

Ein transportables Radioteleskop für Schulprojekte

Wolfgang Herrmann

1. Einleitung

Radioastronomie Schülern nahezubringen und damit den Physik-Unterricht anzureichern, ist eines der Ziele des "Astropeiler Stockert e.V." Viele schöne Projekte lassen sich mit den Instrumenten auf dem Stockert durchführen. Jedoch ist es Schulen nicht immer möglich, einen Ausflug zu unternehmen und diese Angebote wahrzunehmen. Um auch solchen Schulen die Faszination der Radioastronomie nahebringen zu können, wurde ein Radioteleskop gebaut, welches klein genug ist um transportabel zu sein. Dieses kann dann zu den Schulen gebracht werden und die Experimente können vor Ort durchgeführt werden.

Da es bereits mit sehr minimalen Mitteln möglich ist, die 21-cm Linie des Wasserstoffs zu beobachten [1], ist dies umso mehr mit einem kleinen Teleskop machbar. Hier kann sogar die Rotation unserer Milchstraße beobachtet werden. Diese Möglichkeit wird mit unserem kleinen, transportablen Radioteleskop eröffnet.

In diesem Artikel beschreiben wir den Aufbau, den Betrieb und die Beobachtungsergebnisse eines solchen kleinen Teleskops.

2. Zielsetzung und Grundkonzept

Die Zielsetzungen für das Teleskop waren:

- Es sollte die Beobachtung der 21-cm Linie des neutralen Wasserstoffs ermöglichen
- Es sollte leicht transportierbar und mit minimalem Aufwand in Betrieb zu nehmen sein
- Es sollte alle Komponenten mit Hard- und Software enthalten
- Es sollte mit minimalem Verkabelungsaufwand vor Ort auskommen
- Es sollten umfangreiche Unterlagen vorhanden sein, die die Benutzung und die möglichen Experimente beschreiben
- Es sollte soweit möglich, existierende Hard- und Softwarelösungen der bereits vorhandenen Teleskope wiederverwenden

Aufgrund dieser Zielsetzungen wurde eine Größe des Parabolspiegels von 1,2 m Durchmesser ausgewählt. Um eine Beobachtung in der galaktischen Ebene zu ermöglichen, musste das Teleskop in Azimut und Elevation steuerbar sein. Da wir für unseren 3-m Spiegel einen EGIS Rotor verwenden, fiel die Wahl auf einen gleichen Rotor [2]. Dies erlaubt es, Hard- und Softwarekomponenten weitgehend zu übernehmen. Die Transportfrage wurde dadurch gelöst, in dem das ganze Teleskop mit allen Einheiten auf eine PKW-Anhänger untergebracht wurde. Auf dem Anhänger war auch alle Elektronik für Steuerung und Empfang unterzubringen, um vor Ort ausschließlich Strom und ein Netzwerkkabel für den Betrieb zu benötigen.

3. Aufbau und Technik

Das Teleskop ist in betriebsfertiger Konfiguration in Abb. 1 zu sehen. Ein Grundrahmen aus Alu-Profilen bildet die Basis des Teleskops. Dieser ist mit dem Anhänger fest verschraubt. Der Rotor ist oberhalb des Grundrahmens aufgesetzt und erlaubt somit die Beweglichkeit des Spiegels über den gesamten Azimut- und Elevationsbereich. Für den Transport wird der Spiegel von Rotor abgenommen und mit einer Vorrichtung auf dem Anhänger befestigt (Abb.2). Dies verhindert, dass während der Fahrt zu hohe Windkräfte auf Spiegel und Rotor einwirken.



