

# Messung schwacher Radioquellen im L-Band mit einem Radioteleskop



*Das Bild zeigt das Radioteleskop des Christian-Gymnasiums mit dem Großen Wagen am Nachthimmel*

**Philip Pohl (17)**

**Christian-Gymnasium Hermannsburg**

**Wettbewerb „Jugend forscht“ 2020**

Betreuung: StD i.R. Thomas Biedermann

# Inhalt

1	Zielsetzung.....	2
2	Theoretische Grundlagen .....	2
2.1	Strahlungseinwirkung von Sonne und Erde auf den Mond.....	2
2.2	Das Stefan-Boltzmann-Gesetz für thermische Strahler.....	3
2.3	Wiensches Verschiebungsgesetz und Plancksche Strahlungsformel .....	4
2.4	Leistungsbilanz von Sonne, Mond und Erde .....	5
2.5	Empfindlichkeitsverteilung der Empfangskeule.....	5
3	Objektunterscheidung.....	7
3.1	Überlagerung der Strahlung von mehreren Objekten .....	7
3.2	Identifikation von einzelnen Objekten .....	8
4	Untersuchte Quellen .....	8
4.1	Die Galaxien M31 und M33.....	8
4.2	Der Mond als schwache Quelle .....	11
4.3	Einfluss von Wolken bei schwachen Quellen .....	13
5	Verwendete Simulations-Software .....	13
5.1	Untersuchung der Empfangskeule .....	13
5.2	Überlagerung von Quellen .....	14
6	Fazit .....	15
7	Danksagung .....	15
8	Quellen .....	16

# 1 Zielsetzung

Im vergangenen Jahr wurden mit dem Radioteleskop des Christian-Gymnasiums vor allem Messungen zur Wasserstoffverteilung in unserer Heimatgalaxie vorgenommen. Dabei wurde unter anderem versuchsweise auch die Andromeda-Galaxie gemessen. Die Messdaten warfen die Frage auf, wo die Grenzen der Messempfindlichkeit unseres Radioteleskops und der verwendeten Messgeräte liegen.

Daraufhin wurde eine Messkampagne entwickelt, die sich insbesondere mit schwachen Quellen im Bereich der H1-Linie des Wasserstoffs bei einer Frequenz von 1420,405 MHz beschäftigt. In ihrem Rahmen wurden weitere Galaxien sowie der Mond als Zielobjekte ausgewählt. Darüber hinaus wird der Frage nachgegangen, wie sich die Messdaten der Zielobjekte von der unvermeidlichen Hintergrundstrahlung unserer eigenen Galaxie trennen lassen.

Während sich bei Galaxien der lokalen Gruppe grundsätzlich die gleichen physikalischen Prinzipien wie bei unserer Heimatgalaxie anwenden lassen, stellt sich die Situation für den Mond gänzlich anders dar, da bei ihm völlig andere Mechanismen für die Entstehung der H1-Emissionen verantwortlich sind. Da wir derzeit nur über ein Messgerät für die H1-Linie verfügen, muss unter anderem ein Schwerpunkt darauf gelegt werden, sich bei allen theoretischen Überlegungen auf diese Frequenz zu beschränken.

Außerdem muss genauer untersucht werden, welche Auswirkungen die Richtcharakteristik des verwendeten Reflektors auf die Messergebnisse hat. Dazu werden verschiedene Messmethoden verwendet und miteinander verglichen.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Strahlungseinwirkung von Sonne und Erde auf den Mond

In einer sehr starken Vereinfachung wird im Optik-Unterricht der Sekundarstufe zwischen selbstleuchtenden und nicht selbstleuchtenden Körpern unterschieden. Erstere senden Licht aus, Letztere streuen oder reflektieren das auftreffende Licht. Diese Unterscheidung ist geeignet, um z.B. die Mondphasen oder den Unterschied zwischen Tag und Nacht auf der Erde zu beschreiben. Tatsächlich ist es aber so, dass jeder Körper Licht aussendet, das von jedem anderen Körper reflektiert, gestreut oder absorbiert werden kann. Die Gründe dafür werden im nächsten Kapitel näher erläutert.

Die Intensität der Strahlung, die ein Körper von einem anderen empfängt, hängt vom Abstand der beiden Körper ab. Je größer dieser ist, desto geringer ist die dabei übermittelte Energie. Für kugelförmig abstrahlende Körper gilt ein quadratisches Abstandsgesetz (s. Abb. 1).

Wenn z.B. an der Oberfläche der Sonne die Fläche  $A_1$  eine bestimmte Energie aussendet, so beschreibt diese einen bestimmten Anteil der Gesamtoberfläche der Sonne. An einem weiter entfernten Körper wie der Erde hat sich diese Energie auf die Fläche  $A_2$  verteilt. Betrachtet man dort wieder eine Fläche von derselben Größe wie  $A_1$ , ist die

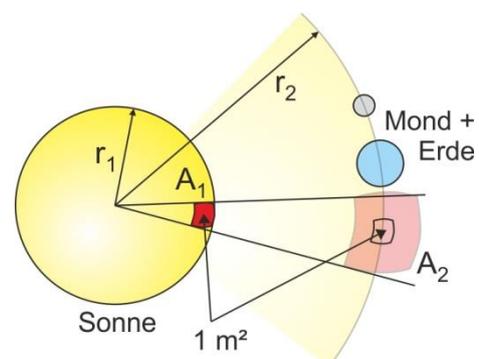


Abb. 1: Erläuterung zum Abstandsgesetz

davon aufgenommene Energie um das Quadrat des Verhältnisses der beiden Abstände  $r_1$  und  $r_2$  kleiner. Ist  $P_1$  die von  $A_1$  ausgestrahlte Energie, so erhält man für die Energie an  $P_2$ :

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

Bei mehr als zwei Körpern sind unterschiedliche Energieanteile zu berücksichtigen (s. Abb. 2). Sonne, Erde und Mond emittieren Strahlung (gelb, blau, grau), die von den jeweils anderen Himmelskörpern aufgenommen wird. Dabei sind auch Sekundäreffekte zu beachten, denn z.B. die von der Sonne auf den Mond treffende Strahlung trägt auch zu einem gewissen Teil zu der Strahlung bei, die auf die Erde trifft (oranger Pfeil). Alle diese Anteile unterliegen dem Abstandsgesetz.

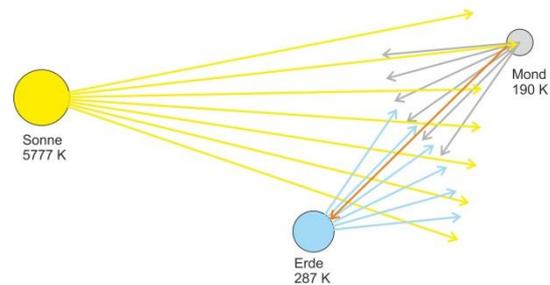


Abb. 2: Strahlungsaustausch bei mehreren Körpern

## 2.2 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz für thermische Strahler

Dieses Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung ein Körper bei einer bestimmten Temperatur hat. Diese Leistung ist proportional zur Oberfläche  $A$  und zur vierten Potenz der Temperatur, es gilt:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Darin ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante mit dem Wert  $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ . [1]

Bei der Sonne handelt es sich in erster Näherung um eine Kugel mit dem Durchmesser

$$d = 1,393 \cdot 10^9 m$$

Für die Oberfläche erhält man daraus

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 6,093 \cdot 10^{18} m^2$$

Bei einer Oberflächentemperatur von  $T = 5777 K$  erhält man daraus eine Gesamtstrahlungsleistung

$$P_{ges} = 3,848 \cdot 10^{26} W$$

Auf der Sonnenoberfläche ergibt sich für einen Quadratmeter somit eine Leistung pro Fläche von

$$\frac{P}{A_{sol}} = 6,315 \cdot 10^7 \frac{W}{m^2} = 63,2 \frac{MW}{m^2}$$

Die Strahlung wird vereinfacht radial von der Oberfläche abgestrahlt, damit nimmt die Leistung pro Fläche nach dem Abstandsgesetz quadratisch ab. Auf der Erdbahn mit dem Radius

$$r_T = 1,496 \cdot 10^{11} m$$

ergibt sich somit noch eine Leistung pro Fläche von

$$\frac{P}{A_T} = 1368,1 \frac{W}{m^2}$$

diese wird auch als Solarkonstante bezeichnet.

