

## *Auswertung radioastronomischer Messungen*



Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2013

Friederike Fürst (16 Jahre)

Julia Bienert (18 Jahre)

Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“  
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg  
Leitung: StD Thomas Biedermann

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	1
2.1	Prinzipieller Aufbau eines Radioteleskops	1
2.2	Die Einheit Dezibel	1
3	Messaufbauten	2
3.1	Der 70 cm – Reflektor	2
3.2	Der 180 cm – Reflektor	3
3.3	Auswertungselektronik	4
4	Messungen	5
4.1	Vergleich der Signalstärke bei unterschiedlicher Reflektorgröße	5
4.2	Vergleich der Signalintensität in Abhängigkeit mit der Polarisierung	6
4.3	Vergleich der Empfänger	7
4.4	Satellitenvermessung	7
4.5	Sonnenvermessung	8
5	Auswertung	8
5.1	Vergleich der Signalstärke bei unterschiedlicher Reflektorgröße	8
5.2	Vergleich der Signalintensität in Abhängigkeit mit der Polarisierung	9
5.3	Vergleich der Empfänger	9
5.4	Satellitenvermessung	10
5.5	Sonnenvermessung	12
5.6	Fehlerquellen	14
6	Fazit	14
7	Danksagung	15
8	Quellen	15

## 1 Einleitung

An unserer Schule läuft im Moment ein längerfristig angelegtes Projekt zum Aufbau eines 4m-Radioteleskops. Bereits im Vorjahr konnten mit einem kleineren Exemplar (70 cm Reflektordurchmesser) erste Messungen gemacht werden. In unserem aktuellen Projekt beschäftigen wir uns deshalb etwas näher mit der Auswertung dieser und weiterer Messungen. Dazu wenden wir ein selbstgeschriebenes Programm und Excel an. Die Messungen selbst haben wir mit zwei unterschiedlichen Aufbauten gemacht, dies erlaubte uns den Einfluss einzelner Parameter und der eingesetzten Komponenten vergleichen zu können.

## 2 Theorie

### 2.1 Prinzipieller Aufbau eines Radioteleskops

Da Radiostrahlung nicht mit bloßem Auge wahrgenommen werden kann, benötigt man einen besonderen Aufbau um sie zu detektieren, ein sog. Radioteleskop. Grundsätzlich besteht ein Radioteleskop aus zwei großen Komponenten, einer Empfangseinheit, die elektromagnetische Wellen in ein elektrisches Signal umwandelt und eine nachgestellte Empfangselektronik zur Auswertung der Signale, z.B. zur Messung der empfangenen Energie.

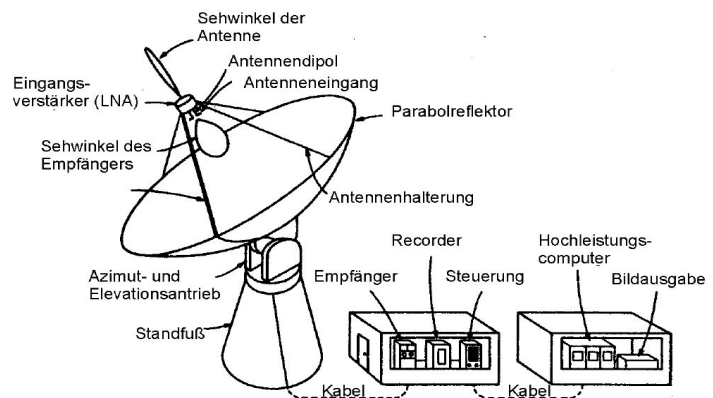


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Radioteleskops

Als Empfänger könnte bereits eine sehr einfache Antenne oder ein Dipol genügen. Da die natürliche Radiostrahlung aber sehr schwach ist, muss sie für sinnvolle Ergebnisse mit einer möglichst großen, reflektierenden Fläche aufgefangen und auf den Empfänger gebündelt werden. Dazu dient ein Parabolreflektor, ähnlich wie eine Satellitenschüssel. Die vom Empfänger umgesetzten Signale werden dann anschließend verstärkt und mit einem Filter auf einen kleineren Frequenzbereich beschränkt, um den Einfluss von Störquellen zu vermindern, die mit einer Frequenz nahe der eigentlichen Beobachtungsfrequenz senden. Da der Verlust in den Leitung umso höher ist, je höher die Frequenz des Signals ist, wird es durch die Überlagerung mit einem Signal bekannter, konstanter Frequenz noch auf eine niedrigere Frequenz herunter gemischt. Anschließend wird sie mit einem Tiefpassfilter ausgekoppelt und weiterverarbeitet. In z.B. einem LNB, einem Empfänger für Satellitenfernsehen, geschieht das alles direkt hinter dem Empfangsdipol.

Da Radioteleskope im Gegensatz zu optischen immer nur einen einzigen Punkt betrachten können, muss ein Radioteleskop zur Beobachtung größerer Himmelausschnitte oder längerer Messung einer beweglichen Quelle ebenfalls drehbar sein.

### 2.2 Die Einheit Dezibel

Da die Amplituden der Signale, die bei radioastronomischen Messung auftreten können, meistens viele Größenordnungen abdecken, wurde eine logarithmische Darstellung der Werte eingeführt. Dadurch lassen sie sich in einem Diagramm übersichtlicher und damit auch leichter auswertbar darstellen. Dabei muss allerdings darauf geachtet werden, dass ein Schritt auf der Hochachse nicht mehr einer Addition entspricht, sondern eine Multiplikation darstellt. Dazu werden die

Signalwerte, z.B. eine Leistung  $P_w$  in Watt, umgerechnet in ihre Entsprechung in der Quasieinheit *Dezibel*. Es gilt

$$P_{dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_w}{1W}\right) \quad (1) \quad \text{bzw.} \quad P_w = 10^{\frac{P_{dB}}{10}} \cdot 1W \quad (2)$$

An (1) wird deutlich, warum Dezibel eine Quasieinheit genannt wird. Dadurch, dass im Argument des Logarithmus keine Einheit stehen darf, wird die ganze Größe dimensionslos. Um ihr trotzdem einen Bezug zu geben, wird die Abkürzung *dB* zu *dBW* oder *dBmW* oder im Falle von z.B. Spannung *dBV* oder *dBmV* ergänzt, abhängig davon, ob im Logarithmus durch 1 W oder 1 mW bzw. 1 V oder 1 mV, geteilt wird. Diese Darstellung hat einen weiteren positiven Nebeneffekt. Wird z.B. eine Leistung  $P$  in Watt innerhalb einer Verstärkerreihe zunächst um den Faktor  $V_1$  dann um den Faktor  $V_2$  verstärkt, dann gilt für die Ausgangsleistung  $P_v$

$$P_v = P \cdot V_1 \cdot V_2 \quad (3)$$

In dB-Angaben gilt allerdings:

$$10 \cdot \lg\left(\frac{P_v}{1W}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P \cdot V_1 \cdot V_2}{1W}\right) \quad (4)$$

$$10 \cdot \lg\left(\frac{P_v}{1W}\right) = 10 \cdot \left[ \lg\left(\frac{P}{1W}\right) + \lg(V_1) + \lg(V_2) \right] \quad (5)$$

$$P_{vdB} = P_{dB} + V_{1dB} + V_{2dB} \quad (6)$$

Im Zuge dieser Umrechnung wird deutlich, dass aus der Multiplikation der Verstärkungen bei der Angabe in dB eine Addition wird. Das vereinfacht die Rechnungen mit Verstärkungen und Dämpfungen maßgeblich.

### 3 Messaufbauten

Durch ein vorheriges „Jugend Forscht“-Projekt zum Thema Radioastronomie konnten wir ein kleines, selbstgebautes Radioteleskop mit einem Reflektordurchmesser von 70 cm für unsere Messungen benutzen. Durch eine freundliche Spende von Kabel Deutschland steht der Radioastronomie-AG unserer Schule auch ein etwas größerer Parabolspiegel mit 180 cm Durchmesser zur Verfügung. Die Messung mit diesen zwei unterschiedlichen Systemen erlaubte es uns, z.B. den Einfluss der Reflektorgröße auf die Messergebnisse zu untersuchen.



