

Seminararbeit
im W-Seminar „Astrophysik“

Messung der HI-Linie mithilfe eines selbstgebauten
Radioteleskops

vorgelegt von: Johannes Kunz

Kursleiter: Peter Mayer

Abgabe am: 09. November 2015

Erzielte Punkte: _____ in Worten: _____
(einfache Wertung)

Ergebnis der Präsentation: _____ in Worten: _____

Unterschrift des Kursleiters: _____

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Die HI-Linie	3
2.1 Neutraler Wasserstoff im Weltall	3
2.2 Entstehung der HI-Linie.....	4
3. Aufbau von Radioteleskopen	4
3.1 Allgemeiner Aufbau.....	4
3.2 Beispiel eines Amateurradioteleskops zur Messung der HI-Linie	5
4. Physikalische Grundlagen der verwendeten Bauelemente	5
4.1 Antenne.....	5
4.1.1 Richtwirkung und Antennengewinn.....	6
4.1.2 Parabolantenne	7
4.1.3 Hornstrahler	8
4.2 Verstärker.....	9
4.2.1 Rauschmaß.....	9
4.2.2 Oszillation.....	10
4.3 Mischer.....	10
5. Bau des eigenen Radioteleskops.....	11
5.1 Antenne.....	12
5.2 Verstärker.....	14
5.3 Signalanalyse	15
5.3.1 Erster Aufbau.....	15
5.3.1.1 Mischer.....	15
5.3.1.2 Oszilloskop.....	18
5.3.1.3 Test des ersten Aufbaus	18
5.3.2 Zweiter Aufbau.....	19
5.3.2.1 RTL2832U	19
5.4 Vorbereitung des Radioteleskops	20
5.4.1 Ausrichtung des Hornstrahlers.....	20
5.4.3 Test des zweiten Aufbaus.....	20
5.5 Durchführung der Messung der HI-Linie.....	21
6. Ergebnisse	21
6.1 Messung am Tag.....	21
6.2 Messung in der Nacht	22
7. Zusammenfassung.....	23
8. Anhang	24
9. Literaturverzeichnis.....	31

1. Einleitung

Die Radioteleskopie ist eine wichtige Methode zur Erforschung des Universums. Eine Möglichkeit, die elementare Zusammensetzung von Himmelsobjekten zu bestimmen, ist die Messung von elementspezifischen Emissionslinien im Radiobereich. Auch neutraler Wasserstoff emittiert auf bestimmten Frequenzen Radiowellen. Eine dieser für neutralen Wasserstoff spezifischen Radiowellen hat im Vakuum eine Wellenlänge von etwa 21 cm und wird auch als HI-Linie (H-Eins-Linie) bezeichnet (Kalberla P., 2009, S. 1). Diese Wellenlänge lässt sich mit Hilfe eines Radioteleskops messen. So kann die Existenz von neutralem Wasserstoff in Himmelsobjekten nachgewiesen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit einfachen Mitteln ein Radioteleskop zu bauen, mit dem die Messung der HI-Linie möglich ist. Dazu werden der allgemeine Bau von Radioteleskopen und die physikalischen Grundlagen der verwendeten Bauteile dargestellt. Schließlich wird das selbstgebaute Radioteleskop mit einem Testsender überprüft und Messungen der HI-Linie durchgeführt.

2. Die HI-Linie

2.1 Neutraler Wasserstoff im Weltall

Wasserstoff macht circa 90% der interstellaren Materie (ISM)¹ aus (Kiehlmann S., 2011). Dabei liegt der Wasserstoff je nach Temperatur in verschiedenen Zuständen vor. Neutraler, atomarer Wasserstoff kommt nur in sogenannter kalter ISM bei Temperaturen unter 100 K vor (Kiehlmann S., 2011). In diesem Zustand emittiert Wasserstoff Radiowellen, die auch als 21-cm-Linie oder HI-Linie bekannt sind (Kiehlmann S., 2011).

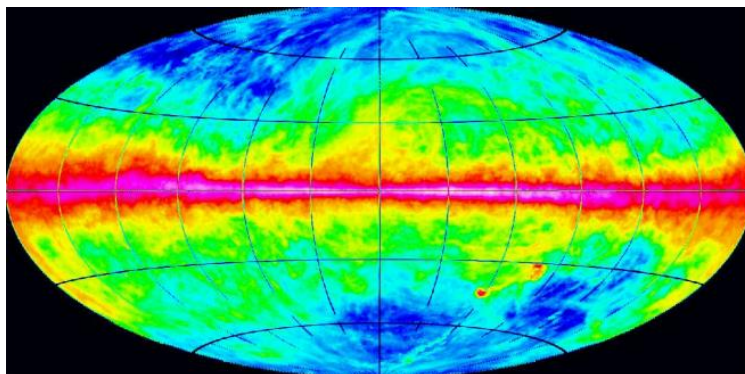


Abb.1: Verteilung von neutralem Wasserstoff in der Milchstraße. Das galaktische Zentrum befindet sich in der Mitte. Rot bedeutet hohe HI-Emission, blau niedrige. (Kalberla P. et al., 2005, S. 7)

¹ Als interstellare Materie ISM wird "das Material[...] [bezeichnet], das sich innerhalb einer Galaxie zwischen den Sternen befindet[...]" (Kiehlmann S., 2011).

2.2 Entstehung der HI-Linie

Die HI-Linie von Wasserstoff bei einer Frequenz von 1420 MHz stammt von dem Übergang zwischen den zwei Energieniveaus im 1s-Grundzustand des Wasserstoffs (Nave R., 2004). Wasserstoff kommt im 1s-Grundzustand in zwei quantenmechanischen Zuständen vor (Nave R., 2004). Das Proton und das Elektron haben einen quantenmechanischen Drehimpuls, einen so genannten Spin (Nave R., 2004). Die Spins des Elektrons und des Protons können parallel oder antiparallel zueinander sein. Die Energiedifferenz der beiden Zustände beträgt $5.87 \cdot 10^{-6}$ eV (Baudis L., 2007, S. 29). Dabei sind parallele Spins energetisch höher als antiparallele (Nave R., 2004). Beim Wechsel der Drehrichtung von parallelen Spins zu antiparallelen wird ein Photon mit der Energie der Energiedifferenz der beiden Energieniveaus emittiert

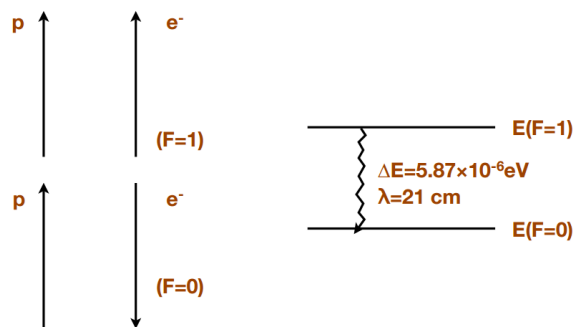


Abb. 2: Entstehung der HI-Linie (Baudis L., 2007, S. 29)

(Baudis L., 2007, S. 29). Der Übergang in den energetisch höheren Zustand erfolgt durch Stöße (Baudis L., 2007, S. 29). Die Abregung und die Emission des Lichtquants erfolgt nach rund 10^7 Jahren (Baudis L., 2007, S. 29).

3. Aufbau von Radioteleskopen

3.1 Allgemeiner Aufbau

Radioteleskope sind Messgeräte zur Bestimmung des Leistungsdichtespektrums (Kristen R., 1996, S. 132) der aus dem Kosmos kommenden Radiowellen.

Der grundsätzliche Aufbau von Radioteleskopen sieht dabei folgendermaßen aus:

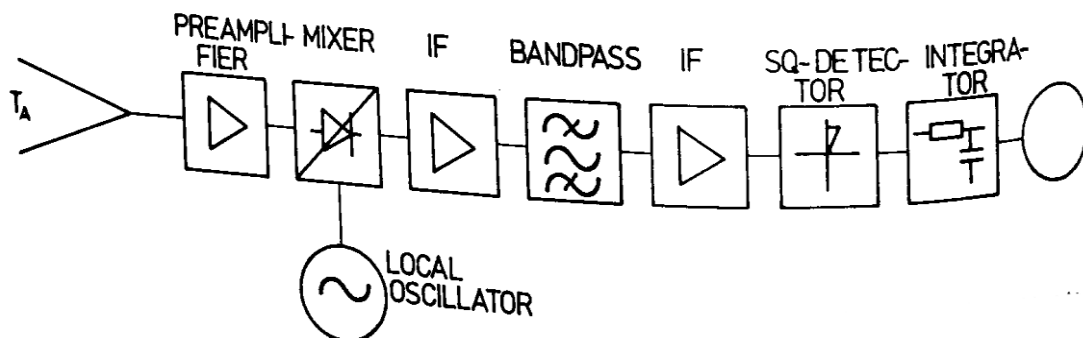


Abb. 3: Allgemeiner Aufbau eines Radioteleskops (Kristen R., 1996, S. 132)

Die Radiowellen werden von der Antenne (T_a) empfangen und durch einen Vorverstärker (preamplifier) verstärkt (siehe Abbildung 3). Anschließend wird das Signal in einem Mischer (mixer) mit Hilfe eines Oszillators (local oscillator) auf eine niedrigere Frequenz herabgesetzt, mit Verstärkern weiter verstärkt und von einem Bandpassfilter gefiltert. Zum Schluss wird das Frequenzspektrum des entstandenen Signals analysiert. In Abbildung 3 geschieht die Analyse beispielsweise mittels einem sogenannten SQ-Detektor, einem Integrator und einem Aufzeichnungsgerät.

3.2 Beispiel eines Amateurradioteleskops zur Messung der HI-Linie

Marcus Leech (2013) verwendet eine Offsetparabolantenne (siehe Kapitel 4.1.2) mit etwa einem Meter Durchmesser und eine als Hornstrahler (siehe Kapitel 4.1.3) umgebaute Kaffeedose als Antenne. Das vom Hornstrahler kommende Signal wird mit einem rauscharmen Vorverstärker und zwei für den SAT-Empfang üblichen Leistungsverstärkern verstärkt (Leech M., 2013). Die Analyse des Signals erfolgt über einen USB DVB-T Empfänger, welcher mit geeigneter Software als Spektrumanalysator dient (Leech M., 2013). Mit diesem Aufbau war es Marcus Leech möglich die HI-Linie zu messen (Leech M., 2013).

4. Physikalische Grundlagen der verwendeten Bauelemente

Zum Verständnis des eigenen Versuchsaufbaus werden zunächst die physikalischen Grundlagen der verwendeten Bauelemente erläutert.

4.1 Antenne

Wesentliche Kenngrößen einer Antenne sind Richtwirkung und Antennengewinn. Dabei sind „[...] [nach] dem Reziprozitätstheorem [...] die Eigenschaften einer Antenne unabhängig davon, ob sie als Sende- oder Empfangsantenne betrieben wird[...]“ (TU Hamburg-Harburg, 2011, S. 8). Kenngrößen, die im Folgenden anhand einer Antenne im Sendebetrieb erläutert werden, sind daher auch auf Antennen im Empfangsbetrieb übertragbar.

4.1.1 Richtwirkung und Antennengewinn

Sendende Antennen „[...]bündeln[...] [die Strahlung] für den Frequenzbereich unterhalb von 300 GHz[...] in bestimmten Richtungen“ (Beuth K., 2009, S. 178). Die Richtungen mit der maximalen Strahlungsintensität werden als Hauptstrahlrichtung bezeichnet (Beuth K., 2009, S. 178). „Die Strahlungsverteilung in Abhängigkeit vom Winkel wird durch ein so genanntes Richtdiagramm dargestellt“ (Beuth K., 2009, S. 178). Der Hauptstrahlrichtung wird dabei die Intensität 1 bzw. 0dB zugeordnet (Beuth K., 2009, S. 179).

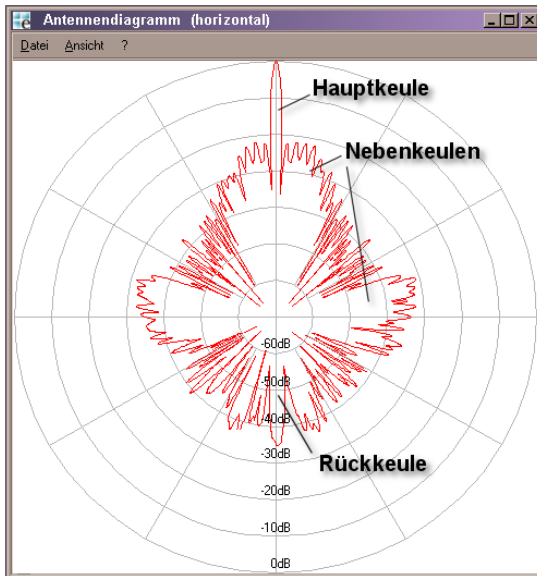


Abb. 4: Richtdiagramm einer Parabolantenne (Wikipedia, 2006)

Außerhalb der Hauptstrahlrichtung sinkt die Intensität der emittierten Strahlung. Die Winkelbreite, bei der die Strahlungsintensität um den Faktor 0.5 bzw. um 3 dB abgefallen ist, bezeichnet man als Halbwertsbreite der Antenne (Beuth K., 2009, S. 179). Im Richtdiagramm (siehe Abbildung 4) zeichnet sich die Hauptstrahlrichtung als Hauptkeule ab. Neben der Hauptkeule weisen Antennen auch Nebenkeulen auf (siehe Abbildung 4).

