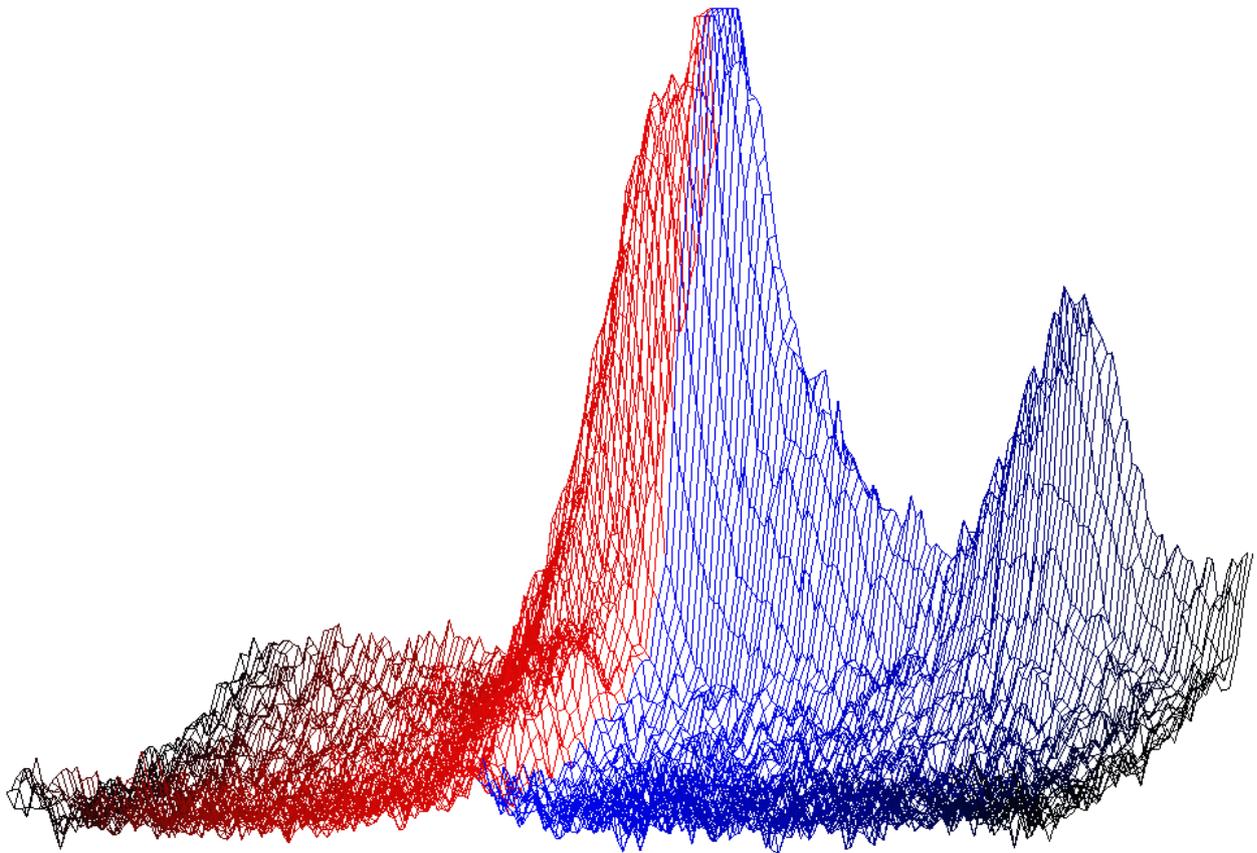


# **Untersuchung des Dopplereffektes der Wasserstoff- H1-Linie in der Milchstraße**



*Das Bild zeigt die Veränderung von Wasserstoff-Spektren in Abhängigkeit vom Horizontwinkel*

**Philip Pohl (16)**

**Christian-Gymnasium Hermannsburg**

**Wettbewerb „Jugend forscht“ 2019**

**Betreuung: StD i.R. Thomas Biedermann**

## Inhalt

Einleitung .....	1
1 Grundlagen.....	1
1.1 Die H1-Linie von Wasserstoff .....	1
1.2 Der Aufbau der Milchstraße .....	2
1.3 Dopplereffekt .....	3
1.4 Dopplereffekt in der Milchstraße .....	3
2 Messaufbau.....	4
2.1 Radioteleskop .....	4
2.2 Messgerät:.....	4
2.3 Software .....	5
2.3.1 MasterGUI .....	5
2.3.2 Positionssteuerung.....	5
2.3.3 Koordinatenserver.....	5
2.3.4 Spectra-Cyber-Steuerung .....	6
3 Durchführung der Messungen .....	6
3.1 Reflektor-Ausrichtung und Nachführung .....	6
3.2 Datenerfassung und Protokollierung.....	7
3.3 Messbeispiele .....	8
3.3.1 Qualitätsunterschiede .....	8
3.3.2 Störquellen .....	8
3.3.3 Externe Referenz .....	9
3.4 Bestimmung der Peak-Amplituden und Frequenzverschiebungen .....	9
3.5 Visualisierung der Messdaten .....	10
4 Auswertung.....	11
4.1 Zuordnung der Peaks im Milchstraßenmodell .....	12
4.2 Einfluss der Erdbahn (Relativgeschwindigkeit Erde Himmelskörper).....	12
4.3 Fehleranalyse.....	13
5 Zusammenfassung .....	14
6 Ausblicke auf weitere sinnvolle Messungen .....	14
7 Quellenangaben .....	15
8 Danksagungen .....	15

## Einleitung

Seit dem Sommer 2018 ist das Radioteleskop unserer Schule einsatzbereit, an dessen Aufbau ich in den vergangenen Jahren mitgearbeitet habe. Mit den dabei entwickelten Messsystemen ist es nun möglich, konkrete Messungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen durchzuführen, was zu einem besseren Verständnis stellarer und interstellarer Prozesse führen kann. Derzeit ist dieses Messinstrument für die Messung einer speziellen Wasserstoff-Emissionslinie eingerichtet, die im Bereich von 1420 MHz auftritt.

In einer sternklaren Nacht sieht man am Himmel vor allem erst einmal viele Sterne, eventuell auch noch den Mond. Nach einiger Zeit fällt aber auch ein erkennbar hellerer diffuser Bereich auf, der sich über einen großen Bereich des Himmels erstreckt. Bei diesem handelt es sich um die Milchstraße, unsere Heimatgalaxie, in der sich auch unsere Sonne und damit unsere Erde befinden. Ihr Leuchten wird von über 100 Milliarden Sternen erzeugt, von denen aber nur die nächstgelegenen mit bloßem Auge zu erkennen sind. Alle diese Sterne machen jedoch nur einen kleinen Bruchteil der Masse der Milchstraße aus, die meiste Materie befindet sich dagegen in ihren Gas- und Staubwolken, die zum Teil nur mit Teleskopen sichtbar gemacht werden können.

Die Gaswolken bestehen überwiegend aus atomarem Wasserstoff, der noch aus der Urzeit des Universums stammt. Dieser strahlt im Radiobereich eine sehr genau bekannte Frequenz aus, die mit einem Radioteleskop und einem geeigneten Empfänger gemessen werden kann.

Sowohl optische Teleskope als auch Radioteleskope sind dazu ausgelegt, einen genau definierten Ausschnitt des Himmels zu beobachten. Im Frequenzbereich der Wasserstoff-Strahlung kann man folglich mit einem Radioteleskop die Wasserstoffwolken an bestimmten Stellen unserer Milchstraße genauer analysieren.

Nach den gängigen Theorien bewegen sich diese Wasserstoffwolken je nach ihrer Position in der Milchstraße mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Bezug auf unsere Erde. Damit unterliegt die empfangene Strahlung einem Dopplereffekt, wie man ihn von vorbeifahrenden Krankenwagen kennt.

Mit der Messung dieses Dopplereffektes an verschiedenen Stellen der Milchstraße sollte es möglich sein, Aussagen über die Bewegungsrichtung dieser Wolken treffen zu können. Da die Intensität der Strahlung nach dem Abstandsgesetz abnimmt, können unter bestimmten Annahmen auch Abschätzungen ihrer Entfernung getroffen werden. Damit lassen sich Erkenntnisse über den Aufbau unserer Milchstraße gewinnen.

Im Rahmen meines Projektes konnte ich bislang 22 unterschiedliche Himmelsregionen vermessen. Die Messungen zeigen deutliche lokale Unterschiede im Hinblick auf den auftretenden Dopplereffekt und die Signalintensitäten vor allem im unmittelbaren Bereich der Milchstraße. Außerdem konnte über den Messzeitraum hinweg beobachtet werden, dass der Einfluss der Bahnbewegung der Erde um die Sonne nicht vernachlässigt werden darf.

## 1 Grundlagen

Zur Durchführung dieses Projektes benötigt man einige Kenntnisse über die Messbarkeit der H1-Linie von Wasserstoff, die Funktion von Radioteleskopen und den grundsätzlichen Aufbau der Milchstraße.

