

S E M I N A R A R B E I T

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

*Die Erforschung des Weltalls*Leitfach: *Physik (Astrophysik)*

Thema der Arbeit:

Die Strahlung von elementarem Wasserstoff auf einer Wellenlänge von 21cm

Verfasser/in: Hannes Gebauer

Kursleiter/in: Herr Koch

Abgabetermin:
(2. Unterrichtstag im November)

8. November 2023

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe:					
Gesamtleistung nach § 61 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

Datum und Unterschrift der Kursleiterin bzw. des Kursleiters

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Die Entstehung der Wasserstofflinie.....	1
2.1 Der Spin.....	1
2.2 Die Bedeutung des Spins für die Entstehung der Wasserstofflinie.....	2
2.3 Die Berechnung der Frequenz sowie der Wellenlänge des emittierten Photons.....	4
3 Bedeutung der Wasserstofflinie für die Wissenschaft.....	5
3.1 Entfernungs- und Geschwindigkeitsbestimmungen mit Hilfe des Doppler-Effekts.....	5
4 Praktischer Nachweis der Wasserstofflinie mit Hilfe von selbstgebaute Messtechnik.....	6
4.1 Aufbau der Antenne.....	6
4.2 Messgenauigkeit der Antenne.....	11
4.3 Langzeitmessung.....	13
5 Allgemeines Fazit.....	15
6 Literaturverzeichnis.....	16
7 Abbildungsverzeichnis.....	16

1 Einleitung

Da es das Ziel dieser Arbeit ist, aktuelle Forschungsthemen aus den Bereichen Astronomie, Astrophysik und Kosmologie zu behandeln, fiel meine Wahl bei der Recherche nach einem aktuellen Forschungsthema relativ schnell auf die Wasserstofflinie. Obwohl diese außerhalb des sichtbaren Spektrums liegende Frequenz bereits vor über 70 Jahren nachgewiesen wurde, ist sie aus mehreren in dieser Arbeit erläuterten Gründen auch heute noch ein wichtiger Bestandteil der Radioteleskopie und leistet einen wertvollen Beitrag bei der Erforschung des Weltraums. Ziel dieser Arbeit ist es, die Entstehung der Linie und deren Nutzen zu erläutern, sowie der Frage nachzugehen, wie schwer es als Amateur ist, diese Linie auch mit eingeschränkten Mitteln nachzuweisen und zu erforschen.

2 Die Entstehung der Wasserstofflinie

Die Existenz der Wasserstofflinie wurde bereits im Jahr 1944 von Hendrik Christoffel van de Lust berechnet [vgl. 1, S. 297] und anschließend von zwei unabhängig voneinander arbeitenden Gruppen geleitet von E. M. Purcell und F. J. Kerr im Jahr 1951 im Abstand von 7 Wochen voneinander erstmals praktisch nachgewiesen [vgl. 1, S. 325]. Die Entstehung dieser besonderen Frequenz beruht auf einem quantenmechanischen Aspekt, der im Folgenden genauer erläutert wird.

2.1 Der Spin

Um die Entstehung der Linie zu verstehen, muss zunächst der Spin von Teilchen veranschaulicht werden, welcher erstmals im Jahr 1925 zunächst bei Elektronen und später auch bei anderen Teilchen entdeckt wurde. Da eine ausführliche Erklärung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird hier angenommen, dass es sich hierbei um den Eigendrehimpuls von Teilchen handelt. Dieser Drehimpuls kann seine Richtung aber nicht seinen Betrag, also vereinfacht angenommen seine Geschwindigkeit, ändern. Dieser Spin wird hierbei mit der Spinquantenzahl $S=1/2$ oder $S=-1/2$ angegeben [vgl. 2, S. 249-255].

