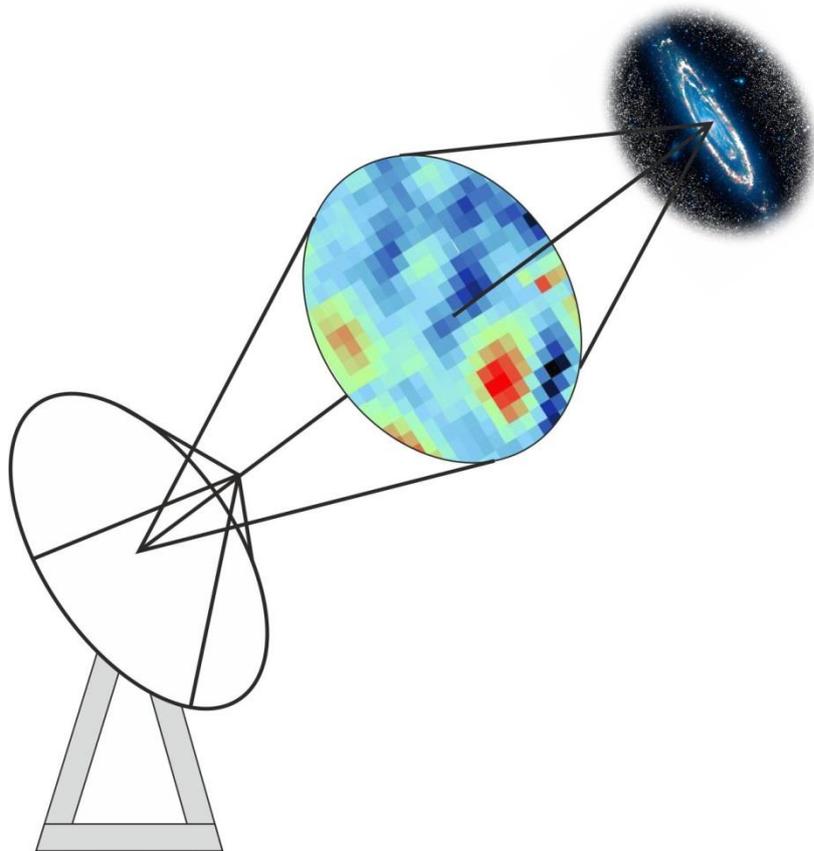


# Optimierung von Messkampagnen mit einem Schul-Radioteleskop



**Philip Pohl (18)**

**Christian-Gymnasium Hermannsburg**

**Wettbewerb „Jugend forscht“ 2021**

Betreuung: StD i.R. Thomas Biedermann

## Inhalt

1	Zielsetzung.....	3
1.1	Bisherige Projekte.....	3
1.2	Aktuelles Projekt .....	3
2	Grundlagen .....	4
2.1	Vorausgegangene Projekte .....	4
2.2	Reflektorcharakteristik.....	4
2.3	Koordinatensysteme .....	4
3	Aufnahme von Spektren.....	6
3.1	Nachführung.....	6
3.2	Abschätzung der Messzeit.....	6
4	Rastermessungen .....	7
4.1	Rasterauflösung.....	7
4.2	Aufnahmezeit .....	7
4.3	Abwägung zwischen Auflösung und Messzeit.....	8
4.4	Positionierungsmethoden .....	9
5	Messgeräte .....	9
5.1	Spectra-Cyber .....	9
5.1.1	Thermische Drift.....	10
5.1.2	Rückkopplungs-Peak.....	10
5.2	FunCube.....	12
5.3	Spectran.....	12
5.4	Vergleich der Messgeräte.....	12
6	Positions-Kalibrierung.....	13
7	Messbeispiele .....	14
7.1	Rastermessungen .....	14
7.2	Spektrum einer schwachen Quelle.....	15
8	Planung künftiger Messkampagnen .....	16
8.1	Derzeitiger Stand der Technik .....	16
8.2	Erweiterung der technischen Möglichkeiten .....	17
9	Fazit.....	17
10	Danksagung .....	17
11	Quellen .....	18

# 1 Zielsetzung

## 1.1 Bisherige Projekte

Das Radioteleskop des Christian-Gymnasiums ist seit knapp drei Jahren in der Lage, Radioquellen mit Emissionen im Frequenzbereich der H1-Linie bei ca. 1420,405 MHz in unserer kosmischen Umgebung zu messen. Während im vorvergangenen Jahr die Wasserstoffverteilung in unserer Milchstraße im Vordergrund stand, wurde im vergangenen Jahr der Fokus auf die Untersuchung der Messempfindlichkeit des Versuchsaufbaus gelegt. Die zugehörige Messkampagne beschäftigte sich insbesondere mit Quellen, die nur schwach strahlen. Dabei wurde neben den weit entfernten Galaxien M31 und M33 auch der Mond untersucht, der als rein thermischer Strahler im Frequenzbereich der H1-Linie eine sehr geringe Abstrahlung hat. Da der Abstand zwischen Signal und Hintergrundrauschen bei diesen schwachen Quellen sehr klein ist, musste die Messgenauigkeit des Aufbaus durch eine Optimierung der Messmethodik gesteigert werden. Die anhand dieser Quellen aufgenommenen Messungen sind reproduzierbar und aussagekräftig. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Leistungsgrenze des Radioteleskops noch nicht erreicht ist [1, S. 9, 11f, 15].

## 1.2 Aktuelles Projekt

Das diesjährige Forschungsziel liegt in der Untersuchung von Vorgehensweisen, um mit der derzeit vorhandenen Ausrüstung künftige Messkampagnen ihren jeweiligen Anforderungen entsprechend zielgerichteter planen und durchführen zu können. Aus den Messkampagnen der letzten Jahre haben sich dabei drei Aspekte als besonders relevant herauskristallisiert:

Bei Rasteraufnahmen handelt es sich überwiegend um Intensitätsmessungen in einem Ausschnitt des sichtbaren Himmels, der mit bestimmten Schrittweiten abgetastet wird. In der visuellen Darstellung erhält man eine farbcodierte Bitmap dieses Ausschnittes. Wie in der digitalen Fotografie steigt zwar der Informationsgehalt mit der Anzahl der Bildpunkte, der Zuwachs ist jedoch nicht proportional zur Bildauflösung. Hier gilt es, einen guten Kompromiss zwischen Messdauer und Messauflösung zu finden. Besonders bei schwachen Quellen wird die Messzeit zusätzlich durch die längere Integrationszeit bestimmt, die für ein hinreichendes Signal-Rausch-Verhältnis benötigt wird. Entsprechende Untersuchungen wurden vor allem in der lokalen Virgo-Gruppe mit mehreren Galaxien um M81 vorgenommen.

Für die Aufnahme von Messungen stehen mehrere Messempfänger zur Verfügung, die im Laufe der Zeit für verschiedenste Zwecke angeschafft wurden. In den letzten beiden Jahren wurde vor allem mit dem Spectra-Cyber gearbeitet, da dieser speziell für die Messung der H1-Linie von Wasserstoff konzipiert ist. Darüber hinaus steht ein FunCube-Dongle zur Verfügung, mit dem vor acht Jahren erste Messungen mit einer kleinen Satellitenschüssel durchgeführt wurden. Außerdem sind Messungen in diesem Frequenzbereich mit dem Aaronia Spectran möglich, der in den Folgejahren beschafft wurde, um Eigenkonstruktionen wie zum Beispiel einen Netzwerkanalysator zu vermessen. Da die letzteren beiden Geräte einen erheblich größeren Frequenzbereich als der Spectra-Cyber abdecken, soll anhand bekannter Quellen geprüft werden, wie gut sie für bestimmte radioastronomische Messungen geeignet sind.

Während der letzten beiden Jahre musste die Ausrichtung des Reflektors mehrmals neu kalibriert werden. Der Vergleich von älteren und neueren Messungen ausgewählter Quellen soll zeigen, welche Auswirkungen diese Änderungen am Pointing-System auf die Interpretation der Messwerte haben. Da die FehlAusrichtung eines Radioteleskops anders als bei einem optischen Teleskop nicht visuell kontrolliert werden kann, ist man hier auf kleinräumige, aber dennoch eindeutig identifizierbare Objekte angewiesen.

## 2 Grundlagen

Die Radioastronomie stützt sich auf den Empfang von Radiowellen in einem Frequenzbereich von 3 kHz bis hin zu nahezu 1000 GHz. Das Entstehen dieser Strahlung ist auf unterschiedliche physikalische Effekte zurückzuführen.

### 2.1 Vorausgegangene Projekte

In den vergangenen Jahren lag der Fokus auf der Wasserstoff-Emissionslinie bei 21 cm Wellenlänge, deren Entstehung in [2, S. 1f] näher beschrieben wurde. Hier handelt es sich um eine Zustandsänderung des neutralen Wasserstoffatoms, die mit den beiden unterschiedlichen Spin-Orientierungen zusammenhängt. Die zugehörige Frequenz von 1420,405 MHz ist bei bewegten Objekten einem Dopplereffekt unterworfen [2, S. 3f], was die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit ferner Objekte erlaubt.

Bereits in diesem schmalen Frequenzbereich ist es möglich, thermische Emissionen zu messen, deren Entstehung und Gesetzmäßigkeiten vor allem durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz und die Plancksche Strahlungsformel beschrieben werden [1, S. 3f]. Diese Emissionen sind bei der Sonne besonders ausgeprägt, lassen sich aber auch auf den Mond oder andere Objekte wie z.B. interstellare Gaswolken anwenden.