Abb. 2: Die beiden Reflektoren im Größenvergleich

#### 3.1 Der 70 cm – Reflektor

Das kleinere der beiden Radioteleskope besteht aus einer handelsüblichen Satellitenempfangsanlage, d.h. einer Satellitenschüssel und einem LNB (*low noise block*), dem zugehörigen Empfänger (Typ Sharp BSCS86M50 Dual), montiert in der dafür vorgesehenen Halterung (s. Abb. 3). Dieser kann Signale im Bereich 10,70...12,75 GHz empfangen. Diese

Frequenzen gehören noch zu dem Teil des elektromagnetischen Spektrums, der die Erdatmosphäre nahezu unverändert passieren kann, d.h. ein solcher Empfänger kann also für ein einfaches Radioteleskop verwendet werden. In seinem Inneren werden die Eingangssignale wie oben beschrieben zunächst verstärkt (1)

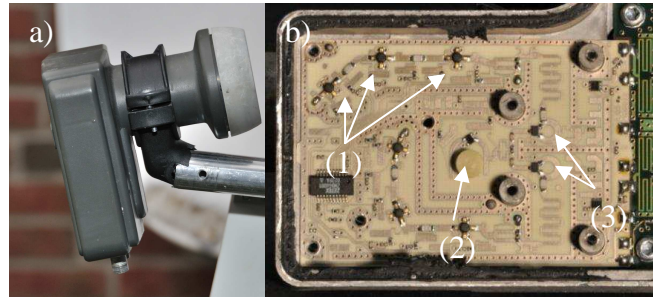


Abb. 3: Der SAT-LNB von a) Außen und b) Innen (Teilansicht)

und dann mit der bekannten Frequenz eines eingebauten Oszillators (2) gemischt (3). Das so bearbeitete Signal hat dann eine Frequenz im Bereich 950...2150 MHz. Der LNB erlaubt es dabei zwei unterschiedliche Arten von Signalen zu empfangen: Vertikal und horizontal polarisierte. Um mit einem Sender möglichst viele Informationen zu übertragen kann man das Phänomen der Polarisation ausnutzen: Jede Welle ist definiert als ein System einzelner schwingender Elemente. Diese können, wie z.B. bei Schallwellen, in Richtung der Ausbreitung der Welle schwingen, dann spricht man von sog. Longitudinalwellen. Bei den von uns untersuchten elektromagnetischen Wellen handelt es sich allerdings um sog. Transversalwellen, bei denen die einzelnen schwingenden Systeme senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Von vertikaler Polarisation spricht man, wenn sie senkrecht zum Boden schwingen, von horizontaler, wenn sie sich parallel zum Boden bewegen. Welche Polarisationsart gerade beobachtet wird, hängt von der Versorgungsspannung ab, mit der der LNB betrieben wird. 14 V entsprechen vertikaler und 18 V horizontaler Polarisation.

Um den Aufbau beweglich zu machen, wurde er auf einem Drehteller montiert und mit einem Drehmotor (1) über eine Spindel (2) verbunden, sodass die Drehung in horizontaler Richtung (Azimut) gewährleistet ist, ohne dass der gesamte Aufbau per Hand bewegt werden muss. Auf diese Weise kann der Azimut um etwa  $100^\circ$  verändert werden. Für die Bewegung in vertikaler Richtung (Elevation) wird ebenfalls ein Stellmotor (3) verwendet, der ebenfalls als Tangentialantrieb fungiert, d.h. durch ein Kupferrohr (4), das mit der Rückseite der Schüsselhalterung verbunden ist, diese entweder nach oben oder nach unten bewegt. Dadurch bewegt sich der Reflektor in vertikaler Richtung um bis zu  $24^\circ$ . Die Ansteuerung dieser beiden Motoren erfolgt aus der Ferne mit einem dafür konstruierten Bedienteil oder mit Hilfe eines zusätzlichen Interfaces auch über den Computer (s. Abb. 7).



Abb. 4: Das 70 cm - Radioteleskop

### 3.2 Der 180 cm – Reflektor

Der 180 cm – Reflektor diente ursprünglich zur Netzeinspeisung für das Kabelfernsehen. Da die geostationären Satelliten, auf die er deshalb ausgerichtet war, ihre Position relativ zur Erde natürlich nicht verändern, war er ursprünglich fix montiert, sodass man seine Ausrichtung zunächst nur manuell verändern kann. Für die horizontale



Abb. 5: Befestigung des 180 cm - Reflektors

Richtung ist er deshalb mit Hilfe eines alten Waschmaschinenlagers (1) drehbar auf einem Stahlrohr befestigt und kann damit in horizontaler Richtung in jeder Position arretiert werden. Für die Veränderung der Elevation befindet sich auf der Rückseite eine Drehspindel (2), die es erlaubt die Elevation in einem Bereich von  $2...35^\circ$  zu verändern. Um ihn in ebenem Gelände auch ohne Kran zu verschiedenen Messstandorten bewegen zu können, ist dieser ganze Aufbau auf einem Rollwagen montiert.

Der Empfänger wird dann in einer dafür vorgesehenen Halterung platziert. Im Gegensatz zum Empfänger beim 70 cm - Reflektor, der leicht außerhalb des Fokus befestigt ist, befindet sich dieser dann genau im Fokus. Dort befand sich als wir den Reflektor erhalten haben ein LNB der Firma Kathrein (Typ: BSME9-301A, Ser.-# 168 2264), der genau wie die kleinere Version bei der 70 cm – Empfangsanlage für einen Messbereich von 10,70...12,75 GHz ausgelegt ist. Er wurde für die Messungen mit dem 180 cm – Reflektor auch verwendet.

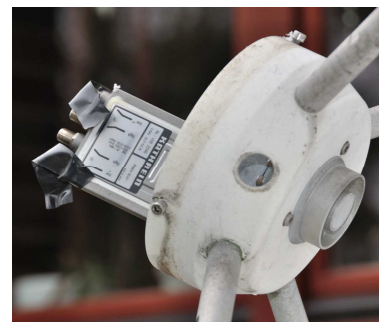


Abb. 6: Der Original-LNB des 180 cm - Reflektors

Im Gegensatz zum anderen SAT-LNB hat er allerdings vier Anschlüsse (s. Abb.), da die Unterscheidung zwischen vertikal und horizontal polarisierten Signalen hier nicht über die Versorgungsspannung geregelt wird, sondern beide Signalarten gleichzeitig empfangen und im LNB selbst getrennt werden. Jeweils zwei der Anschlüsse sind also für jede Polarisationsart. Dabei ist noch jeweils einer für die Signale aus dem High-Band (11,75...12,75 GHz) und einer aus dem Low-Band (10,70...11,70 GHz). Auf letzterem können seit April 2012 allerdings keine analogen Fernsehsignale mehr empfangen werden. Zum Schutz vor Feuchtigkeit wurden die nicht genutzten Anschlüsse bei den Messungen mit Klebeband abgedeckt.

### 3.3 Auswertungselektronik

Die beiden beschriebenen Systeme dienen zum Empfang und erster Verarbeitung der Signale, die Auswertung fand bei beiden aber mit demselben Aufbau statt.