Das Maß der Richtwirkung einer Antenne wird durch den Antennengewinn G ausgedrückt (TH Karlsruhe, 2009, S. 4). Der Antennengewinn berechnet sich folgendermaßen, wobei S_{max} die Strahlungsintensität der Hauptstrahlrichtung und S_i die eines isotropen Strahlers² (Beuth K., 2009, S. 178) mit gleicher Sendeleistung (TU Hamburg-Harburg, 2011, S. 10) ist:

$$G[dBi] = 10 \cdot \log\left(\frac{S_{max}}{S_i}\right) \quad (1) \text{ (Beuth K., 2009, S. 178)}$$

Das i verdeutlicht dabei den Vergleich mit einem isotropen Strahler (Beuth K., 2009).

Außerdem erhält man den Antennengewinn G durch logarithmieren des Antennengewinnfaktors g :

$$G = 10 \cdot \log(g) \quad (2) \text{ (Beuth K., 2009, S. 178)}$$

² Ein isotroper Strahler, auch Kugelstrahler genannt, ist ein fiktiver Strahler, der in alle Raumrichtungen gleichmäßig abstrahlt (Wiesbeck W., 2005).

Wie der folgenden Formel zu entnehmen ist, hängt der Antennengewinnfaktor g von der Antennenwirkfläche A_w der Antenne und der empfangenen bzw. gesendeten Wellenlänge λ ab:

$$A_w = \frac{g \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (3) \text{ (Beuth K., 2009, S. 180)}$$

Als Antennenwirkfläche wird die charakteristische Fläche einer Antenne bezeichnet (Beuth K., 2009, S. 180). Sie „[...] [hängt bei] flächig ausgedehnten Antennen [...] [von] der geometrischen Fläche A_g [...]“ (Beuth K., 2009, S. 180) und dem Flächenwirkungsgrad q ab (Beuth K., 2009, S. 180):

$$A_w = q \cdot A_g \quad (4) \text{ (Beuth K., 2009)}$$

4.1.2 Parabolantenne

Parabolantennen zählen zu den sogenannten Reflektorantennen (Beuth K., 2009, S. 190). Sie bestehen aus einem parabelförmigen Reflektor, der einfallende, ebene Wellen³ in seinem Brennpunkt konzentriert (Beuth K., 2009, S. 190) (siehe Abbildung 5). Im Brennpunkt befindet sich als Erregersystem ein Hornstrahler, der die Parabolantenne speist (Beuth K., 2009, S. 190). Man unterscheidet, je nach Bauform, unterschiedliche Typen von Parabolantennen.

Offset-Parabolantennen werden im Gegensatz zu Rotations-Parabolantennen schräg gespeist (siehe Abbildung 6) (Beuth K., 2009, S. 190). Das Erreger- bzw. Empfängersystem befindet sich bei Offset-Parabolantennen nicht in der geometrischen Mitte des Parabolspiegels, sondern ist seitlich versetzt, wie der Abbildung 6 zu entnehmen ist.

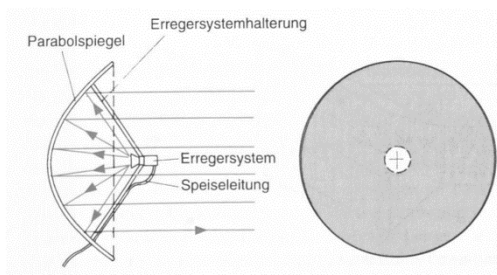


Abb. 5: Rotations-Parabolantenne (Beuth K., 2009, S. 190)

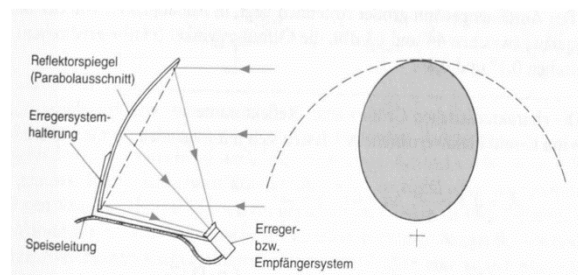


Abb. 6: Offset-Parabolantenne (Beuth K., 2009, S. 191)

³ Als ebene Wellen werden Wellen mit gleicher Frequenz, gleicher Ausbreitungsrichtung und gleicher Phasenlage bezeichnet, die in einer Ebene liegen (Spektrum Akademischer Verlag, 1998).

4.1.3 Hornstrahler

Der Funktionsweise eines Hornstrahlers liegen die physikalischen Eigenschaften eines Hohlleiters zugrunde. Ein Hohlleiter ist ein Metallrohr mit rundem, elliptischem oder rechteckigem Querschnitt (Wolff C., 2009, S. 8). Ab einer bestimmten Frequenz können sich in einem Hohlleiter elektromagnetische Wellen ausbreiten (Wolff C., 2009, S. 8). „Zwischen den a-Wänden bildet sich ein E-Feld aus, das zu den b-Wänden hin abnimmt[...]" (Wolff C., 2009, S. 8) (siehe Abbildung 7). Die Felder ändern ihre Polarität und Intensität dabei mit der Frequenz des Signals in Längsrichtung (Wolff C., 2009, S. 8). Die Leitfähigkeit eines rechteckigen Hohlleiters ist durch die Seitenlänge a in Bezug auf die Frequenz bestimmt (Wolff C., 2009, S. 9). Unterhalb der Grenzfrequenz λ_{Grenz} wird das Signal stark gedämpft (Wolff C., 2009, S. 9). Die Grenzwellenlänge eines rechteckigen Hohlleiters berechnet sich folgendermaßen, wobei a die längere Seite des Hohlleiters ist (Wolff C., 2009, S. 8):

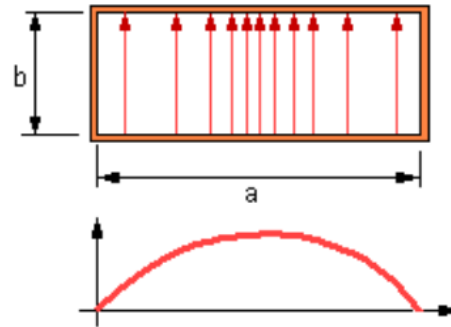


Abb. 7: E-Feld im Hohlleiter (Querschnitt, Momentaufnahme, H_{10} -Modus) (Wolff C., 2009, S. 8)

Man unterscheidet verschiedene Ausbreitungsmoden (siehe Abbildung 8), die alle ihre eigenen Grenzfrequenzen aufweisen (Wolff C., 2009, S. 9). Die Mode mit der niedrigsten Grenzfrequenz in einem rechteckigen Hohlleiter wird als H_{10} -Mode bezeichnet (Wolff C., 2009, S. 9).

$$\lambda_{\text{Grenz}} = 2 \cdot a \quad (5) \text{ (Wolff C., 2009, S. 8)}$$

Man unterscheidet verschiedene Ausbreitungsmoden (siehe Abbildung 8), die alle ihre eigenen Grenzfrequenzen aufweisen (Wolff C., 2009, S. 9). Die Mode mit der niedrigsten Grenzfrequenz in einem rechteckigen Hohlleiter wird als H_{10} -Mode bezeichnet (Wolff C., 2009, S. 9).

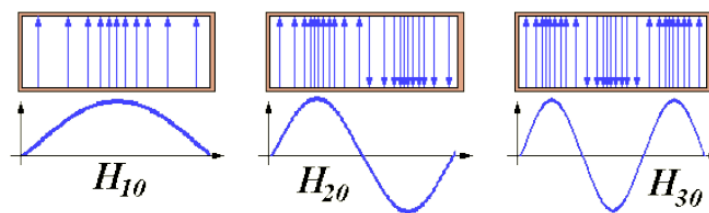


Abb. 8: Hohlleiterquerschnitte mit E-Feld bei verschiedenen Ausbreitungsmoden (Wolff C., 2009, S. 9)

Elektrische Energie kann über eine sogenannte Sonde ein- bzw. ausgekoppelt werden (Wolff C., 2009, S. 10). Sie befindet sich $\lambda/4$ weit vom geschlossenen Ende des Hohlleiters, sowie $\lambda/4$ von den beiden b-Seiten entfernt (siehe Abbildung 9) und sollte idealerweise $\lambda/4$ lang sein (Wolff C., 2009, S. 10).



Abb. 9: E-Sonde im Hohlleiter (Wolff C., 2009, S. 10)

Die Öffnung eines Hohlleiters ist als Strahlungsquelle anzusehen (Beuth K., 2009, S. 189). Die Intensität der Abstrahlung ist dabei vom Öffnungsdurchmesser abhängig (Beuth K., 2009, S.189).

Erweitert man den rechteckigen Hohlleiter in x- und y-Richtung, so erhält man ein Pyramidenhorn (TU Hamburg-Harburg, 2011, S. 13). Dadurch entsteht ein „[...] allmähliche[r] Übergang der Hohlleiterwelle in den freien Raum[...]“ (TU Hamburg-Harburg, 2011, S. 13).

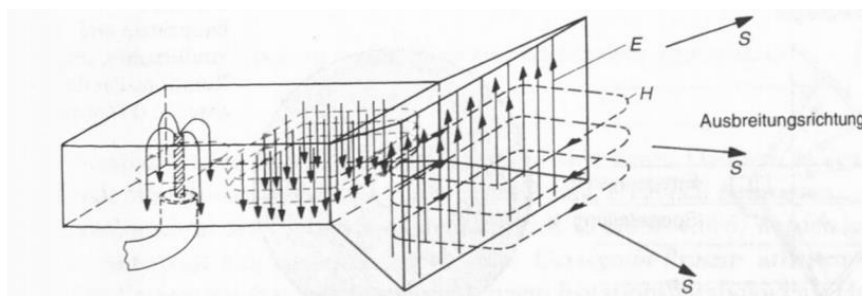


Abb. 10: Prinzipdarstellung eines Hornstrahlers (Beuth K., 2009, S. 189)

4.2 Verstärker

Verstärker verstärken das Eingangssignal um einen bestimmten Pegel. Der Pegel L_P berechnet sich aus der Ausgangsleistung P_a und der Eingangsleistung P_e folgendermaßen:

$$L_P = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_e} \text{ dB} \quad (6) \text{ (Beuth K., 2009, S. 38)}$$

4.2.1 Rauschmaß

Auch ohne Eingangssignal tritt am Ausgang eines Verstärkers Rauschen auf (Mohr F., 2011, S. 6). Das Ausmaß des Rauschens wird mit der sogenannten Rauschzahl und dem Rauschmaß bemessen. Die Rauschzahl kann in das Rauschmaß umgerechnet werden:

$$NF = 10 \cdot \lg F \quad (7) \text{ (Rohde&Schwarz, 2003, S. 42)}$$

Werden mehrere Verstärker hintereinander geschaltet, so ergibt sich die Gesamt-rauschzahl „aus der Addition der Rauschzahl [...] [eines Verstärkers] mit der Rauschzahl des nächsten [...] [Verstärkers] unter Berücksichtigung der Verstärkung des davorliegenden [...] [Verstärkers]“ (Rohde&Schwarz, 2003, S. 42) mit folgender Gleichung:

$$F_{ges} = (F_1 - 1) + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} G_i} \quad (8) \text{ (Rohde\&Schwarz, 2003, S. 42)}$$

4.2.2 Oszillation

Bei hohen Verstärkungen besteht die Gefahr, dass ein Teil des Ausgangssignals zurück zum Eingang gelangt (Kristen R., 1996, S. 138). Die Folge dieser Rückkopplung ist Oszillation des gesamten Systems, weshalb es massiver Schirmung bedarf (Kristen R., 1996, S. 138).