### 1.1 Die H1-Linie von Wasserstoff

Atomarer neutraler Wasserstoff bildet den Großteil aller Materie in unserem Universum. Dessen Ruhfrequenz liegt bei etwa 1420 MHz, was sich wie folgt erklären lässt:

Nach [1, S. 8-87] besitzt das Elektron des Wasserstoffatoms, genau wie auch das Proton, einen Spin, dreht sich also in eine bestimmte Richtung. Die Spins von Proton und Elektron können entweder parallel oder antiparallel zueinander verlaufen, was Auswirkungen auf das Energieniveau des Atoms hat: Wenn beide Spins parallel zueinander verlaufen, ist dieses geringfügig größer als andersherum. Ein spontaner Wechsel der Spinrichtung durch Emission ist sehr selten und kommt etwa einmal in 11 Millionen Jahren vor (dieser Zeitraum entspricht der mittleren Lebensdauer des angeregten Zustandes), sorgt aber angesichts der sehr großen Zahl dieser Atome in den

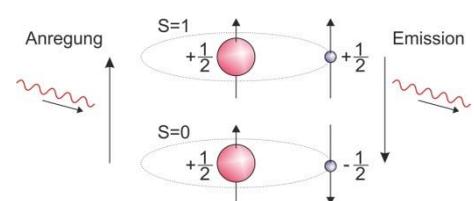


Abb. 1: Spinzustände von Wasserstoff

Wasserstoffwolken für eine deutlich messbare Strahlung. Um in den angeregten Energiezustand zu wechseln, ist das Wasserstoffatom entweder auf einen unelastischen Stoß oder die Absorption eines Photons angewiesen. Diese Ereignisse führen dem Atom dann die für den Phasenübergang benötigte Energie  $E$  von  $5,9 \mu\text{eV}$  zu, was nach der Beziehung

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js, Planck'sches Wirkungsquantum}) [2]$$

einer elektromagnetischen Welle mit einer Wellenlänge von 21 cm oder einer Frequenz von 1420,405 MHz entspricht. Bei der Rückkehr in den Grundzustand wird ein solches Photon wieder emittiert.

Trotz der deutlich messbaren Strahlung der H1-Linie von Wasserstoff entsteht durch die lange Dauer zwischen den Phasenübergängen eine hinreichende Transparenz der Gaswolken, um den Blick auf weiter entfernte Himmelskörper zu ermöglichen.

## 1.2 Der Aufbau der Milchstraße

Unsere Milchstraße hat gigantische Ausmaße: Sie ähnelt einer Scheibe, die einen Durchmesser von 100 000 und eine Dicke von etwa 3 000 Lichtjahren (Lj) hat. In der Nähe ihres Massezentrums (dem sog. Bulk) beträgt ihre Dicke sogar 16 000 Lj. Obwohl die Milchstraße am Nachthimmel von zahllosen Sternen erleuchtet wird, besteht sie zum Großteil aus Gas- und Staubwolken, die etwa 90 % ihrer Masse ausmachen. Über die genaue Struktur unserer Milchstraße ist allerdings vergleichsweise wenig bekannt, da wir sie ja nicht von außen beobachten können, weshalb wir annehmen müssen, dass ihr Aufbau denen anderer Galaxien ähnelt, die wir von der Erde aus beobachten können. Allgemein ist über den Aufbau von Galaxien bekannt, dass sie um ein gemeinsames Massezentrum rotieren, wobei das Vorhandensein von Dichteunterschieden zur Ausbildung von Spiralarmen führen kann. Da auch interstellare Gaswolken an dieser Rotation teilnehmen, könnte eine Analyse von Dichte und Geschwindigkeit des Wasserstoffs Rückschlüsse auf die Struktur unserer Galaxie erlauben.

In erster Näherung lassen sich die Bewegungen von Objekten in der Milchstraße mit den Kepler'schen Gesetzen beschreiben. Demnach nehmen Bahn- und Winkelgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Gravitationszentrum ab. Das hat zur Folge, dass weiter außen liegende Objekte sich langsamer bewegen als innere und sie bei einer Drift nach außen zu den bekannten Spiralarmen führen.

Aufgrund bisheriger Erkenntnisse konnten einige Gaswolken als Spiralarme identifiziert werden, doch aufgrund unserer Lage innerhalb der Milchstraße gibt es große Gebiete, die noch nicht erschlossen werden konnten. Abb. 2 zeigt die 1968 bekannte Verteilung von Wasserstoff in unserer Galaxis [1, S. 8-89, Fig. 8-58]. Über den keilförmigen Bereich von der Sonne in Richtung Zentrum liegen keine Informationen vor, da diese durch den Kern der Milchstraße verdeckt werden. Neuere Aufnahmen [3] haben dieses Bild ergänzen, aber nicht vervollständigen können.

Weitere Erkenntnisse kann man aber dadurch gewinnen, indem man andere Galaxien mit einem ähnlichen Aufbau wie unsere Milchstraße analysiert. Abb. 3 zeigt die etwa 30 Mill. Lichtjahre entfernte Spiralgalaxie M51 im normalen und im Röntgenlicht (rote Überlagerung). In der Aufsicht erkennt man deutlich den Kern sowie mehrere Spiralarme mit ihren Gaswolken. Die Röntgenstrahlung weist auf Sternentstehungsgebiete hin, die in der Regel eine hohe Konzentration von Gas- und Staubansammlungen beinhalten. Die Spiralarme erstrecken sich von ihrem Ausgangspunkt am Bulk etwa anderthalb Umdrehungen um den Kern, was einen Rückschluss auf das Alter dieser Galaxis erlaubt.

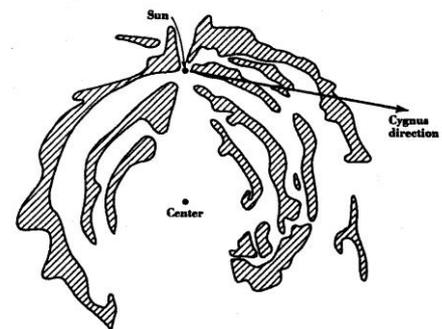


Abb. 2: Verteilung des neutralen Wasserstoffs



Abb. 3: Spiralgalaxie M51 [4]

Nicht alle Galaxien sind Spiralgalaxien: so gibt es neben den mehr oder weniger strukturarmen elliptischen Galaxien auch Balkengalaxien und alle möglichen Zwischenformen. Durch Begegnungen zweier Galaxien kann deren Form auch stark verändert werden.

### 1.3 Dopplereffekt

Der Dopplereffekt tritt auf, wenn die Quelle eines Signals sich in Bezug auf einen Beobachter bewegt. Dabei erhöht sich die Frequenz, wenn sich die Quelle auf den Beobachter zu bewegt, im anderen Fall wird sie niedriger. Dabei ist es egal, ob sich die Quelle oder der Beobachter (oder beide) bewegen, entscheidend sind allein die Relativgeschwindigkeit  $\Delta v$  und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Wellen. Sendet die Quelle ein Signal der Frequenz  $f_0$  aus, registriert der Beobachter eine Frequenz  $f_D$ , für die gilt:

$$f_D = f_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta v}{c}\right) \quad [5]$$

Ist  $\Delta v$  größer als Null, dann nähern sich Quelle und Beobachter gegenseitig an und die Frequenz nimmt zu, andernfalls nimmt sie ab.

Mit  $\Delta f = f_D - f_0$  erhält man

$$\Delta v = \Delta f \cdot \frac{c}{f_0}$$

Da  $f_0$  und  $c$  bekannt und in unserem Fall konstant sind, liefert der Bruch einen konstanten Umrechnungsfaktor, mit dem Frequenzänderungen unmittelbar in Relativgeschwindigkeiten umgerechnet werden können. Für die H1-Linie erhält man

$$\frac{\Delta v}{\Delta f} = \frac{2,997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{1420,405 \cdot 10^6 \text{Hz}} = 0,211 \text{ m} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta f}{\Delta v} = \frac{1420,405 \cdot 10^6 \text{Hz}}{2,997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}} = 4,739 \frac{1}{m}$$

Zur Umrechnung können also folgende Faustformeln gelten:

$$\Delta v = \Delta f \cdot 0,211 \text{ m} \quad \text{bzw.} \quad \Delta f = \Delta v \cdot 4,739 \frac{1}{m}$$

Zum Beispiel gehört zu einer Frequenzverschiebung von 150 kHz eine Relativgeschwindigkeit von

$$\Delta v = 150 \cdot 10^3 \frac{1}{s} \cdot 0,211 \text{ m} = 31650 \frac{m}{s} = 31,65 \frac{km}{s}$$

### 1.4 Dopplereffekt in der Milchstraße

Wenn man in die Milchstraße schaut, sieht man oft nicht nur eine Quelle, sondern möglicherweise mehrere hintereinanderliegende. Abb. 4 zeigt eine solche Situation: Der Beobachter auf der Erde sieht entlang seiner Sichtachse (roter Pfeil von der Erde ausgehend) drei verschiedene Quellen (Peak 1-3). Diese rotieren um ein gemeinsames Massezentrum, sind jedoch unterschiedlich weit davon entfernt und haben deswegen verschiedene Bahn- und Winkelgeschwindigkeiten. Für den Dopplereffekt ist lediglich die Relativgeschwindigkeit in Bezug zur Erde entscheidend. Diese lässt sich aus der Komponentenzerlegung der Bahngeschwindigkeit in Richtung der Sichtachse und senkrecht dazu bestimmen, wobei nur die Komponente in Richtung der Sichtachse entscheidend ist. Die Bahngeschwindigkeit an jedem Punkt ist mit einem schwarzen Pfeil, deren Komponente in Richtung der Sichtachse mit einem grünen Pfeil (orange bei der Erde) gekennzeichnet. Zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit werden die entsprechenden Geschwindigkeiten vektoriell subtrahiert.