In dem vorherigen Projekt wurde die Stärke des empfangenen Signals mit Hilfe eines SAT-Finders (1) bestimmt, einem Gerät, das normalerweise bei der Ausrichtung von Satellitenschüsseln hilft. Es produziert abhängig von der Signalstärke einen Piepton und einen Zeigerausschlag. Die zugehörige Spannung wird mit Hilfe einer zusätzlichen Buchse an die Steuereinheit des 70 cm – Reflektors (2) geleitet und dann über ein Interface (3) als Daten-Wert an den PC übermittelt. Da man die Empfindlichkeit des SAT-Finders einstellen kann, sind die Zahlenwerte die er liefert nicht reproduzierbar, mit ihm sind also nur Relativmessungen möglich. Zwischen dem SAT-Finder und dem Verbindungskabel zum LNB befindet sich noch ein Bias Tee (4). Dieses dient zur Einspeisung der vom LNB benötigten Versorgungsspannung, die ein externes Netzteil (5) liefert. Es erlaubt, die Versorgungsspannung zwischen 14 V und 18 V

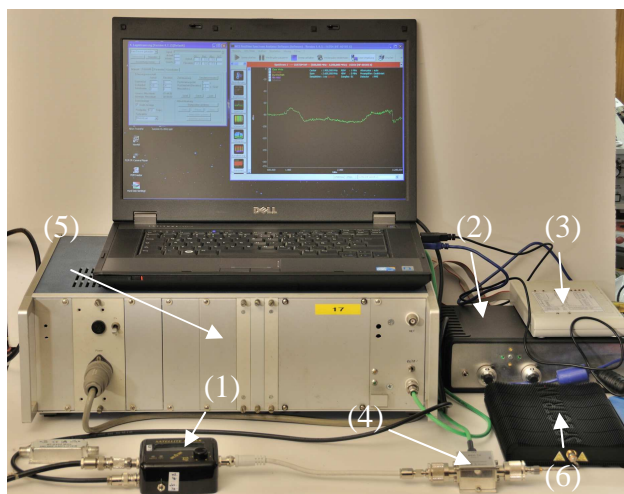


Abb. 7: Messtechnischer Aufbau

umzuschalten, d.h. wie beschrieben die Polarisation der beobachteten Signale auszuwählen. Zur Auswertung der Signale wurde zusätzlich ein Aaronia Spectrum Analyser (6, Spectran) verwendet. Dieser erlaubt es mit Hilfe der zugehörigen Software z.B. das Spektrum der Signalquelle aufzunehmen. Er funktioniert auch als Powermeter und liefert dabei Absolutwerte in der beschriebenen Einheit dB. Da der SAT- Finder nur einen kleinen Teil des Signals für den Ton für die Amplitudenanzeige benutzt und den größten Teil unverändert weiterleitet, wurde er zwischen LNB und Spectran geschaltet, sodass mit beiden Geräten gleichzeitig gemessen werden konnte. Bei einigen der Messungen haben wir zusätzlich noch einen LNA (6) verwendet, der eine Verstärkung von 20 dB liefert. Dieser wurde in die Schaltung zwischen dem LNB und dem Bias Tee eingefügt.

#### **4 Messungen**

Mit diesem Aufbau haben wir uns überlegt, welche Messungen interessant sein könnten. Zu Testzwecken haben wir zunächst Satelliten angepeilt, um einen Ausgangspunkt zu haben und beide Reflektoren auf dieselbe Quelle ausrichten zu können. Die größere Schüssel nutzten wir außerdem noch um die Sonne zu messen. Weitere natürliche Radioquellen konnten wir nicht vermessen, da eine genauere Ausrichtung des großen Reflektors nötig gewesen wäre. Der kleinere Reflektor eignete sich leider trotz größerer Positioniergenauigkeit nicht, da er nicht die hinreichende Empfindlichkeit und Winkelauflösung für schwächere Quellen als die Sonne besitzt.

Da wir sowohl einen großen, als auch einen kleinen Reflektor zur Verfügung haben, entschlossen wir uns als erstes, die Abhängigkeit der Signalstärke von der Größe der Oberfläche der Parabolspiegel zu überprüfen. Außerdem war es uns durch die verschiedenen Empfänger möglich einen Vergleich zwischen dem Kathrein-LNB und dem SAT- LNB zu machen. Hierzu tauschten wir jeweils die Empfänger und bauten sie entweder in den 180 cm - oder 70 cm großen Reflektor ein. Als nächstes testeten wir den Einfluss der Polarisation. Das zu dem kleineren Parabolspiegel gehörige Programm speicherte dabei die Zeit, die Position und die Signalstärke automatisch. Diese nutzten wir mit Hilfe von Excel für die graphische Darstellung der Messergebnisse. Die Daten, die der Spectran lieferte konvertierten wir zunächst in ein anderes Dateiformat (.csv), um sie dann ebenfalls in Excel einfügen zu können.

##### **4.1 Vergleich der Signalstärke bei unterschiedlicher Reflektorgröße**

Um eine spezifische Aussage über den Einfluss der Reflektorgröße auf die Signalstärke treffen zu können, haben wir nur eine Komponente verändert, d.h. für beide Messungen, sowohl mit dem 180 cm- als auch mit dem 70 cm - Reflektor, verwendeten wir denselben Empfänger (SAT-LNB) und dieselbe Polarisation.

Das Diagramm unterhalb zeigt diesen Vergleich, wobei der blau eingefärbte Graph den Verlauf der Messung mit dem kleinen Reflektor beschreibt und der graue Graph den des größeren. Auf der x- Achse ist der Frequenzbereich in Hz und auf der y-Achse die Signalstärke in dB aufgetragen.

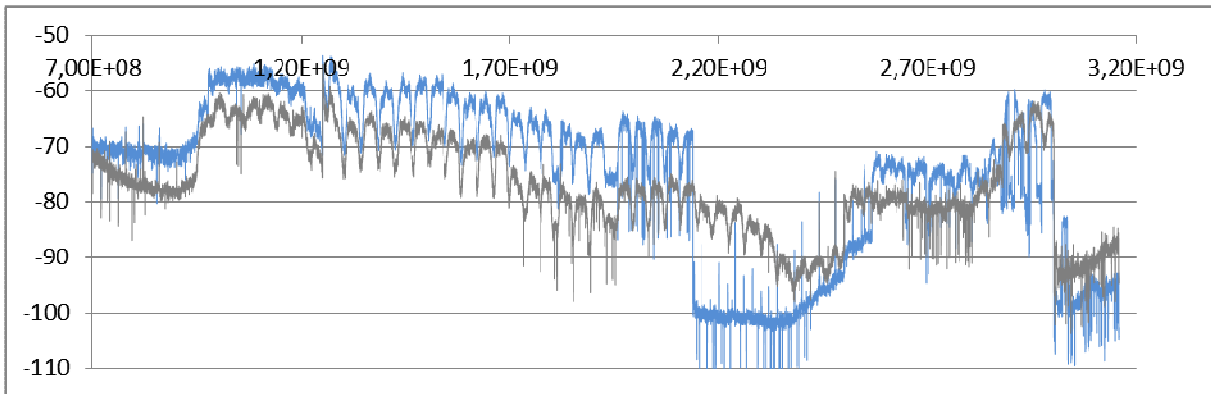


Diagramm 1: Vergleich in Abhängigkeit von der Reflektorgröße

Die Quelle, die wir für unsere Messung nutzten war der ASTRA 1D- Satellit. Im Bereich von 1,2 GHz bis 2,2 GHz kann man deutlich die Transpondersignale des Satelliten erkennen. Ein Transponder dient dazu, die Frequenz des von der Erde kommenden Signals anzupassen und hinterher mit anderer Frequenz als Fernsehsignal wieder zur Erde zurück zu schicken. [2] In diesem Bereich liegt die Stärke des empfangenen und umgewandelten, d.h. runtergemischten Signals, das der blaue Reflektor misst, konstant über dem Wert des großen Reflektors. Die Differenz zwischen den Signalen beträgt ungefähr 10 dB.

#### 4.2 Vergleich der Signalintensität in Abhängigkeit mit der Polarisation

Was in der Nachrichtentechnik zur Informationsübertragung genutzt wird, ist auch in der

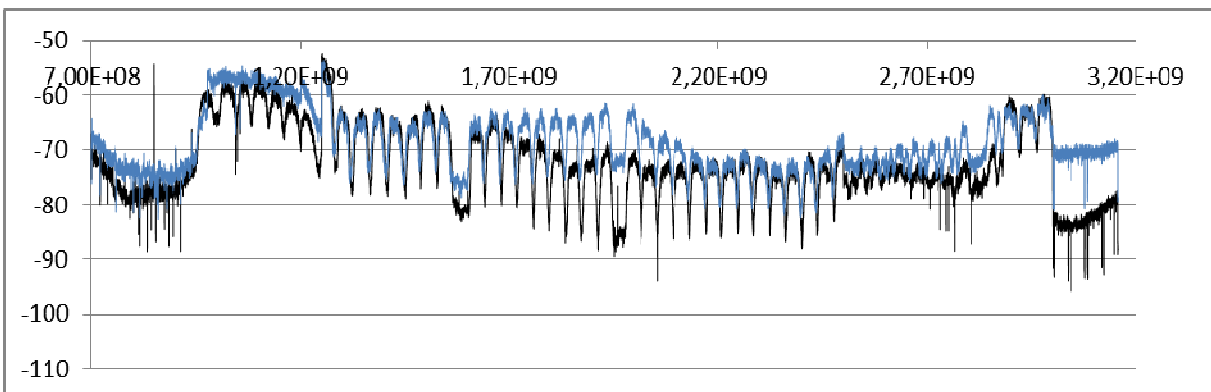


Diagramm 2: Vergleich in Abhängigkeit von der Polarisation

Radioastronomie von Nutzen. Thermische Radioquellen, wie z.B. die Sonne weisen keine Polarisation auf, nicht-thermische, z.B. Pulsare hingegen schon [3]. Die Untersuchung der Polarisation liefert also ein Indiz über die Natur einer beobachteten Quelle.