4.3 Mischer

Ein Mischer ist ein Bauelement, das zwei Signale miteinander zu einem Ausgangssignal multipliziert (Hufschmid M., 2008, S. 2). Werden zwei sinusförmige Signale der Frequenzen f_1 und f_2 miteinander multipliziert, so enthält das Ausgangssignal zwei Frequenzen (Hufschmid M., 2008, S. 3):

- Summenfrequenz $f_1 + f_2$
- Differenzfrequenz $|f_1 - f_2|$

Das Ergebnis einer multiplikativen Mischung zweier sinusförmiger Eingangssignale lässt sich graphisch veranschaulichen:

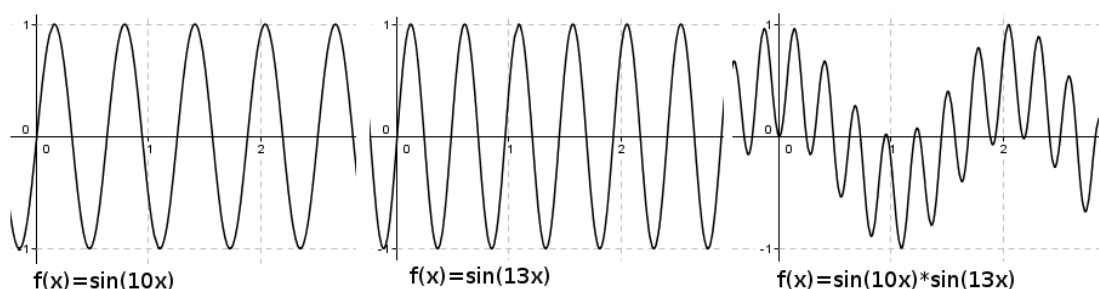


Abb. 11: Multiplikative Mischung von zwei sinusförmigen Signalen

Meist speist man den Mischer mit einem hochfrequenten Eingangssignal, auch RF-Signal genannt, der Frequenz f_{RF} und dem Signal eines Oszillators (LO-Signal),

dem sogenannten Lokaloszillator, mit fester Frequenz f_{LO} (Petermann K. & Bunge C., 2012, S. 48). Verwendet man nur die Differenzfrequenz weiter und filtert man die Summenfrequenz heraus, so setzt der Mischer das hochfrequente RF-Signals auf eine niedrigere, so genannte Zwischenfrequenz herab, auch als IF oder intermediate frequency bezeichnet (Petermann K. & Bunge C., 2012, S. 48).

Soll ein RF-Signal der Frequenz 1420.4 MHz auf 10,0 MHz herabgesetzt werden, so wird nach der Formel $f_{LO} = |f_{RF} - f_{IF}|$ ein Oszillator mit einer Frequenz von $1420,4 \text{ MHz} - 10,0 \text{ MHz} = 1410,4 \text{ MHz}$ benötigt.

Dabei ist zu beachten, dass nicht nur RF-Signale mit einer Frequenz von 1420,4 MHz bei gleichem Oszillatorsignal am Ausgang des Mixers ein IF-Signal mit einer Frequenz von 10,0 MHz hervorrufen, sondern nach der Beziehung $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ auch RF-Signale der Frequenz $f'_{RF} = 1400,4 \text{ MHz}$. Diese Frequenz f'_{RF} heißt Spiegelfrequenz (Petermann K. & Bunge C., 2012, S. 49 f.). Will man bei konstanter Frequenz f_{LO} jeder Zwischenfrequenz f_{IF} eine bestimmte Eingangsfrequenz f_{RF} zuordnen können, so muss die Spiegelfrequenz f'_{RF} vor der Mischung unterdrückt werden (Petermann K. & Bunge C., 2012, S. 49).

5. Bau des eigenen Radioteleskops

Als Antenne dient eine handelsübliche Offsetparabolantenne mit 95 cm Durchmesser, in deren Bereich des Brennpunkts sich ein Hornstrahler befindet. Das vom Hornstrahler (siehe Kapitel 4.1.3) kommende Signal wird mit für den SAT-Empfang üblichen Leitungsverstärkern verstärkt. Anschließend wird das Signal analysiert. Zur Signalanalyse werden im Folgenden zwei verschiedene Methoden angewandt.

Im ersten Aufbau setzt ein Mischer mithilfe eines Oszillators das hochfrequente Signal auf 10 MHz herab. Zuletzt wird das dadurch entstandene Signal von einem digitalen Speicheroszilloskop in sein Frequenzspektrum umgewandelt. Das Blockschaltbild des ersten Aufbaus sieht somit folgendermaßen aus:

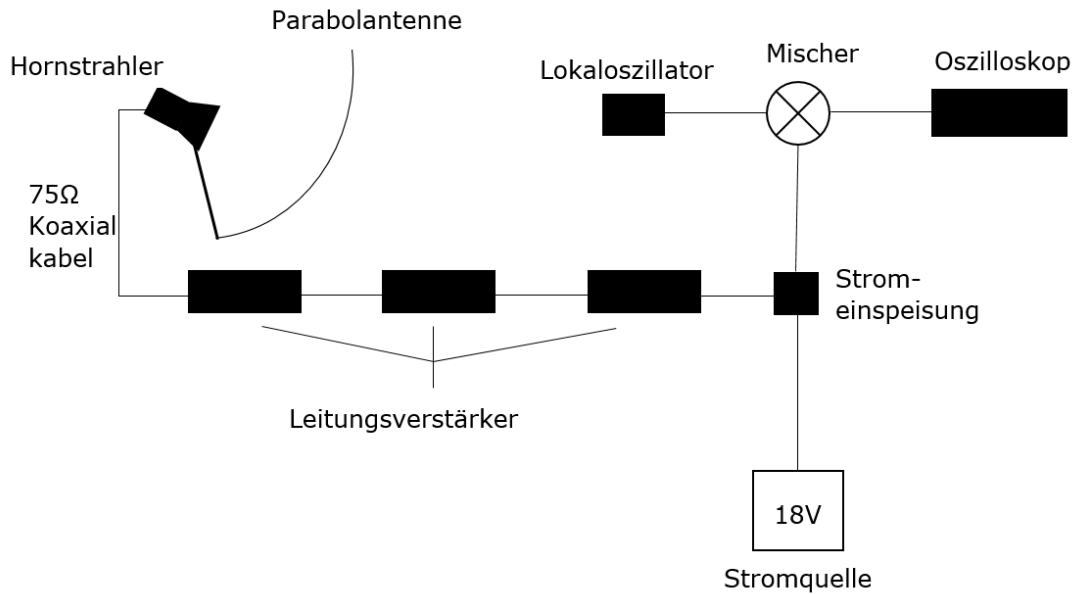


Abb. 12: Schematische Zeichnung des ersten Aufbaus

Im zweiten Aufbau dient der USB DVB-T Empfänger RTL2832U und die PC-Software SDRSharp zur Analyse des Signals, die den Mischer, den Oszillator und das Oszilloskop ersetzen:

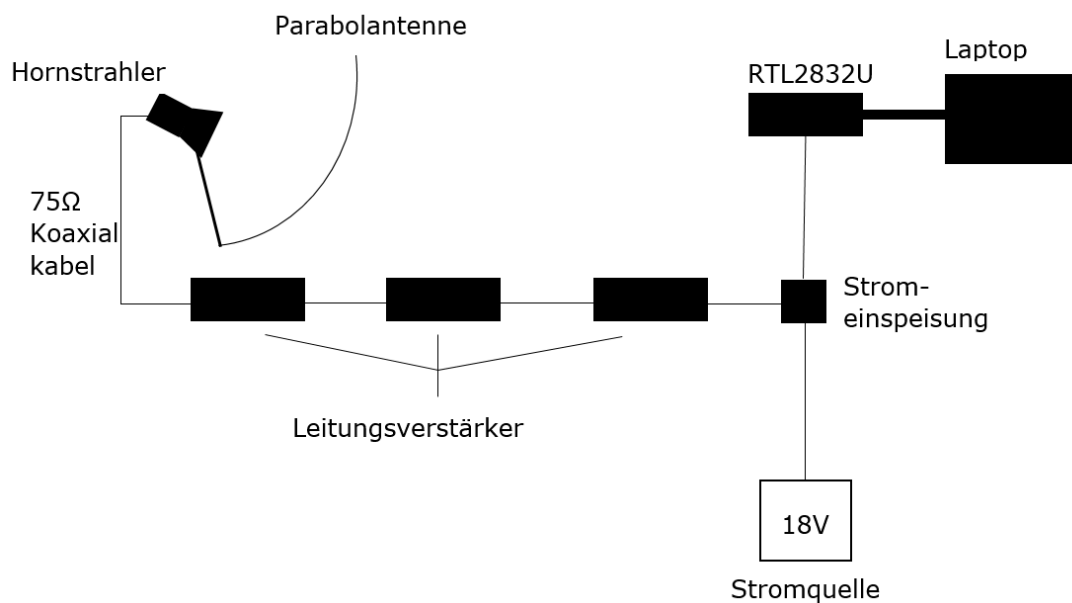


Abb. 13: Schematische Zeichnung des zweiten Aufbaus

5.1 Antenne

Zum Empfang der Strahlung des Wasserstoffs wird eine Antenne mit möglichst hohem Antennengewinn benötigt. Je größer der Antennengewinn ist, desto stärker ist das von der Antenne kommende Signal und desto geringer können die elektronischen

Verstärker dimensioniert werden. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 erläutert, steigt der Antennengewinn von flächig ausgedehnten Antennen mit zunehmender geometrischer Fläche, weshalb es einer möglichst großen Antenne bedarf.

Die größte Antenne, die für den Versuchsaufbau im Rahmen dieses Projekts zur Verfügung steht, ist eine handelsübliche Offsetparabolantenne mit 95 cm Durchmesser (siehe Abbildung 16). Ihr Antennengewinnfaktor lässt sich nach in Kapitel 4.1.1 genannter Formel berechnen, wobei A_W die Antennenwirkfläche und λ die zu empfangende Wellenlänge ist:

$$A_W = g \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (9) \text{ (Beuth K., 2009, S. 180)}$$

Umgestellt nach g und mit $A_W = A_g \cdot q$ ergibt sich, wobei A_g die geometrische Fläche der Antenne und q der Flächenwirkungsgrad ist:

$$g = A_g \cdot q \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (10)$$

Wird die Parabolantenne als kreisförmig angenähert, kann für die geometrische Fläche $A_g = r^2 \cdot \pi$ angenommen werden, wobei r gleich der halbe Durchmesser der Parabolantenne ist:

$$g = r^2 \cdot \pi \cdot q \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (11)$$

Typische Werte für q liegen zwischen 0,4 und 0,9 (Beuth K., 2009, S. 192). Da der Flächenwirkungsgrad der verwendeten Parabolantenne unbekannt ist, wird mit einem Mittelwert von $q = 0.75$ gerechnet. Mit $r = 95 \text{ cm}/2 = 47.5 \text{ cm}$ und $\lambda = 21.1 \text{ cm}$ ergibt sich folgender Antennengewinnfaktor:

$$g = (0.475\text{m})^2 \cdot \pi \cdot 0.75 \cdot \frac{4\pi}{(0.211\text{m})^2} = 150.0525 \approx 150 \quad (12)$$

Der Antennengewinn beträgt somit:

$$G = 10 \cdot \log(g) = 10 \cdot \log(150) = 21.761\text{dBi} \approx 21.8\text{dBi} \quad (13)$$

Der tatsächliche Antennengewinn der verwendeten Parabolantenne ist geringer, da Abschattungen der Spiegeloberfläche durch die Befestigung des Empfängersystems (Beuth K., 2009, S. 190) nicht in der Rechnung berücksichtigt werden.

Bei der Ausrichtung der Parabolantenne auf die zu empfangende HI-Region im Weltall ist die Richtwirkung und die damit verbundene Halbwertsbreite (siehe Kapitel 4.1.1) der Parabolantenne von Bedeutung. Die Halbwertsbreite einer Parabolantenne berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta\alpha = 63^\circ \cdot \frac{\lambda}{D \cdot \sqrt{q}} \quad (14) \text{ (Beuth K., 2009, S. 192)}$$

Damit ergibt sich für die verwendete Parabolantenne folgende Halbwertsbreite:

$$\Delta\alpha = 63^\circ \cdot \frac{0.211m}{0.95m \cdot \sqrt{0.75}} = 16.1572^\circ \approx 16^\circ \quad (15)$$

Im Versuchsaufbau speist ein Pyramidenhornstrahler die Parabolantenne. Die Größe des Horns muss auf die zu empfangende Frequenz abgestimmt werden, um möglichst gute Empfangseigenschaften zu erzielen. Die untere Grenzwellenlänge eines rechteckigen Hohlleiters beträgt nach der Beziehung $\lambda_{\text{Grenz}} = 2 \cdot a$ (siehe Kapitel 4.1.3). Außerdem muss die Sonde zur Auskopplung der Energie aus dem Hohlleiter $\lambda/4$ vom Ende des Hohlleiters und den b-Seiten, wie in Kapitel 4.1.3 behandelt, entfernt sein. Damit sind die Abmessungen der a-Seiten des Hohlleiters auf $\lambda/2$ festgelegt. Die Länge der b-Seiten wird durch die Länge der Sonde von $\lambda/4 \approx 5.3$ cm bestimmt. Damit der Hohlleiter der Sonde ausreichend Platz bietet, weisen die b-Seiten eine Länge von 7 cm auf. Da sich eine „[...]deutliche Abstrahlung erst dann „[...]ergibt][,]wenn der Öffnungsdurchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge liegt“ (Beuth K., 2009, S. 189), wird der Hohlleiter nach einer Länge von 20 cm pyramidenförmig auf 25cmx20cm erweitert. Das Horn wird aus Kupferplatinen angefertigt, welche an den Kanten zusammengelötet werden (siehe Abbildung 17). Als Sonde dient ein $\lambda/4$ langer Kupferdraht.