2.2 Die Bedeutung des Spins für die Entstehung der Wasserstofflinie

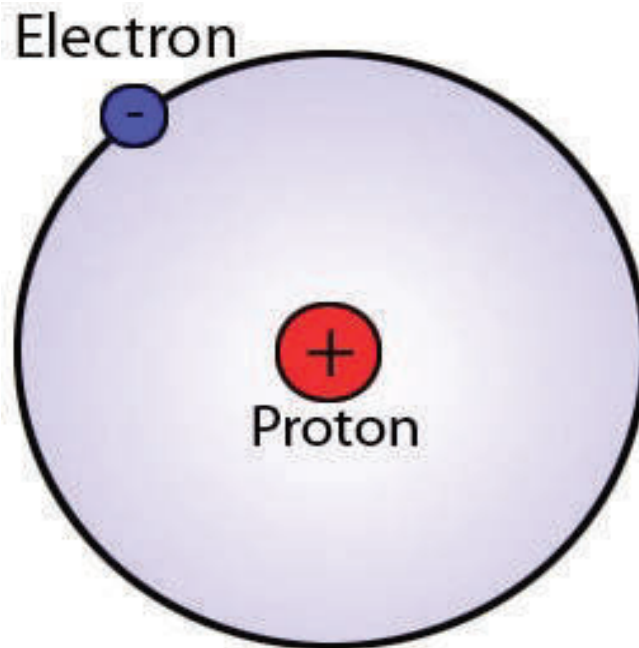
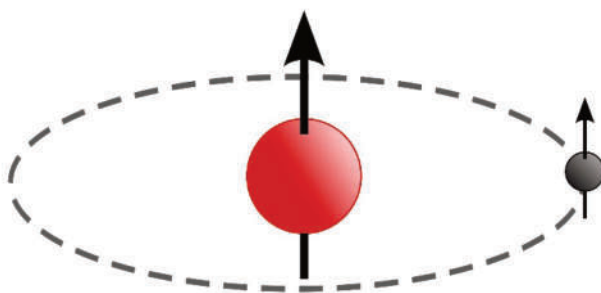


Abbildung 1: Wasserstoffatom mit Elektron und Proton

Wie in der obigen Abbildung zu sehen, besitzt ein neutrales Wasserstoffatom ein Elektron sowie ein Proton. Beide Teilchen besitzen den oben bereits erläuterten Spin. Für die Entstehung der Wasserstofflinie ist nun wichtig, ob Proton und Elektron einen Parallelen- oder Antiparallelen Spin zueinander besitzen. Der Spin wird in den folgenden Abbildungen 2 und 3 durch den aus dem jeweiligen Teilchen kommenden Pfeil dargestellt.



In dieser Abbildung ist der parallele Spin von Proton und Elektron eines neutralen Wasserstoffatoms mit Hilfe der Pfeile dargestellt.

Abbildung 2: Wasserstoffatom im parallelen Zustand

In dieser Abbildung ist der Antiparallele Spin von Proton und Elektron eines neutralen Wasserstoffatoms zu sehen

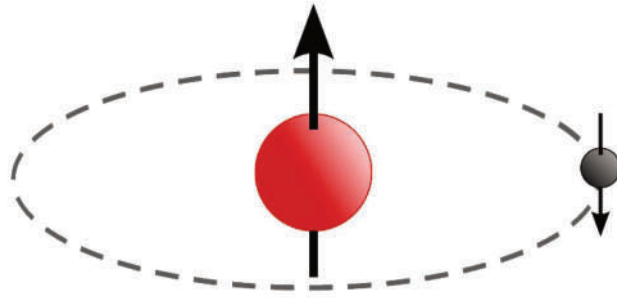


Abbildung 3: Wasserstoffatom im antiparallelen Zustand

Der nun entscheidende Unterschied zwischen dem parallelen und antiparallelen Spin der Teilchen ist, dass sich das Atom mit dem parallelen Spin in einem vereinfacht gesagt „angeregtem“ Zustand befindet. Dies bedeutet, dass die im Atom gespeicherte Energie höher ist als die eines Atoms mit antiparallelem Spin [vgl. 3, S. 1-2].

