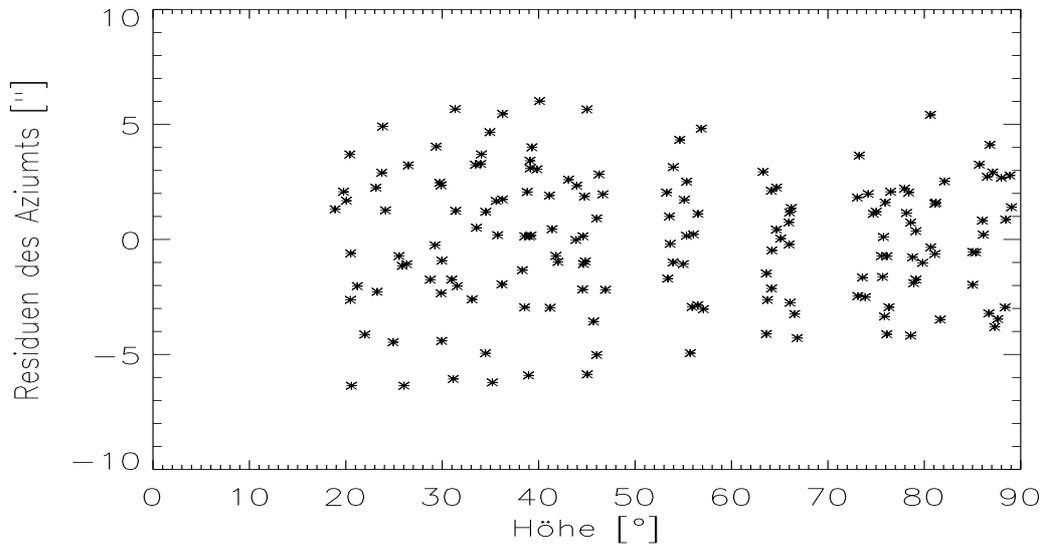


Abbildung B.45: Modellrechnung mit der Gleichung (2.24) Azimutresiduen vs. Höhe ohne AEC

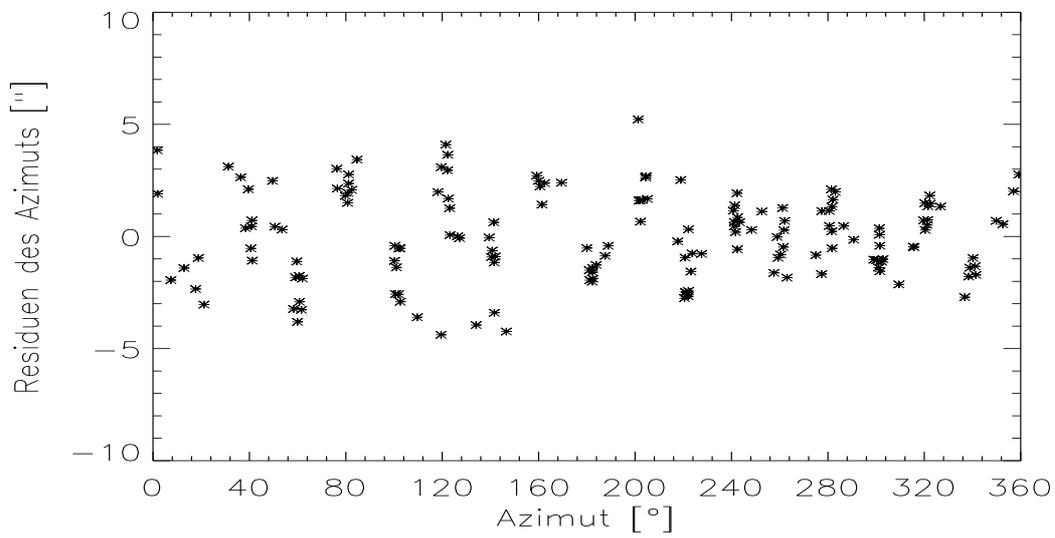


Abbildung B.46: Modellrechnung mit der Gleichung (2.24) Azimutresiduen vs. Azimut unter Berücksichtigung der 180° und 120° Welle