5.2 Verstärker

Der Pegel des Signals, das von der Antenne kommt, ist zu schwach, um direkt weiterverarbeitet werden zu können. Deshalb muss es elektronisch verstärkt werden. Im Versuchsaufbau werden dafür drei handelsübliche Leistungsverstärker eingesetzt. Drei Leistungsverstärker des Typs SVS 2-01 des Herstellers Axing verstärken das Eingangssignal um jeweils 20 dB bei einem Rauschmaß von 7 dB (Axing, 2009). Um eine möglichst hohe Verstärkung zu erzielen, werden die drei Leistungsverstärker über Koaxialkabel in Reihe geschaltet. Die dadurch entstehende Gesamtverstärkung beträgt 60 dB. Um das Gesamttrauschmaß der Verstärkerstufe gering zu halten, verwenden andere Radioteleskope, wie das in Kapitel 3.2 vorgestellte von Marcus Leech einen rauscharmen Vorverstärker (low noise amplifier) mit unter einem Dezibel Rauschmaß als ersten Verstärker. Ein solcher Verstärker steht jedoch aufgrund der zu hohen Anschaffungskosten nicht zur Verfügung.

Nach der Formel 8 lässt sich das Gesamttrauschmaß F_{ges} der Verstärkerstufe berechnen. Dazu werden die Rauschzahlen der einzelnen Verstärker benötigt. Stellt man die Formel 7 nach F um, erhält man als Rauschzahl der Verstärker bei 7 dB Rauschmaß:

$$F = 10^{\frac{7dB}{10}} = 5.012 \approx 5 \quad (16)$$

Damit ergibt sich folgende Gesamtrauschzahl nach der Formel 8:

$$F_{ges} = (5 - 1) + \frac{(5-1)}{100} + \frac{(5-1)}{1000} = 4.044 \quad (17)$$

Rechnet man die Gesamtrauschzahl nach der Formel 7 in das Gesamtrauschmaß um, so erhält man:

$$NF_{ges} = 10 \cdot \lg(4.044) = 6.068dB \approx 6dB \quad (18)$$

Anhand der Rechnung 17 kann man erkennen, dass hauptsächlich der erste Verstärker für die Gesamtrauschzahl und damit auch für das Gesamtrauschmaß verantwortlich ist. Aus diesem Grund ist es notwendig, den ersten Verstärker so rauscharm wie möglich zu halten.

Die Stromversorgung der Leitungsverstärker erfolgt über eine an die Signalleitung angelegte Gleichspannung von 14-18 V (Axing, 2009) und wird mithilfe einer für den SAT-Empfang üblichen Stromspeisung eingespeist. Als Stromquelle werden zwei in Serie geschaltete 9V-Batterrien verwendet, um eine möglichst gleichmäßige, störungsfreie Versorgung zu erzielen.

Der erste Verstärker wird direkt in das Horn hineingeschraubt. Die Sonde kann dann direkt ohne ein weiteres Kabel in den Eingang des Verstärkers gesteckt werden.

5.3 Signalanalyse

5.3.1 Erster Aufbau

5.3.1.1 Mischer

Als Mischer im ersten Versuchsaufbau ein Diodenringmischer zum Einsatz. Ein Diodenringmischer ist aus vier im Ring angeordneten Halbleiterdioden (D1-4) und zwei Übertragern mit Mittelanzapfung aufgebaut, wie in Abbildung 14 zu sehen ist.

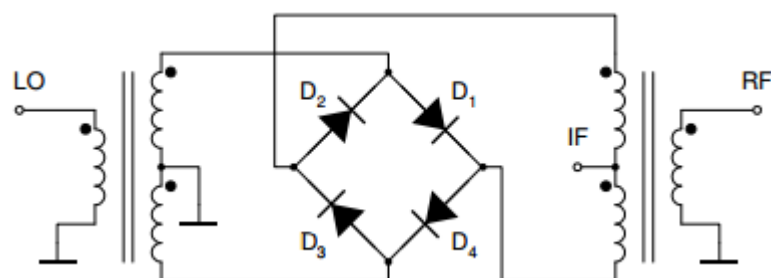


Abb. 14: Aufbau eines Diodenringmischers (Hufschmid M., 2008)

In Abhängigkeit “[...]des] Vorzeichens des LO-Signals leiten entweder die Dioden D1 und D4 oder [...] die Dioden D2 und D3” (Hufschmid M., 2008, S. 13). Je nach Vorzeichen des LO-Signals erscheint das RF-Signal am Ausgang in gleicher Phase oder wird um 180° in der Phase gedreht (Hufschmid M., 2008, S. 13). Dadurch wird die Multiplikation des LO-Signals mit dem Eingangssignal erreicht.

Im Versuchsaufbau wird als Diodenringmischer das Bauteil RMS-5LH des Herstellers Mini-Circuits verwendet. Es kann Signale mit Frequenzen zwischen 10 MHz und 1500 MHz mischen (Mini-Circuits, 2013). Somit eignet es sich für die Herabsetzung der für neutralen Wasserstoff typischen Frequenz von 1420,4 MHz.

Die Frequenz des IF-Signals lässt sich über die Frequenz des LO-Signals variieren. Je näher die Frequenz des LO-Signals an der Frequenz des RF-Signals liegt, desto niedriger ist nach der Beziehung $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ die Frequenz des IF-Signals. Um die Frequenz des LO-Signals möglichst einfach einstellen zu können, wird im Versuchsaufbau ein spannungsgesteuerter Oszillator eingesetzt.

Bei dem verwendeten spannungsgesteuerten Oszillator 1415-3D8V des Herstellers Raditek kann die Ausgangsfrequenz zwischen 1400 MHz und 1500 MHz durch Anlegen einer Abstimmspannung (tuning voltage) variiert werden (Raditek Inc., 2012). Die Abstimmspannung darf laut Datenblatt zwischen 0.5 und 4.5 V liegen (Raditek Inc., 2012) und wird im Versuchsaufbau mit Hilfe eines Spannungsteilers eingestellt.

Laut dem Datenblatt des Mixers muss der verwendete Lokalszillator eine Ausgangsleistung von +10 dBm haben (Mini-Circuits, 2013). Oszillatoren dieser Ausgangsleistung sind jedoch nicht kostengünstig zu erwerben. Der verwendete Oszillator hat daher lediglich eine Ausgangsleistung von +3 dBm (Raditek Inc., 2012).

Wie bereits in Kapitel 4.3 erwähnt, muss der Anteil der Spiegelfrequenz im RF-Signal vor der Mischung unterdrückt werden. Dies geschieht mithilfe eines passiven Bandpassfilters⁴. Damit nur die Frequenz der HI-Linie bei 1420 MHz im Mischer herabgesetzt wird und alle unerwünschten anderen Frequenzen, insbesondere die Spiegelfrequenz, möglichst weit gedämpft werden, muss der Bandpassfilter eine möglichst geringe Bandbreite⁵ aufweisen.

⁴ Ein Bandpassfilter ist Filterschaltung, die nur Anteile eines bestimmten Frequenzbereichs passieren lässt (Spektrum Akademischer Verlag, 2000).

⁵ Die Differenz zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz des Bandpassfilters wird als Bandbreite bezeichnet (Beuth K., 2009, S. 55). Dabei ist die Grenzfrequenz die Frequenz, bei der der Pegel des Signals um 3 dB, bzw. auf den Faktor $1/\sqrt{2}$ abgefallen ist (Beuth K., 2009, S. 55).

Liegt die IF-Frequenz bei 10 MHz, so ist die Spiegelfrequenz nach der Beziehung $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ 20 MHz höher bzw. niedriger als die herabzusetzende Frequenz von 1420 MHz. Um ausschließlich die Spiegelfrequenz, ohne Abschwächung des Frequenzanteils bei 1420 MHz zu dämpfen, muss der Bandpassfilter eine Bandbreite von unter 20 MHz haben. Derartig schmalbandige Filter mit einer Durchlassfrequenz von 1420 MHz sind nur aufwändig realisierbar. Wie im Abbildung 15 zu sehen ist, weist selbst ein Bandpassfilter fünfter Ordnung keine ausreichend geringe Bandbreite auf. Deshalb wird im Versuchsaufbau auf den Einsatz eines Bandpassfilters verzichtet und damit die Anteile von Signalen der Spiegelfrequenz im IF-Signal in Kauf genommen.

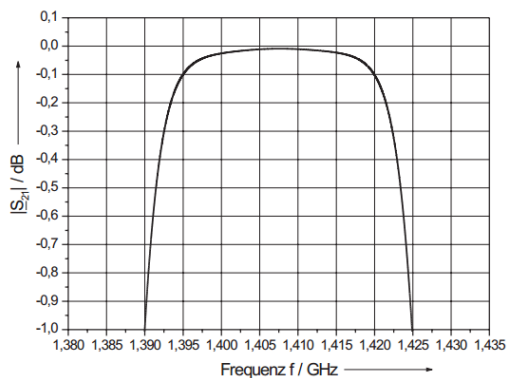


Abb. 15: Simulierter Frequenzgang eines Bandpasses 5. Ordnung (Wünsch S., 2005, S. 165)

teils bei 1420 MHz zu dämpfen, muss der Bandpassfilter eine Bandbreite von unter 20 MHz haben. Derartig schmalbandige Filter mit einer Durchlassfrequenz von 1420 MHz sind nur aufwändig realisierbar. Wie im Abbildung 15 zu sehen ist, weist selbst ein Bandpassfilter fünfter Ordnung keine ausreichend geringe Bandbreite auf. Deshalb wird im Versuchsaufbau auf den Einsatz eines Bandpassfilters verzichtet

und damit die Anteile von Signalen der Spiegelfrequenz im IF-Signal in Kauf genommen. Die Verbindung des Lokaloszillators mit dem Mischer erfolgt über ein 50 Ω Koaxialkabel.

Zur Stromversorgung des Lokaloszillators finden im Versuchsaufbau handelsübliche AA Mignon Batterien Verwendung. Durch eine Serienschaltung wird die für den Betrieb des Oszillators notwendige Gleichspannung von 8 V (Raditek Inc., 2012) bereitgestellt. Der Einsatz von Batterien als Stromquelle vermeidet der Gleichspannung eventuell überlagerte Störsignale.

Die vom IF-Pin des Mixers kommende Leitung wird mittels eines Abschlusswiderstands von 50,6 Ω mit der Masse verbunden, um eine Reflexion des IF-Signals am offenen Leiterende zu vermeiden (Wolff C., 2009, S. 5). Das Oszilloskop misst den Spannungsabfall am Widerstand und somit das IF-Signal.

Im Versuchsaufbau zum Nachweis der HI-Linie wird der Mischer aus zwei Gründen benötigt:

Erstens kann das Oszilloskop DS1102E, das zur Analyse des Frequenzspektrums des Signals verwendet wird, nur Frequenzen bis zu 100 MHz verarbeiten (Rigol Technologies Inc., 2008). Die zu erfassende Frequenz beträgt jedoch 1420,4 MHz. Deshalb wird die Frequenz des vom Vorverstärker kommenden Eingangssignals auf 10 MHz mittels eines Mixers herabgesetzt.

Zweitens lässt sich, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, nur eine begrenzt hohe stabile Verstärkung des von der Antenne kommenden Signals erreichen, ehe der Verstärker

aufgrund von Rückkopplungen zu schwingen beginnt. Um diese zu verhindern, kann ein Teil der erforderlichen Verstärkung des Signals mittels eines Vorverstärkers vor der Mischstufe, der restliche Teil der Verstärkung nach der Mischstufe bewirkt werden, sollte der Verstärker zu schwingen beginnen. Da das Signal vor und nach der Mischstufe unterschiedliche Frequenzen hat, besteht keine Gefahr einer Rückkopplung zwischen den Verstärkern vor und nach der Mischstufe (Kristen R., 1996)

5.3.1.2 Oszilloskop

Um die HI-Linie nachzuweisen, wird das Frequenzspektrum des von der Mischstufe kommenden Signals mit Hilfe eines digitalen Speicheroszilloskops untersucht. Das verwendete Oszilloskop DS1102E der Firma Rigol kann Frequenzen bis 100 MHz messen und verfügt über eine FFT-Funktion (Fast Fourier Transform) (Rigol Technologies Inc., 2008). Diese Funktion zerlegt das eingehende Signal mathematisch in seine Frequenzanteile (Rigol Technologies Inc., 2008, S. 44).

5.3.1.3 Test des ersten Aufbaus

Zur Erkennung von Fehlern im Versuchsaufbau werden die einzelnen Elemente des Aufbaus getrennt getestet. Da das verwendete Oszilloskop DS1102E der Firma Rigol nur Frequenzen bis 100 MHz messen kann (Rigol Technologies Inc., 2008, S. 161) muss zuerst die Mischstufe funktionieren, bevor mit weiteren Tests von Verstärker und Antenne fortgefahren werden kann.

Zum Test der Mischstufe wird ein weiterer Oszillator gleichen Typs wie der Lokaloszillator über ein Koaxialkabel an den RF-Eingang des Mischers angeschlossen. Enthält das IF-Signal das herabgesetzte RF-Signal, also die Differenzfrequenz aus dem LO- und dem RF-Signal, so funktioniert die Mischstufe. Die Frequenz des zweiten Oszillators ist, genauso wie beim Lokaloszillator, über einen Spannungsteiler einstellbar und kann zwischen 1400 MHz und 1500 MHz variabel gewählt werden (Raditek, 2012). Dadurch ist es möglich, die für neutralen Wasserstoff typische Frequenz von 1420.4 MHz zu erzeugen.