Die Genaue Energiedifferenz beider Zustände beträgt:

$$\Delta E_{f=1} - \Delta E_{f=0} = 5,83537504 \cdot 10^{-6} eV \text{ [vgl. 4, S. 1]}$$

Wie bei der Erläuterung des Teilchenspins bereits beschrieben, kann sich die Ausrichtung, also vereinfacht angenommen die Rotationsrichtung des Spins, ändern. Somit ist es möglich ein Wasserstoffatom durch Energiezufuhr in den angeregten parallelen Zustand zu versetzen. Dieser Vorgang kann beispielsweise bei der Kollision des Atoms mit anderen Atomen ausgelöst werden.

Da dieser angeregte Zustand aber nicht so stabil wie der antiparallele Grundzustand ist, fällt das Atom irgendwann in diesen zurück. Mithilfe der Einsteinkoeffizienten lässt sich die Zeitdauer vorhersagen, nach der das Atom mit einer großen Wahrscheinlichkeit in den Grundzustand zurückfällt. Im Falle von Wasserstoff mit parallelem Spin benötigt dieses Atom ca. 11.000.000 Jahre, bis es in den Grundzustand zurückfällt. Bei diesem Vorgang wird die zusätzliche in dem Atom gespeicherte Energie in Form eines Photons wieder abgegeben [vgl. 5, S. 1].

2.3 Die Berechnung der Frequenz sowie der Wellenlänge des emittierten Photons

Die Frequenz dieses Photons lässt sich nun mit Hilfe der Formel der Planck-Einstein-Relation berechnen:

$$E = h \cdot f \text{ [vgl. 6, S. 2]}$$

Durch Auflösen nach f erhält man:

$$f = \frac{E}{h}$$

Setzt man nun die Werte für die Energie in Joule und für das plancksche Wirkungsquantum ein, erhält man:

$$f = \frac{9,41171 \cdot 10^{-6} J}{h}$$

$$f = 1420427514 Hz$$

Dies entspricht gerundet in etwa so viel wie **1420 MHz**.

Um daraus nun die Wellenlänge zu berechnen, wird folgende Formel genutzt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Hierbei steht c für die Lichtgeschwindigkeit. Wird nun die berechnete Frequenz in die Formel eingesetzt, ergibt sich:

$$\lambda = \frac{c}{1420427514 Hz}$$

$$\lambda = 0,2110579069m \approx 21,1cm$$

Dieser Wert entspricht einer ungefähren Wellenlänge von 21cm. Dies ist der Grund, warum die Wasserstofflinie auch 21cm-Linie genannt wird.

3 Bedeutung der Wasserstofflinie für die Wissenschaft

Da das sichtbare von Sternen ausgesandte Licht gestreut bzw. absorbiert wird, ist dieser Frequenzbereich für viele Forschungsbereiche ungeeignet. Da die Strahlung von elementarem Wasserstoff auf einer Frequenz von 1420MHz Materie fast ungedämpft durchdringen kann, bietet sie einen großen Vorteil im Vergleich zu sichtbarem Licht. Ein weiterer Vorteil ist, dass Wasserstoff ca. 90% der bekannten im All vorhandenen Materie ausmacht. Dies bedeutet, dass die Erde im Prinzip von Wasserstoff umgeben ist und somit Messungen in jede Richtung möglich sind.

Die Intensität der gemessenen Strahlung aus einer Richtung gibt hierbei Aufschluss über die Menge des in der Richtung vorhandenen Wasserstoffes. Auf diese Weise wurde beispielsweise der Aufbau der Milchstraße gemessen und diese kartografiert. Doch nicht nur die vorhandene Menge von Wasserstoff kann mit Hilfe der Wasserstofflinie berechnet werden [vgl. 5, S. 1].