### 2.2 Reflektorcharakteristik

Eine Einschränkung im Hinblick auf die Wellenlängen, die mit einem Radioteleskop verarbeitet werden können, ergibt sich aus dem verwendeten Reflektor. Ein Leistungsgewinn ist nur zu erwarten, wenn sein Durchmesser größer ist als die zu untersuchende Wellenlänge. Andererseits muss die Oberflächengenauigkeit des Reflektors in der Größenordnung eines Zehntels der Wellenlänge liegen, damit die reflektierten Wellen im Brennpunkt konstruktiv interferieren. Bei unserem Reflektordurchmesser von 3,8 m mit einer Oberflächengenauigkeit von 2,5 mm ergibt sich aus der ersten Bedingung eine untere Grenzfrequenz von 80 MHz und aus der zweiten Bedingung eine obere Grenzfrequenz von 12 GHz. Eine weitere Einschränkung stellt der im Fokus platzierte Empfangsdipol dar. Dieser ist in der Regel auf eine bestimmte Wellenlänge optimiert und kann nur bedingt bei abweichenden Wellenlängen verwendet werden. Nach [3, S. 9ff] ist der derzeit verwendete Kreuzdipol auf 1420 MHz optimiert, kann aber mit reduziertem Wirkungsgrad im Bereich von 1200 bis 1600 MHz eingesetzt werden.

Der Beam-Angle eines Radioteleskops kennzeichnet dessen Auflösungsvermögen. Nach der empirischen Formel

$$\alpha = 1,2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (1) \quad [1, S. 6]$$

ist dieser abhängig vom Reflektordurchmesser  $d$  und der verwendeten Wellenlänge  $\lambda$ . Alle Objekte, die innerhalb dieses Winkels liegen, werden gleichzeitig gemessen, sodass sich ihre Signale überlagern. Aufgrund der Richtcharakteristik des Reflektors werden Objekte in der Mitte des Beam-Angle stärker gemessen als an dessen Rand [1, S. 6, Abb. 6]. Dieser Effekt ermöglicht es, durch präzise Ausrichtung des Teleskops auch Rastermessungen aufzunehmen, bei denen der Abstand einzelner Messpunkte deutlich kleiner als der Beam-Angle ist. Der Beam-Angle unseres Reflektors beträgt bei einer Wellenlänge von 21 cm ca.  $3,8^\circ$ .

### 2.3 Koordinatensysteme

Sternenkataloge geben die Position von Objekten in der Regel durch die Angabe eines Deklinations- und eines Rektaszensionswinkels an. Diese haben den Vorteil, dass sie von der Zeit und dem

geographischen Standort des Beobachters unabhängig sind. Ein entscheidender Nachteil ist, dass sie ohne zusätzliche Informationen nicht geeignet sind, um Objekte direkt am Himmel zu lokalisieren.

Die Ausrichtung unseres Teleskops erfolgt dagegen durch die Vorgabe von Azimut- und Elevationswinkeln (Abb. 1). Um diese zu berechnen, benötigt man zusätzlich zu den Daten aus dem Sternenkatalog die geographische Breite und Länge, Datum und Uhrzeit sowie die aktuelle Zeitzone.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Elevationswinkel eine Bewegung in azimutaler Richtung immer kürzere Wege am Himmel zurücklegt, was bei Darstellungen in einer zweidimensionalen Projektion zu beachten ist, weil sich die relative Lage von Punkten zueinander wie bei jeglichen Projektionen von einem Koordinatensystem in ein anderes verändert.

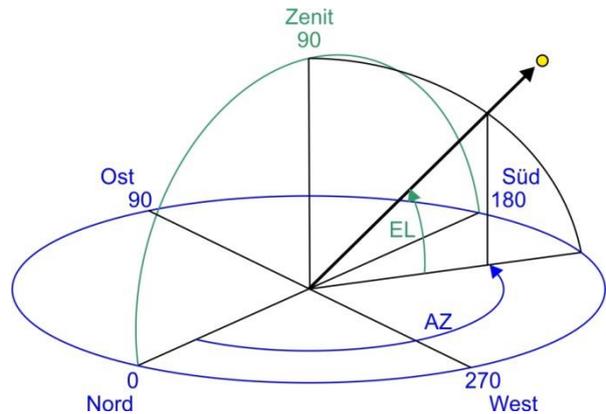


Abb. 1: Ausrichtung durch Elevation (EL) und Azimut (AZ)

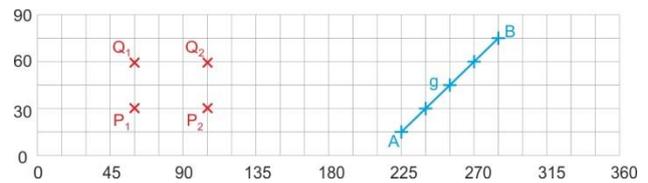


Abb. 2: Punkte eines Rechtecks (rot) und einer Geraden (blau)

Im Beispiel von Abb. 2 bilden im kartesischen Koordinatensystem die roten Punkte ein Rechteck und die blauen Punkte eine gerade Linie. In polaren Koordinaten werden das Rechteck zu einem Trapez und die Linie zu einer Kurve verzerrt (Abb. 3). Letztere Darstellung hat den Vorteil, dass sie ein Bild ergibt, wie man es auch bei der Betrachtung des Himmels sehen würde.

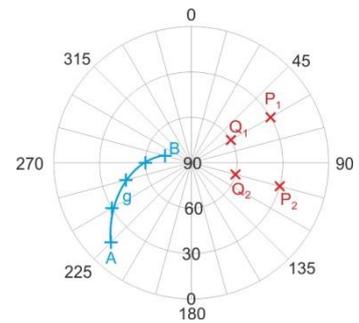


Abb. 3: Die gleichen Objekte in Polarkoordinaten

Wie groß die Unterschiede in der Darstellung sein können, zeigt Abb. 4. Das linke Bild zeigt ein rechteckiges Raster im kartesischen Koordinatensystem, wie man es zum Beispiel aus der Digitalfotographie kennt. Um die tatsächliche Lage am Himmel zu erhalten, ist das polare Koordinatensystem besser geeignet (mittleres Bild). Diese beiden Darstellungen sind jedoch vom Zeitpunkt der Aufnahme abhängig. Erst die Verwendung der zugehörigen Positionen in Deklination und Rektaszension z.B. in einem polaren Koordinatensystem erlaubt eine eindeutige Zuordnung von Objekten (rechtes Bild).

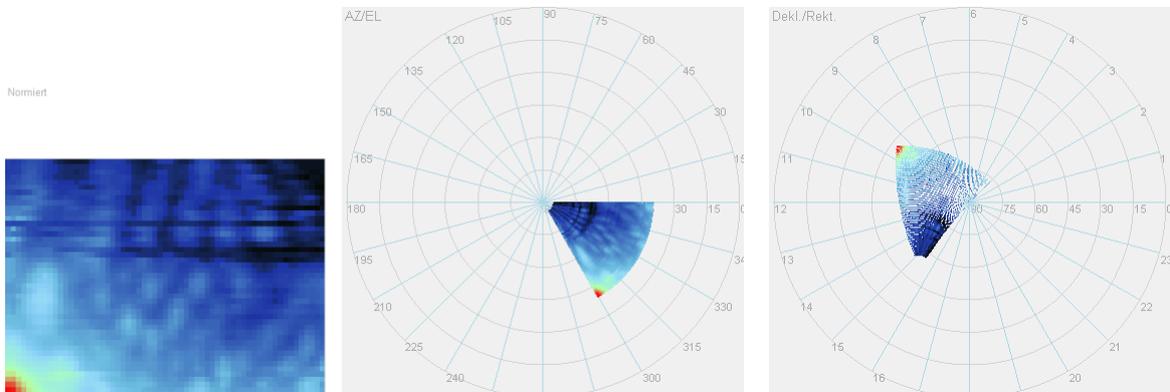


Abb. 4: Darstellung von ein und derselben Rasteraufnahme in drei verschiedenen Koordinatensystemen

### 3 Aufnahme von Spektren

Ein wesentlicher Schwerpunkt radioastronomischer Messungen ist die Aufnahme von Spektren. Während hierfür in der optischen Astronomie Prismen oder optische Gitter verwendet werden können, müssen in der Radioastronomie spezielle Messgeräte eingesetzt werden, die in der Regel durch eine Signalanalyse per FFT (Fast Fourier Transformation) die Frequenzanteile bestimmen. Eine zweite Möglichkeit sind sogenannte Super-Heterodyn-Empfänger, die auf die zu messende Frequenz eingestellt werden und durch mehrfaches Heruntermischen auf Zwischenfrequenzen und der Verwendung sehr schmalbandiger Filter die Signalstärke bestimmen.

#### 3.1 Nachführung

Die Aufnahme eines solchen Spektrums kann je nach Strahlungsleistung der Quelle mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Da sich in dieser Zeit die Zielkoordinaten der Quelle ändern, muss das Teleskop entsprechend nachgeführt werden (sog. Tracking). Die mehrfache Aufnahme von Spektren (Sweeps) mit anschließender Mittelwertbildung verbessert dabei das Signal-Rausch-Verhältnis (s. Abb. 5). Man beachte, dass wegen des möglichen Einflusses der Erdbahn [2, S. 12] nur über Spektren gemittelt werden kann, die höchstens einige Tage auseinanderliegen.