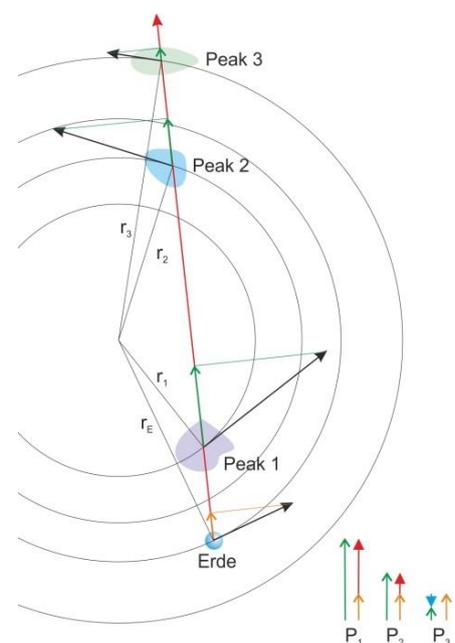


Abb. 4: Signal-Entstehung durch die Peaks

Für die Quellen ergeben sich die Pfeildiagramme, die unten rechts als P1 bis P3 gekennzeichnet sind. Der grüne Pfeil ist die Sichtachsenkomponente der Quelle, der orange Pfeil die Geschwindigkeitskomponente des Beobachters. In den ersten beiden Fällen ergibt sich eine verringerte Geschwindigkeit (roter Pfeil) und somit eine Rotverschiebung des Signals, während sich bei P3 eine erhöhte Geschwindigkeit (blauer Pfeil) und somit eine Blauverschiebung ergibt.

Da bei den räumlich weit ausgedehnten Gaswolken unterschiedliche Geschwindigkeiten auftreten können, führt dies zu einer Verbreiterung des gemessenen Spektrums.

## 2 Messaufbau

Der prinzipielle Aufbau, der für solche Messungen benötigt wird, besteht aus folgenden vier Komponenten:

- Empfangsspiegel
- Antenne
- Verstärker
- Messgerät

Der Empfangsspiegel bündelt die empfangenen Wellen auf eine Dipol-Antenne, die sich im Fokus des Reflektors befindet. Diese wandelt die Energie der elektromagnetischen Wellen in eine Spannung um, die von einem rauscharmen Verstärker weiter verstärkt und zum Messgerät geleitet wird, das diese Signale auswerten kann.

### 2.1 Radioteleskop

Um überhaupt Signale messen zu können, wurde das Radioteleskop der Sternwarte Südheide verwendet. Dieses verfügt über einen Reflektordurchmesser von 3,8 m und ist derzeit mit einem auf die 21 cm Linie abgeglichenen Kreuzdipol zur Messung der H1-Linie eingerichtet. Zwei Antriebe können das Teleskop sowohl in Azimut- als auch in Elevationsrichtung reproduzierbar auf etwa  $0,1^\circ$  genau ausrichten. Bei diesem Reflektordurchmesser beträgt der Strahlungswinkel (beam angle) im verwendeten Frequenzbereich von 1,420 GHz  $3,94^\circ$  (etwa der 8-fache Durchmesser des Mondes) und ist somit nicht dafür geeignet, einzelne Punktquellen (wie zum Beispiel Pulsare) zu messen und dabei von umliegenden Strahlungsquellen zu unterscheiden. Der Winkel ist jedoch hinreichend, auch ausgedehntere Wasserstoffwolken zu erfassen, ohne dass die Messzeit zu stark ansteigt. [6]



Abb. 5: Das 3,8 m Radioteleskop der Sternwarte Südheide [Eigenes Foto]

Ein direkt hinter dem Kreuzdipol montierter rauscharmer HF-Verstärker hebt den Signalpegel um ca. 37 dB an, ein schmalbandiger Bandpassfilter (1350 bis 1450 MHz) lässt nur das uns interessierende Signal durch und filtert alle anderen Signale weitgehend aus. Dieses Signal wird über eine verlustarme Koaxial-Leitung zum Messgerät geleitet, das sich in einem Gebäude neben dem Teleskop befindet.

### 2.2 Messgerät:

Für die Verarbeitung des Empfangssignals wird ein Messgerät (Spectra-Cyber) verwendet, das speziell für den Empfang der H1-Linie ausgelegt ist. In ihm wird das Eingangssignal zunächst extrem rauscharm verstärkt und anschließend durch einen Mischer mit hochstabiler Referenzfrequenz auf eine niedrigere Frequenz umgesetzt und weiter verstärkt. Im hier verwendeten Spektrum-Mode wird anschließend in einem durchstimmbaren Intervall von -2000 kHz bis +2000 kHz um die Ruhfrequenz der H1-Linie mit einer Bandbreite von 7,5 kHz die Signalamplitude gemessen. Die minimale Frequenzschrittweite beträgt dabei 5 kHz. Die ermittelte Signalintensität bei einer bestimmten Frequenz wird als Spannungswert in einem Intervall von 0 bis 10 Volt ausgegeben und kann als Tupel (Frequenz; Intensität) weiterverarbeitet werden.

## 2.3 Software

Zum Radioteleskop gehört ein modular aufgebautes Software-Paket, bestehend aus folgenden Komponenten:

- MasterGUI
- Positionssteuerung
- Koordinatenserver
- Spectra-Cyber-Steuerung

Die Module korrespondieren untereinander durch TCP/IP-Schnittstellen und sind somit Internet-fähig. Im vorliegenden Fall (Nutzung eines direkt angeschlossenen Laptops) wird dazu das lokale Netz „LocalHost“ verwendet.

### 2.3.1 MasterGUI

Dies ist das zentrale Systemmodul zur Ansteuerung der diversen Hardware-Komponenten wie Antriebe, Mess- und Überwachungsgeräte. Außerdem kann es zusätzliche Software-Module starten und beenden. Nachdem die MasterGUI gestartet ist, sind hier keine weiteren Benutzereingaben mehr erforderlich.

### 2.3.2 Positionssteuerung

Dieses Modul ist zuständig für die Ausrichtung des Teleskops auf eine bestimmte Position, indem man die entsprechenden Werte für den Azimut- und den Elevationswinkel angibt. Diese kann man sowohl manuell eingeben als auch vom Koordinatenserver abrufen lassen. Außerdem steuert es den Elektromagneten für die Arretierung des Azimut-Antriebes, der im Parkzustand dafür sorgt, dass die Azimut-Motoren nicht durch die Windlast bewegt werden können. Durch zwei Stopp-Tasten lassen sich die Antriebe jederzeit anhalten, um vorhersehbare Schäden an den Antrieben, z.B. durch Hindernisse oder hängende Kabelverbindungen, zu verhindern. In einer erweiterten Ansicht können zudem auch Grenz- und Kalibrierungswerte festgelegt sowie Fehlermeldungen der Antriebseinheit abgerufen werden.

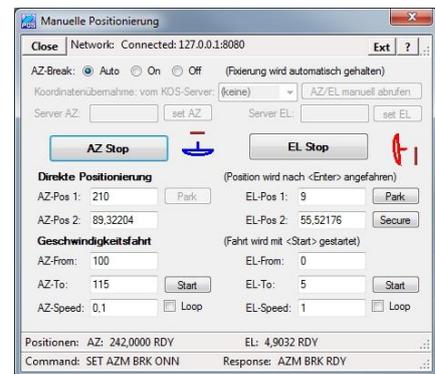


Abb. 6: Positionssteuerung

### 2.3.3 Koordinatenserver

Dieses Modul erlaubt den Zugriff auf einen Sternenkatalog, aus dem die gewünschte Quelle ausgewählt werden kann. Durch die Eingabe von Datum und Uhrzeit kann festgestellt werden, ob sich die Quelle im beobachtbaren Bereich des Teleskops befindet. Zusätzlich kann eine Liste erstellt werden, die alle derzeit sichtbaren Quellen auflistet. Da Messungen einen längeren Zeitraum

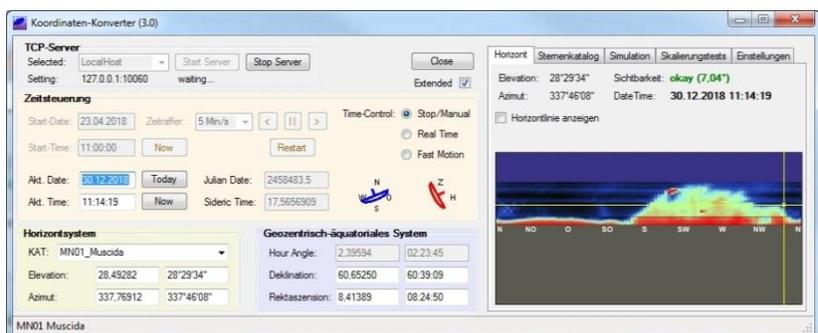


Abb. 7: Koordinatenserver

in Anspruch nehmen können, erlaubt eine Simulation eine Zeitrafferdarstellung der anzufahrenden Positionen, um zu überprüfen, ob diese innerhalb des Beobachtungsbereiches bleiben. Mit einem einfachen Editor können neue Quellen dem Katalog hinzugefügt oder vorhandene Quellen bearbeitet werden. Auch die Bestimmung der Positionen von Sonne oder Mond ist möglich.

Zur Nachführung einer Quelle bei Langzeitmessungen kann man einen Real-Time-Modus aktivieren, der die Positionssteuerung einmal pro Sekunde mit neuen Azimut- und Elevationswinkeln versorgt.

### 2.3.4 Spectra-Cyber-Steuerung

Das Messgerät verfügt über eine serielle Schnittstelle, über die alle notwendigen Einstellungen vorgenommen und die Messwerte abgerufen werden können. Das entsprechende Software-Interface unterstützt den Benutzer bei der Auswahl der passenden Einstellungen und stellt die aufgenommenen Messwerte graphisch dar. Die jeweiligen Messreihen und die zugehörige Graphik können als Datei gespeichert werden.