Die Oberflächenleistung für Erde und Mond kann entsprechend berechnet werden. Tab. 1 enthält die Werte für Sonne, Erde und Mond.

Körper	T	d	$P_{ges}$	$P_{1m^2}$
Sonne	5777	$1,393 \cdot 10^9$	$3,848 \cdot 10^{26}$	$6,315 \cdot 10^7$
Erde	287	$1,273 \cdot 10^7$	$1,958 \cdot 10^{17}$	385
Mond	190	$3,476 \cdot 10^6$	$2,805 \cdot 10^{15}$	73,9
	K	m	W	W

Tab. 1: Strahlungsleistung von Sonne, Erde und Mond

Da der Mond angenähert gleich weit von der Sonne entfernt ist, erhält er von der Sonne die gleiche Leistung pro Fläche wie die Erde. Hinzu kommt die entsprechende Strahlung von der Erde, die jedoch nur  $0,105 \text{ W/m}^2$  beträgt und im Vergleich zur Solarkonstante von  $1368 \text{ W/m}^2$  vernachlässigt werden kann. Die Strahlungsleistung des Mondes auf der Erdoberfläche beträgt nur noch  $0,00151 \text{ W/m}^2$  und kann im Vergleich zur Sonne ebenfalls vernachlässigt werden. Der Anteil der von der Erde auf dem Mond eintreffenden Leistung von  $0,105 \text{ W/m}^2$  ist ebenfalls gering gegenüber der Leistung pro Fläche auf der Mondoberfläche von  $73,9 \text{ W/m}^2$  und liegt weit unter der Solarkonstanten.

## 2.3 Wiensches Verschiebungsgesetz und Plancksche Strahlungsformel

Die Strahlung eines heißen Körpers besteht aus elektromagnetischen Wellen verschiedenster Wellenlängen. Um die Verteilung der einzelnen Wellenlängen zu erhalten, wird ein Spektrum aufgenommen. Dieses zeigt ab einer minimalen Wellenlänge einen steilen Anstieg bis zu einem Maximum und fällt anschließend asymptotisch wieder ab. Abb. 3 zeigt den typischen Verlauf für 4 Körper mit unterschiedlichen Temperaturen. Hierbei fällt auf, dass das Maximum der Kurven sich mit zunehmender Temperatur nach links (hin zu kürzeren Wellenlängen, rote Linie) verschiebt und seine Intensität gleichzeitig stark ansteigt.

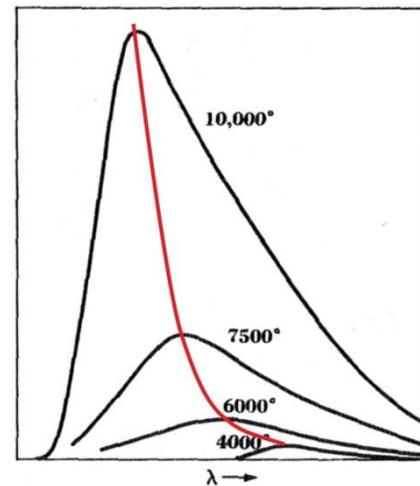


Abb. 3: Spektren bei verschiedenen Temperaturen [3, 3-20, überarbeitet]

Die Wellenlänge des jeweiligen Maximums wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben [2], danach gilt:

$$\lambda_{max} = 2897,8 \frac{\mu\text{m K}}{T}$$

Für die Sonne erhält man daraus das Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge

$$\lambda_{max} = 2897,8 \frac{\mu\text{m K}}{5777 \text{ K}} = 502 \text{ nm} \quad (\text{grün})$$

Für die Erde erhält man analog einen Wert von  $10 \mu\text{m}$  (fernes Infrarot).

Der Verlauf des Spektrums wird durch die Plancksche Strahlungsformel beschrieben [2]. Danach beträgt die Leistung eines thermischen Strahlers bei einer bestimmten Wellenlänge

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Für die Einheit vom M gilt:

$$[M(\lambda, T)] = 1 \frac{\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{\text{m}^5} = 1 \frac{\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{m}^5} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} \frac{1}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

## 2.4 Leistungsbilanz von Sonne, Mond und Erde

Mit dieser Formel ist es möglich, die Leistung bei einer bestimmten Wellenlänge zu berechnen. Da das verwendete Messgerät für eine Wellenlänge von 21 cm ausgelegt ist (H1-Linie), müssen zum Vergleich der Strahlungsanteile die spektralen Leistungen von Sonne, Erde und Mond bei dieser Wellenlänge bestimmt werden.

Durch Einsetzen der Zahlenwerte erhält man für die Sonne

$$M(0,21m, 5777K) = 7,72 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2}$$

und für den Mond

$$M(0,21m, 190K) = 2,54 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2}$$

Damit beträgt die Strahlungsleistung der Sonne bei dieser Wellenlänge nur noch das 30-fache im Vergleich zum Mond. Berücksichtigt man nun noch den Abstand zwischen Sonne und Mond, liegt die Strahlungsleistung der Sonne auf der Mondoberfläche bei  $1,67 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  und beträgt somit nur noch 0,066 % der Eigenstrahlung des Mondes. Dies entspricht einer Signaldifferenz von knapp -32 dB. Wenn auch im Bereich des sichtbaren Lichtes ein großer Unterschied in der Helligkeit des Mondes zwischen Voll- und Neumond zu beobachten ist, tritt dieser Effekt bei einer Wellenlänge von 21 cm praktisch nicht auf.

Da die beobachtete Mondoberfläche unabhängig von der Mondphase immer der Erde zugewandt ist, steuert auch die Erde einen gewissen Anteil im Bereich der 21 cm Linie bei. Die Leistung bei dieser Wellenlänge beträgt für die Erde

$$M_T = M(0,21m, 287K) = 3,84 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2}$$

Nach Anwendung des Abstandsgesetzes erhält man daraus auf der Mondoberfläche

$$M_{T,L} = M_T \cdot \left(\frac{r_T}{d_{T,L}}\right)^2 = 1,04 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

Dieser Wert ist geringer als der Strahlungsanteil der Sonne und macht lediglich 0,041 % der Eigenleistung des Mondes aus.

Das bedeutet, dass sowohl die Strahlung der Sonne als auch die Strahlung der Erde um mehr als 32 dB unter der Eigenstrahlung des Mondes bei dieser Wellenlänge liegen. Folglich werden diese Anteile bei der gegebenen Messgenauigkeit nicht nachweisbar sein. Deshalb ist - anders als im Bereich des sichtbaren Lichtes - das Strahlungsspektrum des Mondes in der Umgebung der H1-Linie unabhängig von der Mondphase.

## 2.5 Empfindlichkeitsverteilung der Empfangskeule

Parabolspiegel haben die Eigenschaft, dass parallel zur optischen Achse einfallende Wellen phasengleich auf einen bestimmten Punkt (Brennpunkt) reflektiert werden. In Abb. 4 kennzeichnen die roten Punkte phasengleiche Quellen (diese können auch im Unendlichen liegen), die blauen Punkte markieren den Auftreffort auf dem Parabolreflektor. Die grauen Linien zeigen den Weg der Wellenfronten von der Quelle über den Spiegel zum Brennpunkt.