Für uns war es von Interesse zu erfahren, ob und wie sich das charakteristische Spektrum eines ASTRA- Satelliten im horizontalen oder vertikalen „Modus“ verändert. Diese Messung führten wir mit dem kleineren Reflektor durch und suchten uns wieder den ASTRA-Satelliten als Radioquelle. Da wir wieder nur einen Aspekt überprüfen wollten, haben wir den Reflektor nicht verändert und auch den LNB beibehalten. Wir haben also lediglich die Versorgungsspannung verändert. In diesem Diagramm haben wir wieder die in der Bandbreite 0,7 GHz bis 3,2 GHz gemessen. In diesem Fall entspricht der blaue Graph den Messwerten bei einer Spannung von 18V (horizontale Polarisation). Dementsprechend sind mit dem schwarzen Graphen die Messwerte für die 14V (vertikale Polarisation) abgebildet. Die Peaks der Transponder liegen dicht beieinander. Im Frequenzbereich 1,7... 2,2 GHz ist das Signal im vertikalen Bereich allerdings um 3-7dB höher. Insgesamt haben wir darauf geachtet, dass wir Messungen, die wir vergleichen



wollten immer mit der gleichen Polarisation messen, damit es dort keine Verfälschungen gibt und die Daten immer vergleichbar sind.

### 4.3 Vergleich der Empfänger

In einer weiteren Messung haben wir die uns zur Verfügung stehenden Empfänger miteinander verglichen, um ggf. einen Unterschied zwischen dem in das 180 cm - Radioteleskop eingebauten LNB und dem dazugekauften LNB zu finden (besonders, was die Intensität der Signale angeht). Dadurch konnten wir ausschließen, dass Unterschiede bei den Vergleichsmessungen der beiden Radioteleskope durch die Empfänger verursacht werden.

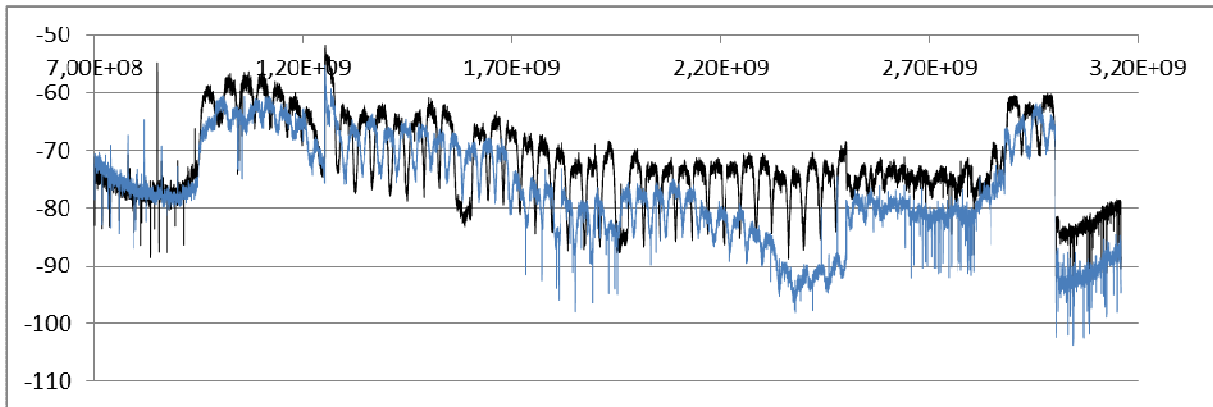


Diagramm 3: Vergleich der Empfänger

Um die Empfänger zu vergleichen, haben wir im Fokus des großen Reflektors jeweils einen der LNBs platziert und eine Messung durchgeführt. Auch dieses Mal haben wir lediglich einen Faktor geändert und alles weiter belassen, sodass wir aussagekräftige Messdaten erhalten konnten. Diese Messung haben wir in horizontaler Polarisation durchgeführt und erneut wählten wir einen der ASTRA-Satelliten als Radioquelle.

Der blaue Graph stellt in diesem Diagramm den Kathrein-LNB des 180 cm - Radioteleskops dar. Der schwarze Graph enthält die Messdaten des SAT-LNBs. Überraschender Weise konnten beide LNBs über eine größere Bandbreite empfangen, als ursprünglich auf den Datenblättern angegeben war (2150 MHz hätte die obere Grenze sein sollen).

### 4.4 Satellitenvermessung

Um den Öffnungswinkel des 180 cm - Reflektors berechnen zu können haben wir einen Satelliten genau vermessen, indem wir mithilfe des Pegelmessers den Fokus genau auf den Satelliten ausgerichtet haben. Dann arretierten wir den Reflektor im Azimut und fuhren nur noch die Elevation.

Wir begannen damit kurz bevor der Pegelmesser ausgeschlagen hätte. Das bedeutet, dass das Signal des Satelliten noch nicht von dem

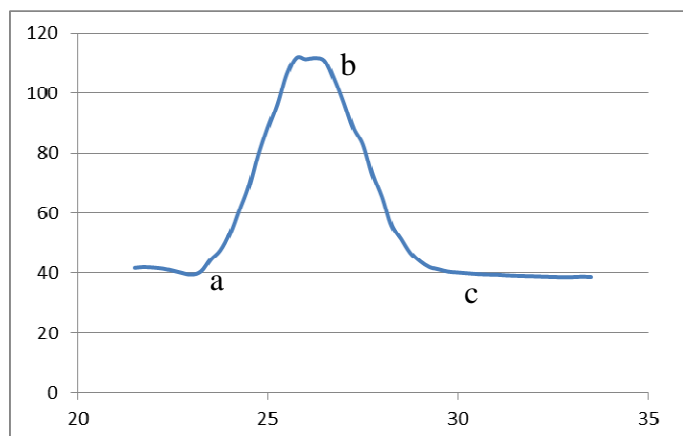


Diagramm 4: a): (Signalminimum) Anstieg der Signalstärke; b) Signalmaximum; c) Signalabfall (Signalminimum)

Öffnungswinkel der Antenne erfasst werden konnte. Dann sind wir manuell in  $0,25^\circ$ -Schritten über den Satelliten gefahren, sodass sich der Peak in Diagramm 4 ergab.

Es ist klar zu erkennen, für welchen Winkelbereich a) bis c) der Satelliten für das Radioteleskop „sichtbar“ war. Daraus können wir den Öffnungswinkel des 180 cm – Reflektors bestimmen.

#### 4.5 Sonnenvermessung

Ähnlich sind wir bei der Vermessung der Sonne vorgegangen. Der größte Unterschied bestand allerdings darin, dass hier statt des Elevationswinkels der Azimutwinkel indirekt variierte, da die Sonne (im Gegensatz zu den Satelliten, die sich mit der Erdrotation mitbewegen) selbst durch den Öffnungswinkel des Reflektors gezogen ist. Das Radioteleskop an sich wurde also nicht bewegt. Verwendet haben wir dazu den 180 cm – Reflektor mit dem Kathrein-LNB. Zur Abspeicherung der Messwerte wurde das Auswertungsprogramm des kleinen Reflektors verwendet, da es in einem vorher eingestellten Zeitintervall von etwa 30 s Uhrzeit und Signalstärke automatisch abspeichern konnte. Mit Hilfe eines Planetariumprogramms (CyberSky) konnte wir dann aus dem Datum und der Uhrzeit den Stand der Sonne während unserer Messzeit von 11 min als Angabe in Grad ermitteln. Verwendet wurde dabei der Winkel des Azimut, da die Sonne zum Zeitpunkt der Messung (12:21...12:32 Uhr)

im Süden stand und sich damit annähernd horizontal über den Himmel bewegte. Diese Winkelangaben sind auf der x-Achse aufgetragen, auf der Hochachse jeweils die zugehörige gemessene Signalstärke. Der blaue Graph stellt den Verlauf der empfangenen Signalstärke dar. Der rote Graph beschreibt die Hälfte des Signalmaximums. Zeitgleich lief auch eine zweite Messung mit, diesmal mit dem Spectran.