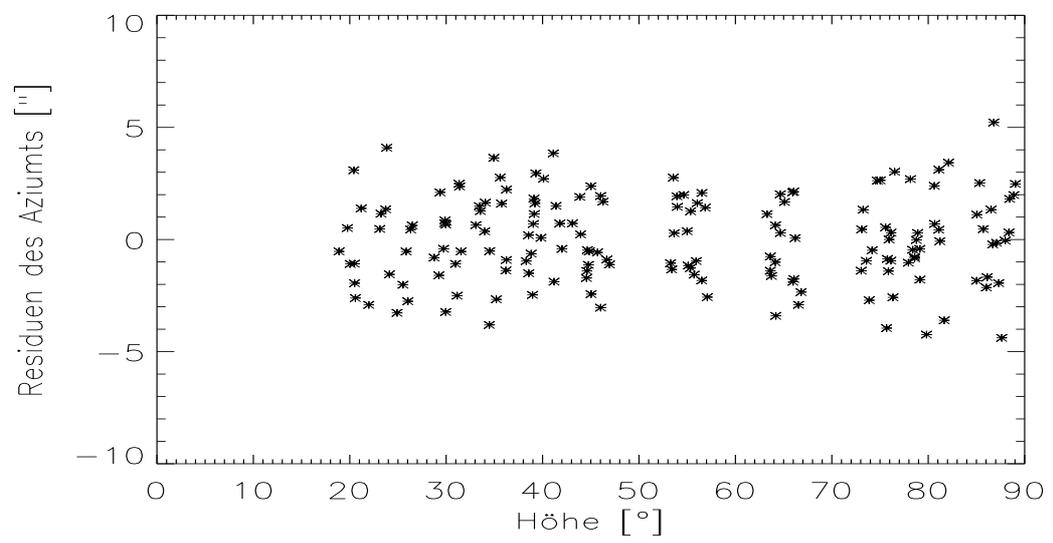


Abbildung B.47: Modellrechnung mit der Gleichung (2.24) Azimutresiduen vs. Höhe unter Berücksichtigung der 180° und 120° Welle