Eine am Rande des Reflektors eintreffende Welle legt den Weg  $Q_1R_1$  zurück, dieser ist um einen bestimmten Betrag kleiner als der Weg  $Q_2R_2$  einer zentraler eintreffenden. Nach der Reflektion legt die erste Welle den Weg  $R_1F$  zurück, während die zweite Welle den Weg  $R_2F$  durchläuft. Das Besondere am Parabolspiegel ist, dass die Wegunterschiede sich gegenseitig aufheben und somit keine Phasenverschiebung auftritt. Damit können alle Wellen konstruktiv miteinander interferieren und am Ort des Empfängers  $F$  wird eine maximale Intensität gemessen.

Bei Signalen von einer Quelle, die nicht auf der optischen Achse liegen, verändern sich die Weglängen: Die Strecken  $R_1F$  und  $R_2F$  bleiben gleich, dafür ergeben sich Weglängenunterschiede für  $Q_1R_1$  und  $Q_2R_2$ . Diese führen zu einer Phasenverschiebung, was eine destruktive Interferenz und damit eine geringere Intensität am Punkt  $F$  zur Folge hat.

Die grünen Linien in den Abb. 4 und 5 markieren die sogenannte Empfangskeule. Diese gibt an, wie hoch die Empfindlichkeit des Systems ist, wenn die Quelle unter einem bestimmten Einfallswinkel beobachtet wird. In Abb. 4 ist die Empfindlichkeit maximal, fällt bei zunehmenden Winkeln ab und steigt bei weiteren Winkeln geringfügig wieder an (sogenannte Nebenkeule wie in Abb. 5). Als Beam-Angle bezeichnet man den Winkel, bei dem die Empfindlichkeit um max. 3 dB (Halbwertshöhe) abnimmt.

Abb. 6 zeigt die Richtwirkung des Reflektors für einen Winkelbereich von  $\pm 45^\circ$  um die optische Achse. Deutlich erkennt man die Hauptkeule und die ersten beiden Nebenkeulen. Die graue horizontale Linie kennzeichnet bei der Halbwertsbreite (HWB) den Beam-Angle. [4]

Der Beam-Angle kennzeichnet das Auflösungsvermögen eines Teleskops: Alle Objekte, die innerhalb dieses Winkels liegen, werden gleichzeitig gemessen, sodass sich ihre Signale überlagern. Nach der empirischen Formel

$$\alpha = 1,2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

erhält man den Beam-Angle  $\alpha$  in Grad, wobei  $\lambda$  die Wellenlänge und  $d$  der Durchmesser des Reflektors ist.

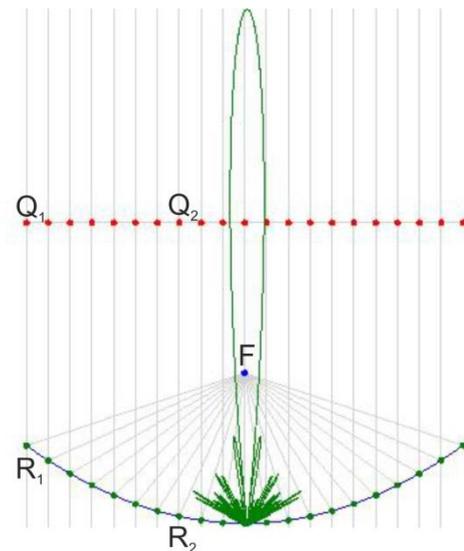


Abb. 4: Strahlengang am Reflektor [4]

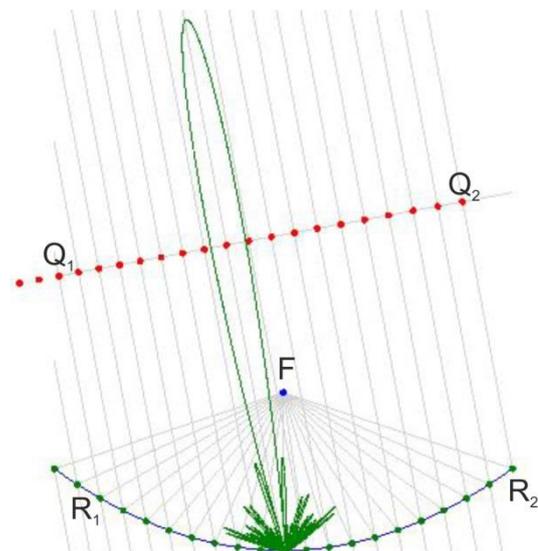


Abb. 5: Strahlengang bei anderem Einfallswinkel

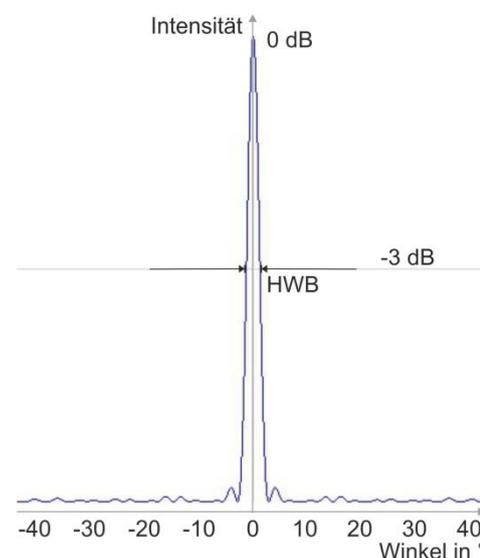


Abb. 6: Richt-Empfindlichkeit des Parabolreflektors

Für unseren Reflektor erhält man bei der Wasserstoff-Linie von 21 cm einen Beam-Angle von  $3,8^\circ$ .

Die Phasendifferenz bei einem bestimmten Weglängenunterschied wird umso größer, je kleiner die Wellenlänge ist, deshalb nimmt der Beam-Angle mit kürzeren Wellenlängen ab. Damit steigt das Auflösungsvermögen des Teleskops, wenn man zu kürzeren Wellenlängen übergeht. Dieses Ziel kann man auch erreichen, indem man den Durchmesser des Reflektors vergrößert.

## 3 Objektunterscheidung

### 3.1 Überlagerung der Strahlung von mehreren Objekten

Werden Objekte gemessen, die kleiner sind als der Beam-Angle, erhält man Strahlungsanteile des Objektes und zusätzlich aus dessen Umgebung. Beim Messen derartiger Quellen erweist sich die Strahlung aus dem näheren Umfeld als signifikanter Störfaktor. Handelt es sich um eine sich bewegende Quelle (wie z.B. Sonne oder Mond), lässt sich dieses Problem recht leicht beheben. Bei fixen Objekten dagegen (wie z.B. Galaxienwolken oder andere Galaxien) entfällt diese Möglichkeit, deshalb müssen andere Verfahren gefunden werden, die eine Unterscheidung ermöglichen.

Abb. 7 zeigt das Problem in einer stark vereinfachten Version, dabei wird von einem gleichmäßigen Hintergrund ausgegangen, in dessen Mitte sich das kleinere Zielobjekt befindet. Dieses ist in der linken Abbildung durch ein Kreuz markiert. Da die Intensitätskurve des Beam-Angles von innen nach außen abnimmt, ist der Strahlungsanteil am Rand (symbolisiert durch den Grauwert) geringer als in der Mitte. Die mittlere Abbildung zeigt diesen Hintergrund, das rechte Bild die eigentliche Quelle.

