

# Das 3-m Radioteleskop am "Astropeiler Stockert"

## Teil 1: Aufbau und Technik

Wolfgang Herrmann

### 1. Warum ein 3-m Teleskop am Astropeiler?

Es erscheint ein wenig seltsam, dass ein 3-m Teleskop am Astropeiler aufgebaut wurde obwohl mit einem 25-m Teleskop doch ein sehr viel leistungsfähiges Instrument zur Verfügung steht [1]. Es gab eine Reihe von Gründen, die hierfür ausschlaggebend waren:

- Der Spiegel und der Rotor waren eine Spende eines Mitgliedes, und dies ergab die Notwendigkeit nun auch etwas damit zu tun.
- Es machte einfach Spaß.
- Eines unserer Ziele ist Schülern Physik nahezubringen. Dies geschieht durch die Radioastronomie als „Vehikel“. Wir haben jedoch die Erfahrung gemacht, dass unser 25-m Instrument in vielen Fällen für ein Schülerpraktikum zu komplex ist. Ein einfacherer Aufbau schien daher für diesen Zweck besser geeignet.
- Da sowohl unser 3-m als auch unser 25-m Spiegel das gleiche  $f/D$  Verhältnis von 0,3 haben, kann das kleinere Teleskop als Testlabor für die Entwicklung von Empfangshörnern und Empfängerkonzepten verwendet werden. Einheiten am Spiegel können schnell und einfach ausgetauscht werden, und die Arbeiten am 25-m Instrument werden nicht beeinträchtigt.
- Mehrere Teleskope können später zu einem Interferometer kombiniert werden.

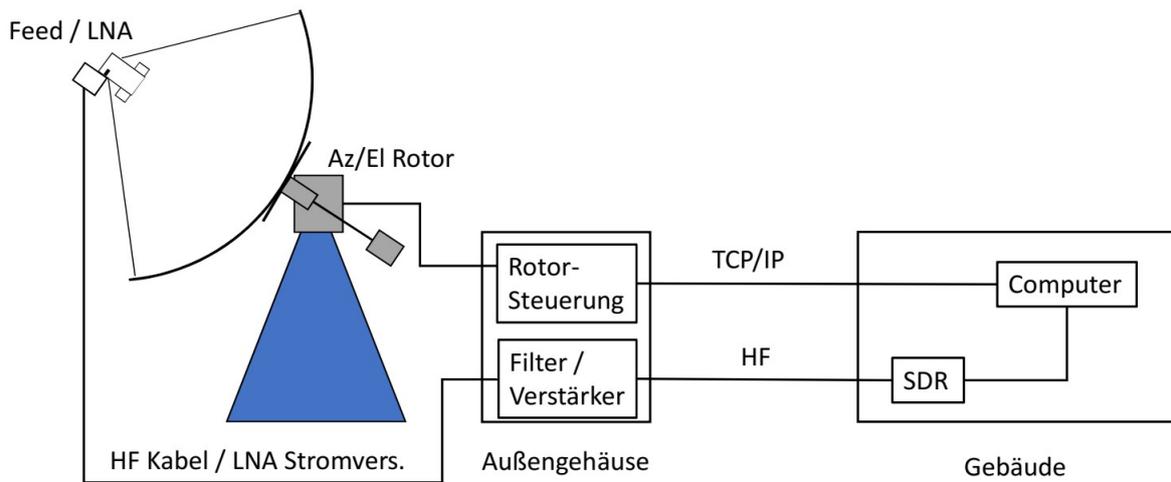
### 2. Entwicklungsziel

Das Hauptziel war, den Empfang der Emission des neutralen Wasserstoffs bei 1420,405 MHz zu ermöglichen. Die Absicht war, Schülern ein Instrument zur Verfügung zu stellen, welche damit Spektren aufnehmen und mit diesen Daten die Rotationskurve unserer Milchstraße bestimmen können. Darüber hinaus sollten Kontinuumsbeobachtungen ermöglicht werden, soweit dies mit dieser Empfangsfläche realisierbar war. Daher war sowohl spektrale Auflösung als auch eine hinreichende Bandbreite erforderlich.

### 3. Überblick über den Aufbau

Das Gesamtsystem besteht aus drei Blöcken, wie in Abb. 1 dargestellt. Diese sind physisch voneinander getrennt:

- Der Spiegel selber mit der Basis, dem Rotor, Feed Horn und „Low Noise Amplifier (LNA)“
- Ein Außengehäuse mit der Rotor-Steuereinheit, HF-Filter und Verstärkern
- Computer und Software Defined Radio (SDR) im Gebäude