Das Ergebnis des Tests zeigt, dass die Mischstufe fehlerhaft ist. Das Anlegen der Betriebsspannung an die Oszillatoren verändert das IF-Signal nicht nachweislich. Dies kann mehrere Ursachen haben:

- Die laut Datenblatt des Mischers erforderlichen +10 dBm werden vom verwendeten Lokaloszillator mit einem Ausgangspegel von +3 dBm nicht erbracht. Das Signal des Lokaloszillators ist daher zu schwach.

- Einer der beiden Oszillatoren oder beide funktionieren nicht. Ohne LO- oder RF-Signal ergibt sich auch kein IF-Signal.
- Beim Lötten der Schaltung ist ein Fehler unterlaufen.

Um die Oszillatoren als Fehlerursache ausschließen zu können, wird an den RF-Ausgang des Lokaloszillators ein an die Frequenz von 1420 MHz angepasster $\lambda/2$ -Dipol angelötet. Damit bilden der Oszillator und die Antenne zusammen einen Sender. Die vom Sender emittierte Strahlung wird von einem DVB-T Empfänger des Typs RTL2832U empfangen und über das Programm SDRSharp als Frequenzspektrum dargestellt. Wenn der Lokaloszillator defekt ist, emittiert der Sender keine Strahlung, die vom DVB-T Empfänger empfangen werden könnte.

Das Ausgangssignal des Lokaloszillators enthält neben der erwünschten Frequenz auch verschiedene unerwünschte Frequenzen. Allerdings ist die gewollte Frequenz nicht konstant, sondern verschiebt sich im Verlauf der Zeit um einige 100 KHz. Aus diesem Grund ist dieser Oszillator nur eingeschränkt als Lokaloszillator für die Mischstufe einsetzbar. Wenn sich die Frequenz des LO-Signals laufend verändert, kann einer IF-Frequenz keine Frequenz des RF-Signals eindeutig zugeordnet werden.

Der aus dem zweiten Oszillator und dem Dipol aufgebaute Sender emittiert keine mit dem DVB-T Empfänger nachweisbare Strahlung. Der zu Testzwecken der Mischstufe verwendete Oszillator ist daher defekt. Da so nur ein funktionierender Oszillator zur Verfügung steht, ist es nicht möglich die Funktionsfähigkeit der Mischstufe zu überprüfen.

5.3.2 Zweiter Aufbau

Anstelle des Oszilloskops wird im zweiten Aufbau der DVB-T Empfänger RTL2832U mit der Software SDRSharp verwendet. Die Mischstufe wird bei diesem Aufbau nicht mehr benötigt, da der DVB-T Empfänger die Frequenz 1420 MHz der HI-Linie direkt messen kann (Superkuh.com, 2015).

5.3.2.1 RTL2832U

Als Spektrumanalysator wird der USB DVB-T Empfänger RTL2832U eingesetzt. In Verbindung mit der PC-Software SDRSharp kann er Frequenzen von 24 MHz bis 1760 MHz messen (Superkuh.com, 2015). Das Signal wird am Computer als Frequenzspektrum dargestellt. Neben den niedrigen Anschaffungskosten von rund 15 € und der hohen Bandbreite eignet sich der DVB-T Empfänger auch aufgrund des integrierten Verstärkers besonders gut für die Messung der HI-Linie. Zusätzlich zu den

40 dB Verstärkung der Leitungsverstärker wird das Signal im DVB-T Empfänger um weitere +49.6 dB verstärkt (Superkuh.com, 2015).

Bei der Verbindung der mit dem DVB-T Stick mitgelieferten Antenne mit den Leitungsverstärkern ergeben sich einige Probleme. Problematisch sind die unterschiedlichen Durchmesser des Antennenkabels des DVB-T Empfängers und des SAT-Kabels. Koaxialkabel bestehen aus einem Innenleiter, der durch eine metallische Außenhülle geschirmt ist (Wolff C., 2009, S. 6). Um die beiden Koaxialkabel miteinander zu verbinden, muss sowohl der Innenleiter als auch die Schirmung elektrisch leitend aneinandergesetzt werden. Damit das Signal ungehindert die Kabelverbindung passieren kann, darf sich die Impedanz der Leitung nicht ändern, da sonst Teile des Signals reflektiert werden (Wolff C., 2009, S. 4 ff.). Aus diesen Gründen wird zur Verbindung der beiden Kabel ein schraubbarer Koaxialkabelverbinder verwendet.

5.4 Vorbereitung des Radioteleskops

5.4.1 Ausrichtung des Hornstrahlers

Zur Ermittlung der optimalen Position des Hornstrahlers in der Parabolantenne wird der Lokaloszillator des ersten Aufbaus mit einem $\lambda/2$ -Dipol versehen. Er erfüllt somit die Funktion eines Testsenders (siehe Abbildung 19). Der Testsender wird in einigen Metern Entfernung vor die Parabolantenne platziert. Über ein 75Ω Koaxialkabel wird der Hornstrahler ohne vorgeschaltete Verstärker an den DVB-T Empfänger angeschlossen. Anschließend wird die Intensität der vom Sender empfangenen Strahlung gemessen, während das Horn in der Nähe des Brennpunkts verschoben wird. In der Position mit dem stärksten Empfang wird der Hornstrahler an der LNB-Halterung der Parabolantenne mit Holzwickeln angeklebt (siehe Abbildung 16).

5.4.3 Test des zweiten Aufbaus

Zum Test des zweiten Aufbaus wird - wie in Kapitel 5.4.1 - ein Testsender eingesetzt. Dieser wird in rund 30 m Entfernung vor den Versuchsaufbau platziert und in Betrieb genommen. Die Parabolantenne wird auf den Testsender ausgerichtet. Nach Inbetriebnahme der Verstärker steigt das Rauschen des Signals stark an. Daran lässt sich erkennen, dass die Verstärker funktionieren.

Das Signal des Senders lässt sich deutlich empfangen, wie anhand des Frequenzspektrums im Bild 20 zu sehen ist. Die Linien 1, 2, 3, 4, 5 und 6 der empfangenen Radiowellen heben sich dabei stark vom Rauschen ab.

Auch in 100 m Entfernung lässt sich der Sender gut empfangen. Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, zeigt sich das empfangene Signal als Linie 2 bei einer Frequenz von rund 1402 MHz.

Hiermit ist gezeigt, dass das Radioteleskop funktioniert.

5.5 Durchführung der Messung der HI-Linie

Die erste Messung findet mittags um zwölf Uhr statt. Um Störeinflüsse durch sonstige Strahlung in der Umgebung zu vermindern, wird die Messung außerhalb der Stadt auf dem Land durchgeführt. Bei der Durchführung der Messung wird die Parabolantenne auf verschiedene Regionen des Himmels gerichtet und das empfangene Signal am Computer aufgezeichnet.

Eine weitere Messung wird abends um neun Uhr bei Dunkelheit durchgeführt. Bei wolkenlosem Himmel und vollständiger Dunkelheit ist es möglich, die Milchstraße zu lokalisieren und die Parabolantenne gezielt darauf auszurichten. Dabei wird die Offset-Parabolantenne zum Problem. Die Parabolantenne kann nicht einfach orthogonal zur zu empfangenden Richtung ausgerichtet werden, da, wie in Kapitel 4.1.2 behandelt, das Empfängersystem bei Offsetparabolantennen seitlich verschoben ist. Deshalb werden nicht die senkrecht zur Parabolantenne einfallenden ebenen Wellen im Brennpunkt konzentriert, sondern leicht schräg einfallende Wellen, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist. Aus diesem Grund wird die Parabolantenne zunächst ungefähr auf die Milchstraße ausgerichtet und dann langsam geschwenkt, bis sich das Signal ändert. Die Messergebnisse werden als Screenshots exportiert.

6. Ergebnisse

6.1 Messung am Tag

Nach der Inbetriebnahme des Radioteleskops und der Ausrichtung der Parabolantenne auf den Himmel ohne genaue Kenntnisse der Lage von neutralem Wasserstoff im Weltall ergibt sich außer Rauschen kein Ausgangssignal, wie in Abbildung 22 zu erkennen ist.

Durch Änderung der Ausrichtung der Parabolantenne Richtung Süd-Westen ändert sich das Ausgangssignal. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, tritt eine Linie bei einer Frequenz von ungefähr 1420.4 MHz zum Vorschein (Linie 1). Unter Berücksichtigung

der Messungenauigkeit des DVB-T Empfängers entspricht dies genau der Frequenz der HI-Linie.

Diese Linie verschiebt sich jedoch mit der Zeit, wie in Abbildung 24 anhand der Linie 3 zu sehen ist. Das zu empfangende Signal der HI-Linie müsste hingegen konstant bei rund 1420 MHz zu finden sein, weshalb die Linie 1 aus Abbildung 23 nicht die HI-Linie sein kann. Zudem tritt eine ähnlich geartete Linie bei einer Frequenz von rund 1450 MHz auf. Auch diese verschiebt sich mit der Zeit.

Neben der Linie 1 in Abbildung 23 ist noch eine weitere, schmalere Linie 2 zu erkennen. Diese Linie erscheint bei allen Messungen bei ungefähr der gleichen Frequenz und ist immer gleich hoch, außer sie wird wie in Abbildung 22 durch Rauschen verdeckt. Vermutlich wird diese Linie daher durch einen Fehler bei der Signalanalyse vom DVB-T Stick oder der Software SDRSharp hervorgerufen. Dieser Linie wird deshalb nicht weiter beachtet.

Dreht man die Parabolantenne weiter in eine andere Richtung, ist das Rauschen nicht mehr in allen Frequenzbereichen gleich stark. Im Gegensatz zum Rauschen aus Abbildung 22 zeichnen sich in Abbildung 25 Frequenzbereiche mit schwächerem und stärkerem Rauschen ab. Wodurch die Bereiche mit verstärktem Rauschen zustande kommen, kann in dieser Arbeit nicht geklärt werden.

Ein weiteres unerwartetes Ergebnis ist die Form des Frequenzspektrums, die sich in Abbildung 24 bei der Zahl 4 einstellt. Dabei tritt in gleichen Frequenzabständen periodisch ein Signal auf.

6.2 Messung in der Nacht

Richtet man die Parabolantenne nicht auf die Milchstraße lässt sich nur Rauschen messen. Schwenkt man die Parabolantenne in Richtung der Milchstraße, bildet sich, wie in Abbildung 25 bei der Messung um 12 Uhr, ein „Berg“. Dieser Berg lässt sich nach links und nach rechts verschieben, indem man die Ausrichtung der Parabolantenne geringfügig ändert. Die Verschiebung des Bergs während der Bewegung der Parabolantenne ist in Abbildung 26 an der blauen Linie 2 sichtbar. Die Linie 2 stellt dabei den zeitlichen Frequenzverlauf des Bergs da. Wieso sich der Bereich mit dem stärkeren Rauschen durch Neigung der Parabolantenne verschieben lässt, kann nicht im Rahmen dieser Arbeit geklärt werden.

Durch Änderung des Samplingmodus von „Quadrature sampling“ auf „Direct Sampling (I branch)“ im Programm SDRSharp ändert sich das Aussehen des Frequenzspektrums.

Bei rund 1420,4 MHz erscheint ein schwaches, breitbandiges Signal (siehe Abbildung 27, Zahl 3). Richtet man die Parabolantenne nicht mehr auf die Milchstraße, verschwindet das Signal 3, im Gegensatz zu den anderen Linien 1, 2, 4, 5 und 6 fast vollständig (siehe Abbildung 28, Zahl 3). Wodurch die Linien 1, 2, 4, 5 und 6 zustande kommen ist unklar.

Da die Frequenz des Signals 3 in Abbildung 27 mit der Frequenz der HI-Linie übereinstimmt und sie sich, im Gegensatz zur Linie aus Abbildung 23, nicht mit der Zeit verschiebt, handelt es sich dabei möglicherweise um die HI-Linie. Hinzu kommt, dass das Signal nur bei Ausrichtung der Parabolantenne auf die Milchstraße auftritt. Da die Milchstraße eine stärkere Strahlungsquelle als der Rest des Himmels darstellt (siehe Abbildung 1), stimmt das Messergebnis mit den Erwartungen überein.

Gegen die Vermutung, dass es sich bei der gemessenen Linie 3 in Abbildung 27 um die HI-Linie handelt spricht die Messung eines ähnlichen Signals bei einer Frequenz von rund 1431MHz (siehe Abbildung 29, Zahl 3).