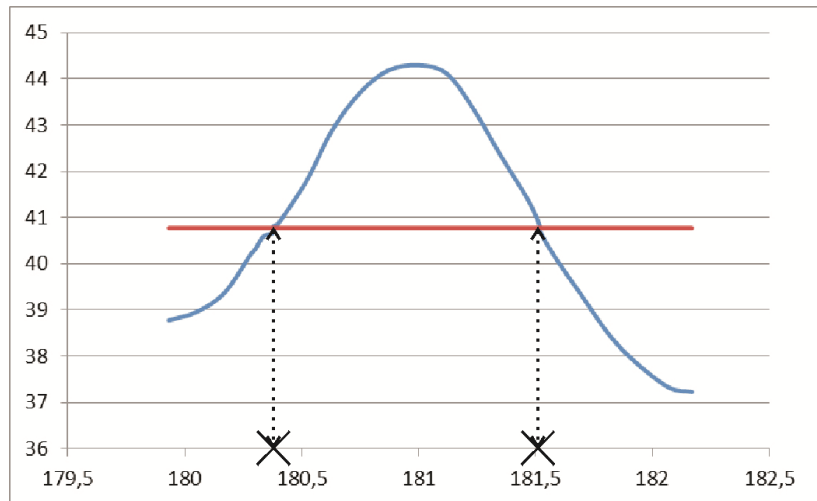


Diagramm 5: Messkurve der Sonne mit Markierung für die Hälfte des Signalmaximums (rote Linie) und zugehöriger Position (Markierungen)

## 5 Auswertung

Da das Steuerungsprogramm die Messdaten in eine Text-Datei schreibt und die vom Spectran produzierten .mdr-Dateien sich mit Hilfe eines C#-Programmes in das .csv-Format konvertieren ließen, bot es sich an, für die Auswertung der Messdaten das Tabellenkalkulationsprogramm Excel zu benutzen. Das erlaubt uns die einfache graphische Darstellung und ggf. Mittelung und Normierung der Messwerte.

### 5.1 Vergleich der Signalstärke bei unterschiedlicher Reflektorgöße

Zuerst zeigt sich bei der Betrachtung dieses Diagrammes, dass die Signalstärke die der 70 cm – Reflektor empfängt, bis auf einen Bereich zwischen 2140 MHz und 2540 MHz immer oberhalb des Signals vom 180 cm – Reflektor liegt. Dieses Messergebnis ist verwunderlich, da für die empfangene Leistung  $P$  eigentlich gilt:

$$P = A \int_{\Omega} B \cos(\theta) d\Omega \quad (7) [4]$$

wobei A die betrachtete Fläche, auf die Strahlung trifft, und B die Helligkeit der Quelle ist.  $d\Omega$  ist der sog. solid angle, der etwas über die Größe des beobachteten Himmelsausschnittes aussagt. Er entspricht näherungsweise dem Produkt aus dem vertikalen und horizontalen Öffnungswinkel des Parabolreflektors.  $\theta$  ist ein weiterer Winkel, der vom Zenit aus gemessen die Höhenposition der Quelle angibt. Die empfangene Leistung ist der Empfangsfläche also direkt proportional.

Da für die Reflektorflächen A unserer beiden Reflektoren gilt

$$A_{70\text{cm}} = \pi \cdot (0,70\text{ m})^2 \approx 1,54\text{ m}^2 \quad (8) \quad \text{bzw.} \quad A_{180\text{cm}} = \pi \cdot (1,80\text{ m})^2 \approx 10,18\text{ m}^2$$

müsste eigentlich die empfangene Signalstärke bei dem großen Reflektor um Faktor 6,6 größer sein. Angegeben in dB bedeutet das die Signal müsste in der Graphik einen Unterschied von

$$d = 10 \cdot \lg(6,6) \approx 8,2\text{ dB} \quad (9)$$

aufweisen. Dass es hier offensichtlich genau andersherum ist, könnte daran liegen, dass mit dem großen Reflektor der Satellit nicht genau getroffen wurde oder der LNB leicht verrutscht ist. Sicher ist aber, dass in beiden Fällen derselbe Satellit gemessen wurde, da die Transpondersignale in beiden Messungen bei denselben Frequenzen liegen, diese sind charakteristisch für jeden Satelliten.

Genauso erstaunlich ist es, dass das Signal bei einer Frequenz von ungefähr 2140 MHz bei der Messung mit dem kleinen Reflektor einbricht, bei der anderen Messung jedoch nicht. Wie oben erwähnt werden Signale im LNB auf eine niedrige Frequenz heruntergemischt und die Signale mit Frequenzen 900...2150 MHz hinterher durch einen Tiefpassfilter herausgefiltert. Da ein Satellit im Gegensatz zu z.B. einer thermischen Quelle ein sehr stark begrenztes Spektrum hat, müsste oberhalb dieser Frequenzen also kein Signale mehr zu sehen sein, wie es bei der Messung mit dem kleineren Reflektor auch der Fall ist. Dass bei der andere Messung trotzdem noch Signale auftreten, die Transpondersignalen ähneln, könnte in der Signalverarbeitung im LNB liegen: Um die Signale, die der LNB empfängt, später im Receiver auswerten zu können, müssen diese einen bestimmten, hinreichend starken Pegel haben. Da die Stärke des Signals variieren kann, z.B. in Abhängigkeit von der Wetterlage, muss entweder im LNB oder im Satellitenreceiver ein variabler Verstärker sein, der alle Signale auf denselben Pegel verstärken kann, eine sog. AGC, *automatic gain control*. Da wie oben beschrieben die Leistung, die der kleinere Reflektor empfängt deutlich kleiner als die Leistung beim großen Reflektor sein müsste, würde die AGC die Signale des kleineren Reflektors oberhalb 2150 MHz stark verstärken. Dadurch steigt aber auch das Rauschen an, sodass das vielleicht vorhandene Signal durch das Verstärkerrauschen überdeckt wird. Bei dem großen Reflektor hingegen wäre die Signalleistung noch etwas größer, dadurch würde die AGC eine schwächere Verstärkung nutzen. Das wäre eine mögliche Erklärung, allerdings müsste dazu mehr über den Aufbau des LNB bekannt sein, um sicherzustellen, dass die AGC wirklich bereits im LNB eingebaut ist.

Das würde die Messungen der Sonne allerdings nicht beeinflussen. Da die Radiosignale der Sonne um Größenordnungen schwächer sind als die des Satelliten würde die AGC die maximale Verstärkung benutzen, damit wäre sie wieder konstant.

## 5.2 Vergleich der Signalintensität in Abhängigkeit mit der Polarisation

Beim Betrachten des Diagramms gibt es insgesamt keine großen Signaldifferenzen zwischen dem Graphen der Messung mit einer Versorgungsspannung von 14 V (vertikale Polarisation) und 18 V

(horizontale Polarisation). Lediglich im Frequenzbereich von 1600 MHz bis 2100 MHz konnten wir ein stärkeres Signal aufzeichnen, wenn wir an den LNB eine Spannung von 18 V angelegt haben. Vermutlich hängt dieses Ergebnis mit der Polarisation der Transpondersignale der Satelliten zusammen. Dass die Signalstärke sich bei beiden Messungen ansonsten kaum unterscheiden, liegt daran, dass die Satelliten bei beiden Polarisationen gleichstark senden. Innerhalb einer Bandbreite von ungefähr 20 MHz gibt es immer ein horizontales und ein vertikales Transpondersignal, beide sind um die halbe Kanalbreite (10 MHz) gegeneinander versetzt) [1]. Unabhängig von der Polarisation ist allerdings die Frequenz, ab der ein deutliches Signal zu sehen ist, etwa 900 MHz. Das ist die kleinste der Zwischenfrequenzen auf die der interne Mischer das Signal runtermischt.