**Abb. 1:** Blöcke des Systems

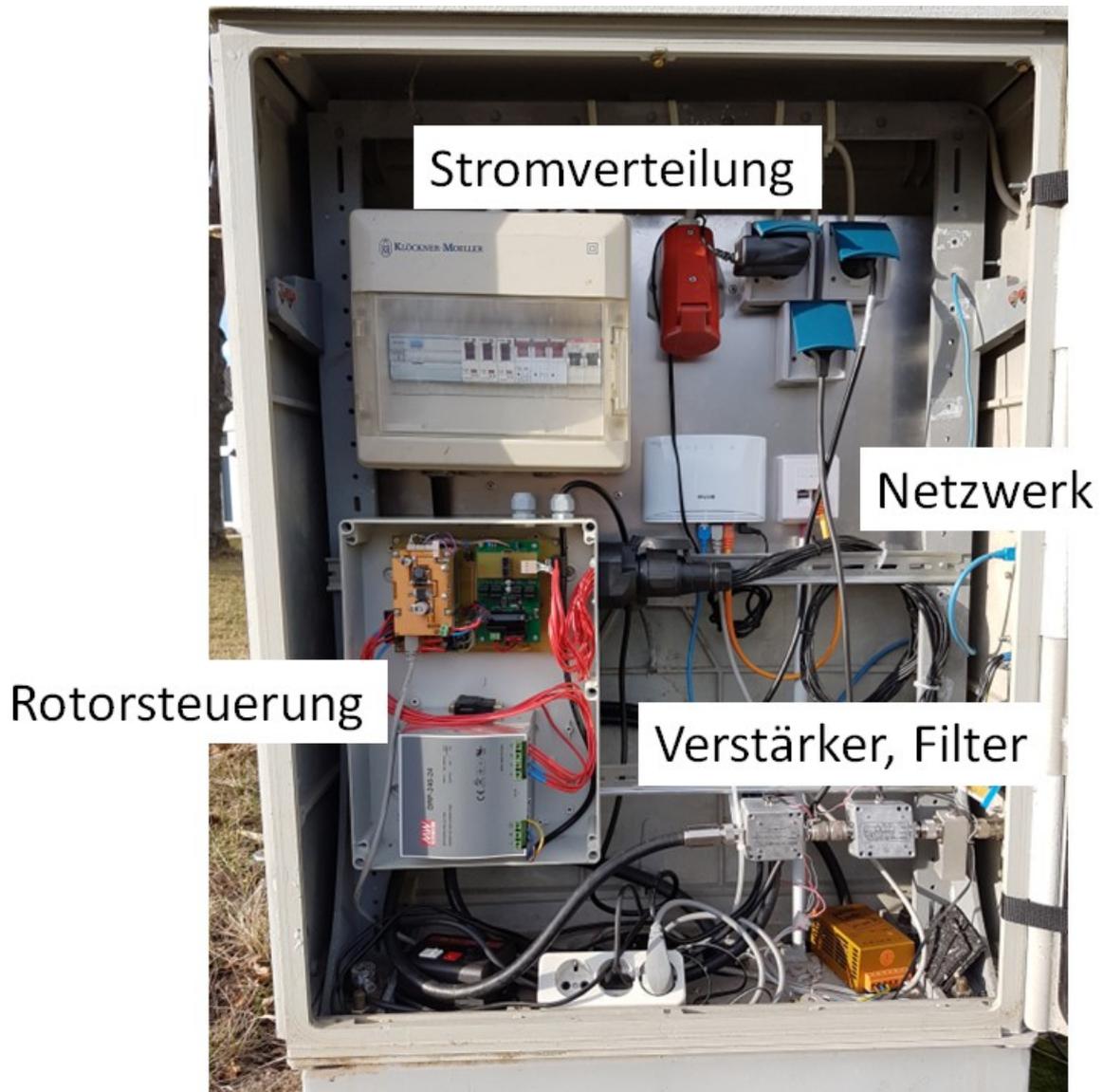
Der Spiegel und das Außengehäuse sind in Abb.2 dargestellt. Das Außengehäuse ist ein ausgedienter Kabelverzweiger (KvZ) aus dem Telefonnetz.



**Abb. 2:** Der Spiegel und das Außengehäuse

Die Rahmenantenne dazwischen gehört nicht zum System, sie dient anderen Zwecken

Der innere Aufbau des Außengehäuses ist in Abb. 3 zu sehen.



**Abb. 3:** Innerer Aufbau des Außengehäuses

Dieses Gehäuse beinhaltet die Stromversorgung sowie die Netzwerkverbindung. Weiterhin sind darin die Steuerung für den Rotor, der HF-Filter sowie Verstärker untergebracht. Die Verbindung für das HF-Signal zum Gebäude geschieht mit einem dämpfungsarmen Koaxkabel (Ecoflex 10). Dieses ist teilweise in der Erde und teilweise in Kabelkanälen verlegt.

## 4. Mechanischer Aufbau, Rotor und Rotorsteuerung

### 4.1. Mechanischer Aufbau des Spiegels

Die Basis des 3-Meter Teleskops ist eine Dreibeinkonstruktion aus Stahl. Diese ist mit Schwerlastdübeln auf einer Betonplatte verankert (Abb.4). Das Dreibein ist so gestaltet, dass eine Bewegung über den vollen Elevationsbereich möglich ist, ohne dass Spiegel oder Gegengewicht mit diesem kollidieren. Das Gegengewicht war erforderlich, da das Drehmoment des Motors in der Elevation sonst nicht ausgereicht hätte.

Die Rotoreinheit für die Bewegung in Azimut und Elevation ist am Kopf des Dreibeins angebracht. Der Spiegel ist mit dem Rotor über eine Adapterplatte verbunden.



**Abb. 4:** Gesamtansicht des Teleskops

Um den Spiegel bei starkem Wind zu sichern und die Rotoreinheit bei diesen Bedingungen zu entlasten, wurde eine Befestigung vorgesehen. An dieser kann das Gegengewicht festgeschraubt werden, siehe Abb. 5.