## 3 Durchführung der Messungen

Zur Durchführung dieses Projektes mussten zahlreiche Messungen aufgenommen werden. Die Aufnahme einer einzelnen Messung beinhaltet folgende Schritte:

- Ausrichtung des Reflektors auf die Quelle
- Aktivierung der Nachführung
- Aufnahme der Messpunkte (in der Regel drei Sweeps)
- Protokollierung und Sicherung der Daten

### 3.1 Reflektor-Ausrichtung und Nachführung

Trotz ihrer Größe erscheint uns die Milchstraße am Nachthimmel als ein schmales, langgestrecktes Band und überdeckt somit in ihrer Längsachse einen Winkel von nahezu 180°. Um lediglich dieses Band zu vermessen, wären bei unserem beam-angle ca. 45 Messpunkte aufzunehmen. Nähme man die (von uns aus nicht sichtbare) südliche Hemisphäre dazu, ergäben sich ca. 90 Messpunkte. Da die Aufnahme eines Messpunktes ca. 15 Minuten dauert, ergibt sich daraus eine reine Messzeit von 22 ½ Stunden. Da die einzelnen Regionen nicht jederzeit sichtbar sind und jede Messung mehrfach durchgeführt werden sollte, ist es notwendig, die Anzahl der Messpunkte zu reduzieren.

Für dieses Projekt wurden insgesamt 42 an Richtsterne gebundene Himmelsabschnitte in drei Bändern verwendet, von denen sich allerdings aufgrund unserer Position auf der nördlichen Hemisphäre im Messzeitraum von August bis Dezember 2018 nur 22 messen ließen. Jeweils 6 dieser Messpunkte liegen ca. 30° oberhalb bzw. unterhalb der Ekliptik der Milchstraße, die übrigen 10 erstrecken sich vom Rand bis etwa zum Zentrum der Milchstraße. Derzeit liegen dafür 65 Messungen vor.

Ergänzend wurden um zwei Positionen lineare Scans bei konstantem Azimut-Winkel über ein Elevations-Winkel-Intervall von 28° (Deneb) bzw. 48° (etwa Dabih bis Deneb) aufgenommen, um zu überprüfen, wie sehr das aufgenommene Spektrum vom Elevations-Winkel abhängt (siehe Titelbild).

Um die Reproduzierbarkeit und damit die Überprüfbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, benötigt das Radioteleskop ständig neue Positionsdaten des aktuellen Zielobjektes, die es in Form von Rektaszensions- und Deklinationskoordinaten erhält und die in Azimut- und Elevationspositionen für die Motoren übersetzt werden müssen. Dieser Schritt ist nötig, da das Teleskop mit Azimut- und Elevationsbefehlen gesteuert wird, die sich jedoch ständig ändern, da diese Positionierung sich auf den Winkel des Teleskops zum Erdboden und zum Nordpol bezieht und die ständige Bewegung des Himmels außer Acht lässt. Rektaszensions- und Deklinationskoordinaten hingegen sind zur Navigation auf der Himmelskarte konzipiert und daher von Ort und Zeit unabhängig. Aus ihnen lassen sich die Azimut- und Elevationswerte für ein Teleskop berechnen, wenn man die exakten Koordinaten der Messstation und die aktuelle Uhrzeit kennt.

Die Positionen sind somit exakt anfahrbar und werden jede Sekunde nachgeführt, damit das Teleskop immer auf die gleiche Position ausgerichtet ist.

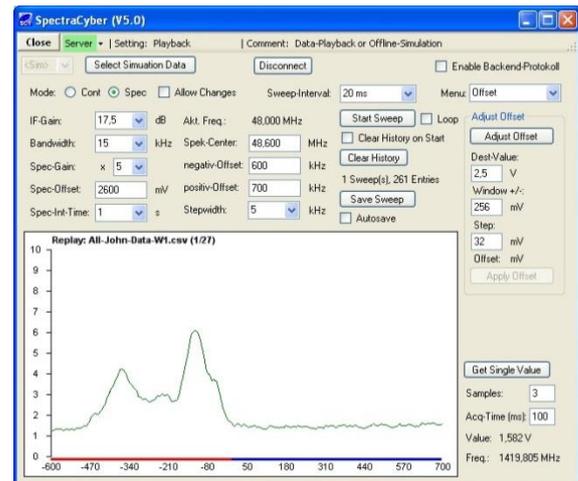


Abb. 8: Benutzeroberfläche des Spectra-Cyber

### 3.2 Datenerfassung und Protokollierung

Je nach Einstellung des Spectra-Cyber erhält man eine bestimmte Anzahl von Mess-Tupeln, bestehend aus der aktuellen Frequenzverschiebung und der zugehörigen Signalamplitude. Zum Beispiel bei einem Frequenzintervall von -800 kHz bis +800 kHz mit einer Schrittweite von 5 kHz ergeben sich so 321 Tupel. In der Regel wird jede Messung 3 Mal wiederholt. Während der Aufnahme der Messung werden die einzelnen Messpunkte graphisch dargestellt. Nach Abschluss der Messung wird aus den drei Scans ein Mittelwert-Scan gebildet und zusammen mit den Tupeln aus den Rohdaten gespeichert (insg. also 1284 Tupel). Die entsprechende CSV-Datei enthält außerdem in einem Header alle relevanten Einstellungen. Die Messdaten werden zeilenweise angegeben, wobei die einzelnen Werte durch ein Semikolon getrennt sind. Die erste dieser Zeilen enthält die Frequenzen, die bei der Messung verwendet wurden, die nachfolgenden Zeilen enthalten die jeweils dazugehörenden Signalintensitäten, ergänzt um Positionsangaben und die Startzeit der Messung. Außerdem wird die Graphik als Bilddatei gesichert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Device:	SpectraCyber										
2	Setup:	FFT										
3	Kommentar:	CassA mit 3 verschiedenen Messzeiten										
4	Mode:	Spectrum										
5	FCenter:	48645 kHz										
6	FStart:	47845 kHz		Shift	-800 kHz							
7	FStop:	49445 kHz		Shift	800 kHz							
8	FSpan:	1600 kHz										
9	FStep:	5 kHz										
10	FCount:	321										
11	Bandwidth:	15 kHz										
12	SampleTime:	Int-Time	x 1.0									
13	Int-Time:	0,5 s										
14	IF-Gain:	15 dB										
15	Spec-Gain:	5 x			7 dB							
16	Spec-Offset:	3700 mV										
17	Startzeit:	30.12.2018 11:06										
18	Samples:	1										
19	Single-Line:	Freq.-Shift[] in kHz										
20	Sweep-Line:	AZ	EL	DateTime	Data[] in V							
21	Frequenz:	-800 -795 -790 -785 -780 -775 -770										
22	SweepSmp 0.0:	45,80268	43,31232	11:06:05	3,22753906	3,50585938	3,59375	3,33496094	3,24707031	3,45214844	3,55224609	
23	SweepSmp 0.1:	46,27810	43,83200	11:10:51	3,45703125	3,81103516	3,54492188	3,58398438	3,52294922	3,58154297	3,7109375	
24	SweepSmp 0.2:	46,62098	44,21255	11:14:19	3,55712891	3,89648438	3,74755859	3,50341797	3,46191406	3,28857422	3,74755859	
25	Sweep 0:	3,41308594 3,73779297 3,62792969 3,47412109 3,41064453 3,43994141 3,66943359										
26	Sweep MW:	3,41308594 3,73779297 3,62792969 3,47412109 3,41064453 3,43994141 3,66943359										

Abb. 9: Ausschnitt aus der Excel-Ansicht einer gespeicherten Messtabelle im CSV-Format

Die Zeilen 1 bis 18 enthalten die Einstellungen des Messgerätes, die Zeilen 19 und 20 eine Legende für die nachfolgenden Datenzeilen. Zeile 21 listet die einzelnen Frequenzen auf, die Messwerte der drei Messungen werden in den Zeilen 22 bis 24 aufgeführt. Die Zeilen 25 und 26 enthalten die automatisch bestimmten Mittelwerte über alle Messungen.

Abb. 10 zeigt einen Ausschnitt aus der Protokolldatei, in der jede Messung mit den wichtigsten Einstellungen für das Spectra-Cyber-Messgerät eingetragen wird. Bei den ersten fünf Messungen handelt es sich um Spektren in bestimmten Regionen, bei den letzten beiden Messungen wurden Rastermessungen für einen Ausschnitt des Himmels aufgenommen, bei denen jedem Rasterpunkt die Intensität der gemessenen Strahlung zugeordnet wird. Die Abkürzung „VA-PE“ weist darauf hin, dass hier der Reflektor in Azimut-Richtung mit konstanter Geschwindigkeit gefahren und am Ende einer Rasterlinie die Elevationsrichtung auf den nächsten Elevationswert gesetzt wurde.

1	Datum	Zeit	Quelle	Modus	Bereich	Gerät	IF-Gain	DC-Gain	DC-Offset	Int-Time	Sweep-Int.	Sweeps	Neg	Pos	Temp.	Bemerkungen
2	15.10.2018	16:02	MN01	Spektrum	1,4 GHz	SpectraCyber	15	10	3300	0,5	Auto (0,01)	3	400	400	21,7°	Peak bei +125
3		16:25	MN03	Spektrum	1,4 GHz	SpectraCyber	15	10	3300	1	Auto (0,01)	3	800	800	22,3°	Peak bei +90
4		16:37	MN04	Spektrum	1,4 GHz	SpectraCyber	15	10	3300	1	Auto (0,01)	3	800	800	22,2°	Peak bei +15
5		16:56	MS04	Spektrum	1,4 GHz	SpectraCyber	15	10	3300	1	Auto (0,01)	3	800	800	22,2°	Breiter Peak von -110 bis +30
6		17:13	MZ02	Spektrum	1,4 GHz	SpectraCyber	15	5	3300	1	Auto (0,01)	3	800	800	22,0°	Breiter Peak von +65 bis +360
7		17:34	(keine)	Raster	1,4 GHz	SpectraCyber	14	10	2800	0,3	VA: 2°/s	VA-PE	AZ: 70 - 132	EL: 24 - 70	21,8°	Ende: 17:48
8		17:58	(keine)	Raster	1,4 GHz	SpectraCyber	15	10	2800	0,3	VA: 3°/s	VA-PE	AZ: 20 - 154	EL: 30 - 84	21,8°	Ende: 18:18

Abb. 10: Auszug aus den Messprotokollen für die Aufnahme von Messungen z.B. am 15.10.2018

### 3.3 Messbeispiele

Die Messergebnisse des Spectra-Cyber sind jedoch aufgrund der verschiedenen Intensitäten, Entfernungen und Winkel zum Teleskop keineswegs alle gleichwertig, wie im Folgenden zu sehen ist.