Bei den nachfolgenden Frequenzen bis etwa 1300 MHz unterscheiden sich die Signale allerdings. Während bei horizontaler Polarisation keine Transpondersignale aufgezeichnet werden konnten, sind bei der vertikalen Polarisation bereits 7 Kanäle deutlich zu erkennen. Dies spricht dafür, dass in diesem Bereich nur Transpondersignale vertikaler Polarisation liegen.

Auffällig ist wieder der Peak bei einer Frequenz von 1250 MHz, der bei allen Messungen und Empfängern in dieser Bandbreite auftritt und so weder mit den Reflektoren, noch mit den Empfängern zusammenhängen kann. Er trat auch bei einer Testmessung ohne Reflektor und ohne angepeilte Quelle auf. Daher bleibt als Ursache nur noch der Spektrum Analyser, der diese Messungen aufzeichnete. Über die zugehörige Software können verschiedene Messbandbreiten eingestellt werden. Also testeten wir die verschiedenen Bandbreitenfilter, über die der Spectran verfügt. Dabei stellten wir fest, dass offensichtlich das 300 kHz-Filter fehlerhaft arbeitet, da dieser Peak bei anderen Filtereinstellungen nicht auftritt.

### **5.3 Vergleich der Empfänger**

Die Graphen der empfangenen Signale unterscheiden sich in der Stärke. Die mit dem Kathrein-LNB aufgenommenen Radiosignale sind immer größer als die des SAT- LNBs. Dies spricht dafür, dass der SAT- LNB der bessere Empfänger ist.

Der Empfang des Signals des Kathrein-LNBs lässt ab einer Frequenz 2150 MHz nach. Das entspricht eigentlich der Erwartung, da ab dieser Frequenz, wie beschrieben durch den Tiefpassfilter, alle Signale herausgefiltert werden müssten. Der SAT-LNB hingegen empfängt bis zu einer Frequenz von 2490 MHz. Eine Erklärung dafür könnte der Altersunterschied der beiden Empfänger sein, die eingebauten Verstärker und Filtern können unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Der Kathrein-LNB ist deutlich älter, möglicherweise empfängt er deshalb für die hohen Frequenzen nichts (mehr). Der Graph beider Empfänger bricht erst bei einer Frequenz von ca. 3 GHz ab. Kurz vor diesem Einbruch empfängt sowohl der SAT-LNB, als auch der Kathrein LNB im Bereich von 2,89...2,98 GHz ein transponderähnliches Signal. Es scheint, als könnten die LNBs trotz des Tiefpassfilters diesen Signalbereich empfangen.

Bei 1250 MHz haben wir ein wiederholtes Mal den Peak gemessen, den wir wieder auf den Spectran zurückführen. Dass er auch bei dieser Messung auftaucht, unabhängig davon, ob ein Signal in diesem Frequenzbereich auftrat, oder nicht ist ein Indiz dafür, dass der Fehler tatsächlich innerhalb des Spectrum Analyseres liegt.

Es fällt ebenfalls auf, dass die Transpondersignale leicht gegeneinander verschoben sind. Das deutet darauf hin, dass doch bei unterschiedlicher Polarisation gemessen wurde, dies sollte wie unter 5.2 erläutert aber keine Einfluss auf die Signalstärke haben. Unterschiede in der Signalstärke könnte auch daher rühren, dass ein LNB beim Einbau leicht aus dem Fokus gerutscht ist. Allerdings sind wir sicher, dass es sich bei beiden Signalen um denselben Satelliten handelt, da

die Transpondersignale zwar gegeneinander verschoben, aber sonst gleich sind und die Position dieser Signale ist charakteristisch für jeden Satelliten.

#### 5.4 Satellitenvermessung

Da die Signalstärke bei dieser Messung mit dem SAT-Finder gemacht wurde, sind die Zahlwerte für die Signalstärke leider nur als Relativwerte zu verstehen. Durch den Verlauf der Kurve kann allerdings der Öffnungswinkel des Reflektors bestimmt werden. Der Satellit könnte aufgrund der großen Entfernung zwischen seiner Position und der Erde eigentlich als Punktquelle betrachtet werden. Die Messkurve würde dann nur ein diskretes Signal zeigen, wenn der Fokus des Reflektors genau auf den Satelliten ausgerichtet ist. Der Parabolspiegel reflektiert allerdings auch einen Teil der Satellitenstrahlung auf den Empfänger, wenn dieser sich nicht genau im Fokus befindet (s. Abb. 8). Deshalb und durch Effekte wie Beugung und Streuung am Reflektorrand ist die Messkurve ein breiterer Graph. Der Winkelbereich, in dem der Satellit von Radioteleskop wahrgenommen wird, ist der sog. Öffnungswinkel  $\alpha$ . Nach der Messkurve in Diagramm 6 entspricht das also

$$\alpha = 25,88^\circ - 25,5^\circ = 0,38^\circ \quad (10)$$

Dieser Winkel entspricht der Winkelauflösung des Reflektors. Sie kann berechnet werden mit

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (11) [5]$$

wobei  $\lambda$  die gemessene Wellenlänge und  $d$  der Durchmesser des Reflektors ist. Diese Formel leitet sich aus Überlegungen zur Beugung und Interferenz hinter einer Blende her. 1,22 ist dabei ein Faktor, der sich aus der numerischen Berechnung der Intensitätsverteilung hinter einer Blende ergibt. Bei einer beobachteten Frequenz von 10,75...12,75 GHz und dem Zusammenhang

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (12)$$

für die Wellenlänge  $\lambda$ , die Frequenz  $f$  und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c \left( \approx 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \right)$  einer Welle liegt die theoretische Winkelauflösung  $\alpha$  des großen Reflektors also zwischen

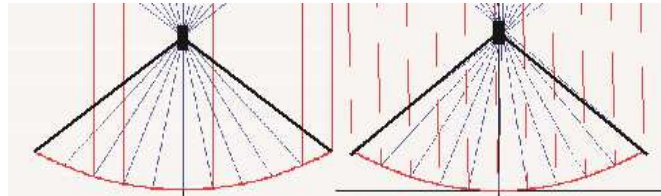


Abb. 8: Reflexion der einfallendem Strahlung wenn die Quelle a) im Fokus und b) um  $1,5^\circ$  verrückt ist

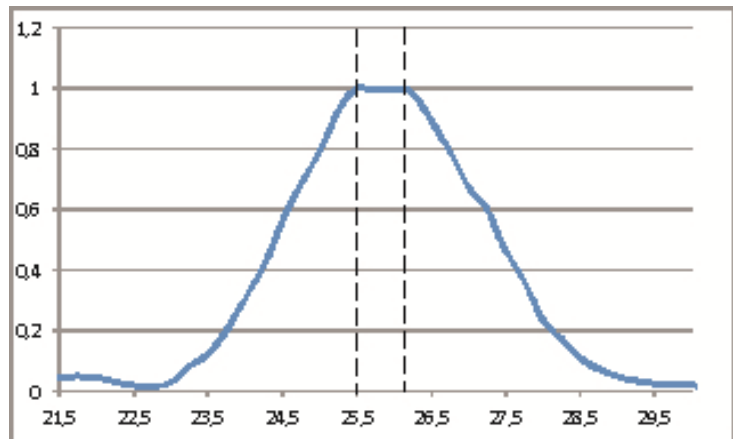


Diagramm. 6: Messung 4.4, wobei die Hochachse auf 1 normiert wurde

$$\alpha_1 = 1,22 \frac{2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{10,75 \cdot 10^9 \frac{1}{s} \cdot 1,80 m} \approx 0,0189 \quad (13) \quad \text{bzw.}$$

$$\alpha_2 = 1,22 \frac{2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{12,75 \cdot 10^9 \frac{1}{s} \cdot 1,80 m} \approx 0,0159 \quad (14)$$

Diese Angaben sind allerdings in Bogenmaß, in Grad entspricht das etwa  $1,08^\circ$  bzw.  $0,914^\circ$ . Im Vergleich zu dem 70 cm – Reflektor, der eine rechnerische Winkelauflösung von etwa  $2,77^\circ$  bzw.  $2,35^\circ$  bei derselben Frequenz hat, hat der größere Reflektor also eine etwa 2,5-mal bessere Auflösung.