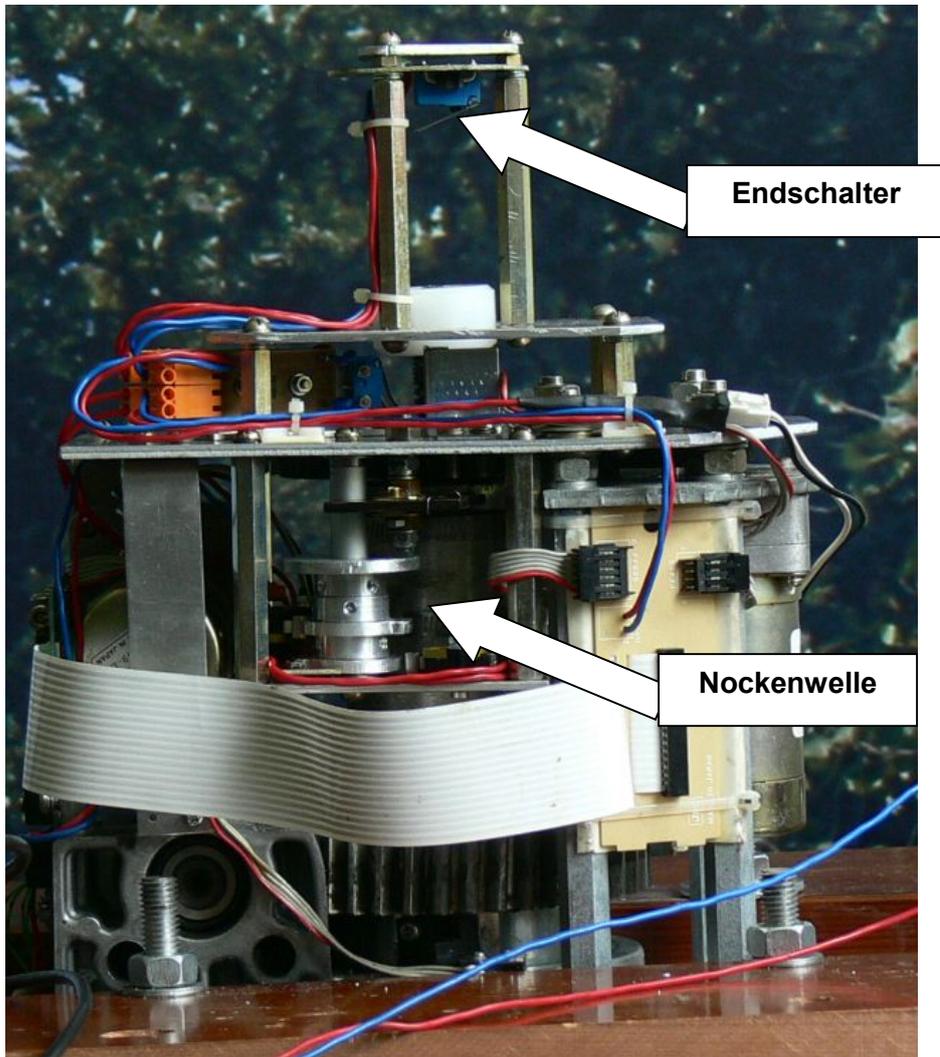


*Abb. 5: Sturmsicherung*

#### **4.2. Rotor**

Der Rotor ist ein EGIS ProfiTracker CL [2] mit einer Erweiterungseinheit für die Bewegung über den vollen Elevationsbereich von 0 bis 90 Grad, siehe Abb. 10 weiter unten.

Es gab eine Anzahl von Einschränkungen, die wir angehen mussten: Es gab keine Endschalter für die Elevation. Da wir hier nicht auf eine reine Softwarelösung setzen wollten, wurden solche Schalter ergänzt. Weiterhin kann der Rotor im Azimut unbegrenzt drehen. Dies kann dazu führen, dass Kabel abgerissen werden. Auch dieses Problem wurde durch die Ergänzung mit einer Nockenwelle behoben. Beides erforderte einige mechanischen Ergänzungen im inneren des Rotorgehäuses, siehe Abb. 6.



**Abb. 6:** *Modifiziertes Innenleben des Rotors*

Der EGIS ProfiTracker ist für Spiegelgrößen bis 2,5 Meter Durchmesser ausgelegt. Dies wird durch die Verwendung des Erweiterungssatzes für die Elevation weiter auf 1,8 Meter weiter eingeschränkt. Da unser Spiegel deutlich größer ist, musste ein Gegengewicht verwendet werden. Andernfalls hätte das Drehmoment des Rotors nicht ausgereicht. Die führte dann zu einem insgesamt höheren Gewicht auf dem Rotor. Das wiederum erforderte den Einsatz von robusteren Lagern für die Elevation, die daher ausgetauscht wurden. Wir mussten dies leidvoll erfahren, da eines der Originallager nach kurzer Betriebszeit gefressen hatte.

Eine weitere Modifikation war die Kabelverbindung zum Rotor steckbar auszulegen. Hier haben wir das Steckersystem von PKW-Anhängern verwendet. Diese sind stabil und wasserfest und dabei kostengünstig (siehe Abb. 7).

Offensichtlich waren einige Modifikationen notwendig, um den Rotor für unsere Zwecke brauchbar zu machen. Dies war aber weniger aufwendig als etwas vollkommen neu zu entwerfen. Ein kommerzieller, leistungsfähigerer Rotor wäre sehr viel teuer geworden.



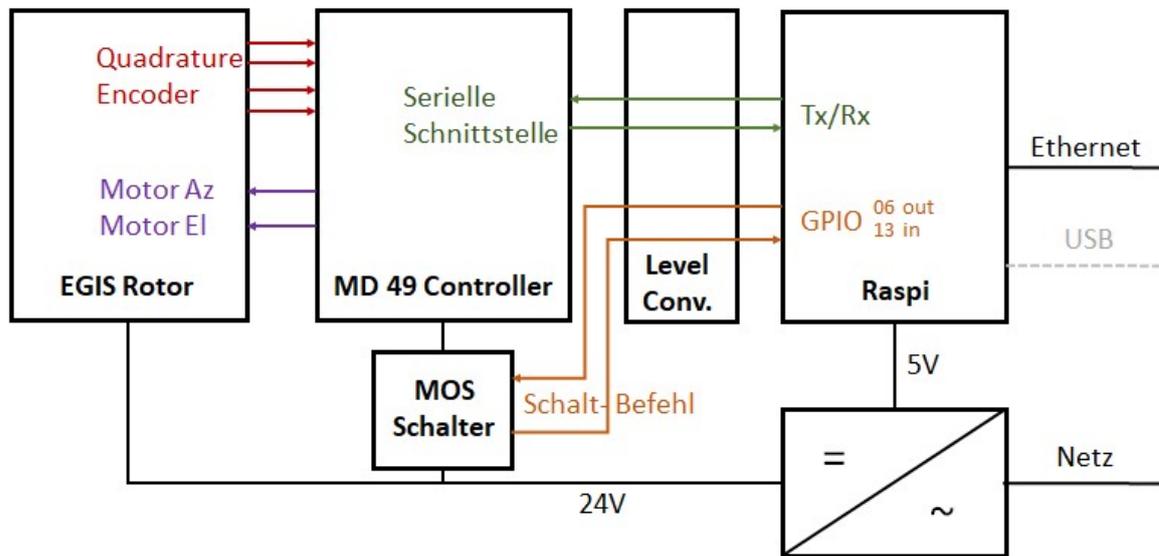
*Abb. 7: Anhänger-Steckverbindung am Rotor*