Abb. 1: Das 1,2-m transportable Teleskop



Abb. 2: Das Teleskop in Transportkonfiguration

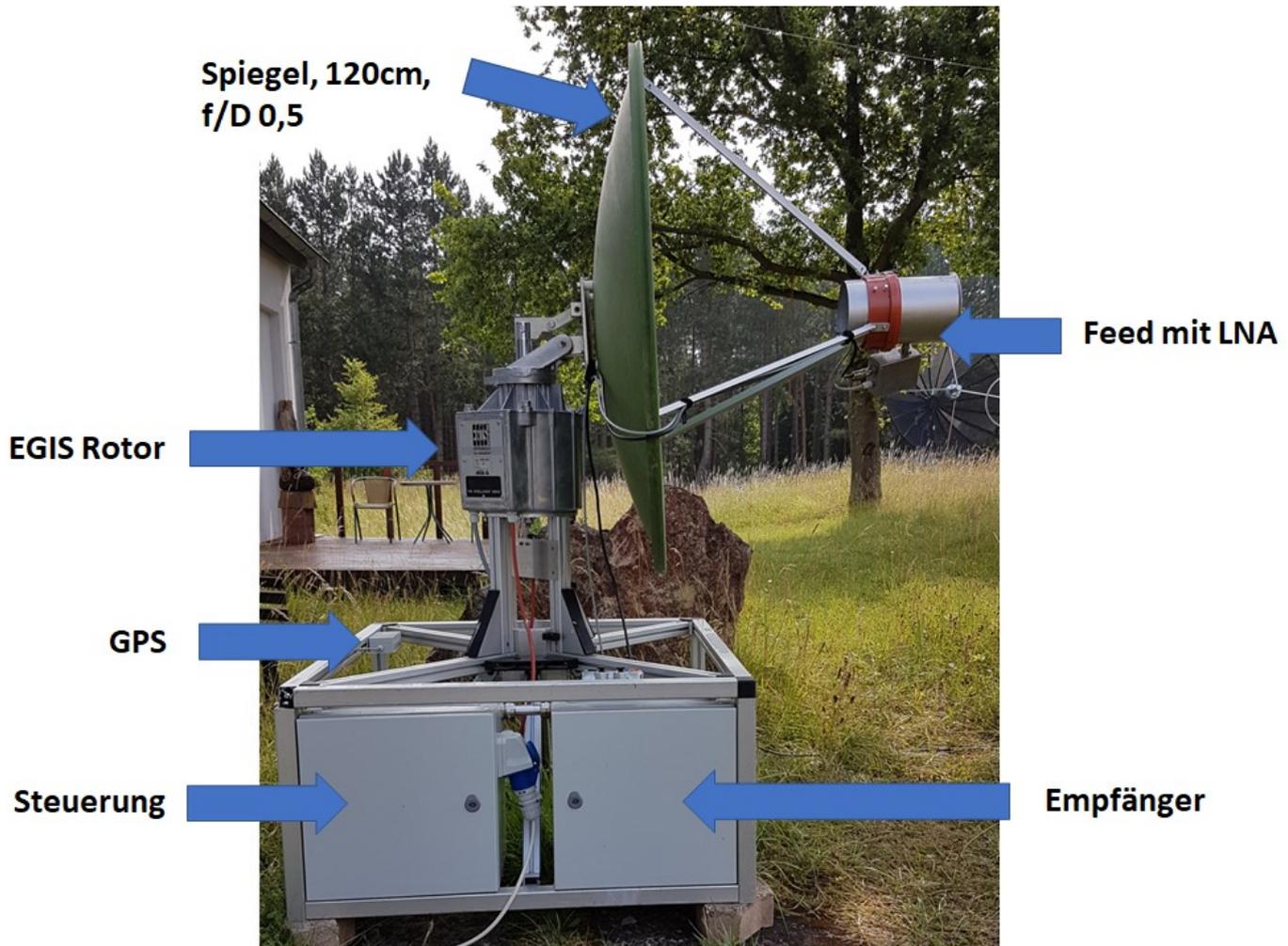


Abb. 3: Die Teleskopeinheit und ihre wesentlichen Komponenten

Abb. 3 zeigt die Teleskopeinheit ohne den Anhänger mit ihren wesentlichen Komponenten. Neben dem Spiegel mit Low Noise Amplifier (LNA) und Rotor sind ein GPS Empfänger und zwei Metallgehäuse montiert. Der GPS Empfänger dient dazu, den Standort des Teleskops festzustellen und die genaue Zeit für die Steuerung zur Verfügung zu stellen. Die Steuerung selber ist in dem linken Metallgehäuse untergebracht. Das rechte Metallgehäuse enthält ein HF-Filter sowie den eigentlichen Empfänger, für den ein Software Defined Radio (SDR) verwendet wird.

3.1. Spiegel und Empfangshorn

Der Spiegel hat einen Durchmesser von 120 cm bei einer Brennweite von 60 cm. Es handelt sich somit um einen relativ flachen Spiegel mit einem f/D Verhältnis von 0,5. Als Empfangshorn wurde ein einfacher Rundhohlleiter verwendet, der aus einem Ofenrohr gebaut wurde.

Das Beamprofil des Empfangshorns wurde vermessen und ist in Abb.4 zu dargestellt. Die blauen Pfeile zeigen an, in welcher Richtung der Spiegelrand vom Horn aus zu sehen ist. Man erkennt an diesem Diagramm, dass eine recht befriedigende Ausleuchtung erreicht wird. Jedoch ist auch eine signifikante Überstrahlung an den Rändern erkennbar, so dass mit einer höheren Systemtemperatur zu rechnen ist. Dies ist ein Kompromiss, den man bei einem so einfachen Horn eingehen muss.