Die Berechnungen, die für die Herleitung von Formel (11) nötig sind führen im dreidimensionalen Raum zu Graphiken für die Intensitätsverteilungen wie in Abb. 9, wobei a) die Verteilung zeigt, wenn der Fokus des Reflektors auf die Quelle gerichtet ist und b) wenn

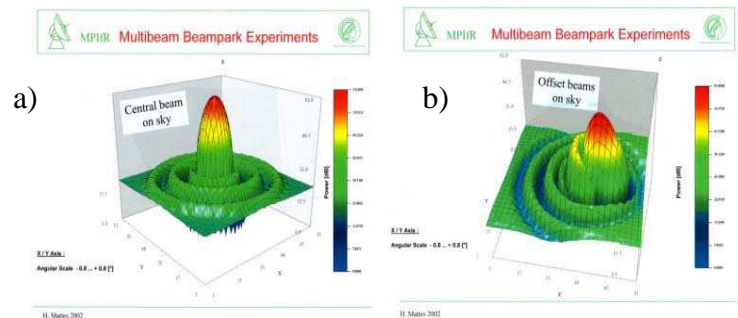


Abb. 9: Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von der Fokus-Ausrichtung des Parabolreflektors, wenn er a) auf die Quelle ausgerichtet ist und b) leicht versetzt dazu [6]

sie leicht außerhalb des Fokus ist. Diese Abbildungen zeigen, dass das Signalmaximum erreicht wird, wenn die Quelle genau im Fokus ist. Allerdings sind auch bei anderen Winkel Signalspitzen zu sehen, wenn auch deutlich schwächere. Diese lokalen Maxima nennt man Nebenkeulen. Ihre Signalstärke ist um Größenordnungen schwächer als das tatsächliche Signalmaximum, ein Beispiel dafür könnte also in Diagramm 4 im Bereich  $21,75 \dots 22,75^\circ$  zu sehen sein. Um die anderen Nebenkeulen zu untersuchen, müsste die Messung mit ggf. höherer Empfindlichkeit noch einmal wiederholt und dabei ein größerer Winkelbereich abgefahren werden. Dies lässt die momentane Steuerung des großen Reflektors allerdings noch nicht zu. Wie Abb. 9 zeigt, hat die Position der Signalquelle relativ zum Fokus des Reflektors direkten Einfluss auf die Intensitätsverteilung. Das heißt aus dem Verlauf des Messgraphen könnte man ggf. auf die exakte Position der Quelle zurückschließen.

Anstatt den Öffnungswinkel wie beschrieben anzugeben, ist es auch möglich, die sog. Halbwertsbreite  $\alpha_H$  zu bestimmen. Sie ist eine andere Größe die oft angegebene wird, um einen Reflektor zu charakterisieren. Die Halbwertsbreite entspricht dem Winkelabstand zwischen den zwei Positionen, bei denen die Hälfte des Signalmaximums erreicht wird, wie z.B. in Diagramm 5 markiert. Diese Winkel sind manchmal leichter zu bestimmen, als der Winkelbereich, in dem das Signalmaximum gemessen wird. Für den Satelliten liegt diese Halbwertsbreite bei etwa

$$\alpha_H = 26,59^\circ - 23,59 = 3^\circ$$

## 5.5 Sonnenvermessung

Diese Messung war vor allem interessant, da die Sonne unsere einzige gemessene natürliche Quelle ist. Bei vorherigen Messungen mit dem kleineren Reflektor war eine Aufnahme der Sonne nur unter Verwendung eines zusätzlichen Verstärkers (+ 20 dB) möglich, hier ist es uns aufgrund des größeren Gewinns des größeren Reflektors allerdings auch so gelungen. Das erlaubt den Vergleich zwischen den Signalen des Satelliten und der natürlichen Radiostrahlung der Sonne.

Um einen Vergleich zwischen der künstlichen und der natürlichen Quelle anzustellen, wurde mit Hilfe von Excel zunächst die Signalstärke auf 1 normiert. Das heißt, die Hochachse gibt nun nicht mehr einen Zahlenwert für die Signalstärke zurück, sondern zeigt an, bei welchen Winkeln ein bestimmter Prozentsatz des maximal gemessenen Signals auftritt. Da die beiden Messungen mit dem SAT-Finder als Powermeter gemacht wurden, geht dadurch keine Information verloren, da

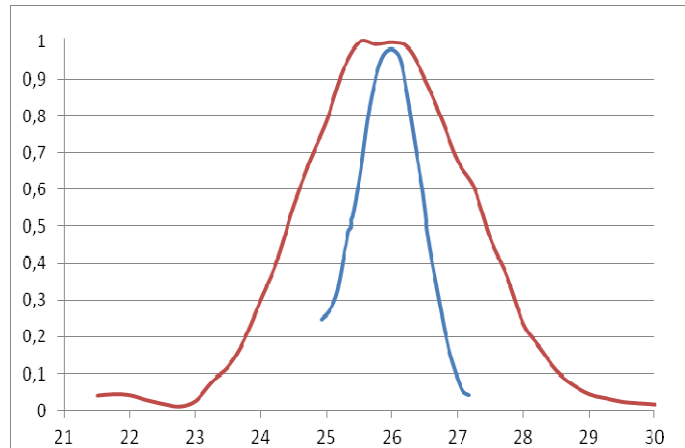


Diagramm 7: Die Sonne (blau) und der Satellit (rot) im Vergleich

die Zahlenwerte ja ohnehin nur Relativwerte sind. Anschließend wurde die Frequenz des Signalmaximums auf dieselbe Position auf der vertikalen Achse gelegt, dadurch kann man die Breite der beiden Peaks vergleichen. Dabei zeigt sich, dass der Graph des Satelliten einen deutlich breiteren Verlauf hat. Dies ist eigentlich verwunderlich, da wie beschrieben der Satellit als Punktquelle betrachtet werden kann. Die Sonne hingegen ist trotz des deutlich größeren Abstandes zur Erde ein Flächenstrahler, sie hätte also über einen größeren Winkelbereich zu sehen sein müssen. Eine mögliche Erklärung für das Messergebnis können die unterschiedlichen Signale sein, die die Quellen aussenden. Der Satellit als künstliche Quelle ist auf einen gewissen Frequenzbereich beschränkt, die Sonne als sowohl thermische als auch nicht-thermische Quelle strahlt in nahezu allen Frequenzen, auch in deutlich höheren als der LNB. Da die Winkelauflösung umgekehrt proportional zur gemessenen Frequenz ist, kann der schmalere Peak der Sonne dadurch verursacht worden sein, dass der LNB doch Signale höherer Frequenzen detektiert hat und dadurch mit einer kleineren Winkelauflösung gemessen wurde. Im Fall der Sonnenmessung beträgt die Halbwertsbreite  $\alpha_H$  ungefähr

$$\alpha_H = 181,5^\circ - 180,3 = 1,2^\circ$$

der zugehörige Öffnungswinkel muss als tatsächlich noch deutlich darunter liegen.

Damit kann auch der Winkel abgeschätzt werden, unter dem die Sonne bei dieser Messung erschien. Rechnerisch haben wir für die Winkelauflösung einen Wert von etwa  $0,91^\circ$  erhalten. Jede Punktquelle müsste auch etwa in diesen Winkelbereich „sichtbar“ für den großen Reflektor sein. Gemessen haben wir für die Halbwertsbreite der Sonne, die wir hier als ein Maß für den Bereich nehmen in dem sie zu sehen war, allerdings  $1,2^\circ$ . Dieser Unterschied entsteht dadurch, dass die Sonne kein Punkt- sondern ein Flächenstrahler ist, d.h. eine gewisse Breite hat, die Differenz der beiden Werte ( $0,39^\circ$ ) entspricht also dem „Schwinkel“ der Sonne. Er wird in der Literatur [5] mit 32 Bogenminuten abgegeben, was etwa  $0,53^\circ$  entspricht. Im Rahmen unserer begrenzten Messgenauigkeit konnten wir also zu einem ähnlichen Ergebnis gelangen.