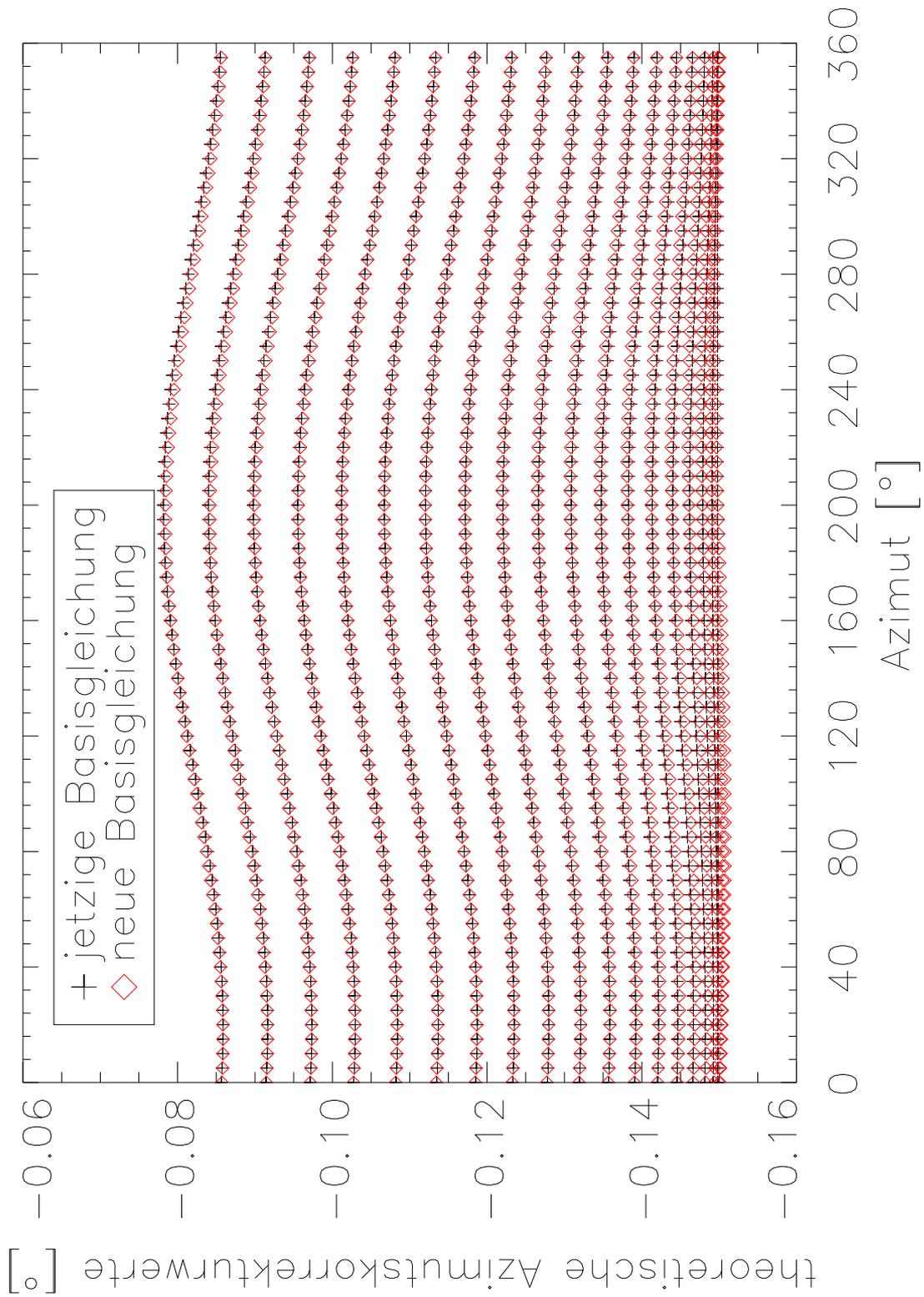


Abbildung B.48: Vergleich der theoretischen Korrekturwerte

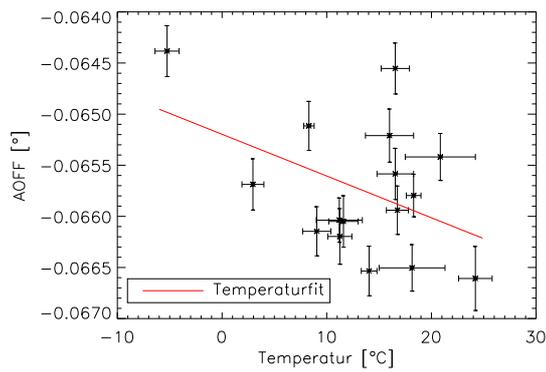


Abbildung B.49: Temperaturverlauf des Parameters AOFF, Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

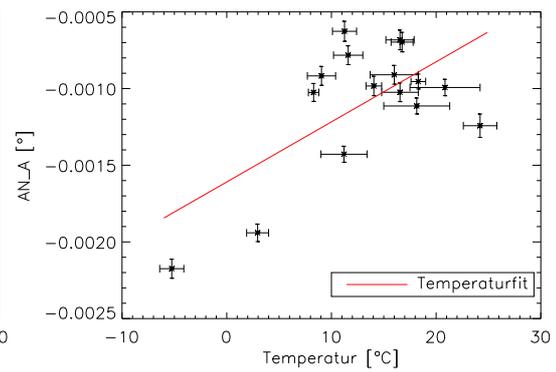


Abbildung B.50: Temperaturverlauf des Parameters AN_A , Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

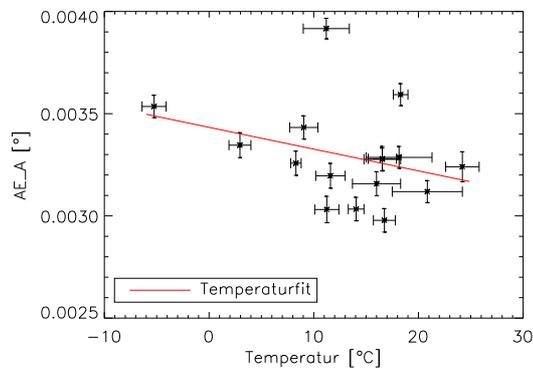


Abbildung B.51: Temperaturverlauf des Parameters AE_A , Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

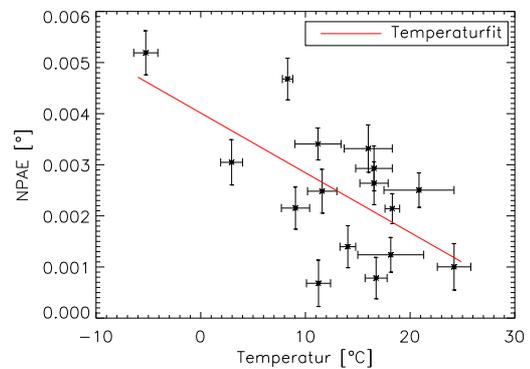


Abbildung B.52: Temperaturverlauf des Parameters NPAE, Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