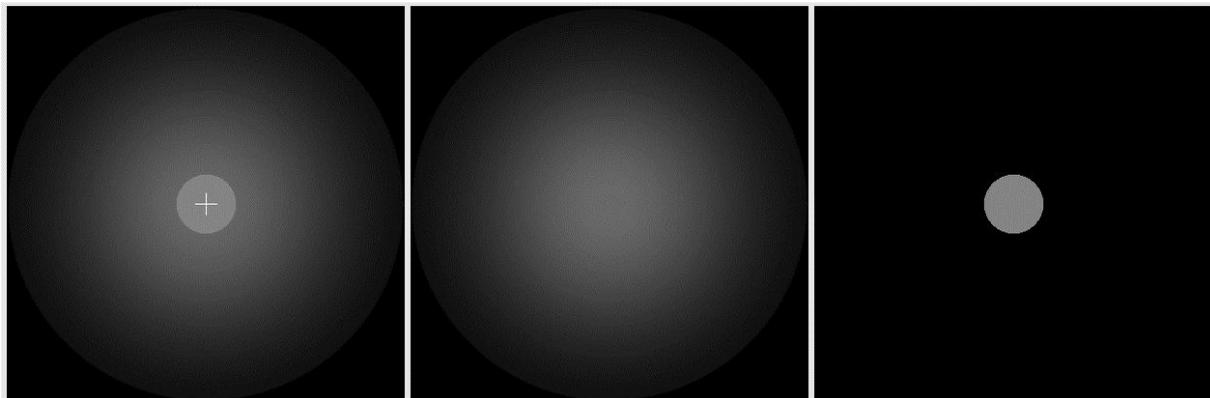


Abb. 7: links: Überlagerung mehrerer Quellen, mitte: Hintergrundquelle, rechts: Hauptquelle [5]

Das vom Teleskop gemessene Signal ist die Summe aller Strahlungsanteile innerhalb des Beam-Angles. Im Falle von nicht ortsfesten Objekten wird nach einer Messung mit dem Zielobjekt im Fokus eine virtuelle fixe Quelle an der Position der Zielquelle erstellt. Diese virtuelle Quelle markiert nun den Hintergrund zum Messzeitpunkt. Nach einigen Tagen hat sich die Quelle von ihrem ursprünglichen Ort vor dem Hintergrund entfernt, woraufhin nun dessen Strahlung mit identischen Messeinstellungen gemessen werden kann, sodass man nur die isolierte Hintergrundstrahlung erhält. Subtrahiert man nun diesen Hintergrund von der Messung mit dem Zielobjekt, erhält man genauere Daten als mit nur einer Messung.

## 3.2 Identifikation von einzelnen Objekten

Um fixe Quellen von ihrem Hintergrund zu trennen, werden deutlich mehr Einzelmessungen benötigt. Dazu definiert man ein rechteckiges Messraster mit der Zielquelle im Mittelpunkt und einer Schrittweite, die signifikant kleiner ist als der Beam-Angle. Das Raster muss so groß gewählt werden, dass die Quelle an seinem Rand nicht mehr erfasst wird.

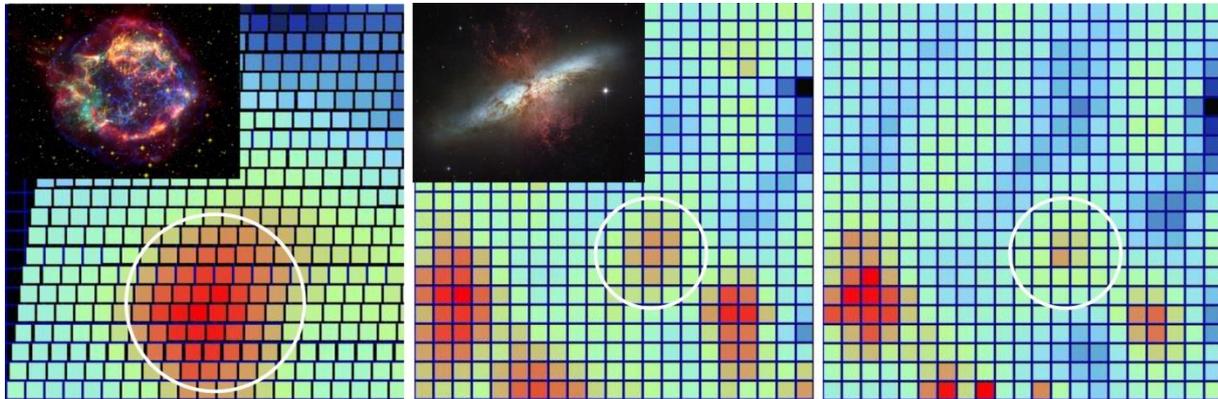


Abb. 8: links: Cassiopeia A (Supernova-Überrest,  $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ ), mitte und rechts: M82 ("Zigarrengalaxie",  $\Delta\alpha = 1^\circ$ ), eingeklinkt jeweils die optischen Aufnahmen [6], [7]

Abb. 8 zeigt drei Beispiele solcher Messungen mit verschiedener Rasterauflösung. Das Schrägraster links entsteht dadurch, dass die Rastermitte während der Messung der aktuellen Zielposition nachgeführt wurde, während bei den beiden anderen Messungen lediglich Azimut und Elevation geändert wurden und die Quelle sich deshalb mit der Drehung des Himmels aus der Mitte herausbewegt hat. Bezogen auf den Beam-Angle handelt es sich bei beiden Quellen nahezu um Punktquellen, deren scheinbare Winkelgröße von ca.  $4,5^\circ$  auf das begrenzte Auflösungsvermögen des Teleskops zurückzuführen ist.

Obwohl für die Rasteraufnahmen die Quellregionen jeweils in die Rastermitte gelegt wurden, befinden sie sich in den Aufnahmen seitlich davon. Hierbei handelt sich um einen systematischen Fehler, der auf eine fehlerhafte Kalibrierung des Azimut- und Elevationsantriebs zurückzuführen ist.

## 4 Untersuchte Quellen

### 4.1 Die Galaxien M31 und M33

Um die Empfindlichkeit der Messapparatur auszureizen, bietet es sich an, schwächere Radioquellen zu vermessen, die prinzipiell bekannte Eigenschaften aufweisen. Hierfür eignen sich nicht zu weit entfernte Galaxien, da sie in der Regel einen ähnlichen Aufbau wie unsere Heimatgalaxie haben. Das heißt, dass sie über Wasserstoffwolken verfügen, die Signale im Bereich der H1-Linie liefern und durch ihre Eigenrotation zu Dopplerverschiebungen führen. Außerdem weisen sie eine Geschwindigkeit in Bezug auf unsere Milchstraße auf, die zu einer weiteren Verschiebung des gesamten Spektrums führt.

Da alle Galaxien eine scheinbare Größe haben, die kleiner als unser Beam-Angle ist, kann immer nur das Gesamtspektrum einer solchen Galaxie erfasst werden.



Abb. 9: M31 (Andromeda-Nebel) [8]

Als Zielobjekte wurden die beiden Galaxien M31 (Andromeda-Nebel) und M33 (Dreiecks-Nebel) ausgewählt, da sie beide im optischen Bereich mit bloßem Auge sichtbar sind und nahezu das ganze Jahr über in unseren Breitengraden beobachtet werden können.