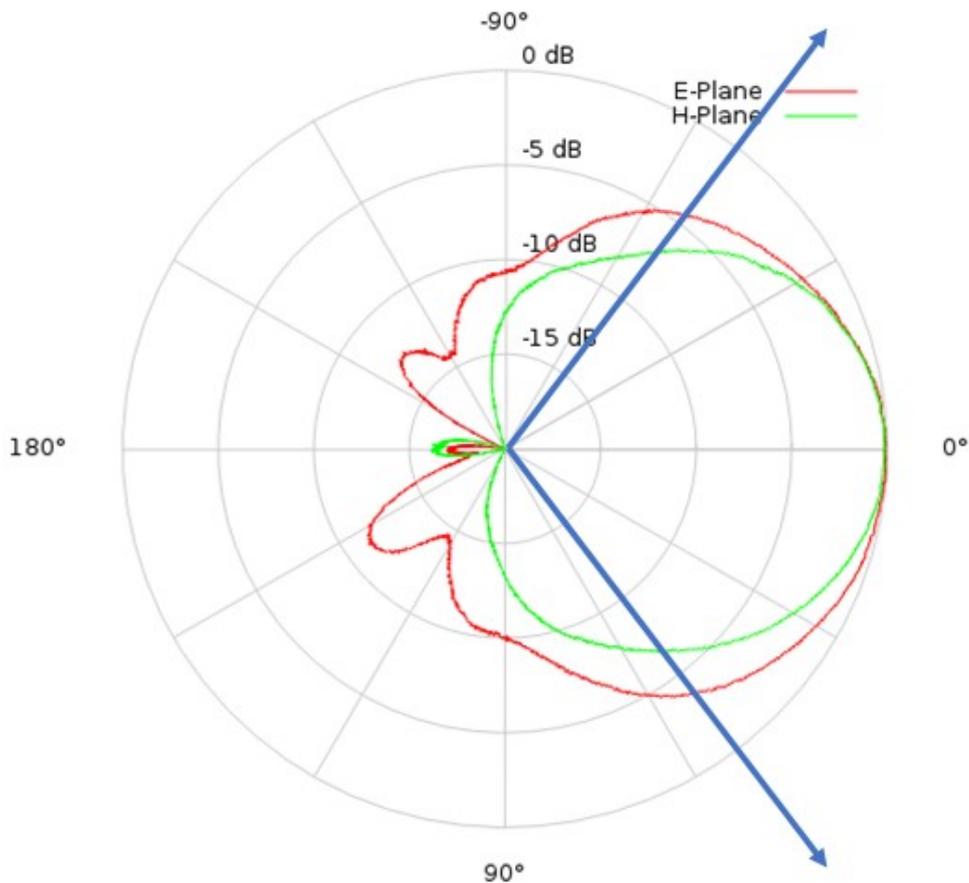


Abb. 4: Beamprofil des Empfangshorns

3.2. LNA

Als LNA werden zwei hintereinander geschaltete Module mit einem SPF5189Z P-HEMT Transistor verwendet. Solche Module sind sehr preiswert und bieten eine recht akzeptablen Rauschzahl. Dieser LNA hat eine Verstärkung von 27 dB bei einer Rauschzahl von 0,88 dB.

Die Module sind in einem wasserdichten Aluminium-Druckgussgehäuse untergebracht. Dieses ist mit N-Steckern versehen. Die Stromversorgung erfolgt über ein separates Kabel von der Empfangseinheit.

3.3. Empfangseinheit

Der LNA wird über ein Kabel mit N-Steckern mit der Empfangseinheit verbunden. Diese Empfangseinheit besteht aus einem Cavity-Filter und einem ADALM-Pluto Software Defined Radio (SDR). Das Filter hat eine Dämpfung von 0,4 dB bei 1420 MHz und eine 3dB Bandbreite von 24 MHz. Das SDR ist mit einem USB zu Ethernetadapter versehen. Ein solcher Adapter wurde verwendet, um einen Rechner (Laptop) mit der SDR-Software entfernt von dem Teleskop aufstellen zu können, siehe hierzu die weiteren Ausführungen unter 4. Alle Geräte der Empfangseinheit sind in dem separaten, rechten Metallgehäuse untergebracht. Eine Innenansicht ist in Abb. 5 zu sehen.



Abb. 5: Empfangseinheit

3.4. Steuerung

In dem linken Metallgehäuse ist die Steuerung, die Stromversorgung und ein Gigabit-Ethernet Switch untergebracht. Die Verbindung zum Rotor, die Netzwerkverbindung und die Stromverbindung sind alle wetterfest ausgelegt. Außerdem ist eine wasserfeste USB Steckdose eingebaut, so dass die USB-Schnittstelle des Steuerrechners von außen zugänglich ist. Eine Gesamtansicht dieser Einheit ist in Abb. 6 zu sehen.

Die Rotorsteuerung besteht aus zwei hauptsächlichen 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 Hallensensoren des Rotors kompatibel sind. Dies dient der Rückmeldung der Ist-Position des Azimut. 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.