Die Steuersoftware für unseren Reflektor ist in der Lage, eine ausgewählte Quellposition zu fixieren und die für das Tracking erforderlichen Winkelkorrekturen sekundlich vorzunehmen.

Die Positioniergenauigkeit der Antriebsmechanik ist besser als  $0,1^\circ$  und liegt damit deutlich unterhalb des Beam-Angle.

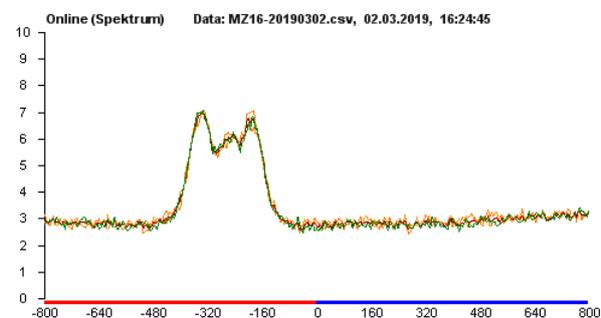


Abb. 5: Spektrum der Region um HIP 32578

#### 3.2 Abschätzung der Messzeit

Unser Teleskop kann im Azimut-Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  und im Elevations-Bereich von  $3^\circ$  bis  $90^\circ$  ausgerichtet werden. Bei der Planung entsprechender Messkampagnen ist zu beachten, dass beim Verfolgen eines Objektes vor allem die Intervallgrenzen im Azimut nicht überschritten werden, da das Teleskop ansonsten einen kompletten  $360^\circ$ -Schwenk ausführt, der die Messung unbrauchbar macht. Die Software verfügt deshalb über eine Zeitraffer-Simulation, mit der die anzufahrenden Positionen vor Beginn einer Messung für die geplante Messdauer überprüft werden können.

Die Aufnahmezeit für ein Spektrum mit dem Spectra-Cyber ergibt sich zu

$$T_s = n \cdot \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{step}} \cdot t_{int} \quad (2)$$

Darin sind  $n$  die Anzahl der Sweeps zur Mittelwertbildung,  $f_{min}$  und  $f_{max}$  die Intervallgrenzen, in denen das Spektrum aufgenommen werden soll,  $f_{step}$  die Frequenzauflösung und  $t_{int}$  die Integrationszeit pro Frequenzschritt.

Für ein Spektrum mit maximaler Bandbreite, kleinstmöglicher Schrittweite und der Mittelung über fünf Sweeps erhält man z.B.:

$$T_s = 5 \cdot \frac{2000 \text{ kHz} - (-2000 \text{ kHz})}{5 \text{ kHz}} \cdot 1 \text{ s} = 4000 \text{ s} \approx 67 \text{ min}$$

Da das Rauschverhalten der Empfangsanlage temperaturabhängig ist, sollte bei länger dauernden Messungen die Umgebungstemperatur möglichst konstant sein.

## 4 Rastermessungen

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Untersuchung von Regionen, bei dem z.B. die Wasserstoffkonzentrationen in den Spiralarmen unserer Milchstraße [2, S. 12] oder auch die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung bestimmt werden können. Zur visuellen Darstellung entsprechender Messungen werden in der Regel Falschfarbendarstellungen verwendet [2, S. 10f].

### 4.1 Rasterauflösung

Falschfarbencodierte Rastermessungen von Quellregionen ähneln optischen Bildern und ermöglichen dem Beobachter einen schnellen Überblick. Wie in der digitalen Fotografie hängt der Informationsgehalt stark von der Bildauflösung ab, was man gut an Abb. 6 erkennen kann: Von links nach rechts wurde die Bildauflösung in den ersten drei Bildern jeweils verdoppelt, das rechte Bild zeigt das Motiv in voller Auflösung. An diesem Beispiel wird deutlich, dass der Zugewinn an Information vom ersten zum zweiten Bild am größten und vom vorletzten zum letzten Bild am geringsten ist. Das bedeutet, dass der Informationsgewinn pro Pixel mit zunehmender Auflösung abnimmt. Da das Radioteleskop im Gegensatz zur Digitalfotografie jeden Pixel nacheinander aufnehmen muss, steigt die Messzeit proportional zur Anzahl der Pixel. Verdoppelt man also die Auflösung, so vervierfacht sich die Messzeit.

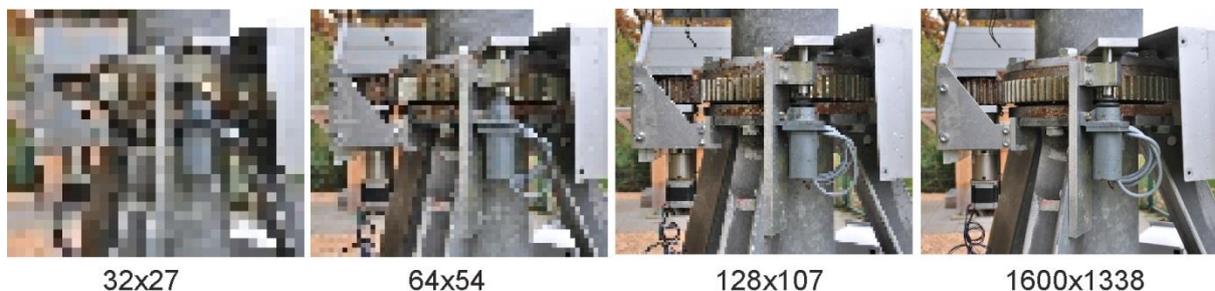


Abb. 6: Änderung des Informationsgehaltes durch zunehmende Bildauflösung

### 4.2 Aufnahmezeit

In der Digitalfotographie muss die Belichtungszeit umso länger gewählt werden, je weniger Licht vorhanden ist. Analog dazu verlängert man in der Radioastronomie die Integrationszeit, um auch schwächere Quellen messen zu können. Da dies für jeden Pixel gilt, geht diese Zeit proportional in die Messzeit ein.

Damit gilt für die Messzeit folgende Gleichung:

$$T = n_x \cdot n_y \cdot (t_p + t_i) \quad (3)$$

Darin sind  $n_x$  und  $n_y$  die Anzahl der Pixel in x- und y-Richtung,  $t_p$  die mittlere Positionierzeit pro Pixel und  $t_i$  die Integrationszeit. Diese Formel gilt nur, wenn jeder Messpunkt einzeln angefahren wird.

Für die Aufnahme eines quadratischen Rasters mit einer Kantenlänge von  $40^\circ$  und einer Schrittweite von  $1^\circ$  erhält man bei einer Integrationszeit von 0,3 s beispielsweise eine Messzeit von

$$T = 41 \cdot 41 \cdot (1 \text{ s} + 0,3 \text{ s}) = 2185 \text{ s} \approx 37 \text{ min}$$

Bei einer Integrationszeit von 1 s verlängert sich die Messzeit auf etwa 56 min.

Die Messzeit lässt sich reduzieren, indem man die Azimutrichtung mit konstanter Geschwindigkeit abfährt und bei den durch die Schrittweite vorgegebenen Rasterpunkten einen Messwert aufnimmt. Diese Methode hat den Nachteil, dass die Integrationszeit nicht frei gewählt werden kann, sondern so kurz sein muss, dass sie in der Größenordnung der Verweildauer des Fokus auf dem Objekt liegt. Damit ist sie für schwache Quellen, die eine längere Integrationszeit benötigen, nicht geeignet.

Für die Abschätzung der Messzeit ergibt sich die Formel

$$T = \left( \frac{(\alpha_{max} - \alpha_{min})}{\omega_{AZ}} + \frac{(\alpha_{max} - \alpha_{min})}{\omega_{AZmax}} \right) \cdot n_y + \frac{(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})}{\omega_{EL}} \quad (4)$$

Darin sind  $\alpha_{min}$  und  $\alpha_{max}$  Start- und Stopp-Winkel in Azimut-Richtung,  $\varepsilon_{min}$  und  $\varepsilon_{max}$  Start- und Stopp-Winkel in Elevations-Richtung,  $n_y$  die Anzahl der Schritte in Elevations-Richtung,  $\omega_{AZ}$  die gewünschte Winkelgeschwindigkeit des Azimut-Antriebes in Grad pro Sekunde,  $\omega_{AZmax}$  dessen maximale Winkelgeschwindigkeit und  $\omega_{EL}$  die mittlere Winkelgeschwindigkeit des Elevations-Antriebes. Der erste Summand bestimmt die Zeit zum Durchfahren einer horizontalen Zeile sowie die für den Rücklauf auf den azimutalen Startwinkel benötigte Zeit, der zweite Summand die Zeit zum Anfahren der nächsten Elevationsposition. Letzterer kann vernachlässigt werden, wenn diese Zeit kürzer als die Rücklaufzeit des Azimut-Antriebes ist.

Für das gleiche Raster wie oben erhält man so eine Messzeit von

$$T = \left( \frac{(40^\circ - 0^\circ)}{3^\circ/s} + \frac{(40^\circ - 0^\circ)}{4^\circ/s} \right) \cdot 41 + \frac{(40^\circ - 0^\circ)}{0,15^\circ/s} = 1223,3 \text{ s} \approx 21 \text{ min}$$

Die Integrationszeit darf dabei 0,3 s nicht überschreiten, da sich in dieser Zeit der Azimutwinkel bereits um  $1^\circ$  ändert. Wird eine Integrationszeit von 1 s benötigt, muss die Winkelgeschwindigkeit im ersten Summanden auf  $1^\circ/s$  reduziert werden, dadurch verlängert sich die Messzeit auf etwa 39 min.