Bei M31 (Abb. 9) handelt es sich um eine Galaxie in einer Entfernung von ca. 2,5 Mill. Lj. Sie hat einen Durchmesser von mindestens 140 000 Lj und bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 266 km/s auf unsere Heimatgalaxie zu. Am Himmel erscheint sie als Ellipse mit einer großen Halbachse von ca. 3° und einer kleinen Halbachse von 1°. [9], [10]



Abb. 10: M33 (Dreiecks-Galaxie) [13]

Bei M33 (Abb. 10) handelt es sich um eine Galaxie in einer Entfernung von ca. 3 Mill. Lj. Sie hat einen Durchmesser von etwa 60 000 Lj und bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 300 km/s auf unsere Heimatgalaxie zu. Am Himmel erscheint sie als Ellipse mit einer großen Halbachse von ca. 1° und einer kleinen Halbachse von 0,6°. Sie verfügt über sehr ausgeprägte Wasserstoffregionen und 2005 konnten in ihr sogar Wasserdampf Wolken nachgewiesen werden, die auf eine Rotationsgeschwindigkeit von 106 km/s hinweisen. [11], [12]

Vergleicht man die Gesamtstrahlungsleistungen von M31 und M33 mit der von Cassiopeia A unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Entfernungen, so ist für M31 eine Leistung von ca. 32 % und für M33 von ca. 2,4 % in Relation zu Cassiopeia A zu erwarten. Dies entspricht Signalunterschieden von -4,9 dB bzw. -16 dB. Da M33 im Vergleich zu M31 sehr hohe Wasserstoffkonzentrationen aufweist, dürfte ihr Signalpegel jedoch deutlich höher liegen. [3, 10-4ff]

Quelle	Leistung in W	Entfernung in kpc	Relative Leistung abs.	Relative Leistung in dB
Cass. A	$10^{28}$	3,4	1	0
M31	$10^{32}$	600	0,32	-4,9
M33	$10^{31}$	700	0,024	-16

Tab. 2: Vergleich der Quellenleistungen unter Berücksichtigung ihrer Entfernung

Diese Tabelle zeigt, dass auf jeden Fall die Signalintensität von M31 mit dem zur Verfügung stehenden Messgerät (Spectra-Cyber) gemessen werden kann. Für M33 wird das nur dann der Fall sein, wenn deren Wasserstoffkonzentration, wie in [12] angegeben, deutlich höher ist als bei M31.

Abb. 11 zeigt die Spektren im Bereich der H1-Linie von M31 und M33. Auf der Rechtsachse ist die Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt in kHz und auf der Hochachse die Signalintensität in Skalenteilen aufgetragen. Für die Umrechnung der Skalenteile in das relative Leistungsmaß dB wird eine Kalibrierungsmessreihe verwendet, die bereits vor längerer Zeit mit dem Spectra-Cyber aufgenommen wurde und die aktuellen Einstellungen (HF- und RF-Verstärkung, Wandler-Offset) berücksichtigt. Bei beiden Messungen wurden die gleichen Einstellungen verwendet, der Rauschpegel liegt bei ca. -116 dBm.

Beide Spektren zeigen einen ausgeprägten Peak bei einer Frequenzverschiebung von +78 kHz, dieser ist auf Wasserstoff in unserer Heimatgalaxie zurückzuführen.

Bei M31 erkennt man im Bereich zwischen +500 und +1900 kHz einen breiten Peak mit einem flachen Maximum bei etwa 1270 kHz. Das entspricht einer Relativgeschwindigkeit 268 km/s und stimmt somit gut mit dem Literaturwert überein. Der Abstand der Peak-Ränder zum Zentrum beträgt ca. 700 kHz entsprechend einer maximalen Geschwindigkeit der Wasserstoffwolken von etwa 150 km/s, diese ist um die Hälfte größer als bei unserer Heimatgalaxie (500 kHz bzw. 105 km/s). Der Peak liegt 0,17 dB oberhalb des mittleren Rauschpegels und ist eindeutig zu erkennen.

Bei M33 erkennt man im Bereich zwischen +550 und +1900 kHz ein breites Spektrum mit zwei sich deutlich abzeichnenden Peaks bei +1200 und +1500 kHz. Das Zentrum bei ca. +1350 kHz entspricht einer Relativgeschwindigkeit von 285 km/s und liegt damit noch recht nahe am Literaturwert von 300 km/s. Da die beiden Spektren eine vergleichbare Breite aufweisen, ergeben sich für die Geschwindigkeit der Wasserstoffwolken die gleichen Verhältnisse wie bei M31. Die in der Mitte erkennbaren einzelnen Peaks sind vermutlich auf stärkere lokale Turbulenzen des Wasserstoffs in M33 zurückzuführen. Das Maximum liegt etwa 0,08 dB über dem mittleren Rauschpegel und ist ebenfalls noch eindeutig zu erkennen.

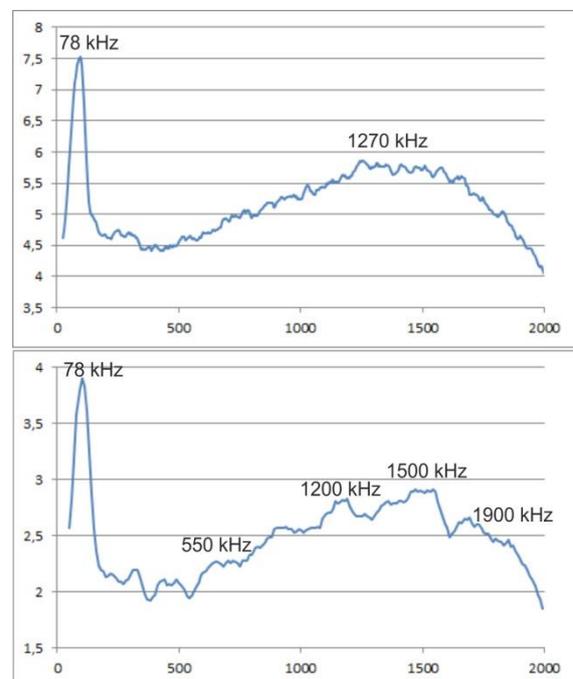


Abb. 11: H1-Spektren von M31 und M33

Zum Vergleich: Bei der Quelle Cassiopeia A SNR liegt das Signal bei einem vergleichbaren Rauschpegel bei 1,41 dB. Diese Messungen zeigen deshalb, dass bei einer Quelle wie M33 in der derzeitigen Konfiguration der Empfangsanlage die Empfindlichkeitsgrenze fast erreicht ist.

## 4.2 Der Mond als schwache Quelle

Bei einer Messung des Mondes im Bereich der H1-Linie können die von der Sonne und der Erde emittierten Strahlungsanteile gegenüber der Eigenstrahlung des Mondes vernachlässigt werden (siehe Kapitel 2.4). Aufgrund seiner relativ geringen Temperatur ist die vom Mond emittierte Strahlung recht leistungsschwach.

Da der Mond überwiegend ein thermischer Strahler ist, wird der Spectra-Cyber im Breitband-Mode betrieben, deshalb sind nachgeführte Messungen hier nicht erforderlich. Stattdessen können entweder Rastermessungen oder als Sonderfall eines Rasters Line-Scans durchgeführt werden. Geht man von einem symmetrischen Abstrahlungsverhalten aus, liefern Line-Scans bereits alle benötigten Informationen und sind dabei deutlich zeitsparender.

Bei einem Line-Scan werden Start- und Endpunkt einer geraden Linie festgelegt, in deren Mitte sich das Objekt befindet. Dazu wird die Azimutrichtung in festgelegten Schritten inkrementiert und die Elevation so nachgeführt, dass der Fokus immer auf der Höhe des Objektes bleibt. Dadurch wird sichergestellt, dass mögliche Asymmetrien des Reflektors keinen Einfluss auf die Messung haben.