### **4.3. Rotorsteuerung**

#### **4.3.1. Steuerungs-Hardware**

Der Rotor hat eigentlich bereits eine zugehörige Steuereinheit. Da diese dafür gedacht ist Satellitenpositionen anzufahren, ist sie für die Astronomie weniger geeignet. Es gibt auch eine Version der Steuereinheit mit einer RS232 Schnittstelle, die die unsrige aber nicht hatte. Im Übrigen wollten wir die Steuerung in unser IP-Netzwerk einbinden. Daher wären ohnehin Anpassungen notwendig geworden. Wir haben uns daher entschieden, eine eigene Steuerung zu bauen. Dies erleichterte es auch ganz wesentlich, Software von unserem 25-m Spiegel zu verwenden.

Unsere Rotorsteuerung besteht aus zwei Hardwarekomponenten: Ein MD49 Motortreiber-Board von Robot Electronics [3] und ein Raspberry Pi. Der MD49 Motortreiber liefert den Strom für die Gleichstrommotoren des Rotors. Das Board hat außerdem Zähler für Quadratur-Encoder, die mit den Hallsensoren des Rotors kompatibel sind. Dies dient der Rückmeldung der Ist-Position. Die Kommunikation zwischen dem MD49 Board und dem Raspberry Pi erfolgt über ein serielles Interface. Die Stromversorgung zum MD49 Board läuft über einen MOS Schalter. Dies erlaubt es, das Board über den Raspberry Pi zurückzusetzen, wenn eine Überstromsicherung ausgelöst haben sollte. Die Umsetzung von 5 V Logik auf 3,3 V Logik erfolgt über entsprechende Konverter. Ein Blockschaltbild der Einheit ist in Abb. 8 zu sehen.



**Abb. 8:** Blockschaltbild der Steuerungshardware

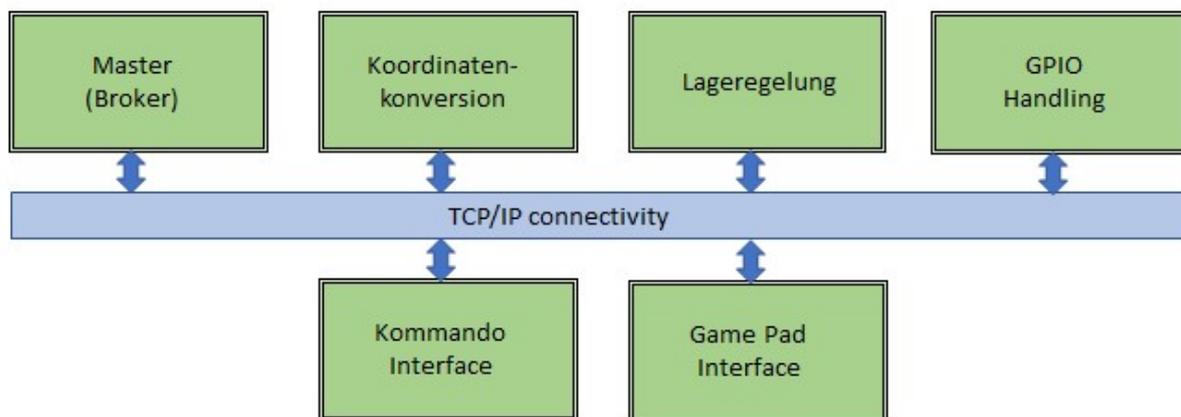
Die erwähnten Endschalter für Azimut und Elevation werden vollständig von der Hardware innerhalb des Rotors wirksam. Wenn ein Endschalter auslöst, wird der Strom zum entsprechenden Motor unterbrochen. Dioden über die Endschalter erlauben es jedoch in die entgegengesetzte Richtung zu fahren und so wieder freizufahren.

#### 4.3.2. Manuelle Steuerung

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, das Teleskop direkt manuell steuern zu können, wenn man neben dem Teleskop zum Beispiel zu Wartungszwecken steht. Dies wurde durch ein kabelloses Game Pad realisiert. Der Empfänger dieses Game Pads wird an der USB Schnittstelle des Raspberry PI eingesteckt. Die Software erkennt diesen Vorgang und dann kann das Teleskop über den Joystick des Gamepads bewegt werden.

#### 4.3.3. Steuerungssoftware

Die grundsätzliche Philosophie des Softwaredesigns ist, dass es einen zentralen Prozess gibt, der sämtliche Informationen über das Teleskop verwaltet, d.h. solche Informationen von anderen Prozessen empfängt und an diese verteilt. Dies gewährleistet, dass immer ein konsistentes Bild über den Zustand des Teleskops in allen Prozessen vorhanden ist. Es erleichtert auch, diese Prozesse voneinander getrennt zu halten. Dies wiederum erlaubt es, generische und teleskopspezifische Prozesse zu verwenden und dadurch bestehende Softwaremodule der anderen Teleskope weiter zu verwenden. Die Kommunikation der Prozesse erfolgt über TCP/IP. Dadurch können, wenn erforderlich, unterschiedliche Prozesse auch auf verschiedenen Rechnern laufen. Insbesondere werden mit diesem Konzept die Teleskopinformationen auch im gesamten Netzwerk verfügbar. Die Software ist in Python geschrieben und verwendet wo immer möglich bereits vorhandene Module. Eine Übersicht über die verschiedenen Prozesse die für den 3-m Spiegel verwendet werden ist in Abb. 9 zu sehen.