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass es mit einer einfachen, handelsüblichen 95 cm Parabolantenne und günstig zu erwerbenden elektrotechnischen Bauteilen möglich ist, einen selbstgebauten Sender aus 100 m zu empfangen, der auf einer Frequenz von 1402 MHz und 1420 MHz sendet. Um jedoch extraterrestrische Radiowellen nachweislich zu empfangen, ist ein empfindlicherer Aufbau erforderlich. Zur Verbesserung des bestehenden Aufbaus könnte eine Antenne mit höherem Antennengewinn zum Einsatz kommen. Gleichmaßen würden rauschärmere Verstärker, insbesondere ein rauschärmerer Vorverstärker als erste Verstärkerstufe die Signalqualität verbessern. Bessere Verstärker würden jedoch den Kostenrahmen dieses Projekts sprengen oder zu lange Zeit zur Lieferung benötigen.

Nachdem der erste Versuchsaufbau aufgrund eines defekten Oszillators gescheitert ist und wahrscheinlich auch mit funktionierendem Oszillator aufgrund der mangelnden Verstärkung des Signals gescheitert wäre, vereinfacht der DVB-T Empfänger RTL2832U durch seinen integrierten Verstärker, die Möglichkeit die Frequenz von 1420 MHz ohne Mischer zu messen in Verbindung mit der Software SDRSharp den Versuchsaufbau erheblich.

8. Anhang



Abb. 16: Die verwendete Parabolantenne mit Hornstrahler und erstem Verstärker

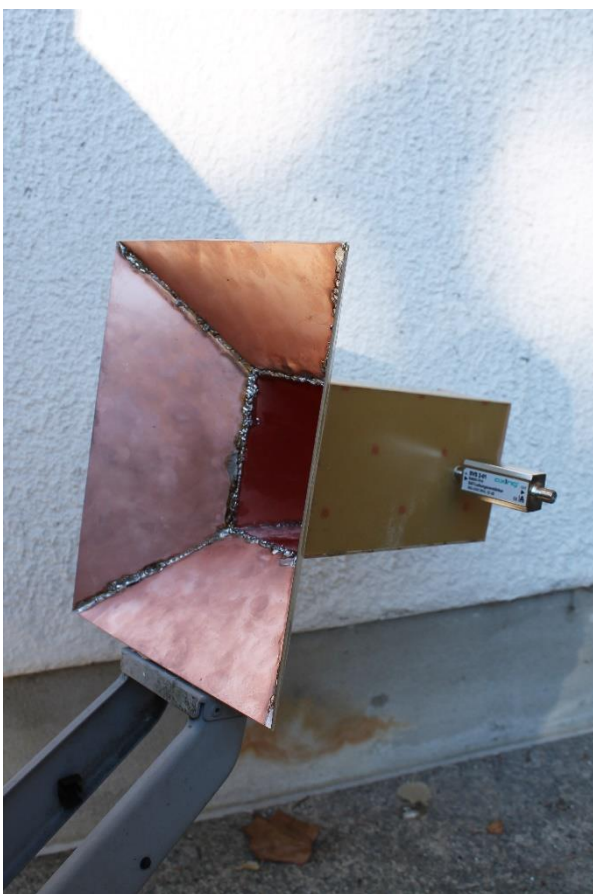


Abb. 17: Der verwendete Hornstrahler

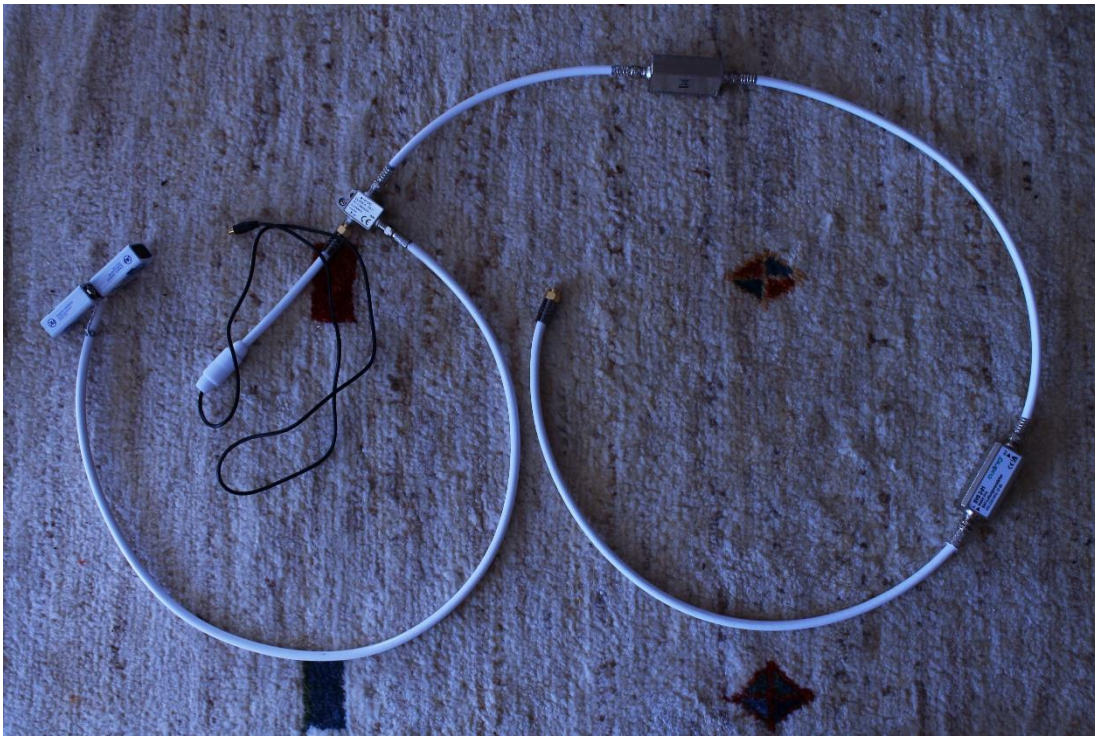


Abb. 18: Zweiter und dritter Verstärker mit Stromeinspeisung, Stromquelle (Batterien) und Adapter vom SAT-Koaxialkabel (weißes Kabel) auf das Antennenkabel des DVB-T Empfängers (schwarzes Kabel)

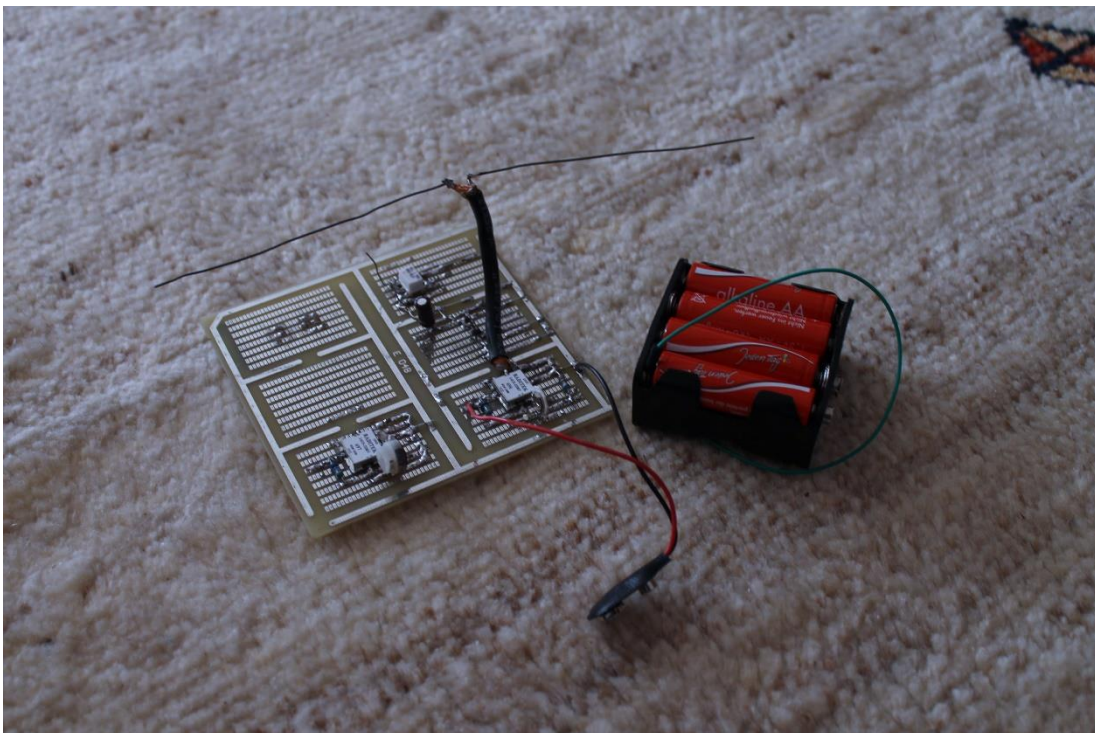


Abb. 19: Testsender mit Stromversorgung

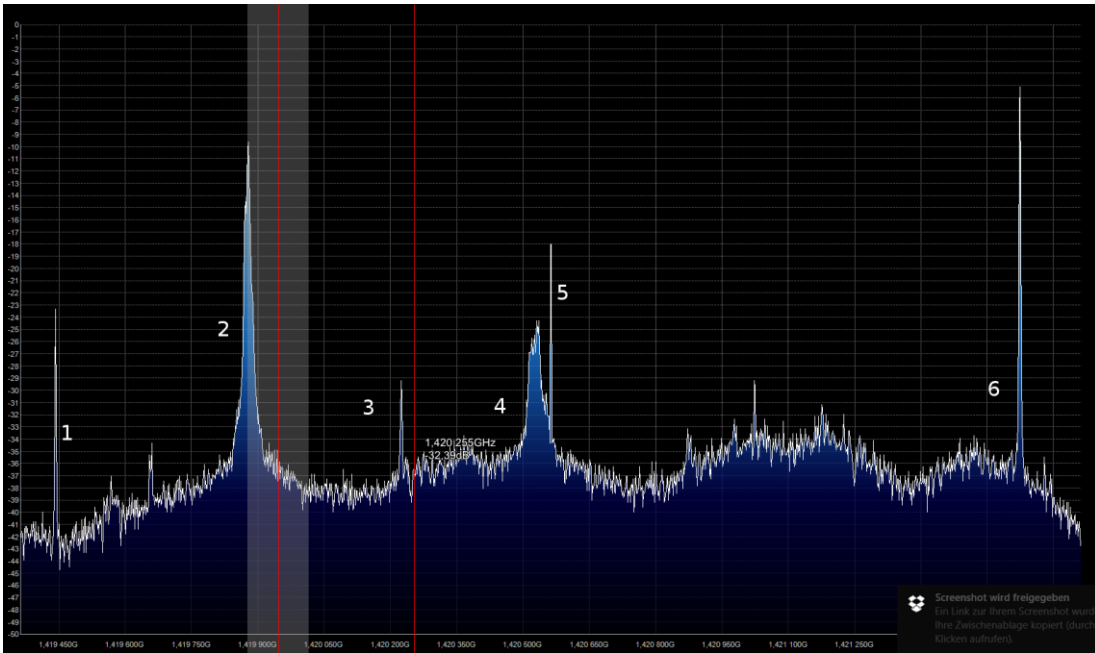


Abb. 20: Frequenzspektrum bei 1420MHz des vom Sender empfangenen Signals (30m Entfernung zum Sender)

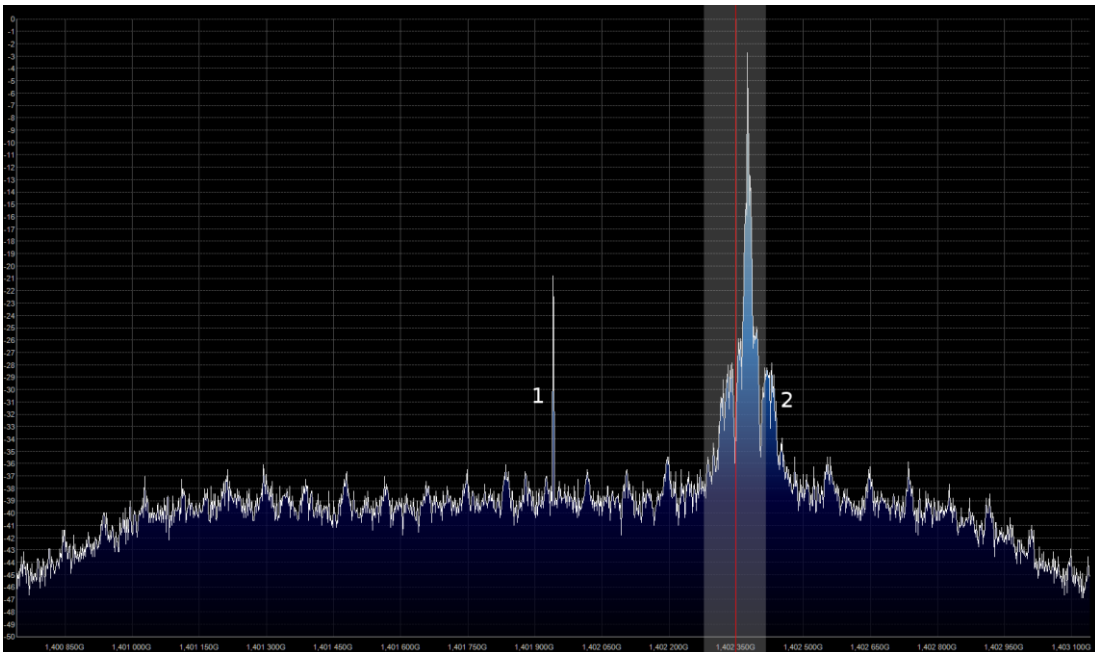


Abb. 21: Frequenzspektrum bei 1402MHz des vom Sender empfangenen Signals (100m Entfernung zum Sender)