In Abb. 12 sieht man ein Beispiel eines solchen Scans für den Mond. Die senkrechten farbigen Linien geben in einer Falschfarbendarstellung die Intensität wieder. Dabei erstreckt sich das Intervall vom kleinsten gemessenen Wert (blau) bis zum Höchstwert (rot). An den mit einem Pfeil

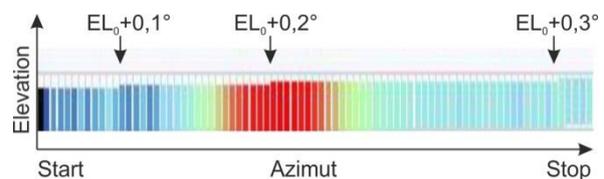


Abb. 12: Beispiel eines Line-Scans mit EL-Nachführung

gekennzeichneten Stellen wurde der Elevationswinkel korrigiert, wobei die Schrittweite von  $0,1^\circ$  der kleinstmögliche Nachführwinkel der Steuerung ist. In Azimutrichtung betragen der Startwinkel  $100^\circ$ , der Stoppwinkel  $120^\circ$  und die Schrittweite  $0,25^\circ$ , sodass insgesamt 81 Messpunkte aufgenommen wurden. Die Aufnahme dieses Scans dauerte insgesamt  $2'40''$ . Der Mond hat sich in dieser Zeit lediglich um  $5,625$  Bogenminuten bzw.  $0,094^\circ$  in azimuthaler Richtung weiterbewegt, das ist nur etwas mehr als ein Drittel der Schrittweite und kann deshalb vernachlässigt werden. Damit kann aus dem Scan die scheinbare Winkelgröße des Mondes bestimmt werden. Der Graphik kann man entnehmen, dass der Mond in 18 Schritten überstrichen wird, was einem Winkel von  $4,5^\circ$  entspricht. Bei einem Beam-Angle von  $3,8^\circ$  und einem scheinbaren Monddurchmesser von  $0,57^\circ$  entspricht dieser Wert den Erwartungen.

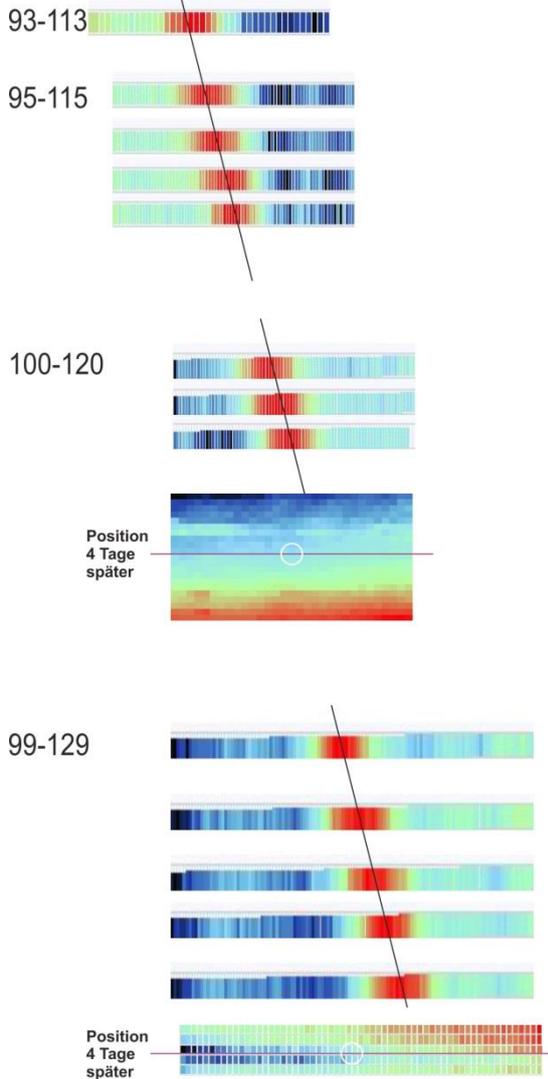
Am 14.10.2019 wurden in der Zeit zwischen 21:24 und 22:44 insgesamt 13 solcher Messungen in drei Gruppen aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 13 zusammengestellt.

Man erkennt deutlich, dass der Mond im Verlauf der Messungen gewandert ist (schwarze schräge Linien). In den Graphiken rechts daneben sind die zugehörigen Intensitätsverläufe abgebildet. Die roten Linien dort zeigen jeweils eine Trendlinie für den Verlauf des Rauschsignals. Es ändert sich innerhalb einer Messgruppe um jeweils etwa  $0,1$  Skt, was bei den aktuellen Einstellungen einem Wert von ca.  $0,02$  dB entspricht. Der Abstand zwischen dem Rauschsignal und dem Peak-Maximum liegt bei allen Messungen zwischen  $0,04$  und  $0,05$  dB. Wie die Graphen aber klar erkennen lassen, sind die Peaks eindeutig zu identifizieren. Außerdem haben alle Peaks nahezu die gleiche Form, was für die Reproduzierbarkeit der Messungen spricht.

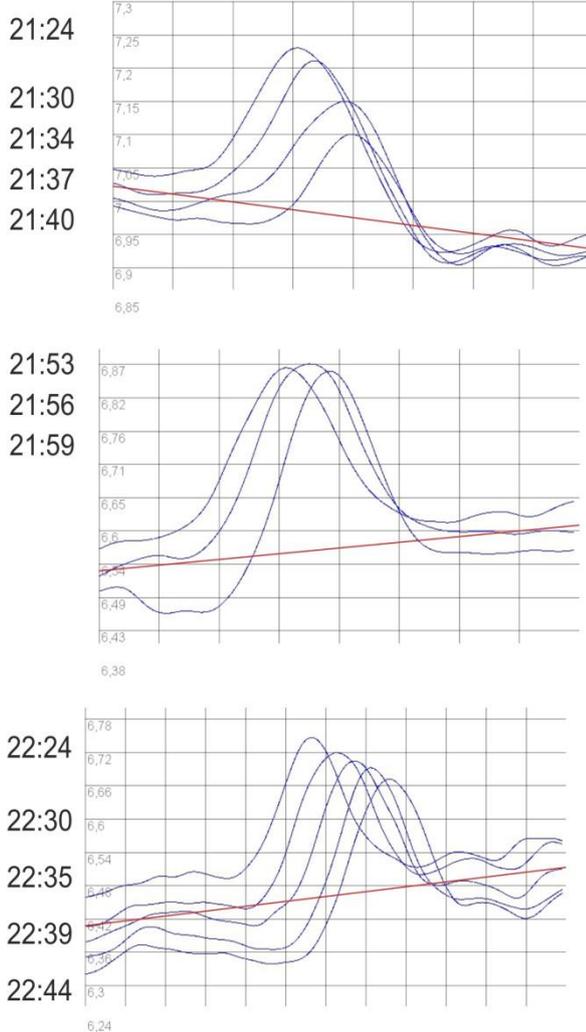
Im Unterschied zu den Messungen an den beiden Galaxien wurde hier der Spectra-Cyber im Continuum-Mode betrieben, der mit einer Bandbreite von  $8$  MHz arbeitet, während er im Spektral-Mode eine Bandbreite von  $15$  kHz verwendet und eine zusätzliche RF-Verstärkung beinhaltet. Das

führt dazu, dass bei diesen Messungen das Rauschsignal bei ca. -102 dBm und damit 14 dB über dem Rauschsignal im Spektral-Mode liegt. Der Signal-Rausch-Abstand liegt mit 0,04 dB aber in der gleichen Größenordnung wie bei der Spektralmessung.

**Azimet:**



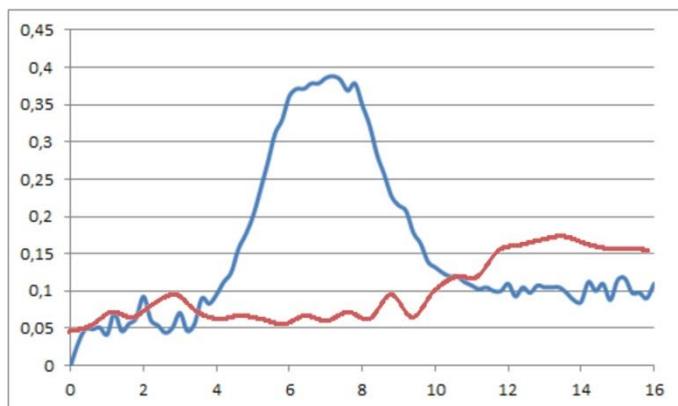
**Zeit (14.10.2019):**



**Abb. 13: Zeitliche Abfolge einer Messreihe für den Mond**

An den Positionen der zweiten und der dritten Messgruppe wurden zusätzlich 4 Tage später Rastermessungen aufgenommen, deren Zentren jeweils so gewählt wurden, dass sie an der Position des Mondes bei der Aufnahme der Line-Scans liegen. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob dort (weißer Kreis) andere Quellen die Messung verfälschen konnten. Wie man der Farbdarstellung entnehmen kann, ist dies nicht der Fall.