**Abb. 9:** Blockdiagramm der Software Module

Wie erwähnt, verwaltet der Master-Prozess alle Informationen, die entweder beim Systemstart durch Konfigurationsdaten festgelegt wurden oder durch andere Prozesse geliefert werden. Das Kommandozeilen-Interface ist textorientiert. Es interpretiert die Benutzereingaben und setzt die entsprechenden Informationselemente. Diese werden dann durch den Master-Prozess allen anderen Prozessen zur Verfügung gestellt. Ein typisches Beispiel wäre die Eingabe eines Zielobjektes für das Teleskop. Ein Prozess für die Koordinatentransformation konvertiert fortlaufend zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen. Äquatoriale Koordinaten werden so in andere astronomische Koordinatensysteme (wie z.B. galaktische Koordinaten) umgerechnet. Azimut und Elevation sowie die Maschinenkoordinaten werden so ebenfalls errechnet. Die Ergebnisse der Umrechnung werden dann wieder über den Master zur Verfügung gestellt. Die Positionsregelung holt sich die Maschinenkoordinaten und regelt die Lage über das MD49 Motormodul nach, so dass astronomische Objekte angefahren und verfolgt werden können. Das GPIO Handling behandelt die direkten Signale des Raspi und kann so z.B. die Versorgung des Motormoduls ein- und ausschalten. Das Game Pad Interface detektiert, wenn ein Game Pad USB Empfänger eingesteckt wird und interpretiert dann die Bewegungen des Joysticks zur Bewegung des Teleskops.

### Koordinatenkonversion für die Elevation

Bedingt durch die Konstruktion des Elevationsantriebes des EGIS Rotors besteht eine besondere Herausforderung für die Steuerung der Elevation: Eine Spindel bewegt sich auf und ab und bewirkt über einen Kippmechanismus die Veränderung der Elevation, siehe hierzu Abb. 10.

Damit ist die Elevation sehr nichtlinear mit der Drehung der Spindel verknüpft. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Bewegung im Azimut die gleiche Wirkung hat wie eine Spindeldrehung und somit die Elevation vom Azimut abhängt.

Um dieser Gegebenheit Rechnung zu tragen und eine Abbildung von Endoderwerten zur tatsächlichen Elevation zu erhalten, wurde die Elevation mit Hilfe eines elektronischen Inklinationssensors vermessen. Hierzu wurden insgesamt 2200 Messpunkte in verschiedenen Elevations- und Azimutpositionen genommen.



**Abb. 10:** Mechanik der Elevation

Ein mathematisches Modell wurde dann an diese Messwerte angepasst. Dieses erlaubt es dann für jede Kombination aus Azimut und Elevation die korrekten Soll-Encoderwerte zu errechnen. Im Zuge der Messung wurde auch festgestellt, dass die Achse des Teleskops nicht ganz genau senkrecht steht. Eine kleine Verkippung von 0,8° in Richtung 80° Azimut wurde festgestellt. Auch dies konnte durch das Modell berücksichtigt werden. Das mathematische Modell ist Bestandteil der Koordinatenkonversion.

## 5. Spiegel und Feedhorn

### 5.1. Spiegel

Der Spiegel ist ein Gitterspiegel mit aus Aluminium mit einem Durchmesser von 3 Metern. Er besteht aus 18 Segmenten mit Aluminium-Führungsschienen dazwischen. Das f/D Verhältnis ist 0,3.

### 5.2. Feedhorn

#### 5.2.1. Feedhorn Design Parameter

Das für den 3-m Spiegel verwendete Feedhorn ist ein sogenannter Kumar Feed, auch als VE4MA Horn bekannt. Dieses Design ist in dem ausgezeichneten Artikel von Paul Wade und Tommy Henderson beschrieben [4].

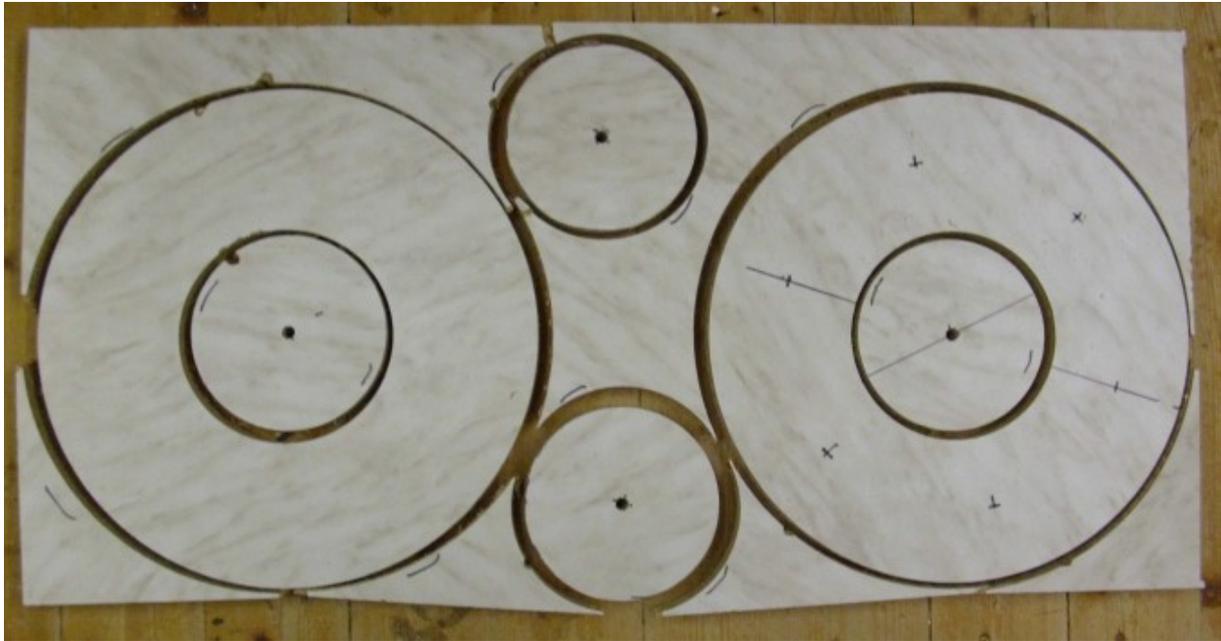
Um geeignete Parameter für das Horn zu bestimmen, haben wurde das Excel-Sheet der SETI League Organisation verwendet [5]. Die Parameter wurden so gesetzt, dass die Zielfrequenz von 1420 MHz in der Mitte der TE<sub>11</sub> und TM<sub>01</sub> Cutoff Frequenzen lag. Für die Berechnung der Choke Ring Position wurde das f/D Verhältnis von 0,3 zugrunde gelegt. Abb. 11 zeigt das Berechnungsergebnis.