#### 3.3.1 Qualitätsunterschiede

Im ersten Bild sieht man einen Mess-Sweep, dessen Auswertung sich aufgrund des geringen Unterschiedes des Peaks vom Grundrauschen und dessen kontinuierlichen Anstiegs als schwierig erwies.

Die Qualität der nächsten Messung ist deutlich besser, da sich in mehreren aufeinander folgenden Sweeps ein ähnlicher Verlauf mit einem klar erkennbaren Peak und einem gut davon abtrennbaren Rauschen zeigt. Die Reproduzierbarkeit dieser Messung bestätigt zudem, dass der Einfluss umweltbedingter Störfaktoren sich durch optimalere Einstellungen reduzieren lässt. Zudem lässt sich erst durch die mehrfache Wiederholung des Messvorganges ein weiterer kaum über dem Rauschniveau liegender Peak feststellen, der jedoch aufgrund seiner geringen Intensität nur schwer von der Auswertungssoftware erfasst werden kann.

Die Qualität der letzten Messung ist mit Abstand am höchsten, da sich die einzelnen Peaks deutlich vom Grundrauschen abheben, was auf eine sehr starke und gut messbare Quelle schließen lässt. Der ähnliche Verlauf weiterer Messungen desselben Abschnitts bestätigen zudem die Reproduzierbarkeit der Werte. Da die einzelnen Peaks zudem zu breit für terrestrische Störquellen sind, handelt es sich hierbei also mit hoher Wahrscheinlichkeit um stellare Wasserstoffkonzentrationen.

#### 3.3.2 Störquellen

Doch leider gibt es auch einige Messungen, die aufgrund von Störquellen oder anderen Messfehlern nicht verwertbar sind.

Obwohl diese Messungen des Himmelsabschnittes um Cassiopeia A (Abb. 12) auf den ersten Blick sehr aufschlussreich erscheinen, da die Peaks deutlich erkennbar sind und kaum vom Rauschen beeinflusst wurden, sind sie für eine Auswertung ungeeignet.

Dies liegt bei der ersten Messung an einer zu hoch gewählten Verstärkung des Messgerätes, wobei stärkere Signale zu einer Übersteuerung des Messwandlers geführt haben. Auch ist ein sehr schmaler Peak zu sehen, der nicht wirklich ins Gesamtbild der Messung zu passen scheint. Da es sich hierbei um eine kurzzeitige Störung handeln könnte, bietet sich eine Wiederholung der Messung an.

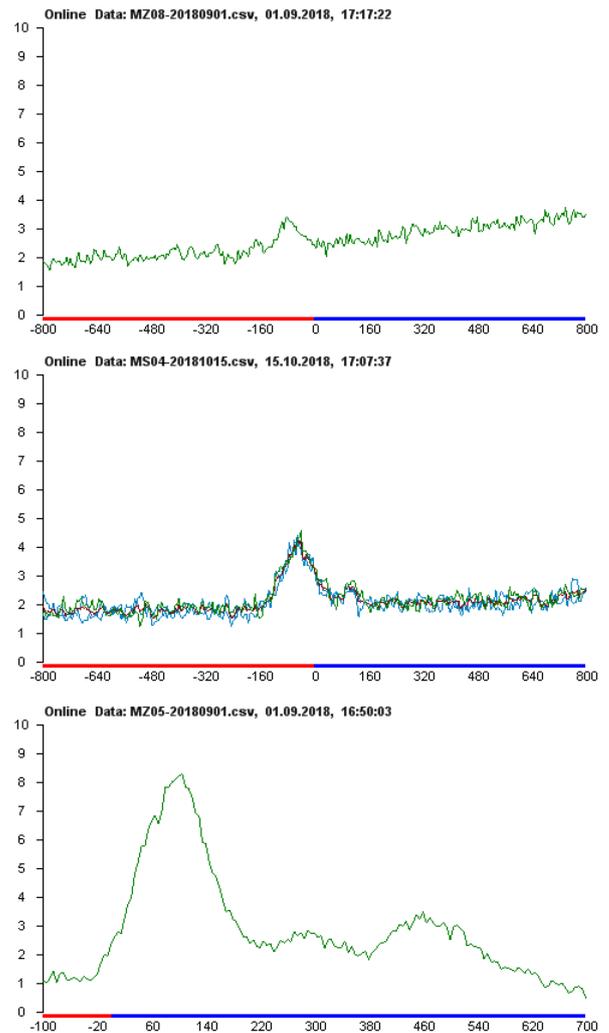


Abb. 11: Beispiele von Messungen unterschiedlicher Signalqualität

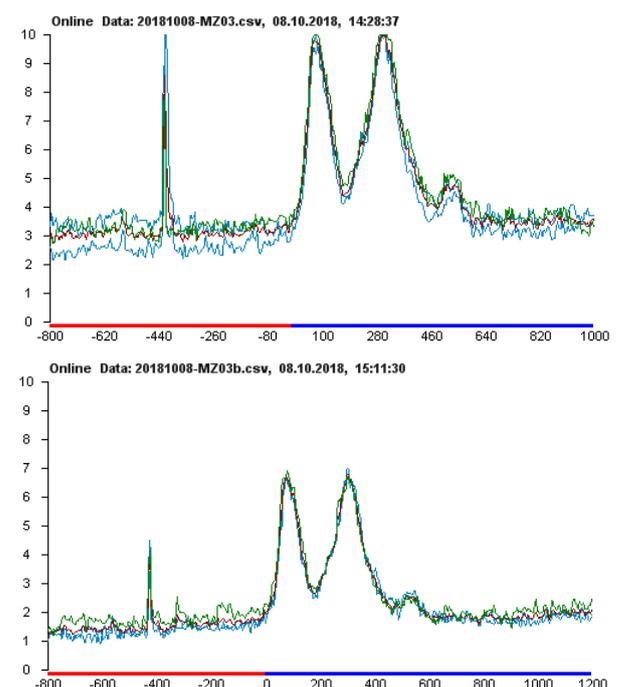


Abb. 12: Übersteuerte und durch Störpeak beeinflusste Messung in der Region um Cassiopeia A

Durch die Wiederholung der Messung mit reduzierter Vorverstärkung ergibt sich ein ähnlicher Verlauf, jedoch mit deutlich geringeren Werten. Allerdings ist der schmale Peak weiterhin messbar, was gegen einen einmaligen Messfehler spricht. Da der Peak nur auf diesen beiden Messungen auftaucht, ist anzunehmen, dass es sich hierbei um eine kurzzeitige Störquelle terrestrischen Ursprungs handelt, die von der Empfangsanlage registriert wurde, aber aufgrund der hohen Nutzung dieses Frequenzbandes nicht eindeutig einer bestimmten Quelle zuzuordnen ist.

### 3.3.3 Externe Referenz

Doch wie präzise sind die Ergebnisse dieses Messaufbaus überhaupt? Um darüber eine Aussage treffen zu können, wurde das Max-Planck Institut in Effelsberg um eine Referenzmessung aus der Region um Cassiopeia A gebeten. Zu diesem Gebiet lagen uns bereits zahlreiche eigene Messungen vor, von denen eine in Abb. 13 oben dargestellt ist.

Darunter ist ein Messgraph aus Effelsberg abgebildet. Die Daten stammen vom „Effelsberg-Bonn HI Survey“ [3], wobei die dort aufgenommenen Daten für den Vergleich mit unseren Daten auf das Auflösungsvermögen unseres Radioteleskops heruntergerechnet wurden.

Im Unterschied zu unseren Darstellungen ist dort die X-Achse gespiegelt, weil statt der Frequenzverschiebung die Relativgeschwindigkeit angegeben ist und deren negatives Vorzeichen eine Annäherung der Quelle bedeutet. Für einen qualitativen Vergleich wurde deshalb in unserer Messung, abweichend von den sonstigen Darstellungen, die X-Achse invertiert. Der kleine Peak bei  $-1e5$  entspricht einer Relativgeschwindigkeit von 100 km/s und korrespondiert mit der von uns gemessenen Frequenzverschiebung von ca. 500 kHz. Die Verschiebung des Nullpunktes der beiden X-Achsen ist auf den Einfluss der Erdbahn zurückzuführen, da die beiden Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Zur Darstellung der Signalamplitude auf der Y-Achse verwendet Effelsberg die in der Radioastronomie gebräuchliche Einheit K (Kelvin) für die Signaltemperatur, da diese äquivalent zur Rauschleistung des Objektes ist.

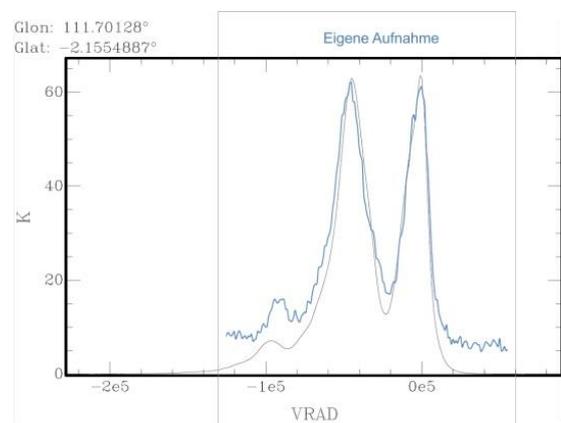


Abb. 13: Vergleich mit einer Referenzmessung des 100 m Radioteleskops in Effelsberg für die Region Cassiopeia A (MZ03) [7]

## 3.4 Bestimmung der Peak-Amplituden und Frequenzverschiebungen

Grundsätzlich ist es möglich, aus diesen Rohdaten die benötigten Informationen manuell zu extrahieren, dies ist aber recht aufwändig, da sehr viele Tabelleneinträge zu durchsuchen sind.