Abb. 14 zeigt ein konkretes Beispiel für die Messung des Mondes am 14.10.2019 um 21:56 (blaue Kurve) und vier Tage später an der gleichen Position, wobei der Mond aber weitergewandert ist und



**Abb. 14: Aufnahme der Mondposition ohne / mit Mond**

deshalb nicht mehr bei der Messung erfasst wurde (rote Kurve). In beiden Fällen ist der Pegel am Ende leicht angestiegen, man erkennt aber deutlich den durch den Mond verursachten Peak bei der ersten Messung. In Abb. 14 wurden die Rohdaten verwendet, während in Abb. 13 zur Verminderung des Rauschens die Messdaten nach einem Gauß-Verfahren geglättet wurden.

### 4.3 Einfluss von Wolken bei schwachen Quellen

Am 15.09.2019 wurde eine Messung des Mondes als Durchlauf-Scan durchgeführt, dabei wird der Reflektor fest auf die Position ausgerichtet, die der Mond zu einem bestimmten Zeitpunkt einnehmen wird. Anschließend wird 15 Minuten vor diesem Zeitpunkt eine Messreihe im Continuum-Mode gestartet und 15 Minuten nach diesem Zeitpunkt beendet. Obwohl zu Beginn der Messung der Himmel klar war (gelber Balken), zog nach einigen Minuten eine Wolkenbank auf, die den Mond für den größten Teil der Messung verdeckte (grauer Balken).

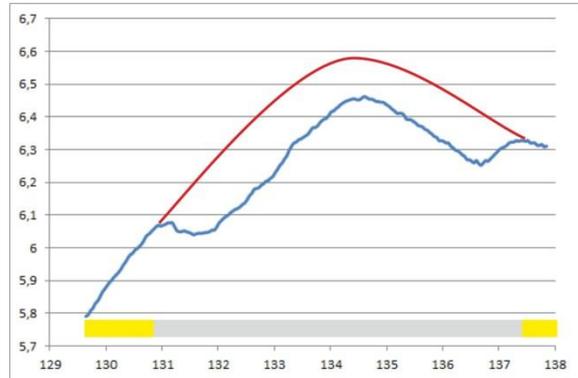


Abb. 15: Bedeckung des Mondes durch Wolken

Obwohl diese Messung deswegen ursprünglich verworfen werden sollte, hat sich im Nachhinein herausgestellt, dass sie geeignet ist, um atmosphärische Einflüsse auf unsere Messungen zu untersuchen. Die in Abb. 15 eingezeichnete rote Kurve ist eine Interpolation des ursprünglich erwarteten und durch andere Messungen bestätigten Verlaufes. Die Differenz zwischen dem blauen Graphen und der Interpolationskurve beträgt konstant ca. 0,13 Skt, bei den verwendeten Einstellungen entspricht das einem Signalunterschied von 0,01 dB. Dies zeigt, dass einerseits eine so geringe Signaländerung noch eindeutig erfasst werden kann, andererseits, anders als oft behauptet, das Auftreten von Wolken den Signalverlauf verfälschen kann und deshalb bei weiteren Messungen dokumentiert und ggf. berücksichtigt werden muss.

## 5 Verwendete Simulations-Software

### 5.1 Untersuchung der Empfangskeule

Um die Richtwirkung des Parabolspiegels besser nachvollziehen zu können, wird die Software „BeamAngle“ verwendet [4]. Abb. 16 zeigt die zugehörige Benutzeroberfläche. Spiegeldurchmesser

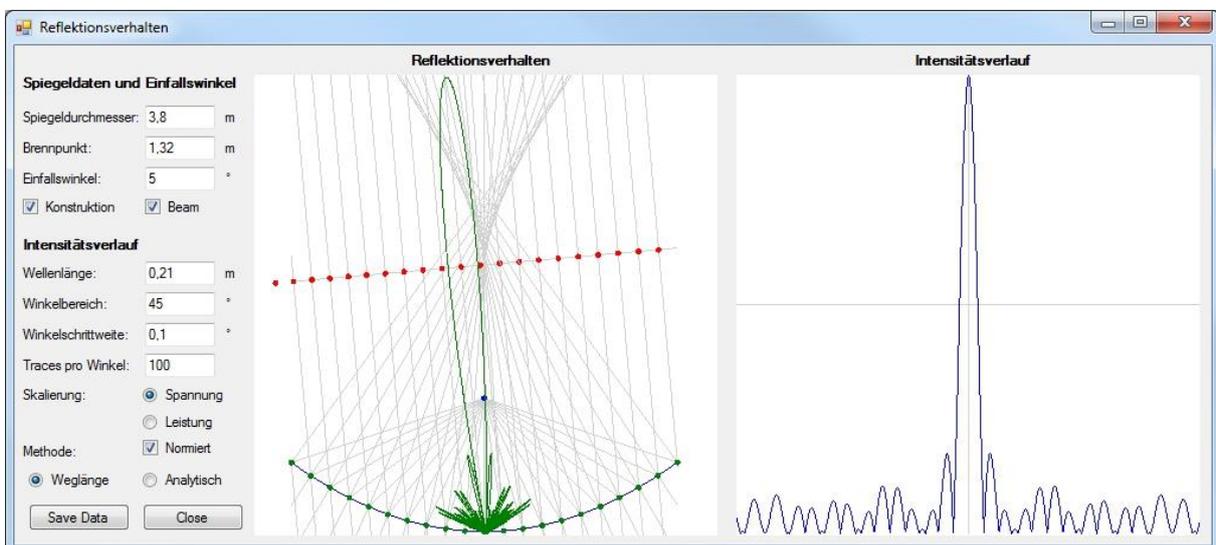


Abb. 16: Benutzeroberfläche der Simulations-Software "BeamAngle"

und Brennpunkt des Reflektors sind frei wählbar, ebenso die Wellenlänge sowie die Orientierung der zu untersuchenden Wellenfronten.

In der Methode „Weglänge“ werden wie in Kapitel 2.5 beschrieben die zurückgelegten Weglängen in Bezug zur Wellenlänge gesetzt, um daraus die Phasenverschiebungen zu bestimmen. In der Methode „Analytisch“ wird eine Funktion aus der Antennentheorie verwendet, um die resultierende Signalintensität am Ort des Brennpunktes zu bestimmen. Die linke Graphik zeigt die zur ersten Methode verwendeten Beispielwege (graue Linien), die rechte Graphik den daraus resultierenden Intensitätsverlauf. Die grün dargestellte Empfangskeule im linken Bild gibt diesen Verlauf in Polarkoordinaten wieder.

Mit dieser Simulation kann der Intensitätsverlauf im Bereich des Beam-Angles berechnet und somit auf Intensitätsmessungen angewendet werden.

## 5.2 Überlagerung von Quellen

Um die Situation genauer analysieren zu können, die auftritt, wenn unterschiedliche Quellen gleichzeitig im Fokus des Reflektors stehen, wird die Software „Überdeckung“ verwendet [5]. Sie erlaubt es, an einem stark vereinfachten Beispiel nachzuvollziehen, wie sich die Signalstärke ändert, wenn ein Zielobjekt vor dem galaktischen Hintergrund gemessen wird und welche Auswirkungen es hat, wenn dieses Objekt sich nicht genau im Fokus befindet. Dabei berücksichtigt es wahlweise die Intensitätsänderungen im Verlauf des Beam-Angles sowie die relative Lage von Quelle und Hintergrund. Objektgröße und Objektlage sind frei wählbar, der Beam-Angle ist derzeit wegen der verwendeten analytischen Funktion (s.o.) auf  $3,8^\circ$  festgelegt. Die Signalstärken von Quelle und Hintergrund können frei variiert werden. Durch Aufnahme einer Animation kann der Signalverlauf bei einer Bewegung des Objektes durch den Fokus untersucht werden.