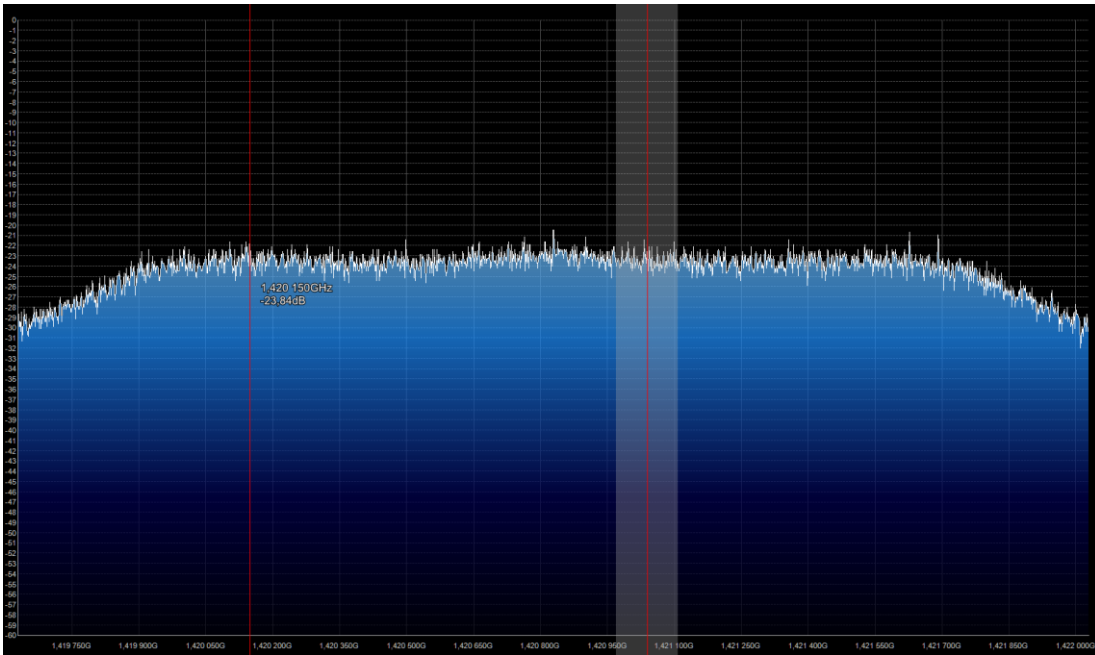


Abb. 22: Frequenzspektrum bei 1420MHz mit Ausrichtung der Parabolantenne in eine Richtung ohne Signal (12Uhr)

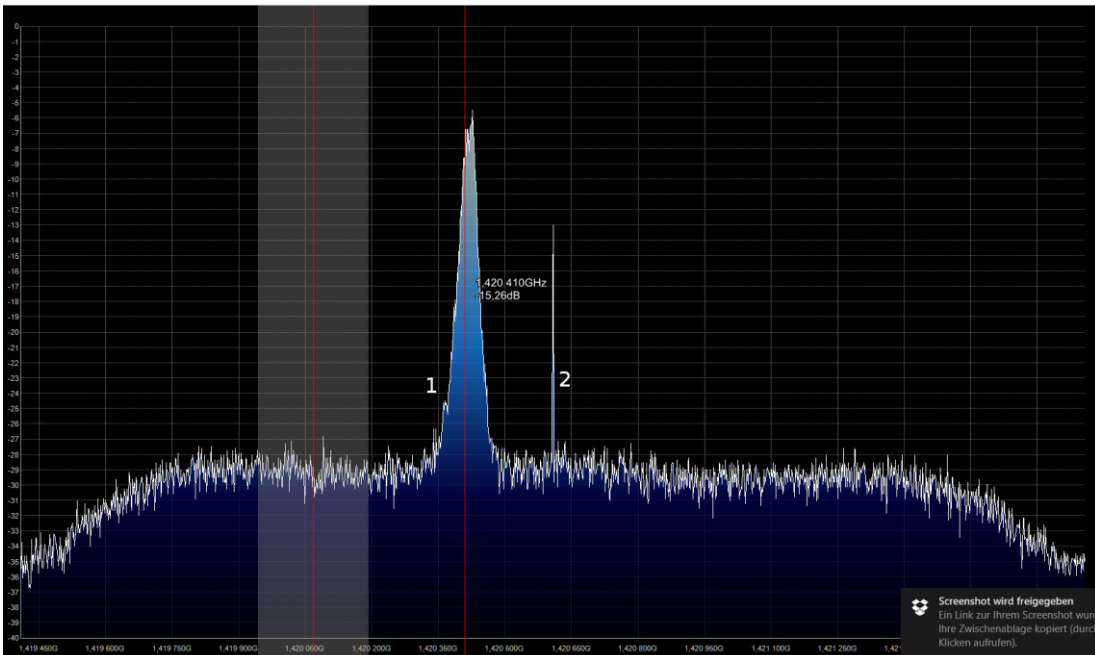


Abb. 23: Frequenzspektrum bei 1420MHz mit einer Linie bei 1420,45MHz (12Uhr)

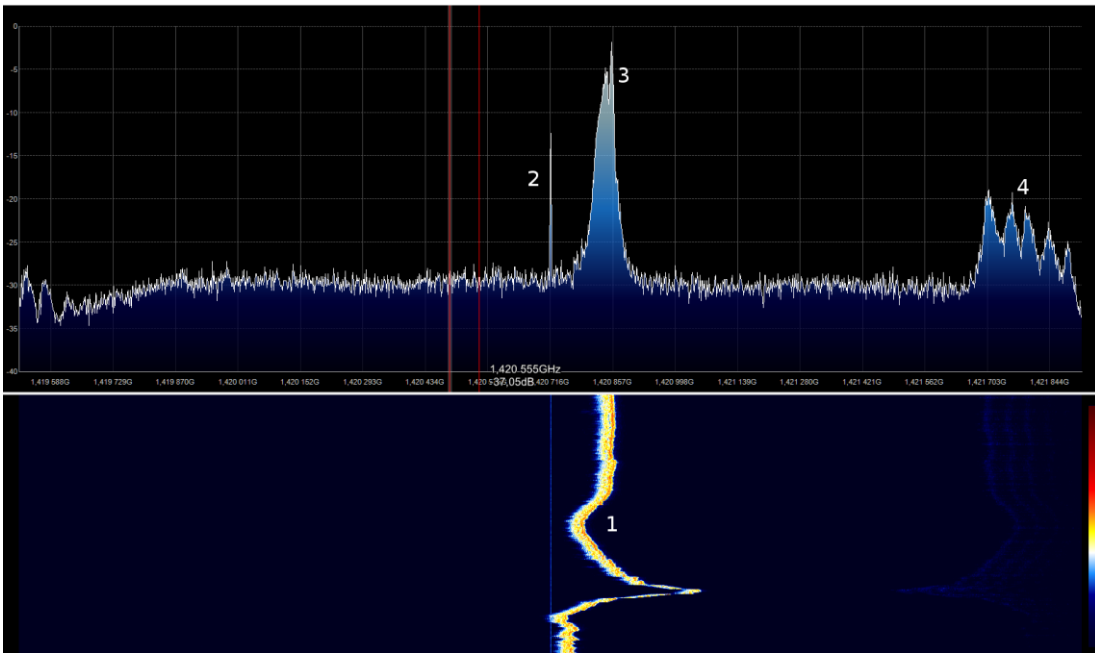


Abb. 24. Verschiebung der Linie 1 aus Abbildung 23 (12Uhr)

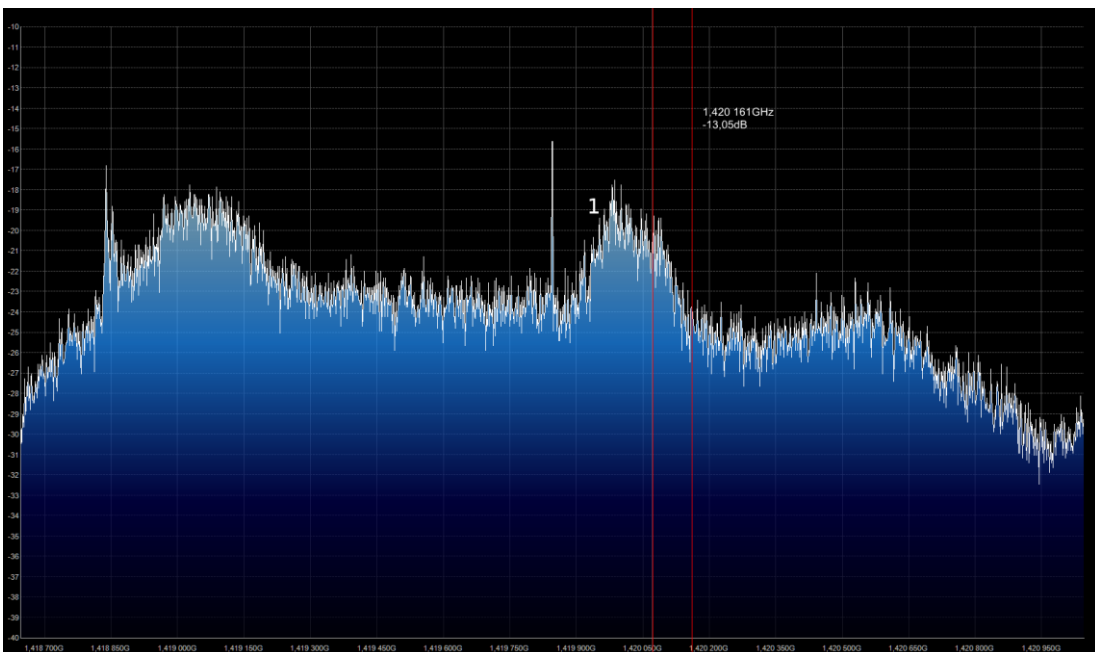


Abb. 25: Frequenzspektrum mit „Bergen“ bei 1420MHz (12Uhr)

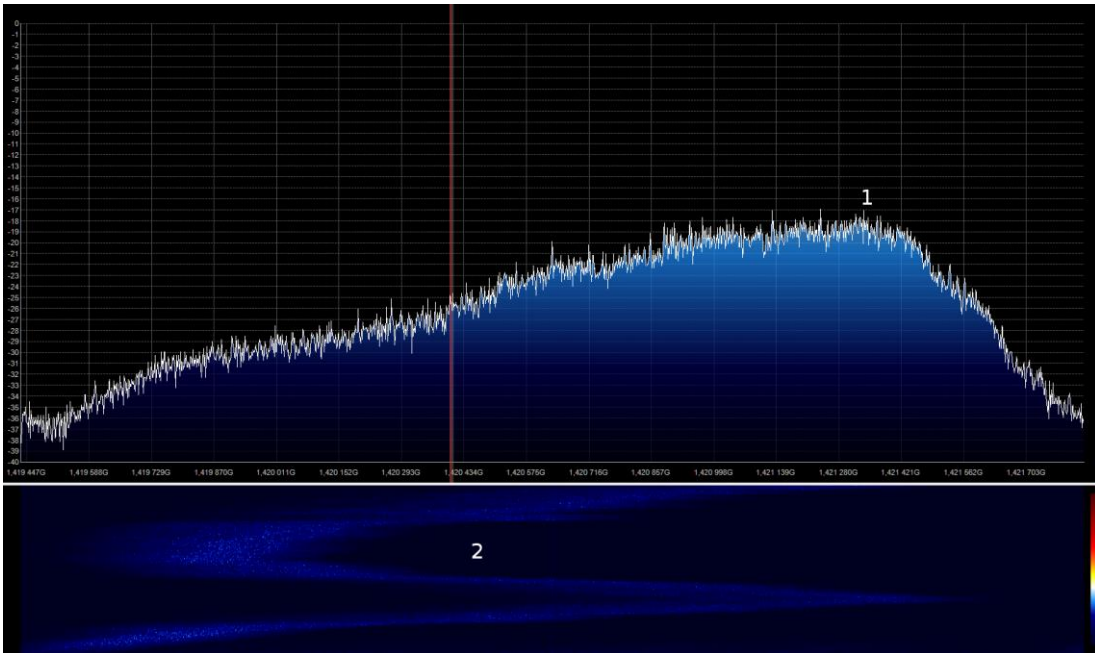


Abb. 26: Frequenzspektrum bei 1420MHz mit Ausrichtung der Parabolantenne auf die Milchstraße. Samplingmodus „Quadrature sampling“ (21Uhr)