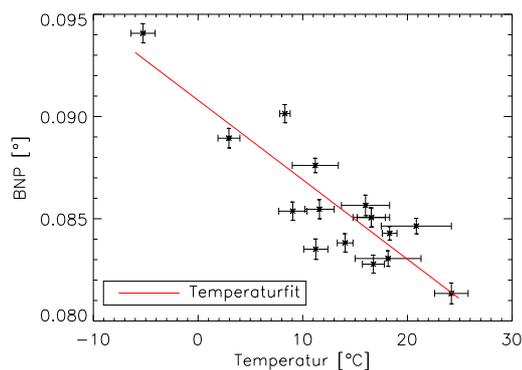


Abbildung B.53: Temperaturverlauf des Parameters BNP, Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

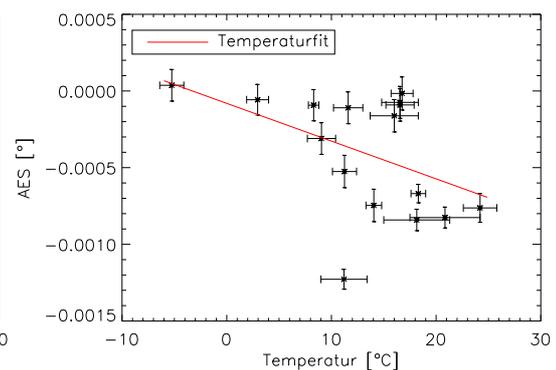


Abbildung B.54: Temperaturverlauf des Parameters AES, Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

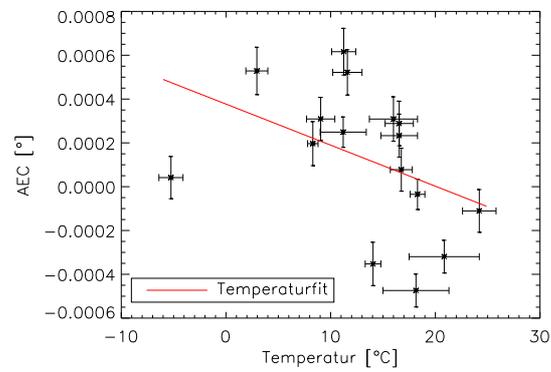


Abbildung B.55: Temperaturverlauf des Parameters AEC, Parameter berechnet mit der Basisgleichung (2.24)