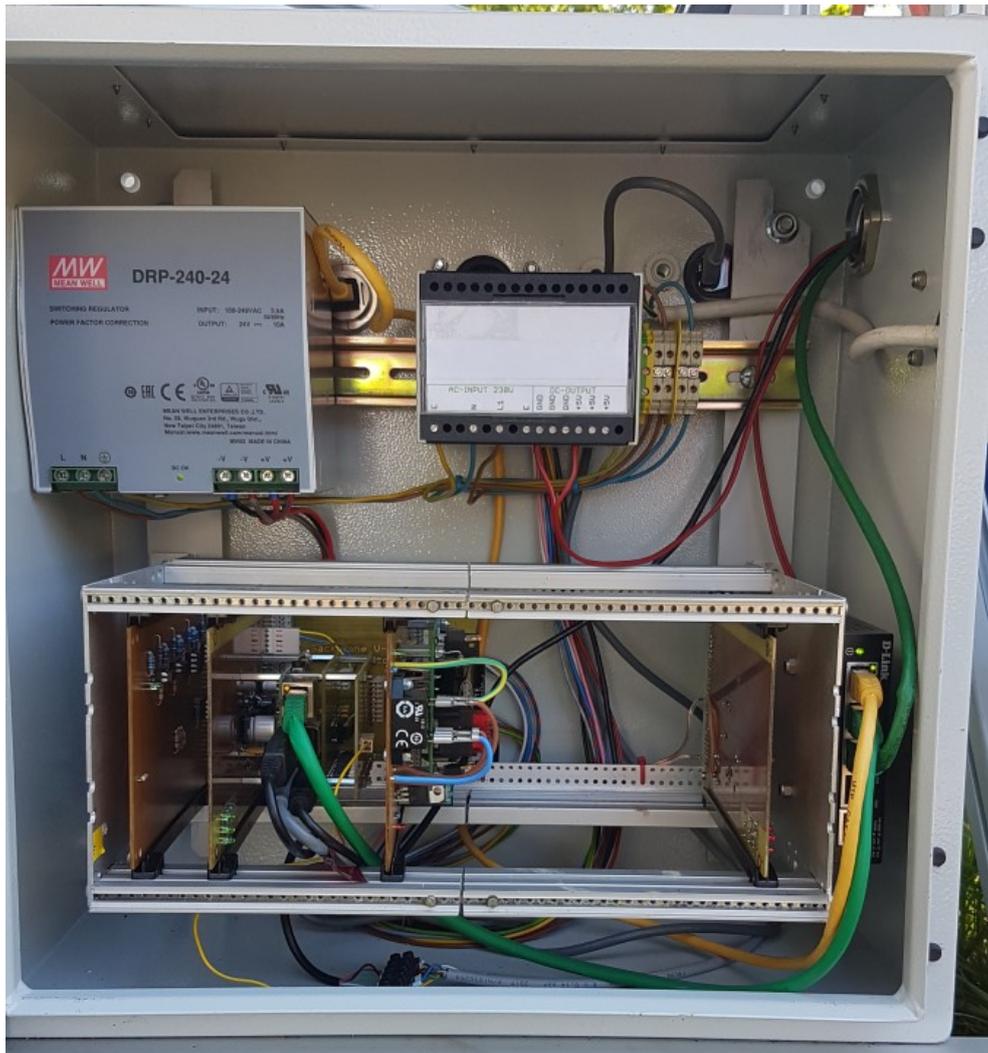


Abb. 6: Steuerung

Um die Elevation zu erfassen, wird ein Neigungssensor verwendet. Die Wahl fiel auf diese Lösung, da nicht sichergestellt werden kann, dass der Anhänger immer genau waagrecht aufgestellt wird. Der Neigungssensor ist ein ADXL 203, der mit einem Arduino Nano verbunden ist. Der Arduino errechnet die Neigung aus den Rohdaten des Sensors und übermittelt dies an den Raspberry Pi über eine USB Schnittstelle. Eine weitere USB Schnittstelle dient der Verbindung zu einem GPS um aktuelle Daten für Zeit und Ort zu haben. Zur Verbesserung der Zeitgenauigkeit wird auch der PPS Puls vom GPS ausgewertet, was sicher in dieser Anwendung nicht unbedingt notwendig wäre. Ein Blockschaltbild der Einheit ist in Abb. 7 zu sehen.