Leider verfügt der große Reflektor im Moment noch nicht über eine Nachführung, die es erlaubt hätte, die Sonne für eine längere Zeit zu messen. Während der Messung die zu Diagramm 5 führte, lief wie beschrieben aber gleichzeitig der Spektrometer mit, sodass in Zeitabständen von etwa einer Minute ein Spektrum der gemessenen Strahlung im Bereich 700...3200 MHz aufgezeichnet wurde.

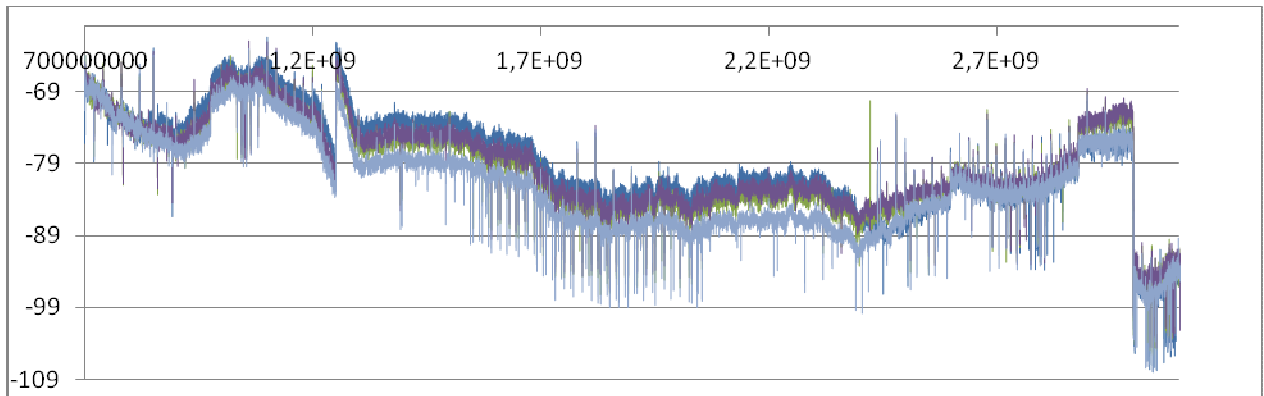


Diagramm 8: Die Spectran-Daten zur Sonnenmessung kurz bevor die Sonne gemessen wurde (blau), bei der Hälfte des Signalmaximums (grün), beim Signalmaximum (violett) und als die Sonne weiter aus dem Fokus gewandert war (hellblau)

### 5.6 Fehlerquellen

Verschiedene Faktoren haben unsere Messungen beeinflusst, sodass es in den Ergebnissen gewisse Ungenauigkeiten gibt.

Eine der möglichen Fehlerquellen ist die ungenaue Positionierung des großen Reflektors. Diese erfolgt im Moment per Hand bzw. per Drehung an einer Spindel, lässt also eine Bestimmung der Ausrichtung in Form von Koordinaten nur begrenzt zu. Über die Länge der Spindel und den mit der Halterung eingeschlossenen Winkel kann auf den momentanen Elevationswinkel zurückgeschlossen werden und mit Hilfe eines Kompasses der an den Empfänger angelegt wird auch auf den zugehörigen momentanen Azimutwinkel. Allerdings sind beide Methoden nicht besonders genau und Veränderungen der Position um kleine Winkel aufgrund der manuellen Steuerung ebenfalls nicht. Da wir also nur begrenzt Koordinaten für die Ausrichtung angeben können, ist also nicht auszuschließen, dass der Satellit nicht immer ganz „getroffen“ wurde.

Eine weitere Fehlerquelle ist auch, der häufig auftretende Peak. Dieser scheint ein starkes Signal anzuzeigen, da er allerdings nachweislich nicht das Produkt von Radiowellen ist und auch kein Charakteristikum eines LNBS ist, mussten wir ihn immer vernachlässigen und darauf achten, keine falschen Schlüsse auf Satelliten, oder natürliche Himmelskörper schließen. Da wir auch die Dämpfung der Signale durch die Atmosphäre noch nicht einbeziehen konnten, können wir bis jetzt die tatsächliche Stärke eines Objektes nicht komplett erfassen. Bei einigen Messungen (Vergleich der Empfänger) ist leider auch nicht auszuschließen, dass der Empfänger aus dem Fokus der Antenne gerutscht sein könnte.

## 6 Fazit

In unserer Arbeit konnten wir einige spannende und unerwartete Ergebnisse erzielen. Wir können nun für einige der Komponenten, die in einen radioastronomischen Aufbau eingebunden sind, Aussagen über ihren Einfluss auf die empfangenen Signale treffen. Unserer Erfahrung nach sind ausführliche Informationen, insbesondere über Empfänger und Messgeräte von Nöten. So ist es z.B. für weitere Messungen mit einem LNB nötig ist, mehr über seine genaue Funktionsweise und z.B. Filter- und Mischercharakteristiken zu erfahren. Auf Grundlage dieser Messungen lassen sich noch einige weitere machen, die helfen können, bei künftigen Messungen natürlicher Quellen Fehlerquellen auszuschalten. So könnte z.B. durch die Messung der Signalstärke einer beweglichen Quelle, wie z.B. der Sonne, bei verschiedenen Höhenwinkeln ein Modell für die höhenabhängige Dämpfung durch die Atmosphäre erstellt werden []. Dieser Wert wäre nötig um die absolute Signalstärke einer Quelle bestimmen zu können. Das würde bedeuten, dass wir nicht weiter Messungen mit relativen, also vergleichenden Zahlenwerten haben, sondern tatsächliche Werte. Ob diese Messung in den Wintermonaten, in denen die Sonne sehr tief steht,



möglich ist, ist aber fraglich. Gegebenenfalls wäre es auch erst nötig, einen präziseren Weg zu finden, den großen Reflektor zu steuern. Bei genauerer Untersuchung der Sonne könnte und es uns vielleicht sogar gelingt die Sonnentemperatur zu errechnen. Dazu wären allerdings noch weitere Messungen nötig. z.B. über die Rauschtemperatur des Empfängers. Über unser Projekt hinaus, möchten wir aufgrund unserer Beobachtung hinsichtlich des Peaks, der bei nahezu allen Messungen mit dem Spectran auftauchte auch weitere Messungen nur mit dem Spectran machen, z.B. nur mit einem Abschlusswiderstand versehen. Gegebenenfalls würde dann ein Brief an die Herstellerfirma folgen, um sie auf unsere Feststellung aufmerksam machen und vielleicht Informationen darüber zu erhalten, wie dieser Fehler zu vermeiden ist.

## **7 Danksagung**

Unser Dank gilt in dieser Arbeit allen Menschen, die uns unterstützt haben, trotz der geringen Zeit die wir hatten eine „Jugend Forscht“-Arbeit schreiben zu können. Das ist natürlich in erster Linie Thomas Biedermann, der uns immer, auch wenn er eigentlich wenig Zeit hatte, mit Rat und Tat zur Seite stand. Aber auch seine Frau Susanne, die immer wieder für unser leibliches Wohl gesorgt hat. Allen unseren Mit- Jungforschern möchten wir ebenfalls ein großes Dankeschön aussprechen, weil sie immer gute Ergänzungsvorschläge und neue Ansätze für uns parat hatten. Ohne sie wäre die Zeit während wir über unseren Arbeiten gebrütet haben, nur halb so schön gewesen. Last but not least gilt unser Dank auch unseren Eltern, die immer wieder bereit waren, uns aus Weesen abzuholen (und erst mal dahin zu bringen).

## **8 Quellen**

- [1] <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Transponder-transponder-TP.html>, letzter Abruf: 15.01.2013
- [2] [http://www.pirmasoft.de/astra/g\\_indivi.htm](http://www.pirmasoft.de/astra/g_indivi.htm), letzter Abruf: 15.01.2013
- [3] <http://www3.mpifr-bonn.mpg.de>, letzter Abruf: 15.01.2013
- [4] Krauss, John D.: Radio Astronomy, Quasar Books, 1986
- [5] Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Schroedel Verlag, Hannover, 1998
- [6] Kopie eines Datenblattes vom Max-Planck-Institut in Bonn, mit der freundlichen Erlaubnis des Autors