Das Prinzip ist aber recht einfach: Man sucht in der Zeile mit den Intensitäten die Werte, die ein lokales Maximum darstellen und notiert diese zusammen mit der zugehörigen Frequenz. Auf diese Weise erhält man eine Auflistung der einzelnen Peak-Frequenzen und der zugehörigen Signalamplituden.

Da dieser Vorgang immer wieder gleich abläuft, lässt er sich zum Teil automatisieren und durch das Setzen weiterer Parameter an die vorliegende Messung anpassen. Diese Aufgabe übernimmt das Softwaremodul „Dopplershift.exe“. Dieses erlaubt auch die Kombination mehrerer Messungen an gleichen Quellpositionen und erleichtert die Bestimmung des Erdbahneinflusses.

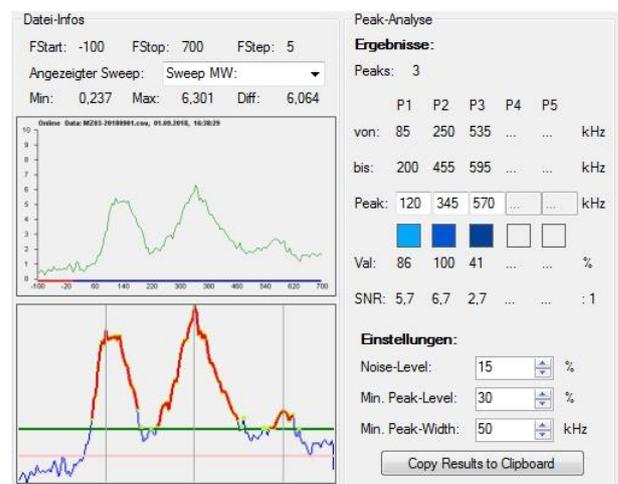


Abb. 14: Peak-Bestimmung mit dem Dopplershift-Modul

In Abb. 14 wird am Beispiel der Quelle MZ03 (Cassiopeia A) die Peak-Auswertung dargestellt. Unter den Datei-Infos findet man zunächst die Wiedergabe des Graphen, darunter die aus den Messwerten bestimmte normierte Darstellung. Diese erfolgt nach folgendem Prinzip:

Man bestimmt das globale Minimum und Maximum der Messwerte, subtrahiert von allen Messwerten das Minimum und dividiert diesen Wert durch die Differenz von Maximum und Minimum. Auf diese Weise werden alle Messwerte in das Intervall [0; 1] transformiert und sind nun untereinander vergleichbar. Abb. 15 zeigt dieses Vorgehen schematisch:

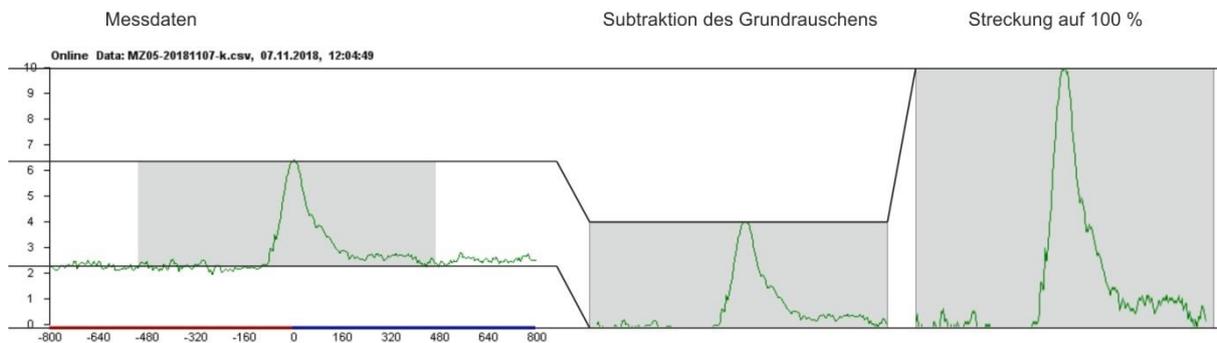


Abb. 15: Exemplarische Darstellung der Normierung

Nunmehr können die einzelnen Peaks isoliert werden. Dazu wird ein Minimalpegel definiert, der überschritten sein muss, damit der Signalverlauf berücksichtigt wird, außerdem eine minimale Peak-Breite, um einzelne Spikes (z.B. Störimpulse) zu unterdrücken. In diesen Intervallen (in Abb. 14 rot markiert) wird die Stelle mit dem höchsten Wert (lokales Maximum) als Peak interpretiert und je nach Frequenzverschiebung farblich gekennzeichnet in der Tabelle rechts eingetragen. Der lokale Wert (in Prozent), die zugehörige Frequenzverschiebung (in kHz) und der Signal-Rausch-Abstand (SNR: Signal Noise Ratio) werden ebenfalls angegeben, je größer der letztere Wert ist, desto signifikanter ist der Peak.

Da das menschliche Auge in der Lage ist, bei asymmetrischen Peaks das wahre Maximum besser zu bestimmen als ein Algorithmus, kann die Position des Peaks nachträglich noch manuell korrigiert werden. Die Lage der so bestimmten Peaks wird in der normierten Darstellung durch graue senkrechte Linien markiert.

### 3.5 Visualisierung der Messdaten

Die erhaltenen Daten sind in diesem Zustand allerdings nicht sehr anschaulich, da es sich bei ihnen lediglich um Zahlenpaare handelt, die die Amplituden jeder gemessenen Frequenz darstellen. Die einzelnen Peaks einer Messung sollten deshalb farbcodiert werden, damit ihre Kernaussagen schnell und intuitiv zu erfassen sind.

Dazu wurde bereits der ermittelten Frequenz der Peaks eine Farbe aus einer Palette zugeordnet. Da die gemessenen Frequenzen jedoch keiner sichtbaren Farbe entsprechen, wird eine Falschfarbzuordnung benötigt, um dennoch eine intuitive Darstellung zu erhalten. Hierfür wird eine Farbskala erstellt, die den Frequenzverlauf von Rot nach Blau darstellt und dem Messbereich zugeordnet (s. Abb. 16).

Zur Darstellung der Amplitude wird ein Balken verwendet, dessen maximale Höhe von 100 % dem Peak des höchsten Signals einer Gruppe entspricht. Weitere (kleinere) Peaks einer Gruppe werden, sofern vorhanden, entsprechend kleiner dargestellt. Für die Signalqualität wird ein weiterer Balken verwendet, dessen graue Markierung dem SNR des höchsten Peaks entspricht und somit das Signalrauschen berücksichtigt.

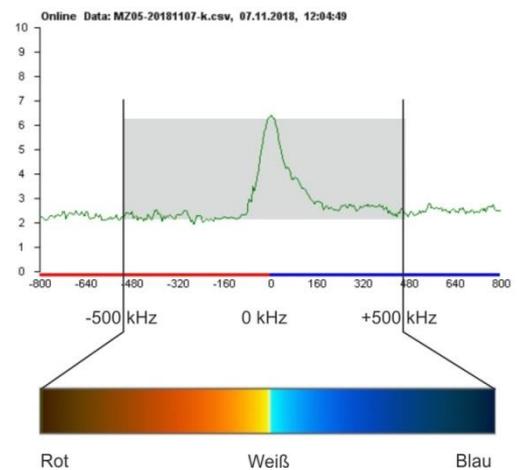


Abb. 16: Veranschaulichung einer Falschfarbzuordnung

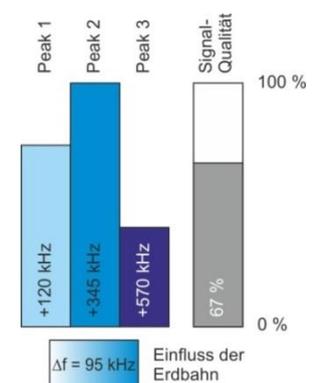


Abb. 17: Erläuterung der Balkendiagramme

In einigen Fällen sind mehrere Messungen eines Himmelsabschnittes vorhanden. Es hat sich gezeigt, dass diese eine Frequenzverschiebung gegenüber früheren aufweisen können. Abb. 18 zeigt ein Beispiel bei der Quelle MZ03 (Cassiopeia A). Von dieser Region liegen 5 Einzelmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten vor, die mehrere Monate auseinanderliegen. Legt man diese Messungen übereinander, ist eine deutliche seitliche Verschiebung der Graphen zu sehen, während sie sich in ihrer grundsätzlichen Form dagegen sehr ähneln. Verschiebt man nun die Graphen jeweils um einen bestimmten Betrag, lassen sich diese Grundformen nahezu zur Deckung bringen. Diese Verschiebung ist auf die Eigenbewegung der Erde um die Sonne zurückzuführen.

Da die Beobachtungslinie verschiedene Winkel zur Bahnebene der Erde einnehmen kann, kann dieser Effekt maximal  $\pm 140$  kHz ausmachen, wenn die Beobachtungslinie genau in der Bahnebene der Ekliptik liegt. Steht sie senkrecht dazu, tritt dieser Effekt überhaupt nicht auf.

Bei den jeweiligen Quellen wird die daraus resultierende Änderung der Dopplerverschiebung als horizontaler Balken mit einem passenden Farbverlauf unterhalb der Visualisierung angezeigt.