### 4.3 Abwägung zwischen Auflösung und Messzeit

Der Länge der maximalen Messzeit sind Grenzen gesetzt, da sich die Objekte während der Messung um den Polarstern drehen und dabei auch unter die Horizontlinie gelangen können. Dies ist besonders kritisch, wenn großflächige Rasteraufnahmen gemacht werden. Hier ist bei der Planung abzuwägen, ob der mit der Messzeit zunehmenden Verzerrung der Aufnahme oder der Zerlegung in mehrere Teilaufnahmen der Vorzug zu geben ist.

Bei einem vorgegebenen Himmelsausschnitt hängen die Auflösung und damit die Anzahl der Pixel von der Schrittweite ab, mit der aufeinander folgende Koordinatenpunkte angesteuert werden. Obwohl unser Beam-Angle bei der derzeit verwendeten Wellenlänge knapp  $4^\circ$  beträgt, hat sich gezeigt, dass wegen der Nicht-Linearität der Empfangskeule auch zwischen Punkten differenziert werden kann, die kleinere Winkelabstände haben. Abb. 7 zeigt ein und dieselbe Region mit einer Schrittweite von  $1^\circ$  (links) und  $2^\circ$  (rechts). Bei der kleineren sind deutlich mehr Details zu erkennen. Eine Schrittweite von  $0,5^\circ$  würde zwar noch etwas mehr Information liefern, die Messzeit allerdings vervierfachen.

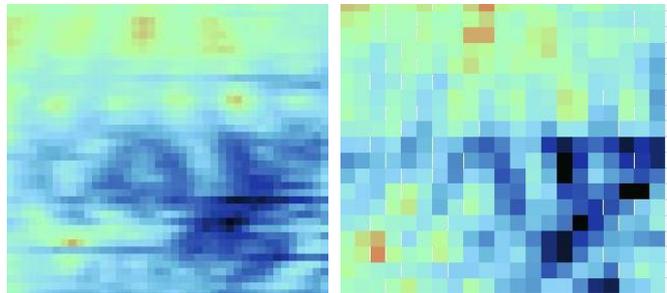


Abb. 7: Rasterausschnitt mit 2 verschiedenen Auflösungen

Bei kleinen Schrittweiten wird dafür das Auftreten von fehlerhaften Messpunkten durch terrestrische Störungen leichter erkennbar, da sie sich deutlich von unmittelbar benachbarten Messpunkten unterscheiden.

Besondere Beachtung ist dem Zusammenhang zwischen Positionierungs- und Integrationszeit zu schenken. Je länger die Integrationszeit ist, desto länger dauert es, bis nach dem Anfahren einer neuen Position ein stabiler Signalpegel anliegt. Je größer die Signaländerung zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten ist, desto stärker wird das Signal zeitlich verzerrt. Dies hat zur Folge, dass die Pixel in horizontaler Richtung ineinander verlaufen und schlimmstenfalls Streifen bilden. Die Zeit zum Anfahren einer Position sollte deshalb möglichst anderthalb- bis zweimal so groß wie die Integrationszeit sein.

## 4.4 Positionierungsmethoden

Beim Anfahren direkter Positionen zum Anfertigen von Rastermessungen gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder werden für jeden Rasterpunkt absolute Positionen verwendet (Abb. 8, links), oder das Zentrum des Rasters wird einer virtuellen Quelle nachgeführt. In beiden Fällen werden die gleichen Daten aufgenommen. Im ersten Fall wird in Kauf genommen, dass sich das Zielobjekt während der Messung innerhalb des

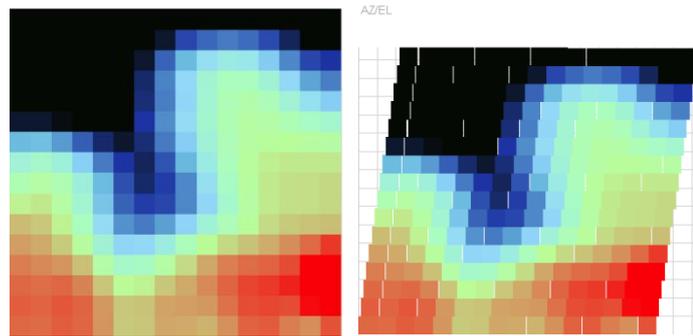


Abb. 8: Rasteraufnahme mit absoluten (links) und nachgeführten Koordinaten

Rasters bewegt, im zweiten Fall wird tatsächlich ein Rechteck um die Quellposition gemessen. Da sich diese jedoch fortlaufend ändert, erscheint die Darstellung des nachgeführten Rasters verzerrt (Abb. 8, rechts). In jedem Fall wird mit den Messdaten ein Zeitstempel aufgenommen, wodurch sich die Koordinaten auch nachträglich ineinander überführen lassen.

Die absolute Darstellung gibt einen schnelleren Überblick über die Verteilung der Signalintensitäten, bei der nachgeführten Darstellung sind die Überlappungen einzelner Messpunkte besser zu erkennen. Wenn es wichtig ist, dass das Zielobjekt auch bei einer länger andauernden Messung nicht aus dem Raster wandert, sollte der nachgeführten Methode der Vorzug gegeben werden.

## 5 Messgeräte

Erdgebundene Radioastronomie ist in einem Frequenzbereich von etwa 3 kHz bis 1000 GHz möglich, was zahlreiche Möglichkeiten zum Aufstellen einer Messkampagne bietet. Der zu wählende Frequenzbereich richtet sich nach der Art der zu untersuchenden Objekte. Je nach Messaufgabe unterscheiden sich deshalb die Anforderungen, die an ein Messgerät gestellt werden. Derzeit stehen dafür drei sehr unterschiedliche Geräte zur Verfügung.

### 5.1 Spectra-Cyber

Der Spectra-Cyber von RAS (Radio Astronomy Supplies, Withesboro, Texas) ist ein Messgerät, das speziell für Messungen im Bereich der H1-Linie bei 1420,405 MHz konzipiert wurde. Er ist als Super-Heterodyn-Empfänger aufgebaut und verfügt über zwei Messmodi: Im Kontinuum-Mode wird die Signalstärke mit einer Bandbreite von 8 MHz ermittelt, im Spektrum-Mode wird in einem Messintervall von maximal 4 MHz Breite und einer Bandbreite von 7,5 kHz in Schritten von 5 kHz ein Spektrum erzeugt. Die Komponenten sind für radioastronomische Messungen der H1-Linie optimiert, dadurch hat das Gerät eine sehr hohe Eingangsempfindlichkeit und ein hervorragendes Signal-Rausch-Verhältnis.

Die Messzeit für die Aufnahme eines Spektrums wird durch die Intervallgröße und die Schrittweite bestimmt und liegt im Bereich einiger Minuten. Durch Mittelwertbildung über mehrere Sweeps kann das Signal-Rausch-Verhältnis weiter verbessert werden. Im Kontinuum-Mode wird die Signalstärke über einen einstellbaren Zeitraum gemittelt, die Messwerte können zum Beispiel für die Untersuchung der Wasserstoffverteilung in einer Himmelsregion verwendet werden.

Beim aktuellen Projekt wurden mit dem Spectra-Cyber Messungen an schwachen Quellen aufgenommen, bei denen eine höhere Verstärkung der Signale erforderlich war als bei früheren Messungen. Dabei wurden zwei Effekte beobachtet, die bisher nicht in Erscheinung getreten waren.

### 5.1.1 Thermische Drift

Nach dem Einschalten driftet der gemessene Pegel erkennbar zu niedrigeren Werten und stabilisiert sich erst nach längerer Zeit. Um dieses Problem näher einzugrenzen, wurden zwei Messungen mit unterschiedlicher Laufzeit durchgeführt, wobei der Eingang mit  $50 \Omega$  abgeschlossen war. Als Messmethode wurde ein Raster gewählt, das sich hierbei von links unten zeilenweise nach rechts oben aufbaut (Abb. 9).

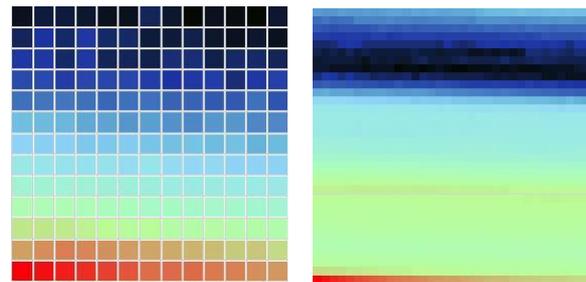


Abb. 9: Rasterdarstellung der beiden Driftmessungen

Die Messungen wurden mit einer ZF-Verstärkung von 20 dB und einer 20-fachen DC-Verstärkung aufgenommen und zeigen das Eigenrauschen des Gerätes. Anhand der Falschfarbendarstellung ist zu erkennen, dass generell eine Abnahme des Rauschens (von rot zu blau) zu beobachten ist.

Eine genauere Analyse ist durch die graphische Darstellung der Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit möglich (s. Abb. 10). Direkt nach dem Einschalten (kleine Graphik oben rechts) ist eine angenähert exponentielle Abnahme zu sehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Elektronik so lange erwärmt, bis sich nach ca. 30 Minuten ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat.