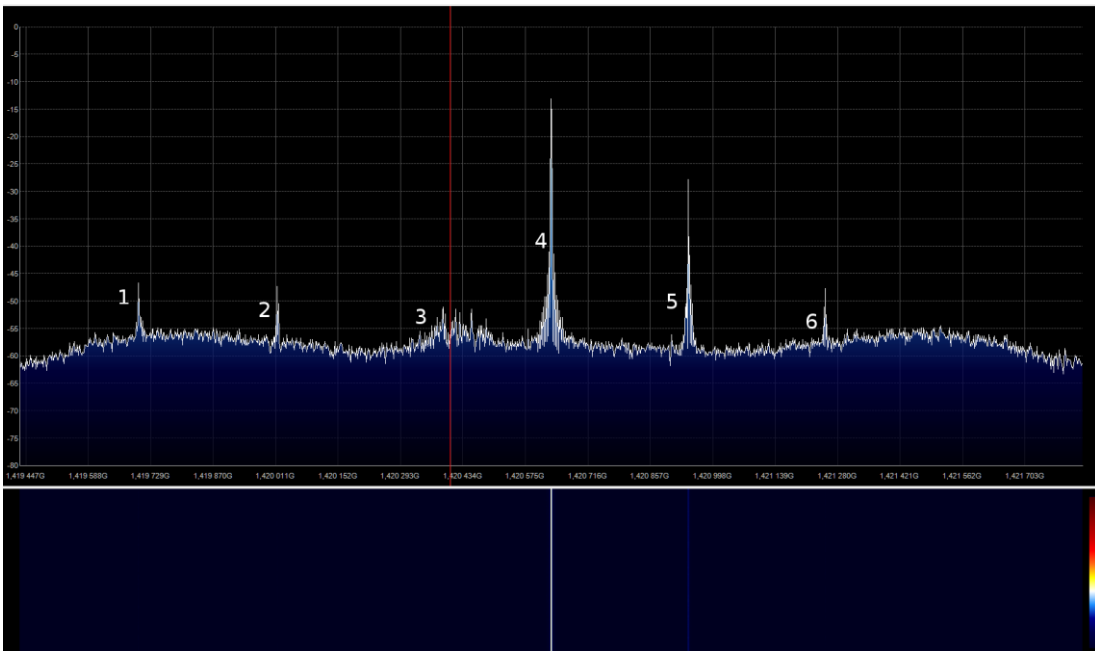


Abb. 27: Frequenzspektrum bei 1420MHz mit Ausrichtung der Parabolantenne auf die Milchstraße. Samplingmodus „Direct Sampling (l branch)“ (21Uhr)

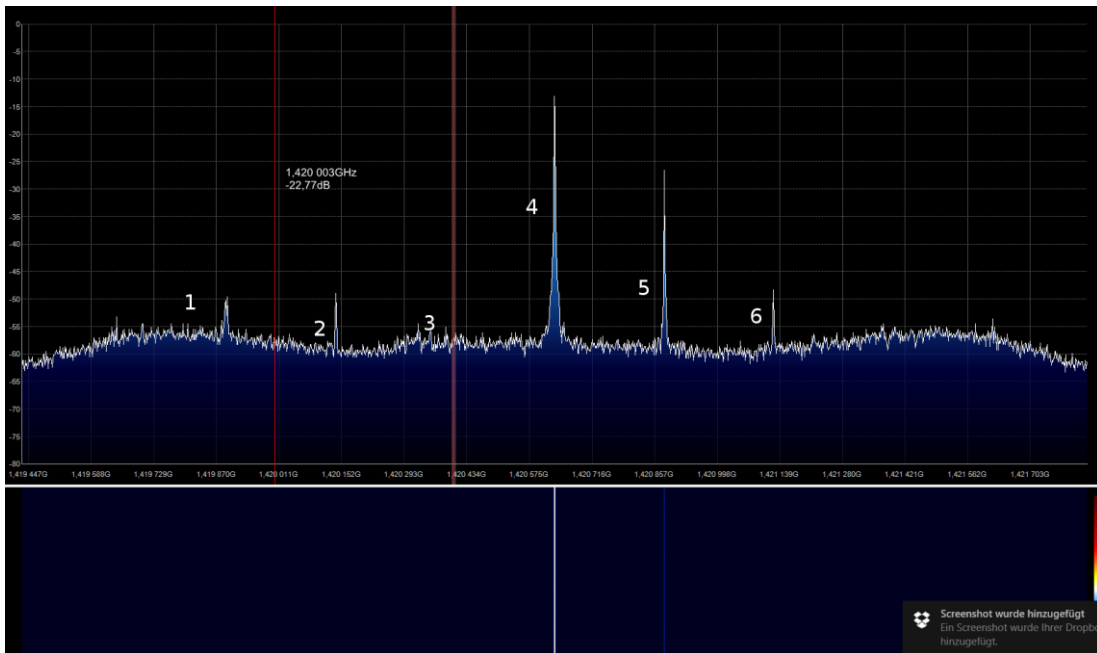


Abb. 28: Frequenzspektrum bei 1420MHz ohne Ausrichtung der Parabolantenne auf die Milchstraße. Samplingmodus „Direct Sampling (I branch)“ (21Uhr)

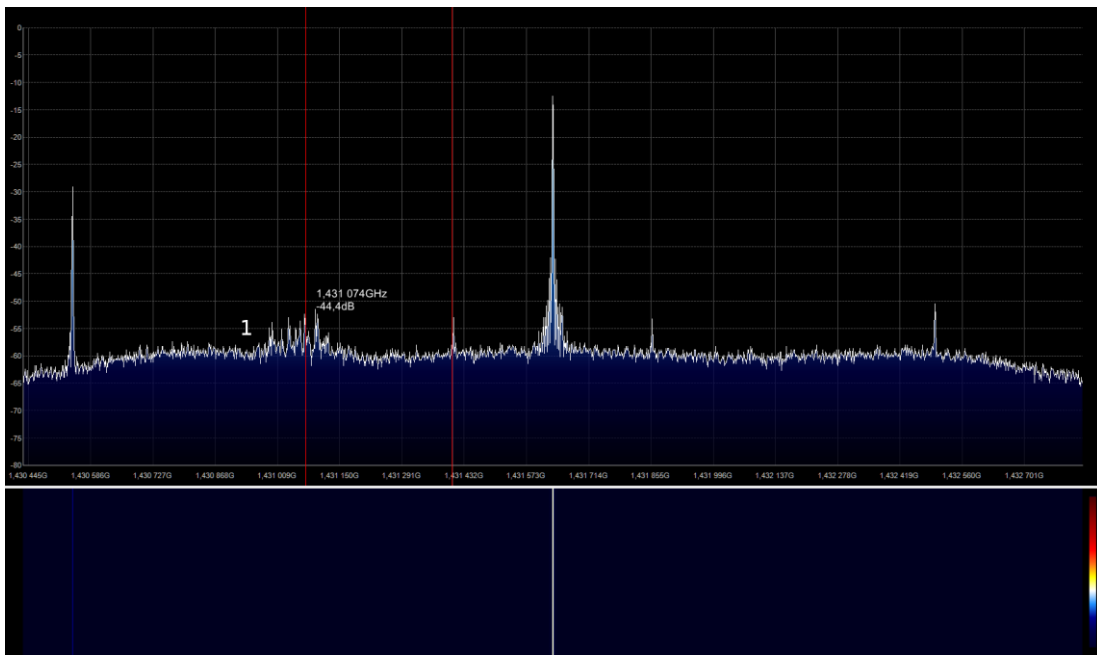


Abb. 29: Frequenzspektrum bei 1431MHz mit Ausrichtung der Parabolantenne auf die Milchstraße. Samplingmodus „Direct Sampling (I branch)“ (21Uhr)

Danksagung

Besonderer Dank geht an Herrn Christof Ermer, Lehrstuhl Lupton an der Universität Regensburg für die hilfreiche Unterstützung bei der Auswahl der Bauteile für den zweiten Versuchsaufbau, sowie zahlreiche Ratschläge.

9. Literaturverzeichnis

Axing (2009). *Betriebsanleitung basic-line Inline-Verstärker*. Verfügbar unter http://files.elv.de/Assets/Produkte/7/777/77729/Downloads/77729_Verstaerker_um.pdf [04.11.2015].

Baudis, L. (2007). *Interstellare Materie und Sternentstehung*. Physikalisches Institut Ib, RWTH Aachen. Verfügbar unter http://www.physik.unizh.ch/~lbaudis/astro-ph0607/lecture11_180107.pdf [04.11.2015].

Beuth, K. (2009). *Nachrichtentechnik*. Würzburg: Vogel.

Hufschmid, M. (2008). *Mischer*. Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Technik. Verfügbar unter <http://www.informationsuebertragung.ch/Extras/Mischer.pdf> [04.11.2015].

Kalberla, P.; Burton, W.; Hartmann, D.; Arnal, E.; Bajaja, E.; Morras, R. & Pöppel, W. (2005). *Final data release of the LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections*. Verfügbar unter <http://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0504/0504140.pdf> [04.11.2015].

Kalberla, P. (2009). *Unsere Milchstraße im Licht der 21-cm Line Ein Hands-On Projekt*. Verfügbar unter https://www.astro.uni-bonn.de/hisurvey/euhou/ar_111.pdf [22.03.2015].

Kiehlmann, S. (2011). *Interstellare Materie*. Georg-August-Universität Göttingen. Verfügbar unter <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7283> [04.11.2015].

Kristen, R. (1996). *Tools of Radio Astronomy*. Berlin: Springer-Verlag.

Leech, M. (2013). *A 21cm Radio Telescope for the Cost-Conscious*. Science Radio Laboratories, Inc. Verfügbar unter http://www.sbrac.org/files/budget_radio_telescope.pdf [04.11.2015].

Mini-Circuits (2013). *Frequency Mixer RMS-5LH*. Verfügbar unter http://www.mcl-yokohama.co.jp/webdata/RMS-5LH_SPEC.pdf [04.11.2015].

Mohr, F. (2011). *Messtechnik 2*. Verfügbar unter <http://eitidaten.fh-pforzheim.de/daten/mitarbeiter/mohr/materialien/MT2/MES-Kap10.pdf> [04.11.2015].

Nave, R. (2004). *The Hydrogen 21-cm Line*. HyperPhysics. Verfügbar unter <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/h21.html> [04.11.2015].

Petermann, K. & Bunge, C. (2012). *Hochfrequenztechnik II*. Technische Universität Berlin. Verfügbar unter https://www.hft.tu-berlin.de/fileadmin/fg154/HFT/Skript/HFTII/Skript_HFT_II_gesamt.pdf [04.11.2015].

Raditek Inc. (2012). *Voltage Controlled Oscillator, 1400-1500MHz 3dBm Power Output, 8Volts, Surface Mount*. Verfügbar unter http://www.rfbayinc.com/upload/files/data_sheet/rvco-1400-1500m-3d-8v-s-y10.pdf [04.11.2015].

Rigol Technologies Inc. (2008). *User's Guide DS1000E, DS1000D Series Digital Oscilloscopes*. Verfügbar unter http://www.colorado.edu/physics/phys4430/phys4430_fa15/manuals_and_datasheets/Rigol_DS1052E_Oscilloscope_Manual.PDF [04.11.2015].

Rohde&Schwarz (2003). *Bessere Systemempfindlichkeit durch Vorverstärker*. Verfügbar unter http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/178/n178_esib_de.pdf [04.11.2015].

Spektrum Akademischer Verlag (1998). *Ebene Welle*. Verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/ebene-welle/3596> [04.11.2015].

Spektrum Akademischer Verlag (2000). *Bandpaßfilter*. Verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bandpassfilter/1382> [04.11.2015].

Superkuh.com (2015) *RTL-SDR and GNU Radio with Realtek RTL2832U [Elonics E4000/Raphael Micro R820T] software defined receivers*. Verfügbar unter <http://superkuh.com/rtlsdr.html> [04.11.2015].

Technische Universität Hamburg-Harburg (2011). *Versuch Nr. 722 Richtantennen*. Verfügbar unter https://www.tuhh.de/et3/students/Skripte_ss/V722.pdf [04.11.2015].

Technische Universität Karlsruhe (TH) Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (2009). *Versuch Nr. 5: Antennen und Antennenmesstechnik: Hornstrahler, Patchantennen und Arrays*. Verfügbar unter <http://www.ihe.kit.edu/img/studium/V5.pdf> [04.11.2015].

Wikipedia (2006). Uplink3 [Online Bild]. Verfügbar unter <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Uplink3.png> [04.11.2015].

Wiesbeck, W. (2005). *Antennen und Antennensysteme*. Universität Karlsruhe (TH) Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik. Verfügbar unter <http://download.prgm.org/ham/ant/wiesbeck-aas-05skript.pdf> [04.11.2015].

Wolff, C. (2009). *Leitungstechnik*. Radartutorial.eu. Verfügbar unter <http://www.radartutorial.eu/druck/Leitungstechnik.pdf> [04.11.2015].

Wünsch, S. (2005). *Supraleitende koplanare Mikrowellenfilter für radioastronomische Empfänger bei 15K*. Verfügbar unter www.ksp.kit.edu/download/1000003395 [04.11.2015].

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.