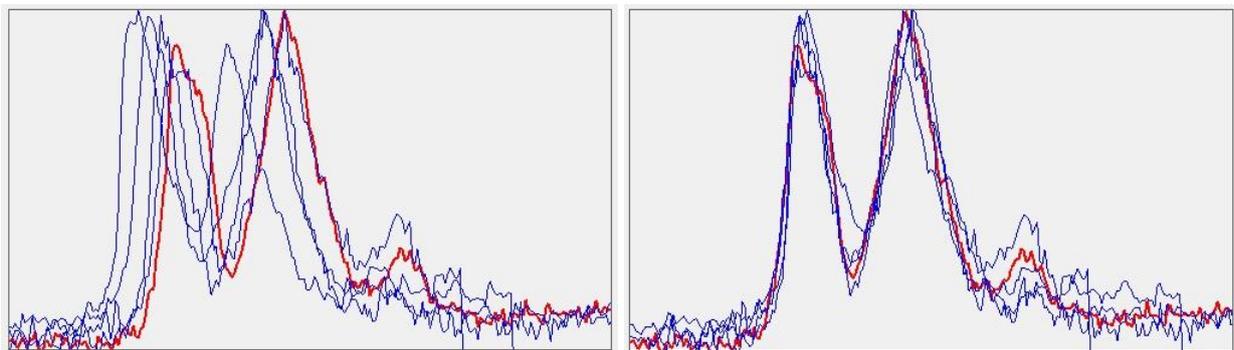


Abb. 18: Links: Durch die Eigenbewegung der Erde verschobene Spektren, rechts: Durch Frequenzkorrektur überlagerte Spektren

## 4 Auswertung

Auf diese Weise ist es nun möglich, die Messergebnisse in einer graphischen Übersicht gemeinsam in einem Bild darzustellen (s. Abb. 19). Grundlage ist dabei eine Bildmontage der gesamten Milchstraße, die aus einem interaktiven Sternenkatalog (Stellarium) erstellt wurde. Die insgesamt 42 ausgewählten Quellen wurden dort mit ihren Bezeichnungen (in Orientierung an markanten Sternen) eingetragen und durch einen Kreis markiert. Sofern Messergebnisse verfügbar waren, wurden sie darunter mit den oben beschriebenen Balkendiagrammen versehen.

Fehlt der horizontale Balken, liegt nur eine einzige Messung dieser Quelle vor, sodass kein Erdbahneinfluss untersucht werden konnte.

Vor allem im rechten Teil der Darstellung befinden sich Regionen, die nur von der südlichen Hemisphäre der Erde aus sichtbar sind, weshalb hier keine Daten vorliegen.

Auf den ersten Blick erkennt man drei Gruppierungen:

In der linken oberen Bildhälfte finden sich vor allem Regionen, die ausschließlich eine Blau-Verschiebung aufweisen, dies betrifft sowohl Quellen in der Ebene der Milchstraße als auch darüber.

Im linken unteren Drittel sowie im Zentrum finden sich dagegen Rot-verschobene Regionen, zum Teil mit angedeuteten Blau-Verschiebungen.

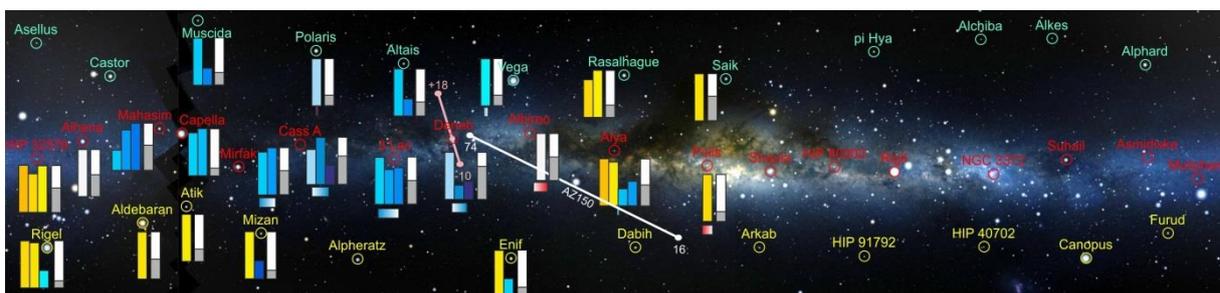


Abb. 19: Graphische Übersicht über alle Messergebnisse

## 4.1 Zuordnung der Peaks im Milchstraßenmodell

Bei den Quellen Rigel, Mizan, Enif, Muscida, Polaris, Altair und Vega sind zwar Peaks erkennbar, doch haben diese nur eine geringe Intensität. Da hier aber die Beobachtungslinie aus der Milchstraße hinaus zeigt, ist nicht anzunehmen, dass es sich hier um weiter entfernte Spiralarme handelt. Es liegt vielmehr nahe, dass es sich bei den gemessenen Wasserstoffwolken um Bestandteile unseres eigenen Spiralarmes ( $S_0$ ) handelt. Hierfür spricht auch eine nur sehr geringe Dopplerverschiebung über die Beobachtungszeit (sofern gemessen). Dies trifft auch evtl. auf Aldebaran und Atik zu, obwohl wegen der geringeren Entfernung der Beobachtungslinie zur Ebene der Milchstraße eine Zugehörigkeit zu  $S_0$  weniger wahrscheinlich ist.

Bei der Quelle Alya scheint es sich um einen etwas näher gelegenen Spiralarm ( $S_1$ , leicht Rot-verschoben) und einen weiteren und weiter entfernten Spiralarm ( $S_2$ , leicht Blau-verschoben, geringere Intensität) zu handeln.

Die Quellen von Deneb bis Mahasim in der Ebene der Milchstraße scheinen aufgrund ihrer ähnlichen Intensitäten und Blau-Verschiebungen zu ein und demselben Spiralarm ( $S_3$ ) zu gehören.

Die Quellen HIP-32578 und Alhena wiesen keine (Alhena) bzw. eine mäßige (HIP) Rot-Verschiebung auf und haben etwa die gleiche Intensität. Damit ist es möglich, dass sie zu einem weiteren Spiralarm ( $S_4$ ) gehören.

Die Rot-Verschiebungen von Polis und Saik lassen auf einen Spiralarm (evtl.  $S_1$ ) schließen, der näher am Zentrum liegt als  $S_0$ , obwohl sie nicht direkt in der Ebene liegen. Dies könnte eventuell auch für Rasalhague zutreffen.

Bei der Quelle Albireo scheint es sich aufgrund der geringen Verschiebung und der hohen Intensität um eine Gaswolke zu handeln, die etwa die gleiche Entfernung zum Zentrum der Milchstraße hat wie die Erde. Die Beobachtungslinie liegt dabei ungefähr in der Ebene der Erdbahn, da diese einen großen Einfluss auf die zeitliche Verschiebung hat.

## 4.2 Einfluss der Erdbahn (Relativgeschwindigkeit Erde Himmelskörper)

Die Bahnebene der Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne ist in Abb. 20 in Grün dargestellt. Sie wird durch die beiden Vektoren  $a_1$  und  $a_2$  aufgespannt. Der Normalenvektor  $n$  (blau) ist ein Vektor, der senkrecht auf diesen beiden Vektoren steht. Er dient dazu, Richtungen in Bezug auf eine Ebene anzugeben. So schließt z.B. der Vektor  $b$  mit dem Normalenvektor den Winkel  $\alpha$  ein. Beträgt dieser Winkel  $0^\circ$ , steht  $b$  senkrecht auf der Ebene, bei  $90^\circ$  ist er parallel zur Ebene.

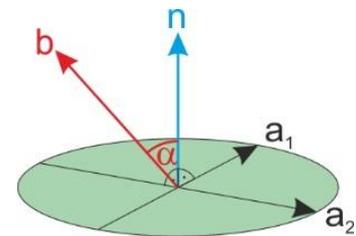


Abb. 20: Normalenvektor

Im Zentrum der Milchstraße finden sich zwei Quellen, die durch die Erdbewegung eine Rot-Verschiebung (Albireo: zunehmend, Polis: abnehmend) aufweisen.

Links neben dem Zentrum gibt es insgesamt vier Quellen mit einer durch die Erdbewegung verursachten Blau-Verschiebung, je zwei davon sind zu- bzw. abnehmend.

In den eben genannten Fällen ist der Winkel  $\alpha$  also recht groß, die Beobachtungslinie liegt demnach angenähert parallel zur Erdbahn.

Vega, Polaris und Alya zeigen keine nennenswerten Verschiebungen, obwohl mehrere Messungen vorliegen, damit ist  $\alpha$  recht klein.

Die größte Verschiebung wurde bei MZ03 (Cassiopeia A, 165 kHz) gemessen. Aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraums von 4 Monaten und der unterschiedlichen zeitlichen Abstände der Messungen kann daraus leider noch nicht ermittelt werden, welchen Betrag  $\alpha$  haben muss, dafür wären mindestens 6, am besten sogar 12 Monate Beobachtungszeit erforderlich. Dies gilt ebenfalls für alle anderen Quellen, auch wenn diese eine nicht so deutliche Verschiebung aufweisen.

### 4.3 Fehleranalyse

In dem Zeitraum, in dem die Messungen aufgenommen wurden, erfolgten mehrere Umbauten an der Mechanik des Teleskops. Unter anderem musste der Elevationsträger mit einer Versteifung nachgerüstet werden, weil sich dieser aufgrund der mit 450 kg relativ hohen beweglichen Masse des Reflektors zu stark verformte. In Folge dessen musste die Elevations-Kalibrierung im September um ca.  $2,6^\circ$  korrigiert werden. Das hatte zur Folge, dass bei späteren Messungen etwas andere Regionen untersucht wurden als vorher. Besonders deutlich wurde dies bei Messungen in der Region um Deneb, wo nach dem Umbau zusätzliche Peaks gemessen wurden, die auf eine weitere, nun vom beam-angle mit erfasste, Quelle zurückzuführen sind. Diese Peaks wurden auch im Frühjahr bereits einmal gemessen, als die Elevationssteuerung noch nicht kalibriert war.