Die große Graphik zeigt einen Zeitraum von sechseinhalb Stunden. Am Anfang zeigt sich ebenfalls das exponentielle Verhalten, während sich danach ein irregulärer Verlauf abzeichnet. In dieser Zeit hat sich die Raumtemperatur der Messumgebung ständig geringfügig geändert, was sich unmittelbar auf das Eigenrauschen auswirkt. In der ersten halben Stunde ist das Signal um ca. 0,05 dBm abgesunken, die Schwankungsbreite durch die Änderung der Raumtemperatur liegt bei 0,09 dBm.

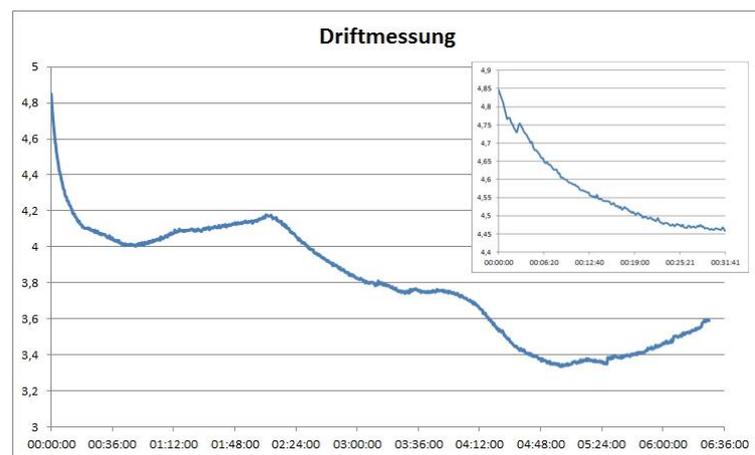


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Eigenrauschens in Abhängigkeit von der Zeit

Folglich sollte das Gerät bei Messungen mit hoher Eingangsempfindlichkeit mindestens eine halbe Stunde lang warmlaufen, bis sich das Eigenrauschen stabilisiert hat. Im weiteren Verlauf der Messung sollte dann darauf geachtet werden, dass sich die Umgebungstemperatur möglichst nicht ändert. Aufgrund der Wärmeträgheit des Gerätes sind durch Temperaturschwankungen hervorgerufene Signaländerungen bei Messungen mit einer Dauer von wenigen Minuten zu vernachlässigen. Bei längeren Messzeiten muss dieser Effekt nur dann besondere Berücksichtigung finden, wenn sich das Messsignal um weniger als 0,1 dBm vom Rauschniveau unterscheidet.

### 5.1.2 Rückkopplungs-Peak

Die Galaxie M82 ist die bisher schwächste Quelle, von der mit dem Spectra-Cyber ein Spektrum aufgenommen wurde (Abb. 11, oben). Um ein auswertbares Signal zu erhalten, wurden eine ZF-Verstärkung von 15 dB und eine 10-fache DC-Verstärkung gewählt. Das Signal bei einem Offset von 1500 kHz liegt dabei nur 0,3 dB über dem Grundrauschen.

Der Peak bei einem Offset von 100 kHz stammt aus den Wasserstoffwolken unserer Milchstraße, außerdem ist ein weiterer Peak bei knapp 400 kHz zu erkennen. Um auszuschließen, dass der Frequenzgang des Spectra-Cyber für diesen Signalverlauf verantwortlich ist, wurde sein Eingang mit  $50 \Omega$  abgeschlossen und eine Referenzmessung mit gleichen Einstellungen vorgenommen. Typischerweise hätte sich nun ein angenähert linearer Verlauf ergeben müssen, jedoch ist auch hier bei knapp 400 kHz ein eindeutiger Peak zu erkennen (Abb. 11, unten). Eine genauere Analyse hat ergeben, dass durch Rückkopplung des im Spectra-Cyber verwendeten durchstimmbaren Sweep-Oszillators mit einer Mittenfrequenz von 48 MHz bei bestimmten Offset-Einstellungen auf seiner 30. Oberwelle ein Störsignal entsteht. Dieses führt bei Offsets von  $-1345 \text{ kHz}$  und  $+345 \text{ kHz}$  zu starken Eigenschwingungen, die nicht durch die schmalbandigen Filter unterdrückt werden können.

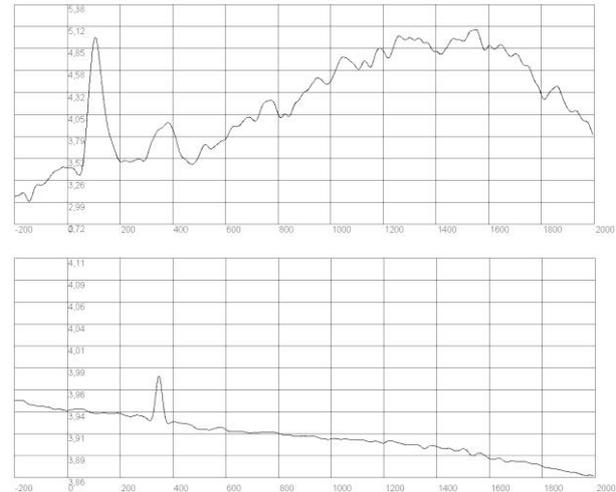


Abb. 11: Vergleich Signalverlauf von M82 (oben) und Frequenzgang des mit  $50 \Omega$  abgeschlossenen Spectra-Cyber

Nachdem das Einfügen eines Ferrit-Kerns für die Versorgungsleitungen und das Umverlegen der HF-Eingangslleitung keinen Effekt zeigten, wurden nach Rücksprache mit dem Hersteller Abschirmbleche aus Kupfer in das Gerät eingebaut, deren Wirksamkeit durch Kontrollmessungen mit dem Spectran nachgewiesen werden konnte.

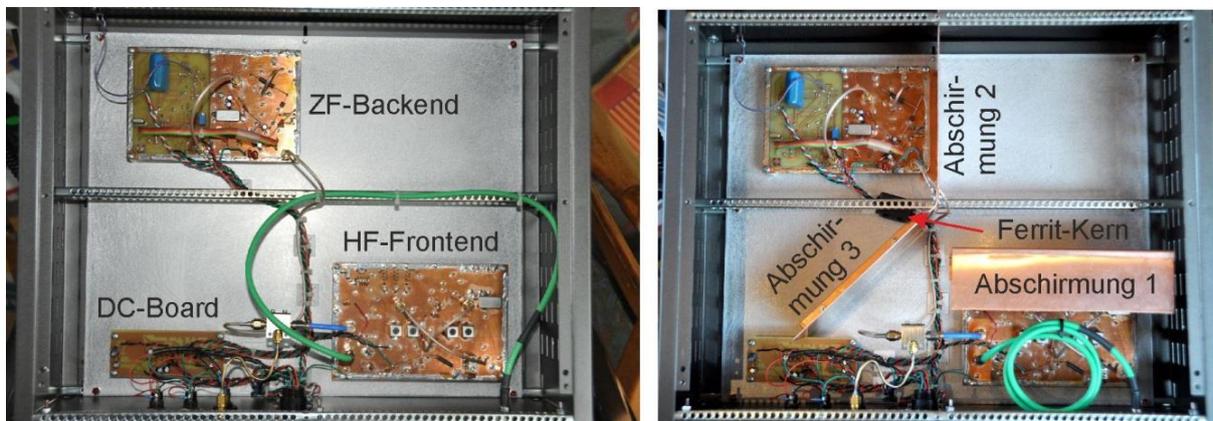


Abb. 12: Komponenten des Spectra-Cyber vor (links) und nach der Umrüstung (rechts)

Abb. 12 zeigt die getroffenen Maßnahmen. In Kombination sorgen die beiden Kupferbleche dafür, dass das Störsignal bei  $-1345 \text{ kHz}$  um mehrere Größenordnungen abgeschwächt wird und der Peak bei  $+345 \text{ kHz}$  hinreichend stark unterdrückt wird, um im Rauschen unterzugehen (Abb. 13). Die Kalibrierung wurde dadurch nicht beeinflusst. Da die Genauigkeit dieses Gerätes in den vergangenen Jahren durch den Vergleich mit professionellen Messungen überprüft und bestätigt werden konnte, können damit aufgenommene Messungen auch im weiteren Verlauf der Messkampagne als Referenz herangezogen werden.