| The SETI League, Inc.  |  | Cylindrical Waveguide Feedhorn Analysis |            |               |  |
|--|--|---|------------|---------------|--|
| User specifies variables shown in  |  | <b>Bold</b>                             |            |               |  |
| Freq =   | <b>1.42</b> GHz ;                      | 21.1 cm                                 | Wavelength |               |  |
| Waveguide Diameter =   | <b>5.45</b> in =                       | 13.8 cm                                 |            |               |  |
| TE <sub>11</sub> Cutoff =  | 1.27 GHz ;                             | 23.6 cm                                 | Wavelength | Margin = 12 % |  |
| TM <sub>01</sub> Cutoff =  | 1.66 GHz ;                             | 18.1 cm                                 | Wavelength | Margin = 14 % |  |
| Guide Wavelength =   | 18.61 in =                             | 47.3 cm                                 |            |               |  |
| Probe placement =  | 4.65 in =                              | 11.8 cm                                 |            |               |  |
| Feedhorn Length =  | 13.96 in =                             | 35.5 cm                                 |            |               |  |
| Zo =   | 844 ohms;                              | 2.24 vswr                               |            |               |  |
| Choke Ring Depth =   | 4.16 in =                              | 10.6 cm                                 |            |               |  |
| Choke Ring Diameter =  | 13.77 in =                             | 35.0 cm                                 |            |               |  |
| Dish F/D Ratio =   | <b>0.3</b> (Valid range: 0.25 to 0.50) |   |            |               |  |
| Feedhorn Placement: focal point of reflector falls inside lip of feedhorn by     |  |   |            |               |  |
|  | 0.50 in =                              | 1.3 cm                                  |            |               |  |
| Choke Ring Placement: distance from front of feedhorn to back of choke ring, for |  |   |            |               |  |
| Max. Gain (10 dB taper)  | 5.23 in =                              | 13.3 cm =                               | 0.63       | Wavelengths   |  |
| Min. Noise (15 dB taper)   | 4.82 in =                              | 12.2 cm =                               | 0.58       | Wavelengths   |  |

**Abb. 11:** Berechnung der Feed Horn Parameter mit dem SETI League Spreadsheet

### 5.2.2. Praktische Umsetzung des Feed Horn Designs

Das Feed Horn wurde per Hand aus Zinn-beschichtetem Stahlblech gefertigt. Für die Teile, die gebogen werden mussten, wurden Schablonen aus Holz angefertigt. Siehe hierzu Abb. 12 und 13.



*Abb. 12: Holzschablonen*



*Abb. 13: Biegevorgang mit Hilfe der Schablonen*

Die einzelnen Teile wurden miteinander verlötet, siehe Abb. 14.



**Figure 14:** gelöteter Choke Ring

Schließlich bekam das Ganze noch ein freundliches Gesicht (Abb. 15):