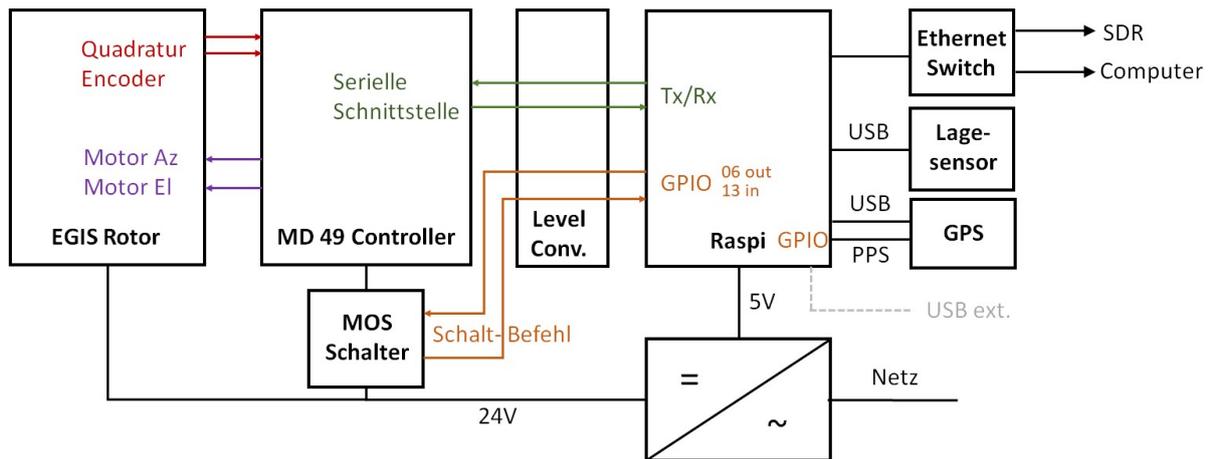


Abb. 7: Blockschaltbild der Steuerung

Die externe USB Schnittstelle dient insbesondere auch dazu, einen Game Controller anzuschließen. Dieser erlaubt es, über den Joystick das Teleskop manuell zu steuern. Dies wird insbesondere zum erstmaligen Einrichten benötigt. Das Einstecken eines solchen Controllers wird automatisch erkannt und die entsprechende Funktion wird dann aktiviert.

3.4.1. Steuerungssoftware

Die Steuerungssoftware ist weitgehend gleich zu der, die bei dem 3-m Spiegel [3] des Astroteiler Stockert verwendet wird. Die grundsätzliche Philosophie hierbei 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. Die Software ist in Python geschrieben und verwendet wo immer möglich bereits vorhandene Module. Eine Übersicht über die verschiedenen Prozesse die für den 1,2-m Spiegel verwendet werden ist in Abb. 8 zu sehen.

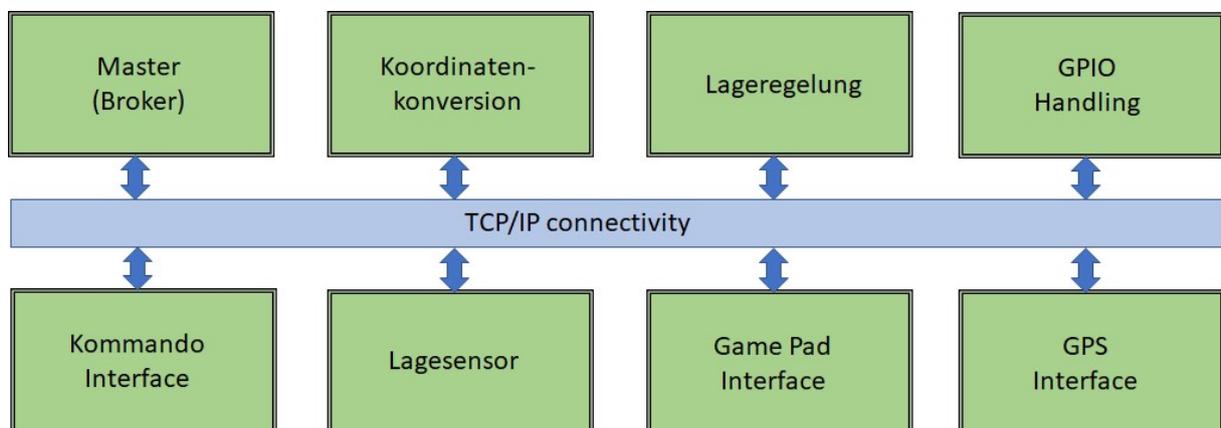


Abb. 8: Blockdiagramm der Software Module

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 zugehörigen Maschinenkoordinaten für den Azimut werden so ebenfalls errechnet. Die Elevation kann direkt über den Soll-Winkel gesteuert werden, da ein Lagesensorprozess die Elevation direkt liefert. Die Positionsregelung holt sich die jeweiligen Soll- und Ist-Daten 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 Raspberry Pi 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. Das GPS Interface schließlich kommuniziert mit dem GPS-Daemon um die aktuelle Position des ortveränderlichen Teleskops für die Rechnungen zur Verfügung stellen zu können.

4. Software für Bedienung, Signalverarbeitung und -darstellung

Das Teleskop ist über den internen Ethernet Switch mit einem Notebook verbunden, auf dem die Programme für die Bedienung und für die Verarbeitung der von dem SDR gelieferten Rohdaten laufen.