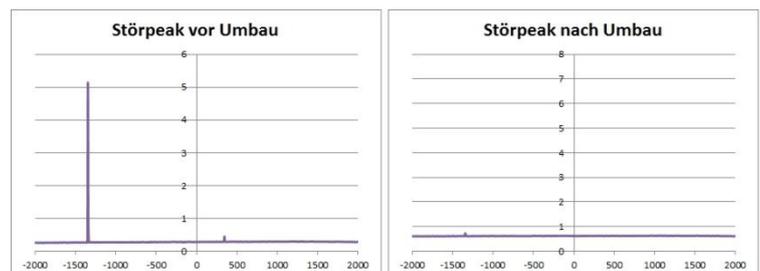


Abb. 13: Wirksamkeit der Abschirmungsmaßnahmen

## 5.2 FunCube

Der FunCube-Dongle ist ein Software-Defined-Radio (SDR) in Form eines USB-Sticks (Abb. 14). Auch hier handelt es sich im Prinzip um einen Super-Heterodyn-Empfänger. Er wurde vor allem für den Amateurfunk entwickelt und kann auf Frequenzen im Bereich von 150 kHz bis etwa 2 GHz



Abb. 14: FunCube-Dongle

eingestellt werden. Da er die Soundkarte des PC als Signalwandler benutzt, ist seine Bandbreite auf maximal 44 kHz beschränkt, was für den Amateurfunkbereich mit einer Signaldemodulation im NF-Bereich völlig ausreicht, die Aufnahme von Spektren in größeren Frequenzintervallen jedoch erschwert. Die Abtastrate ist zwar sehr hoch, allerdings ist er nicht sehr rauscharm, sodass für radioastronomische Messungen über viele Sweeps gemittelt werden muss. Die Eingangsempfindlichkeit ist deutlich niedriger als beim Spectra-Cyber. Das Ausgangssignal kann per Software einer FFT unterworfen werden und ist so zur Aufnahme von schmalbandigen Spektren geeignet. Für größere Frequenzintervalle kann der FunCube aber auch wie der Spectra-Cyber durchgestimmt werden. Mit einem Preis von ca. 200 € ist er relativ günstig, was ihn auch für Hobbyastronomen und Schul-AGs erschwinglich macht.

## 5.3 Spectran

Der Spectran HF-60100 V4 X von Aaronia ist ein Spektrum-Analysator für elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich von 1 MHz bis 9,4 GHz und wurde vor allem für die Umweltmesstechnik konzipiert (Abb. 15). Die Eingangsempfindlichkeit ist etwas niedriger als beim Spectra-Cyber. Für dieses Gerät liegt kein Blockschaltplan vor, bestimmte



Abb. 15: Spectran Spektrum-Analysator

Charakteristika weisen aber darauf hin, dass die Messmethode der des FunCube entspricht. Die Messzeit für die Aufnahme eines Spektrums hängt von der gewählten Bandbreite und der Größe des Frequenzintervalls ab und liegt zwischen 50 Millisekunden und mehreren Minuten. Durch Aufnahme mehrerer Sweeps kann das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessert werden. Auch dieses Gerät verfügt über einen Kontinuum-Mode, der jedoch mit seiner Bandbreite von 9,4 GHz kaum für radioastronomische Messungen geeignet ist.

## 5.4 Vergleich der Messgeräte

Die Aufnahme von Spektren ist ein häufiger Bestandteil zahlreicher Messkampagnen. Bevor man den FunCube oder den Spectran in anderen Frequenzbereichen nutzen kann, muss sichergestellt werden, dass die damit verbundenen Ergebnisse vergleichbar sind.

Dazu wurde zunächst mit dem Spectra-Cyber ein Spektrum der Region um Cassiopeia-A aufgenommen (Abb. 16). Da in [2, S. 9ff] gezeigt wurde, dass die Eigenbewegung der Erde einen deutlichen Einfluss auf die Dopplerverschiebung und damit die Lage der Peaks hat, musste eine aktuelle Messung als Referenz aufgenommen werden. Diese stimmt vom prinzipiellen Verlauf mit den damaligen Messungen überein.

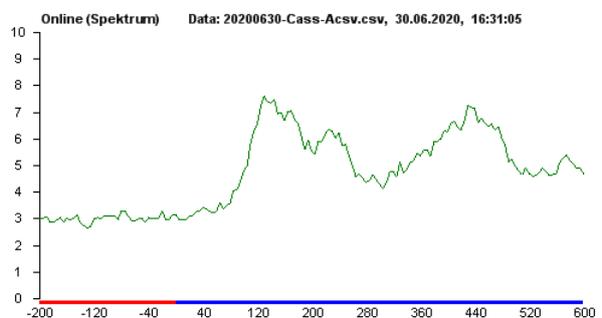


Abb. 16: Region um CassA mit Spectra-Cyber (Referenz)

Abb. 17 zeigt ein mit dem FunCube erstelltes Spektrum im gleichen Frequenzbereich um die H1-Linie bei 1420,405 MHz (senkrechte Linie) in der Region um Cassiopeia-A. Das Intervall wurde in Schritten von 5 kHz abgetastet, für jede



Abb. 17: Region um CassA mit FunCube

einzelne Frequenz wurden 50 Messungen aufgenommen und gemittelt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Der globale Verlauf der beiden Graphen stimmt bis auf wenige Details überein. Obwohl das Rauschen beim FunCube deutlich größer ist, ist das Signal-Rausch-Verhältnis dieser Messung aufgrund der Mittelung nicht wesentlich schlechter als beim Spectra-Cyber. Allerdings sind die Peaks in der Messung des FunCubes um etwa 30 kHz verschoben, was einem Fehler von ca. 20 ppm entspricht. Für Präzisionsmessungen wäre es sinnvoll, diesen Fehler genauer zu quantifizieren und entsprechend zu berücksichtigen.

Abb. 18 zeigt einen vergleichbaren Sweep, der mit dem Spectran aufgenommen wurde. Das Intervall wurde mit einer Schrittweite von 15 kHz und einer Bandbreite von 30 kHz abgetastet. Der Graph zeigt das Ergebnis von 50 gemittelten Sweeps. In Bezug auf Rauschen und Signal-Rausch-Verhältnis gelten die gleichen Einschränkungen wie beim FunCube. Im Gegensatz dazu stimmt die Frequenzzuordnung mit dem Spectra-Cyber überein, was mit dem im Datenblatt angegebenen Fehler von 0,5 ppm korrespondiert.

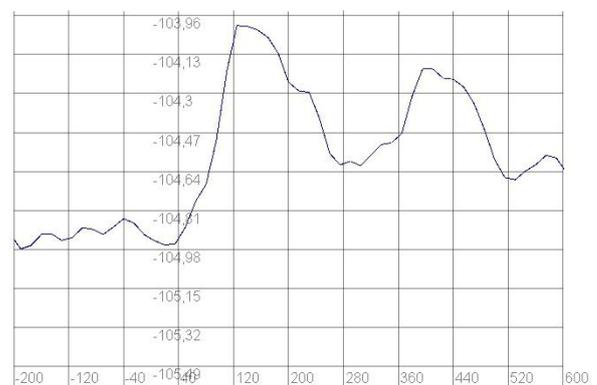


Abb. 18: Region um CassA mit Spectran

Die im Spectran verwendete Messelektronik verursacht sehr schmale Spikes, die exakt alle 20 MHz auftreten. Diese können softwareseitig durch eine entsprechende Kalibrierungstabelle unterdrückt werden, was leider zur Folge hat, dass bei diesen Frequenzen keine Messwerte aufgenommen werden können.

Der Powermeter-Modus des Gerätes, der die Signalintensität über alle messbaren Frequenzen mittelt, ist für Rasteraufnahmen ungeeignet, da die interessierenden Signale im Vergleich zur Bandbreite in diesem Modus viel zu schmalbandig sind. Die einzelnen Pixel in Abb. 19 sind auf externe terrestrische Einstreuungen zurückzuführen. Damit ist der Spectran nur zur Aufnahme von Spektren sinnvoll einsetzbar.

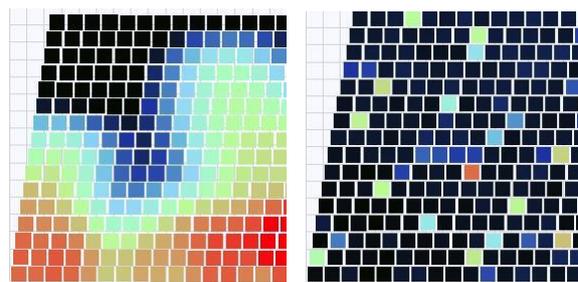


Abb. 19: Region um Virgo-A mit Spectra-Cyber (links) und Spectran (rechts)

## 6 Positions-Kalibrierung

Eine wesentliche Komponente eines Teleskops ist dessen Pointing-System. Dieses umfasst sowohl die Antriebsmechanik als auch die Steuerungssoftware. Nach dem Aufbau wurde das Teleskop mit Kompass und Winkelmesser grob justiert und anschließend durch Ausrichten auf die Sonne und der Überprüfung des Schattenwurfes des Primärfokus auf das Zentrum des Reflektors nachjustiert.

Beim Azimut-Antrieb besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Schrittzahl des Motors und dem horizontalen Ausrichtungswinkel. Beim Elevations-Antrieb ist dieser Zusammenhang komplizierter, da es sich bei dem verwendeten Stellmotor zwar um einen Linearantrieb handelt, die

mechanische Geometrie jedoch aufgrund trigonometrischer Beziehungen zu einem nicht-linearen Zusammenhang zwischen Motorposition und Höhenwinkel führt. Die Linearisierung erfolgt in der Software durch ein Approximationspolynom, deren Koeffizienten empirisch ermittelt wurden.

Der Bezugspunkt des Pointing-Systems besteht in der Sturmsicherung, in die das Teleskop in seiner Parkposition einrastet. Die zugehörige Mechanik befindet sich auf der Wartungsplattform. Da das geparkte Teleskop eine Kraft von ca. 1000 N auf die Plattform ausübt, hat sich deren Position im Laufe der Zeit verändert, was eine Rekalibrierung erforderlich machte. Um diesen Effekt künftig zu verhindern, wurde eine Abstützung zur Zentralsäule montiert (Abb. 20). Da die Koeffizienten des Approximationspolynoms noch nicht aktualisiert werden konnten, ergeben sich derzeit bei der Elevationsausrichtung Winkelfehler von bis zu 4°.