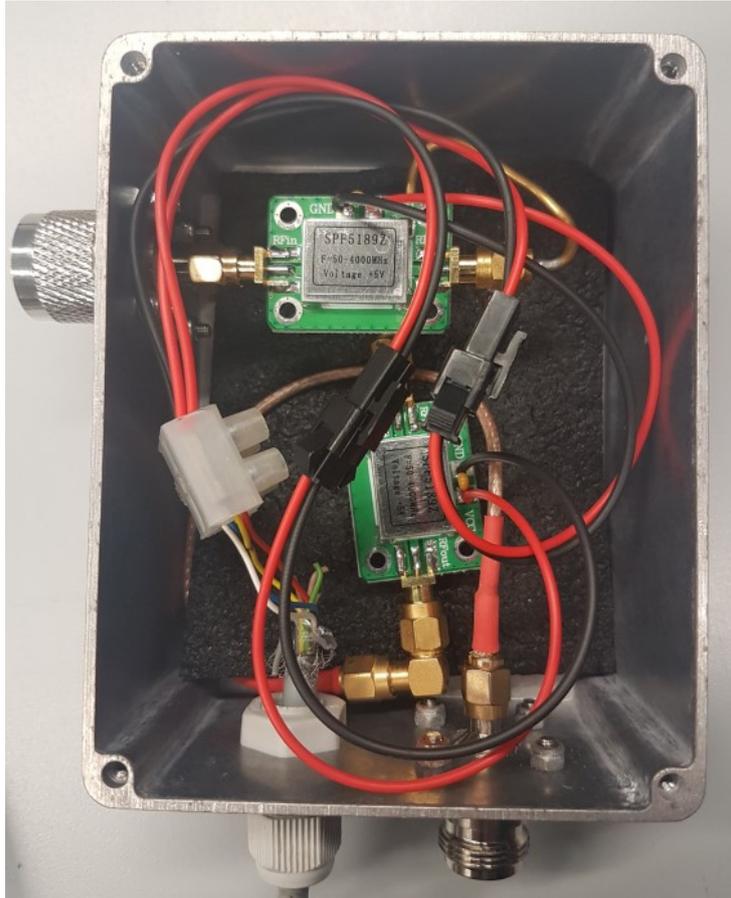


**Abb. 15:** Fertiges Feed Horn

### 5.3. HF-Kette: LNA, Filter, Linienverstärker

#### 5.3.1. LNA

Verschiedene kostengünstige LNAs wurden getestet. Die Testergebnisse findet man auf unserer Webseite [6]. Für unsere Beobachtungen haben wir vorzugsweise eine Anordnung mit zwei Modulen verwendet: Einen Triquint TQPM9037 als erste Stufe und einen SPF5189Z als zweite Stufe. Beide Module wurden in einem wasserdichten Aluminium-Gehäuse untergebracht. Die Anordnung hat eine Verstärkung von 35 dB bei einer Rauschzahl von 0,52 dB bei 1420 MHz.

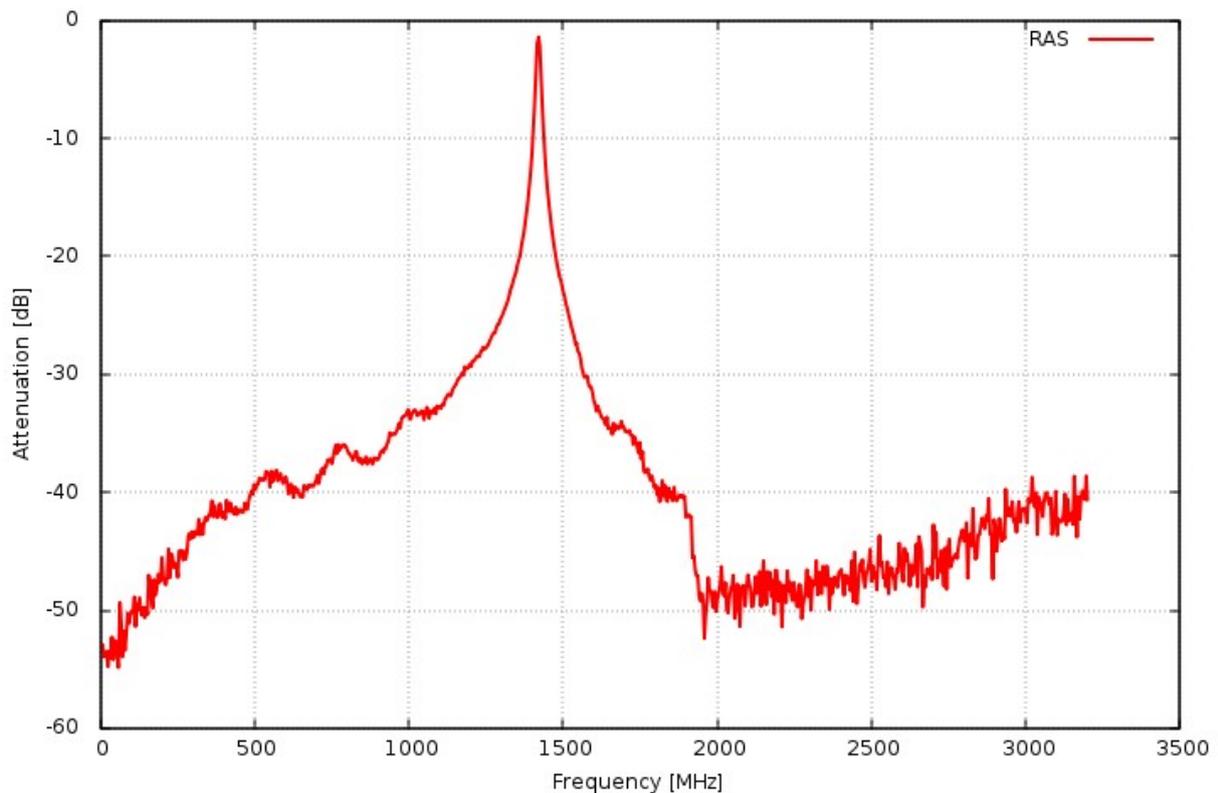


**Abb. 16:** LNA Aufbau

Abb. 16 oben zeigt zwei LNA Module im Gehäuse. Diese spezifische Variante verwendet zwei SPF5189Z Module.

#### 5.3.2. Filter

Verschiedene Filter wurden mit dem Teleskop verwendet. Diese sind ebenfalls in einem Bericht auf unserer Webseite beschrieben [6]. Bei spektralen Beobachtungen haben wir in der Regel ein Filter von Radio Astronomy Supplies [7] verwendet. Dieses hat eine 3 dB Bandbreite von 8 MHz. Die Verluste dieses Filters sind 1,1 dB. Die Filtercharakteristik ist in Abb. 17 dargestellt.



**Abb. 17:** Filterkurve des Radio Astronomy Supplies Filters

Gelegentlich wird das Teleskop auch für Beobachtungen von OH Masern bei 1612 MHz verwendet. Dann wird ein Cavity Filter verwendet, welches diesen Frequenzbereich abdeckt.