4.1. Kommando-Oberfläche

Die Eingabe der Kommandos zum Fahren des Teleskops erfolgt über eine textorientierte Schnittstelle. Hier können Zielkoordinaten in äquatorialen, galaktischen oder auch als Azimut und Elevation eingegeben werden. Weitere grundlegende Funktionen wie das Ein- und Ausschalten, die Darstellung der Ist-Position und Anderes stehen zur Verfügung. Hierbei übernimmt der Notebook keine eigene Verarbeitung, vielmehr dient er lediglich als Terminal zu der Steuerung, in der die eigentliche Funktionalität implementiert ist.

4.2. Signalverarbeitung und Darstellung

Das SDR liefert das empfangene Signal in Form von komplexen Werten (I/Q-Daten). Dieser Signal ist letztlich ein Vektor der Betrag und Phase darstellt. Je nach eingestellter Bandbreite kann die Datenrate bis zu 200 Mbit/s sein. Dieses Signal wird fortlaufend durch eine Fourier-Transformation verarbeitet, so dass man ein Spektrum des Empfangssignals erhält.

Für die Ansteuerung des SDRs, den Empfang der Rohdaten und für die Errechnung der Fouriertransformation verwenden wir ein Programmsystem, welches nicht nur die Verwendung des hier verwendeten ADALM Pluto SDR erlaubt, sondern auch andere SDRs unterstützt und damit universell verwendbar ist. Dieses nennt sich SoapySDR [4] im Zusammenhang mit soapy_power [5] für die Fouriertransformation. Beide Pakete sind Freeware.

Als Schicht darüber gibt es drei verschiedene Programme, die das darunterliegende System ansteuern und die Daten empfangen. Diese sind Eigenentwicklungen und in Python geschrieben:

- Ein Programm, welches die empfangene Gesamtleistung als Summe aller spektralen Kanäle misst und entweder live darstellt oder aufzeichnet (Kontinuumsignal),
- Ein Programm, welches die spektral aufgelösten Daten 1x pro Sekunde empfängt, eine Basislinienkorrektur vornimmt und das resultierende Spektrum live darstellt,

- Ein Programm, welches spektral aufgelöste Daten mit einer einstellbaren Auflösung und Integrationszeit misst und die Daten für detaillierte Auswertungen in eine Datei (FITS-Format) schreibt.

Die beiden erstgenannten Programme sind primär für die Schulpraktika gedacht. Das dritte Programm ist für fortgeschrittenere Versuche, bei dem z.B. die Rotationskurve der Galaxis aufgenommen werden soll. Alle Programme sind so ausgelegt, dass Spektren und Geschwindigkeiten immer auf den „Local Standard of Rest (LSR)“ bezogen sind. Dieses ist ein Referenzsystem, bei dem die Eigenbewegung der Erde herausgerechnet wird. Dieses verhindert, dass aufgrund der Bewegung der Erde die Messergebnisse je nach Zeitpunkt der Messung variieren.

Ein Beispiel, wie das Live-Bild von dem ersten Programm aussieht, ist in Abb. 9. gezeigt. Dieses wird im Takt von ca. einer Sekunde fortgeschrieben, so dass ein laufendes Profil entsteht. Der jeweils aktuelle Messwert wird zusätzlich angezeigt. In diesem Beispiel wurde das Teleskop auf die Sonne gefahren und dann wieder von der Sonne weggefahren. Der deutliche Anstieg des Signals ist augenfällig.