Abb. 20: Elevationsabstützung der Sturmsicherung

Um die Auswirkungen einer Neukalibration zu untersuchen, wurde das Spektrum der bereits häufig vermessenen Quellregion Cassiopeia-A vor und nach der Umstellung untersucht. In Abb. 21 erkennt man deutliche Unterschiede im Verlauf des Spektrums, lediglich der globale Verlauf ist noch vergleichbar. Der Kurvenverlauf nach der Korrektur (blaue Kurve) stimmt sehr gut mit früheren Messungen überein [2, S. 11], der abweichende Verlauf der roten Kurve zeigt, wie sehr die Ergebnisse durch die Deplatzierung der Parkposition beeinflusst wurden. Da diese Verformung schleichend passiert ist, sind nur solche Messungen unmittelbar vergleichbar, die in nicht zu großen Zeitabständen aufgenommen wurden. Dieses Problem konnte durch die Montage der Abstützung behoben werden.

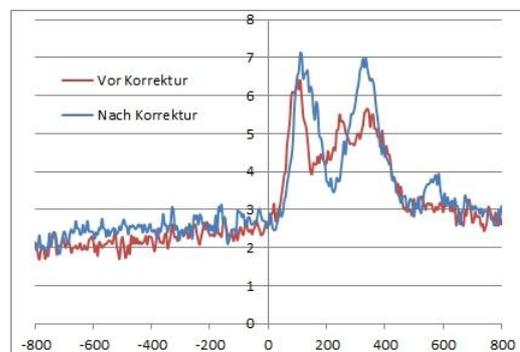


Abb. 21: CassA-Spektrum vor/nach Korrektur

Die Positionierungsfehler durch das Approximationspolynom wirken sich zwar negativ auf die Erfassungsgenauigkeit bestimmter Quellregionen aus, da es sich aber um konsistente Abweichungen handelt, ist es trotzdem möglich, reproduzierbare und damit verwertbare Messkampagnen durchzuführen. Der Nachteil ist, dass dadurch die genaue Identifikation kleinräumiger Zielregionen erschwert wird.

## 7 Messbeispiele

### 7.1 Rastermessungen

Die Untersuchung der Galaxienansammlung um M81 reizt die Grenzen unseres Radioteleskops unter Verwendung des Spectra-Cyber in mehrfacher Hinsicht aus. Dort befinden sich in der lokalen Gruppe des Virgo-Clusters mehrere Galaxien eng nebeneinander. Der Cluster umfasst eine Region von etwa 40° Ausdehnung in beiden Richtungen, dabei sind einzelne Galaxien teils weniger als 4° voneinander entfernt.

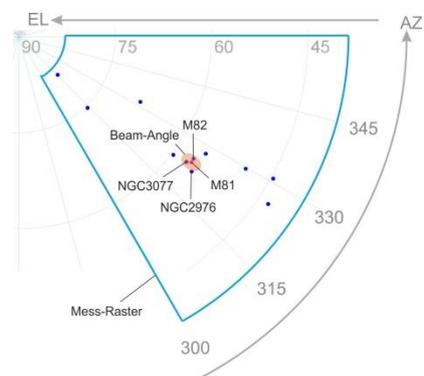


Abb. 22: Beam-Angle und M81-Cluster

Der blau umrahmte Bereich in Abb. 22 umfasst diese Region. Einige der leuchtstärksten Galaxien sind durch Punkte markiert, die orangefarbene Ellipse entspricht dem Beam-Angle. Wie man sieht, liegen in seinem Bereich die vier in der Abbildung benannten Galaxien.

Am 25. September 2020 wurde eine nachgeführte Rasteraufnahme mit M82 im Zentrum bei einer Schrittweite von  $1^\circ$  aufgenommen. Die Wiederholung der Messung 19 Minuten später zeigt weitgehende Übereinstimmungen und geringfügige Abweichungen aufgrund der veränderten Himmelsposition (Abb. 23).

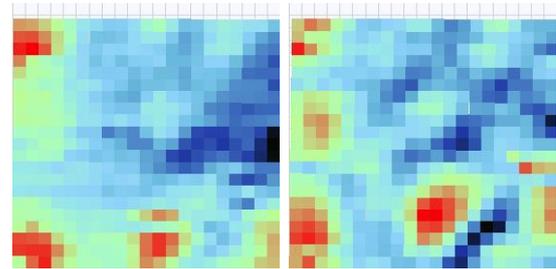


Abb. 23: Rasteraufnahmen um M82

Die Falschfarbendarstellung erweckt den Eindruck, dass sich hier deutlich erkennbare Strukturen abzeichnen. Die zugehörigen Rohdaten (Abb. 24) zeigen jedoch, dass die Messwerte für die einzelnen Rasterpunkte im Bereich von 7 – 8 V variieren, was bei den verwendeten Einstellungen einer maximalen Signaländerung von 0,2 dBm entspricht. Die deutlich erkennbaren rötlichen Strukturen können dabei schon durch geringfügige Änderungen der Wasserstoffkonzentration unserer Milchstraße verursacht werden.

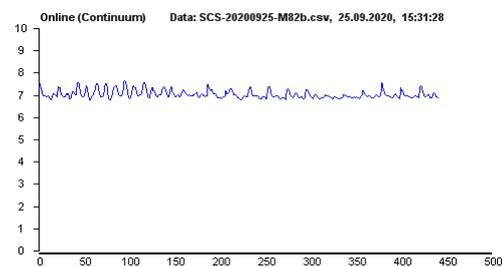


Abb. 24: Rohdaten zu Abb. 23 (rechtes Raster)

In der folgenden Woche wurde eine großflächigere Aufnahme mit der gleichen Schrittweite erstellt. Auch diese Messung wurde wenige Minuten später wiederholt, außerdem wurde

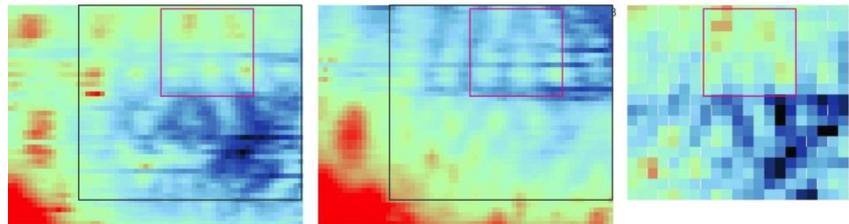


Abb. 25: Rasteraufnahmen der lokalen Gruppe um M81 um die H1-Linie

Rahmen markierte Fläche mit einer geringeren Auflösung erneut gemessen (Abb. 25). Die Region von Abb. 23 ist mit einem pinken Rahmen markiert. Wie die Rohdaten (Abb. 26) zeigen, ist hier die Variation noch geringer und entspricht einer maximalen Signaländerung von 0,14 dBm. In der linken unteren Region heben sich deutlich großräumige Wasserstoffkonzentrationen unserer Milchstraße ab, bei allen Aufnahmen treten aber auch wiederkehrende Muster auf. Ohne die Aufnahme von Spektren für diese Rasterpunkte kann aber nicht entschieden werden, ob diese von lokalen Wasserstoffwolken oder weiter entfernten Galaxien stammen.

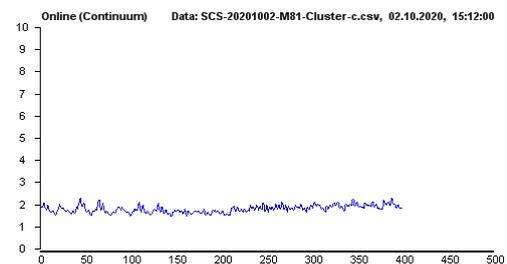


Abb. 26: Rohdaten zu Abb. 25 (rechtes Raster)

## 7.2 Spektrum einer schwachen Quelle

Versuchsweise wurde für eine Position in einem Bereich des pinken Rahmens ein Spektrum aufgenommen, in dem die beiden Galaxien M81 und M82 liegen. Mit einer Entfernung von ca. 12 MLj sind sie fast fünfmal so weit entfernt wie M31.

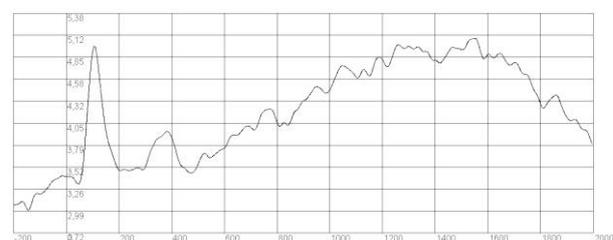


Abb. 27: Spektrum im Bereich der lokalen Gruppe um M81

Das Spektrum (Abb. 27) ist relativ zur H1-Linie von

Wasserstoff deutlich blauverschoben und ähnelt in seinem Verlauf dem des Andromeda-Nebels M31 [1, S. 10, Abb. 11]. Da in diesem Bereich mehrere Galaxien sehr eng benachbart sind (s.a. Abb. 22), ist davon auszugehen, dass die Messung eine Vermischung mehrerer Einzelspektren darstellt.