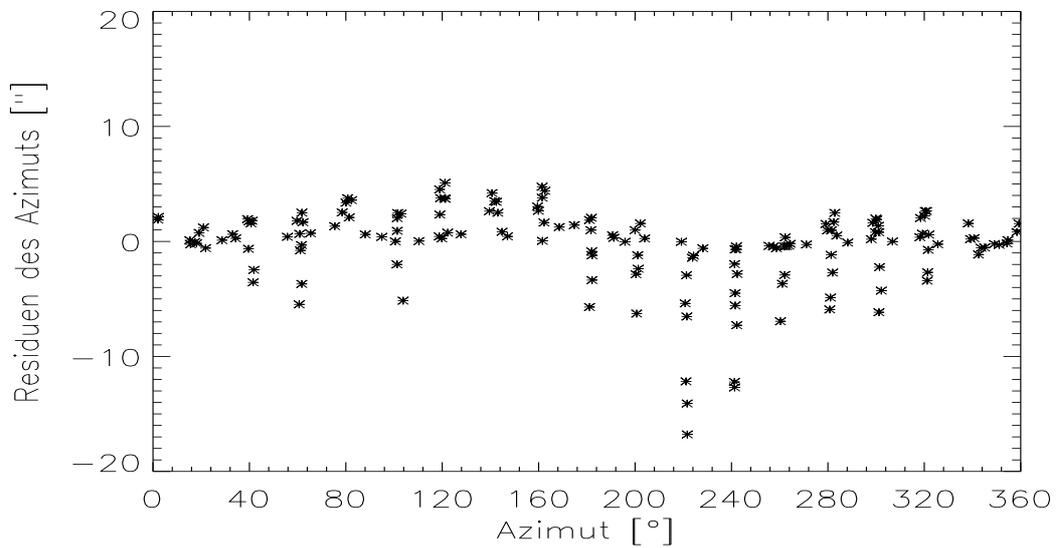


Abbildung B.56: Azimutresiduen vs. Azimut, von der Pointingmessung am 19.07.2006

Literaturverzeichnis

- [1] Jean Meeus, Astronomical Algorithms Second Edition, Willmann-Bell, Inc. 1998
- [2] William H. Press Brian P. Flannery Saul A. Teukolsy William T. Vetterling, Numerical Recipes, Cambridge University Press, 1986
- [3] , The Astronomical Almanac for the year 2006, Washington: U.S. Government Printing Office London: the Stationery Office
- [4] Alfred Weigert Heinrich J. Wendker, Astronomie und Astrophysik, 3. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, 1996
- [5] H. H. Voigt, Abriss der Astronomie 4. Auflage, Wissenschaftsverlag Mannheim/Wien/Zürich 1988
- [6] A. Unsöld B. Baschek, Der neue Kosmos, 4. Auflage Springer Verlag 1988
- [7] Helmut Zimmermann Alfred Weigert Lexikon der Astronomie, 8. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin
- [8] Torsten Fließbach, Allgemeine Relativitätstheorie, 4. Auflage 2003, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg und Berlin
- [9] Hanns und Margret Ruder, Die Spezielle Relativitätstheorie, Vieweg Studium, 1993
- [10] A. W. Strong, Data analysis in gamma-ray astronomy: multivariate likelihood method for correlation studies, Astron. Astrophys. 150,273-275, 1985
- [11] Daniel Plaza, Diplomarbeit, Aufbau und Erprobung eines Robot- Teleskops- Steuersoftware für das Stella Teleskop, Universität Tübingen, 01.11.2001
- [12] www.iers.org
- [13] www.jach.hawaii.edu/JCMT/telescope/pointing/parameters.html
- [14] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polbewegung>
- [15] Alexander Hempelmann,
www.hs.uni-hamburg.de/DE/Ins/Per/Hempelmann/HRT/index.html
- [16] Jose Nicolas Gonzalez Perez und Alexander Hempelmann, HRT Software Preliminary Concept Description, 27.02.2006

- [17] Alexander Hempelmann, Abschlussbericht zur Testphase des Stella I Teleskopes, 11.05.2004
- [18] J. H. M. M. Schmitt, D. Reimers, A. Hempelmann, STELLA Ein Roboter-Teleskop zur Untersuchung stellarer Aktivität
- [19] www.aip.de/stella
- [20] Heidenhain, Kataloge Winkelmeßsysteme (März 1999) und Lieferübersicht

Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, ganz besonders bei meiner Frau für ihre Unterstützung und ihr Verständnis. An dieser Stelle möchte ich meiner Mutter gedenken, die leider den Abschluss dieser Arbeit nicht mehr miterleben durfte. Ohne ihre Unterstützung und ihren Zuspruch wäre das Studium sehr viel schwieriger gewesen.

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Jürgen H. M. M. Schmitt für die Vergabe dieses interessanten Themas bedanken, dass mir einen kleinen Einblick in die Teleskoptechnik erlaubt hat.

Bei Prof. Dr. Günter Wiedemann möchte ich mich bedanken dafür, dass er sich bereit erklärt hat die Aufgabe des Zweitkorrektors zu übernehmen.

Einen besonderen Dank möchte ich an Dr. Alexander Hempelmann, der mich während dieser Arbeit betreut hat und an Dr. Jose Nicolas Gonzalez Perez richten dafür, dass sie mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Bei Dr. Alexander Hempelmann, Boris Rockenfeller und meiner Frau möchte ich mich nochmals, für das Korrekturlesen, den vielen hilfreichen Tipps und Anmerkungen zur Struktur sowie zum Inhalt dieser Arbeit, bedanken.

Desweiteren möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mir meine Fragen beantwortet haben. Eine meiner häufigsten Fragen in der Anfangszeit war z. B.: "Ich habe ein IDL-Problem und zwar ...?"

Auch möchte ich mich noch bei allen Kolleginnen und Kollegen für die tolle Arbeitsatmosphäre und freundliche Aufnahme bedanken.

Erklärung

Ich, Marco Mittag, versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und nur die hier angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Des weiteren erkläre ich mich mit dem Verleih und der Veröffentlichung dieser Arbeit einverstanden.

Unterschrift

Hamburg, den 11.10.2006