Abb. 17 zeigt die Benutzeroberfläche dieser Software. Auf der linken Seite können die gewünschten Parameter eingestellt werden, die sich daraus ergebende Situation wird in der linken oberen Graphik dargestellt. Der gelbe Kreis kennzeichnet den Beam-Angle, die rote Linie den Weg des Objektes, die rosafarbene Linie die Hauptachse des Objektes und der grüne Kreis den zu betrachtenden Himmelsausschnitt (View-Angle). Wird der View-Angle hinreichend groß gewählt, werden auch eventuelle Nebenkeulen mit erfasst.

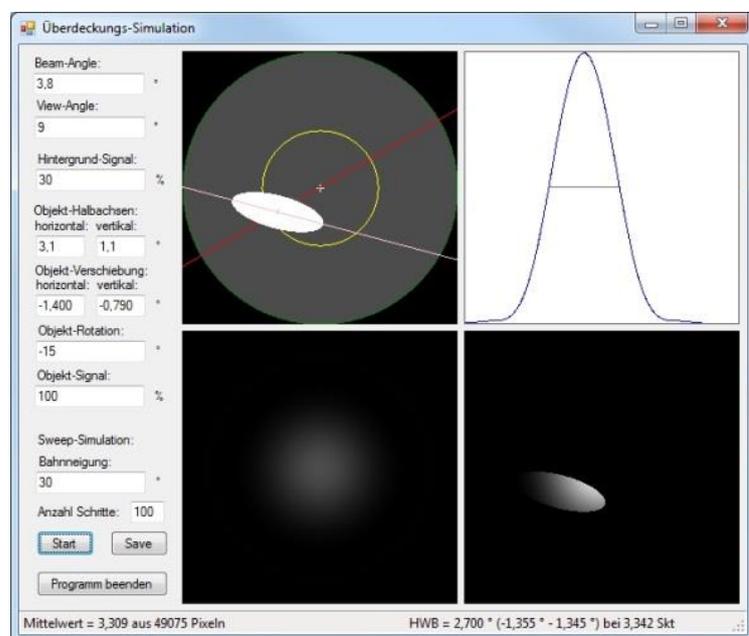


Abb. 17: Simulations-Software „Überdeckung“ zur Signalüberlagerung mehrerer Quellen

Die beiden unteren Graphiken zeigen den Hintergrund (links) sowie die Quelle (rechts). Deutlich erkennt man, wie die Signalintensität durch den Beam-Angle beeinflusst wird.

Zur Bestimmung der resultierenden Intensität werden im Rahmen der Animation jeweils die Bilddaten dieser beiden Graphiken für die unterschiedlichen Quellpositionen verrechnet. Liegt die Quelle vor dem Hintergrund (z.B. Mond), werden die Hintergrunddaten durch die Quelldaten ersetzt, andernfalls werden sie addiert. Die Graphik rechts oben zeigt den Signalverlauf, wenn die Quelle durch den Aufnahmebereich des Teleskops wandert. Die Messdaten können zur weiteren Analyse in einer CSV-Datei gespeichert werden.

## 6 Fazit

Mit diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Messempfindlichkeit der verwendeten Messapparatur hoch genug ist, um auch Radioquellen messen zu können, die um mehr als eine Größenordnung schwächer sind als die in der Vergangenheit gemessenen Wasserstoffwolken in unserer Heimatgalaxie. Die Messungen haben außerdem gezeigt, dass die Leistungsgrenze des Radioteleskops noch nicht erreicht ist, zumal auch weitere Methoden, wie zum Beispiel die Verlängerung der Integrationszeit oder die Optimierung der HF-Vorverstärker noch nicht angewendet wurden.

Insbesondere die Line-Scans für den Mond haben gezeigt, dass die theoretischen Voraussagen für den Einfluss des Beam-Angles durch die Messungen bestätigt werden.

Besonders bei den Überlegungen zur Überlagerung mehrerer Signale wurde festgestellt, dass eine Signaltrennung mit einfachen Mitteln nur selten zu realisieren ist (z.B. Mond), während in anderen Fällen eine deutlich aufwendigere numerische Methode entwickelt werden muss, die sich vor allem auf relativ feine Rastermessungen stützen müssen.

## 7 Danksagung

Zur Verwirklichung des Projektes war ich auf externe Unterstützung angewiesen, für die ich mich hier bedanken möchte:

Das Christian-Gymnasium hat mir gestattet, das schuleigene Radioteleskop jederzeit zur Aufnahme von Messungen benutzen zu dürfen.

Der Verein Sternwarte Südheide stellte mir mit dem Spectra-Cyber ein Messgerät zur Verfügung, ohne das diese Messungen nicht möglich gewesen wären.

Der Verantwortliche für das Radioteleskop, Thomas Biedermann, hat mich in der Bedienung des Radioteleskops und der zugehörigen Software eingewiesen und bei der Erstellung der Simulationssoftware unterstützt.

Doch ein solches Projekt hängt nicht nur von Messgeräten und technischer Ausrüstung, sondern auch von abstrakteren Faktoren ab: Thomas und Susanne Biedermann haben in der ganzen Zeit dieses Projektes durch das regelmäßige Fahren von der Schule zum Büro sowie die Bereitstellung von diversen Mahlzeiten und Unmengen von Tee stets für eine optimale Arbeitsatmosphäre gesorgt. Obwohl ich nach jeder Frage über den Weltraum, die in einem Gespräch mit ihm geklärt wurde, gerne mindestens zwei weitere hätte stellen mögen, beginne ich allmählich, dessen Dimensionen und die Möglichkeiten, ihn zu erforschen, zu begreifen.

## 8 Quellen

PD: Public Domain

CC: Creative Commons

Alle Internet-Quellen: Letzter Aufruf: 03.01.2020

- [1] nach: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>
- [2] nach: [https://de.wikipedia.org/wiki/Wienschens\\_Verschiebungsgesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Wienschens_Verschiebungsgesetz)
- [3] John D. Kraus, Radio Astronomy, 2<sup>nd</sup> Edition, Cygnus-Quasar Books, University of New Hampshire, 2005
- [4] Simulationssoftware „BeamAngle“, Th. Biedermann, Hermannsburg, 2019
- [5] Simulationssoftware „Ueberdeckung“, Ph. Pohl, Hermannsburg, 2019
- [6] Cassiopeia A SNR Bild:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia\\_A#/media/Datei:Cassiopeia\\_A\\_Spitzer\\_Crop.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia_A#/media/Datei:Cassiopeia_A_Spitzer_Crop.jpg) (PD)
- [7] M82 Bild: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/14/1876-Image.html?keyword=M82> (PD)
- [8] M31 Bild:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:101\\_0081\\_M31\\_50x60s\\_Messier\\_31\\_Andromeda\\_Galaxy\\_\(28443166380\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:101_0081_M31_50x60s_Messier_31_Andromeda_Galaxy_(28443166380).jpg) (CC, PD)
- [9] nach: <https://de.wikipedia.org/wiki/Andromedagalaxie>
- [10] nach: M31: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/518955/m31> (PD)
- [11] nach: M33: [https://www.mpifr-bonn.mpg.de/3047648/2005\\_2](https://www.mpifr-bonn.mpg.de/3047648/2005_2) (PD)
- [12] nach: <https://de.wikipedia.org/wiki/Dreiecksnebel>
- [13] M33 Bild: [https://de.wikipedia.org/wiki/Dreiecksnebel#/media/Datei:M33\\_lohrmobs.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Dreiecksnebel#/media/Datei:M33_lohrmobs.png) (CC)