Bezogen auf einen Messwert von 3,79 SKT für das Rauschen erstreckt sich das Spektrum auf ein Intervall von ca. 600 kHz bis 2000 kHz. Dabei zeigt es eine leichte Asymmetrie, da das Maximum bei 1550 kHz liegt, die Intervallmitte jedoch bei 1300 kHz. Die Faustformel, um die Relativgeschwindigkeit zweier Objekte aus ihrer Dopplerverschiebung zu ermitteln, lautet:

$$\Delta v = \Delta f \cdot 0,211 m \quad (5) \quad [2, S. 3]$$

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Erde und gemessener Quelle bei der Intervallmitte beträgt also

$$\Delta v = 1300 \cdot 10^3 \frac{1}{s} \cdot 0,211 m = 274 \frac{km}{s}$$

In der Literatur [4, S. 713, Table 1] wird für das Zentrum von M82 ein Wert von  $240 \frac{km}{s}$  angegeben, dort wird aber auch erwähnt, dass es in deren Wasserstoffwolken starke Turbulenzen gibt [4, S. 709], die im Verlauf des Graphen als kleine Peaks zu erkennen sind. In der Literatur findet man für M31 im Radiobereich eine Leistungsflussdichte von 7,5 Jy [5, S. 17], für M81 werden 0,1 Jy [6, Tab. 7] und für M82 1,3 Jy [7] angegeben. Damit müsste die gemessene Leistung im Vergleich zu M31 deutlich geringer sein, was jedoch nicht der Fall ist. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass aufgrund des vergleichsweise großen Beam-Angle noch weitere Galaxien bei der Messung mit erfasst wurden. Wenn auch die Messempfindlichkeit als solche noch hinreichend für derartige Objekte ist, verhindert die begrenzte Winkelauflösung des Teleskops genauere Analysen.

## 8 Planung künftiger Messkampagnen

Die bisherigen Messkampagnen und ihre jeweiligen Ergebnisse bieten zahlreiche Anknüpfungspunkte für die Planung und Umsetzung neuer Projekte. Sie haben aber auch die Grenzen der bisher verwendeten Messtechnik erkennen lassen. Durch das Aufzeigen dieser Grenzen konnte ein zunehmend verlässlicher Rahmen an Möglichkeiten abgesteckt werden, was mit der aktuell vorhandenen Technik erreicht werden kann und welche Erweiterungen sinnvoll wären.

### 8.1 Derzeitiger Stand der Technik

In der derzeitigen Ausstattung beschränken sich die Fragestellungen im Wesentlichen auf Signale in der unmittelbaren Umgebung der H1-Linie von Wasserstoff. Mit Breitbandmessungen kann dabei die großräumige Verteilung von Wasserstoff in unserer Milchstraße untersucht werden. Durch die Aufnahme von Spektren sind Aussagen über Dopplerverschiebungen in deren Spiralarmen möglich. Außerdem lassen sich Untersuchungen an der Sonne und am Mond durchführen.

Für großräumige Messungen bietet sich die Aufnahme von Rastern an, wobei aus Zeitgründen in der Regel Breitbandmessungen durchgeführt werden. Für die Aufnahme von Spektren ist es dagegen erforderlich, den Reflektor auf die Quellposition auszurichten und nachzuführen. Alternativ ist es möglich, den Reflektor auf eine fixe Position einzustellen und die Eigenbewegung des Himmels zu verwenden, um die Passage von Objekten zu untersuchen. Letzteres ist bei unserem Teleskop auch durch die Durchführung von Line-Scans möglich.

Der aktuell eingebaute Empfangsdipol ist zwar ebenfalls auf die H1-Linie optimiert, kann aber auch in einem größeren Frequenzintervall eingesetzt werden. In diesem Fall können nur noch der FunCube und der Spectran als Messgerät verwendet werden, da sie einen erheblich größeren Frequenzbereich als der Spectra-Cyber abdecken. Ihr schlechteres Rauschverhalten kann durch entsprechend höhere Integrationszeiten weitgehend ausgeglichen werden.

## 8.2 Erweiterung der technischen Möglichkeiten

Eine Änderung des Empfangsdipols eröffnet die Möglichkeit, auch andere Frequenzbereiche untersuchen zu können. Zum einen können damit auch eventuell thermische Quellen nachgewiesen werden, zum anderen sind gerade im 12 GHz-Bereich Untersuchungen von geostationären Satelliten möglich. In diesen Fällen können nur noch FunCube und Spectran sinnvoll eingesetzt werden. Für bestimmte Frequenzbereiche kommen aber auch SAT-Finder oder DVBT-Empfänger in Frage.

In der derzeitigen Konfiguration unterstützt die Steuersoftware nur die Verwendung eines einzelnen der oben genannten Messgeräte. Um synchrone Messungen mit mehreren Messgeräten durchführen zu können, muss einerseits die Software entsprechend ergänzt und andererseits eine Aufteilung des Signalweges auf mehrere Empfänger konstruiert werden.

Aktuell werden im eingebauten Kreuzdipol die beiden Polarisationsrichtungen summiert, sodass die Polarisation eines Signals keine Rolle spielt. Ersetzt man das Summierglied durch einen steuerbaren HF-Switch und ergänzt die Software entsprechend, können auch Polarisationsmessungen durchgeführt werden.

## 9 Fazit

Bei der ursprünglichen Planung des Radioteleskops wurde davon ausgegangen, dass es nur knapp hinreichend für die Untersuchung des Dopplereffektes von Wasserstoffkonzentrationen in unserer Milchstraße geeignet ist. Dieses Ziel wurde bereits kurz nach der ersten Inbetriebnahme erreicht. Die Messkampagnen der folgenden Jahre haben gezeigt, dass auch weitere interessante Untersuchungen damit durchgeführt werden können. So wurden unter anderem die Wasserstoffverteilung in unserer Milchstraße kartiert und Messungen an der Sonne und dem Mond durchgeführt. Selbst ferne Galaxien wie zum Beispiel der Andromeda-Nebel konnten nachgewiesen werden, wobei deutlich wurde, dass hierbei die Empfindlichkeitsgrenze der aktuell verwendeten Technik erreicht ist.

Während meiner vergangenen Projekte habe ich vieles über die Radioastronomie und den Umgang mit Versuchsdaten gelernt. Um einzelne Aspekte besser nachvollziehen zu können, musste ich wiederholt Quellen konsultieren und meine eigenen Erkenntnisse anschließend detailliert und nachvollziehbar dokumentieren. Der eigentliche Wert dieses durchaus aufwändigen Prozesses wurde mir klar, als ich auch vorausgegangene Jugend-forscht-Arbeiten als Informationsquelle heranziehen konnte. Das macht deutlich, wie hilfreich die solide Dokumentation eines Forschungsprojektes für nachfolgende Forscher ist.

## 10 Danksagung

Ein Jugend-forscht-Projekt ist immer mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Dies gilt umso mehr, wenn es zur Zeit einer globalen Pandemie angefertigt wird. Ich bin deshalb sehr dankbar dafür, dass das Christian-Gymnasium es mir dennoch ermöglicht hat, unter Einhaltung der geltenden Hygieneregeln das schuleigene Radioteleskop zu benutzen.

Mein Dank gilt außerdem Carl Lyster, dem Konstrukteur des Spectra-Cyber, dessen Tipps quer über den Atlantik uns geholfen haben, die Resonanz-Peaks zu eliminieren.

Ich möchte mich auch bei Susanne Biedermann dafür bedanken, dass sie mir mit leckeren Nudelaufläufen und heißem Tee die für die Forschung notwendige Energie zugeführt hat.

Vor allem aber gilt mein Dank Thomas Biedermann, der mir in den letzten vier Jahren mit unermüdlichem Enthusiasmus nicht nur Antworten auf alle fachlichen, sondern auch weltlichen Fragen geben konnte.

## 11 Quellen

- [1] Philip Pohl, Messung schwacher Radioquellen im L-Band mit einem Radioteleskop, Jugend-forscht-Projekt 2020,  
<http://www.jufo-hermannsburg.de/pdfs/2020-quellen.pdf>  
letzter Zugriff: 12.12.2020
- [2] Philip Pohl, Untersuchung des Dopplereffektes der Wasserstoff-H1-Linie in der Milchstraße, Jugend-forscht-Projekt 2019  
<http://www.jufo-hermannsburg.de/pdfs/2019-h1-linie.pdf>  
letzter Zugriff: 12.12.2020
- [3] Tim Rambousky, Fabian Jablonski, Bau und Untersuchung von Dipol-Antennen im GHz-Bereich  
Jugend-forscht-Projekt 2013,  
<http://www.jufo-hermannsburg.de/pdfs/2013-dipole.pdf>  
letzter Zugriff: 12.12.2020
- [4] Solinger, A., Morrison, P., & Markert, T., "M82 sans explosion - A galaxy drifts through dust",  
Astrophysical Journal, Part 1, vol. 211, Feb. 1, 1977, p. 707-717  
<http://adsabs.harvard.edu/full/1977ApJ...211..707S>  
letzter Zugriff: 12.12.2020
- [5] Planck Collaboration: Astronomy & Astrophysics manuscript no. m31 arxiv, February 26, 2018:  
<https://arxiv.org/pdf/1407.5452.pdf>  
letzter Zugriff: 12.12.2020
- [6] Sera Markoff e.a.: The Astrophysical Journal 681 (2008) 905, The American Astronomical Society:  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/588718/fulltext/>  
letzter Zugriff: 12.12.2020
- [7] NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE, M82,  
Table "QUICK-LOOK PHOTOMETRY and LUMINOSITIES for MESSIER 082"  
<http://ned.ipac.caltech.edu>  
letzter Zugriff: 12.12.2020

Alle Abbildungen (Fotos, Grafiken) wurden selbst erstellt.