Ein weiteres Problem ergab sich zu Beginn des Winters, da sich durch eine geringfügige Verformung der Sturmsicherung die darauf beruhende Elevations-Kalibrierung erneut verstellt hatte. Durch die daraus resultierende Veränderung des Elevationswinkels um ca.  $3^\circ$  wurde bei der Messung am 30.12.2018 eine Region mitgemessen, die bei der Aufnahme vom 03.11.2018 nicht erfasst wurde. Der Vergleich der beiden Aufnahmen (s. Abb. 21) zeigt die sich daraus ergebenden drastischen Unterschiede. Zur genaueren Untersuchung wurde diese Region deshalb noch einmal bei verschiedenen Elevationswinkeln vermessen. Das 3-D-Farbprofil zeigt in der Rechtsachse die Frequenzverschiebungen, in der Hochachse die Signalintensitäten und in der Tiefenachse den (in  $1^\circ$ -Schritten zunehmenden) Elevationswinkel. In den beiden ausgewählten Spektren ist der Peak um die Ruhfrequenz (0 kHz) eindeutig zu erkennen. In der Messung vom 03.11. (unten, EL1) zeichnet sich recht schwach ein weiterer Peak bei 340 kHz ab. Bei einer 9 Wochen später durchgeführten Messung vom 30.12. (oben, EL2) mit abweichender Elevations-Kalibrierung ist dieser Peak nun sehr deutlich ausgeprägt, außerdem kommt ein weiterer Peak bei 200 kHz dazu. Bei anderen Regionen macht sich dieser Effekt bei weitem nicht so stark bemerkbar. Das lässt darauf schließen, dass bei MZ05 zwei verschiedene leistungsstarke Quellgebiete eng nebeneinander liegen. Um diesen Sachverhalt zu klären, müsste eine großräumigere Rasteraufnahme dieser Region angefertigt werden, was bislang jedoch aus Zeitgründen nicht möglich war. Dazu sollte vorab eine genaue Positions-Kalibrierung erfolgen, die am besten mit der Sonne als genau lokalisierbarer Quelle durchgeführt werden kann. Auch diese Kalibrierung nimmt aber wegen der Anzahl der benötigten Messpunkte zu verschiedenen Zeitpunkten im Tagesverlauf viel Messzeit in Anspruch.

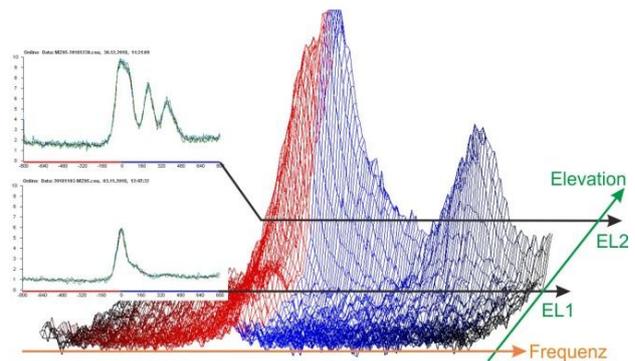


Abb. 21: Aufnahmen der Region MZ05 zu zwei verschiedenen Zeitpunkten

Die eben dargestellten Probleme hatten deshalb sicherlich auch Folgen für die gemessenen absoluten Intensitäten, was auch durch die Normierung nicht ganz behoben werden konnte.

Der Spectra-Cyber ist für einen Betrieb in einem Temperaturintervall von  $15 - 25^\circ \text{C}$  ausgelegt, in welchem er in der Lage ist, die angegebene absolute Genauigkeit von  $\pm 5 \text{ kHz}$  einzuhalten. Außerhalb dieses Intervalls kann der absolute Fehler auf bis zu  $\pm 25 \text{ kHz}$  ansteigen. Da alle Messungen im Freien durchgeführt wurden, ist vor allem im Sommer und im Winter nicht sichergestellt, dass dieses Temperaturintervall eingehalten werden kann. Um diesen Fehler auch nachträglich berücksichtigen zu können, wurde die Umgebungstemperatur ins Messprotokoll mit aufgenommen. Eine aktive Temperaturstabilisierung ist bereits in Planung, aber noch nicht realisiert.

Die erzielbare Messgenauigkeit hängt besonders bei schwachen Quellen stark vom Rauschsignal ab, sodass bei einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis die Angaben insbesondere zu den Peak-Intensitäten eine gewisse Unsicherheit aufweisen.

Auch terrestrische Störsignale können die Messungen ungünstig beeinflussen. Häufig kann man diese durch ihre Schmalbandigkeit identifizieren (z.B. siehe Abb. 12), sodass man durch mehrfache oder zu einem anderen Zeitpunkt stattfindende Wiederholungen solche Störungen eliminieren kann.

## 5 Zusammenfassung

Mit diesem Projekt konnte bestätigt werden, dass es in unterschiedlichen Regionen unserer Milchstraße Quellen für die Emission der H1-Linie gibt, die mit unterschiedlicher Intensität gemessen werden können. Diese erstrecken sich über die gesamte Länge der Milchstraße, aber auch in ihren Randbereichen sind derartige Quellen nachweisbar.

Die Aufnahme von Spektren ermöglicht es, Aussagen über die Verschiebung der H1-Ruhefrequenz mit so hoher Genauigkeit zu treffen, dass über den Dopplereffekt Rückschlüsse über ihre Relativgeschwindigkeit in Bezug auf die Erde gezogen werden können.

Aus der Beobachtungsrichtung und den jeweiligen Spektren lassen sich zumindest in erster Näherung mehrere unterschiedliche Spiralarme identifizieren. Die bislang vorliegenden Daten sind jedoch noch nicht hinreichend, um begründete Vermutungen über ihre Entfernung anstellen zu können, da derartige Folgerungen aus der Intensität allein stark vereinfachende Annahmen über die Strahlungsleistung der Gaskonzentrationen voraussetzen würden.

In Ansätzen konnte nachgewiesen werden, dass die Bewegung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne einen erheblichen Einfluss auf die gemessene Dopplerverschiebung hat. Der Messzeitraum ist aber noch nicht hinreichend groß, um qualitativ belastbare Aussagen zur relativen Erdbahnneigung treffen zu können.

## 6 Ausblicke auf weitere sinnvolle Messungen

Es hat sich gezeigt, dass durch eine Verlängerung des Messzeitraumes erheblich verlässlichere Aussagen über die in diesem Projekt angerissenen Fragestellungen getroffen werden können. Damit könnten auch weitere Kontrollmessungen zu bereits vermessenen Quellen aufgenommen werden. Dies betrifft nicht nur die Ergänzung um weitere Quellregionen, sondern auch die vollständige Erfassung eines Erdbahn-Zyklus.

Ergänzend bietet sich eine großflächige spektrale Rasteraufnahme des Himmels mit hoher Winkelauflösung an. Darauf musste bislang aus Zeitgründen verzichtet werden, da bereits die Aufnahme eines Rasters von 40 x 40 Punkten ca. 160 Stunden dauern würde.

In naher Zukunft wird es zudem möglich sein, in einem Frequenzbereich um 11 GHz Messungen vorzunehmen. Dazu muss allerdings der Antennenkopf umgebaut werden und würde in dieser Zeit nicht für Messungen der H1-Linie zur Verfügung stehen.

Um auch Quellen auf der südlichen Hemisphäre messen und auswerten zu können, wurde am 06.12.2018 eine entsprechende Anfrage an die australische CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) gerichtet. Leider ist bislang von dort keine Rückmeldung eingegangen.

## 7 Quellenangaben

- [1] John D. Kraus: Radio Astronomy, 2nd Edition, Cygnus-Quasar-Books, Durham 1986
- [2] Joachim Grehn, Joachim Krause: Metzler Physik, Schroedel, Hannover 1998, S. 379
- [3] „100-m-Radioteleskop kartiert den kompletten Nordhimmel im Licht des neutralen Wasserstoffs“  
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemitteilungen/2015/9>  
Letzter Aufruf: 21.12.2018
- [4] <https://apod.nasa.gov/apod/ap120602.html>  
Letzter Aufruf: 04.01.2019
- [5] Oskar Höfling, Physik Formeln und Einheiten Sekundarstufe II, Aulis Verlag, Köln 1984, S. 16, Form. 1.45
- [6] <http://www.biedermann-weesen.de/RA>, → Informationen → Empfangsantennen → 380 cm Reflektor,  
letzter Aufruf: 02.01.2019
- [7] Benjamin Winkel, MPIfR Bonn/Effelsberg, 2018 (Mail vom 12.10.2018)

## 8 Danksagungen

Für die Realisierung dieses Projektes war ich auf diverse Hilfen angewiesen, ohne die dieses vermutlich gar nicht zustande gekommen wäre. Zunächst einmal würde ich sehr gerne der Sternwarte Südheide dafür danken, dass sie mir überhaupt die Möglichkeit gegeben hat, mit einem so komplexen Messgerät wie einem Radioteleskop über einen längeren Zeitraum zu arbeiten. Auch das Max-Planck Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Effelsberg verdient meinen aufrichtigen Dank, denn ohne ihre Referenzmessungen könnte ich immer noch nicht sicher sein, ob die Messergebnisse überhaupt entfernt realistisch wären.

Doch vor allem gilt mein Dank Thomas Biedermann, der gefühlt sechs Monate am Stück wach geblieben ist, um mir Vektorrechnung und die Einheit Dezibel zu erklären. Durch ihn habe ich verstanden, welche unglaublichen Dimensionen der Weltraum hat und warum ein einziger Messgraph mehr sagt als 1000 Worte. Ich kann nicht einmal annähernd beschreiben, wie dankbar ich für diese Zeit bin.