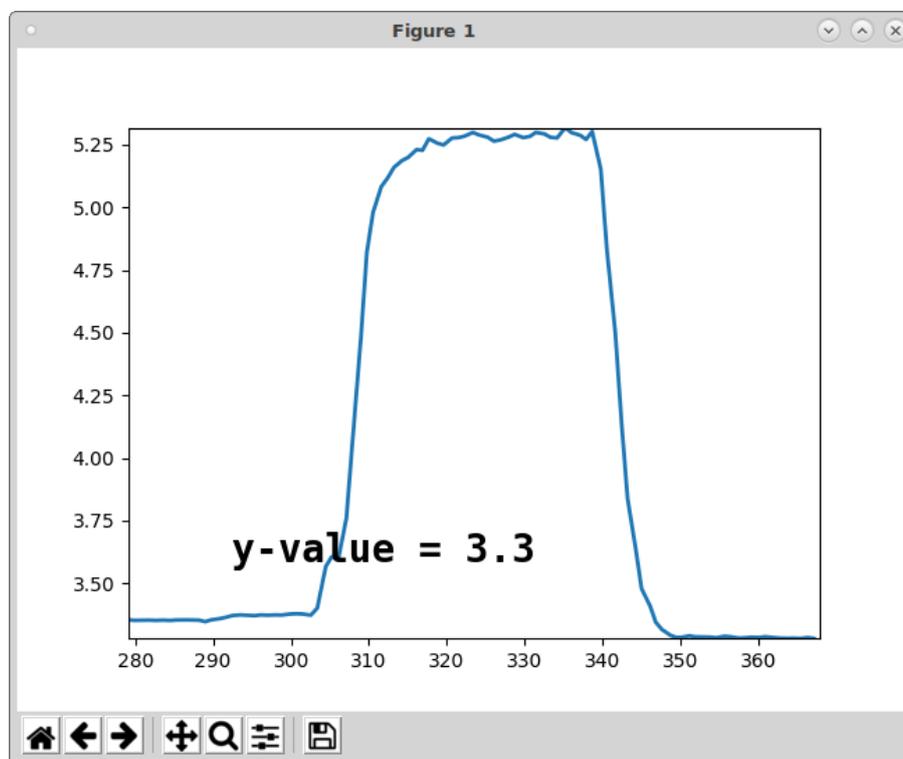


Abb. 9: Kontinuumsignal der Sonne

Das zweite Programm mit einer Live-Darstellung des Spektrums erzeugt eine Grafik wie in Abb. 10 dargestellt. Das gezeigte Beispiel demonstriert das Spektrum bei einer galaktischen Länge von 90° in der galaktischen Ebene (gal. Breite 0°).

Die schmale Linie bei ca. 200 km/s ist eine Störlinie, die nicht astronomischen Ursprungs ist. Auch ist das Spektrum in der Intensität unkalibriert. Der besondere Vorteil dieser Darstellung besteht darin, dass man die Veränderung des Spektrums unmittelbar mit der Bewegung des Teleskops verfolgen kann.

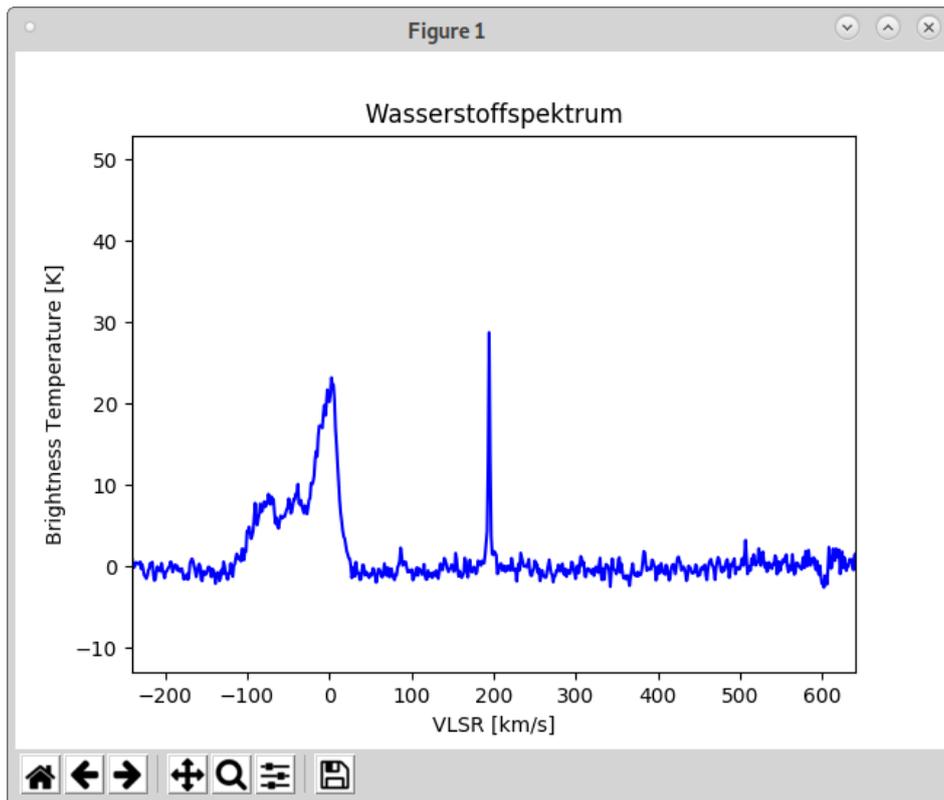


Abb. 10: Live Spektrum (unkalibriert)

Ein Beispiel für ein Spektrum welches mit dem dritten Programm aufgezeichnet und dann mit Hilfe des CLASS Programms aus dem GILDAS Paket [6] ausgewertet wurde, ist in Abb. 11 dargestellt. Es zeigt das Spektrum an der gleichen Position wie im obigen Beispiel, d.h. in Richtung 90° galaktischer Länge in der galaktischen Ebene (galaktische Breite = 0°). Die Integrationszeit war 1 Minute bei einer spektralen Auflösung von 1,47 kHz. Zwei schmale Spitzen bei -75 km/s und 95 km/s sind Störungen die nicht zur Emission des Wasserstoffs gehören. Hier ist natürlich aufgrund er längeren Integrationszeit ein deutlich besseres Signal/Rauschverhältnis erreicht. Die spektrale Auflösung ist hier mit 1,46 KHz höher gewählt.