### 5.3.3. Linienverstärker

Um den Verlust auf der langen Kabelstrecke zwischen Außengehäuse und dem Gebäude zu kompensieren, sind zwei Verstärker im Außengehäuse installiert. Es sind Einheiten von Down East Microwave die in [6] beschrieben sind. Die Gesamtverstärkung beträgt 39 dB.

## 6. Backends

Da dieses Teleskop unter anderen dazu dient, verschiedene Konzepte auch für das große Teleskop zu testen, haben wir verschiedene Software Defined Radios als Backend eingesetzt. So konnten Vergleiche der verschiedenen Ansätze gemacht werden und die Vor- und Nachteile analysiert werden. Grundsätzlich beruhen alle darauf, dass eine Fouriertransformation des von den SDRs kommenden Datenstroms gemacht wird. Die wichtigsten SDRs sind nachfolgend kurz angesprochen. Eine ausführlichere Beschreibung der SDRs findet man unter [8].

### 6.1. RTL-SDR basiertes Backend

Der RTL-SDR Dongle ist ein unter Amateur-Radioastronomen recht beliebtes Gerät, da es sehr kostengünstig ist. Dieser Dongle wurde von uns für erste Tests verwendet und unser „First Light“ wurde damit aufgenommen.

## 6.2. HackRF basiertes Backend

Der HackRF ist ein Software Defined Radio welches zwischen 1 MHz und 6 GHz arbeitet. Es liefert bis zu 20 Millionen Samples pro Sekunde. Dies ist mehr Bandbreite als für die Beobachtung der 21-cm Linie erforderlich ist. Für Kontinuumsbeobachtungen hingegen ist diese Bandbreite hilfreich. Viele der Beobachtungen wurden mit einem HackRF gemacht.

## 6.3. ADALM Pluto basiertes Backend

Beobachtungen in der jüngeren Zeit wurden mit einem ADALM Pluto gemacht. Dieses SDR wird von Analog Devices hergestellt. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es eine deutlich höhere Stabilität als andere SDRs hat und damit besser für kalibrierte Messungen geeignet ist.

## 6.4. Backend Software

Für die Erfassung der Daten der verschiedenen SDRs haben wir Soapy SDR verwendet [9]. Dieses Programmpaket erlaubt es verschiedene SDRs anzusprechen und den I/Q Datenstrom zu empfangen. Der Vorteil dieses Paketes liegt darin, dass es eine einheitliche Schnittstelle für die höheren Softwareebenen für alle unterstützten SDRs bereitstellt. Für die Spektren wurde die Fouriertransformation mit dem Programm soapy\_power gemacht [10]. Dieses setzt auf Soapy SDR auf. Wir haben dann einen in Python geschriebenen Wrapper darüber gesetzt, der soapy\_power aufruft. Die Daten, angereichert um die Teleskopdaten wie Koordinaten und Targetnamen werden dann insgesamt in eine FITS Datei geschrieben. Dieser Wrapper berechnet auch die notwendigen Frequenzkorrekturen so dass alle spektralen Daten auf den „Local Standard of Rest“ bezogen sind. Die FITS Dateien können dann durch Standardprogramme weiterverarbeitet werden. An unserem Observatorium verwenden wir dafür vorzugsweise CLASS aus dem GILDAS Paket [11]

## 7. Danksagungen

Der Bau dieses Teleskops war eine Teamleistung. Darüber hinaus haben wir wertvolle Unterstützung von Personen und Organisationen außerhalb unseres Vereins erhalten. Wir sind sehr dankbar für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes und die Ermutigung durch den Rotary Club "Euskirchen-Burgfey". Eines seiner Mitglieder ist Mike Krosch, Mitinhaber der Firma Hecker&Krosch. Er und seine Firma haben sehr wertvolle Beiträge zu dem mechanischen Design geleistet und diverse Teile, darunter die Basis und das Gegengewicht angefertigt.

Aus unserem Verein waren beteiligt (in alphabetischer Reihenfolge):

- Thomas Buchsteiner, der alle Aktivitäten zu dem mechanischen Design koordiniert hat und der unsere Kontaktperson zu Hecker&Krosch war
- Wolfgang Herrmann, der die Empfangskette entworfen und gebaut hat, die astronomische Software des 25-m Spiegels migriert hat und der Beiträge zur Steuerungssoftware geschrieben hat.
- Hans-Peter Löge, der die Steuerungshardware gebaut hat.
- Martin Klenke, der Spiegel und Rotor gespendet hat.
- Andreas Marschner, der das Steuerungssystem entworfen hat und entsprechende Software entwickelt hat.
- Gerhard Stramm, der das Empfangshorn gebaut hat und der die Endschalter für den Rotor entworfen und gebaut hat.

### Literatur:

[1] <https://astropeiler.de/beobachtungen-mit-dem-25-meter-spiegel>

[2] [http://www.egis-rotor.de/aroto\\_us.html](http://www.egis-rotor.de/aroto_us.html)

[3] <https://www.robot-electronics.co.uk/products/drive-systems/motor-boards/md49-24v-5a-dual-h-bridge-motor-driver.html>

- [4] [www.w1ghz.org/antbook/conf/high\\_efficiency\\_prime\\_feeds.pdf](http://www.w1ghz.org/antbook/conf/high_efficiency_prime_feeds.pdf)
- [5] <http://www.setileague.org/software/feedhorn.xls>
- [6] [https://astropeiler.de/sites/default/files/Hydrogen\\_2.pdf](https://astropeiler.de/sites/default/files/Hydrogen_2.pdf)
- [7] <https://www.radioastronomysupplies.com/>
- [8] [https://astropeiler.de/sites/default/files/Hydrogen\\_3.pdf](https://astropeiler.de/sites/default/files/Hydrogen_3.pdf)
- [9] <https://github.com/pothosware/SoapySDR/wiki>
- [10] [https://github.com/xmikos/soapy\\_power](https://github.com/xmikos/soapy_power)
- [11] <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>