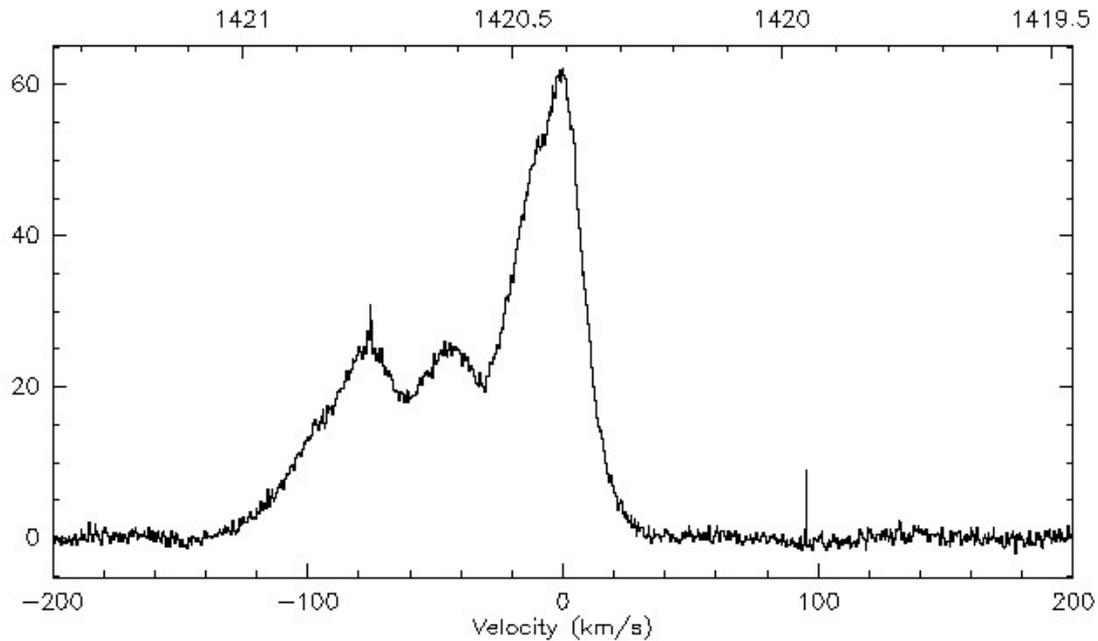


Abb. 11: Beobachtetes Spektrum $l=90^\circ$, $b=0^\circ$

Vertikale Skala ist die Helligkeitstemperatur in K

Obere horizontale Skala ist in MHz, untere horizontale Skala ist die Geschwindigkeit bezogen auf LSR

5. Fazit

Ein Teleskop in der hier vorgestellten Größenklasse von gut einem Meter Durchmesser ist ohne Weiteres geeignet, um die Emission des neutralen Wasserstoffs aus der Milchstraße zu beobachten. Die verhältnismäßig bescheidene Größe erlaubt es, das System transportabel auszulagern und so Schulklassen das Erlebnis Radioastronomie unmittelbar nahe zu bringen.

6. Das Team

Wie immer am Astroteiler, so ist auch dieses Projekt eine Teamleistung bei der viele Hände und Köpfe beteiligt waren. Die nachstehende Liste ist sicher nicht ganz vollständig, aber die Hauptbeteiligten waren (in alphabetischer Reihenfolge):

Thomas Buchsteiner: Integration aller Hardwarekomponenten
 Bert Engelskirchen: Feedhalterung und weitere mechanische Arbeiten
 Hans-Peter Löge: Hardware der Steuerung, Teile der Steuerungssoftware
 Wolfgang Herrmann: HF-Design, LNA und Software, Systemintegration
 Karl-Josef Mauel: Beschaffung, Zulassung und Herrichtung des Anhängers
 Gerhard Stramm: Bau des Cavity Filters

7. Danksagung

Wir danken Per Dudek, Kiel, für die Überlassung des Spiegels, dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie für die Überlassung der Alu-Rahmenstruktur und der Fa. Hecker & Krosch für die Anfertigung von robusteren Lagern für den Rotor

Literatur und Web-Links:

- [1] <https://astropeiler.de/beobachtungen-der-21-cm-linie-mit-einfachen-mitteln>
- [2] http://www.egis-rotor.de/aroto_us.html
- [3] <https://astropeiler.de/beobachtungen-mit-dem-3-meter-spiegel>
- [4] <https://github.com/pothosware/SoapySDR/wiki>
- [5] https://github.com/xmikos/soapy_power
- [6] <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>