3.1 Entfernungs- und Geschwindigkeitsbestimmungen mit Hilfe des Doppler-Effekts

Durch den Doppler-Effekt verändert sich die Frequenz, je nachdem in welche Richtung sich ein Atom vom Empfangspunkt aus bewegt. Mit Hilfe dieses Prinzips lässt sich unter anderem die Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße berechnen [vgl. 5, S. 3-5]. Des Weiteren ist es beispielsweise möglich, die Expansionsgeschwindigkeit des Universums zu messen, sowie die Bewegung verschiedener Objekte relativ zur Erde [vgl. 5, S. 2-3].

4 Praktischer Nachweis der Wasserstofflinie mit Hilfe von selbstgebauter Messtechnik

4.1 Aufbau der Antenne

Da die eigentliche Forschungsfrage dieser Arbeit das Thema behandelt, ob es für einen Amateur mit wenigen Mitteln möglich ist, die Wasserstofflinie nachzuweisen, wurde in diesem Teil der Arbeit dieser Frage nachgegangen und entsprechende Messtechnik gebaut. Die Kosten für das Projekt belaufen sich auf ca. 100€ und es wurden folgende Komponenten verwendet:

- RTL-SDR RTL2832U DVB-T Tuner (Abbildung 4)
- RTL-SDR Blog Wideband Low-Noise-Amplifier (Abbildung 4)
- RG316 Male SMA to Male SMA cable (Abbildung 4)
- Female SMA Connector
- 20cm x 30cm Aluminium Platte
- Kupferdraht (Ø2mm)



*Abbildung 4: Oben: LNA Mitte: RTL2832U
Unten: RG316 Kabel*

Aufgrund des einfachen Aufbaus und der geringen Störstrahlung hat sich der Bau einer Biquad-Antenne, wie in Abbildung 5 zu sehen, angeboten.

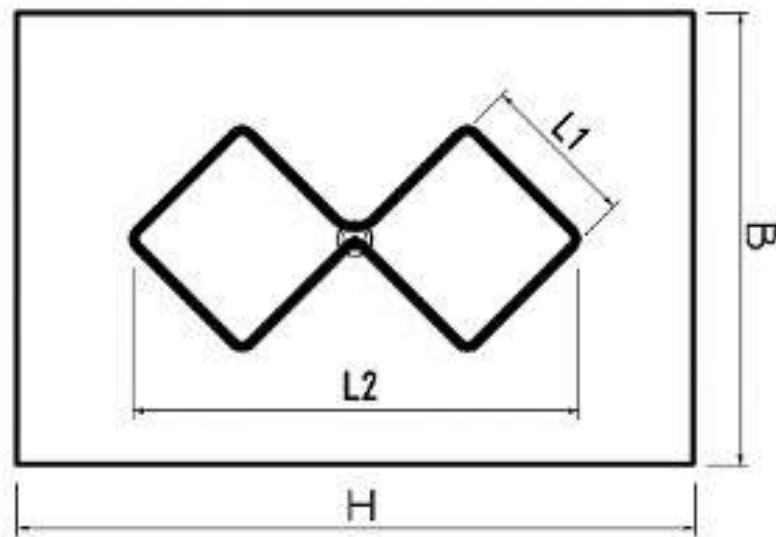


Abbildung 5: Skizze einer Biquad Antenne

Eine solche Antenne besteht aus zwei Quadraten, die in einem bestimmten Abstand vor einen Reflektor gebaut ist. Durch diesen Reflektor wird ein stärkerer und deutlich gerichteter Empfang ermöglicht. Mithilfe eines Web-Tools (https://www.changpuak.ch/electronics/bi_quad_antenna_designer.php) liessen sich die benötigten Maße berechnen und ein einfacher Plan skizzieren. Anschließend wurde die Antenne aus 2mm dickem Kupferdraht entsprechend der Maße wie in der Abbildung 6 zu sehen gebogen.

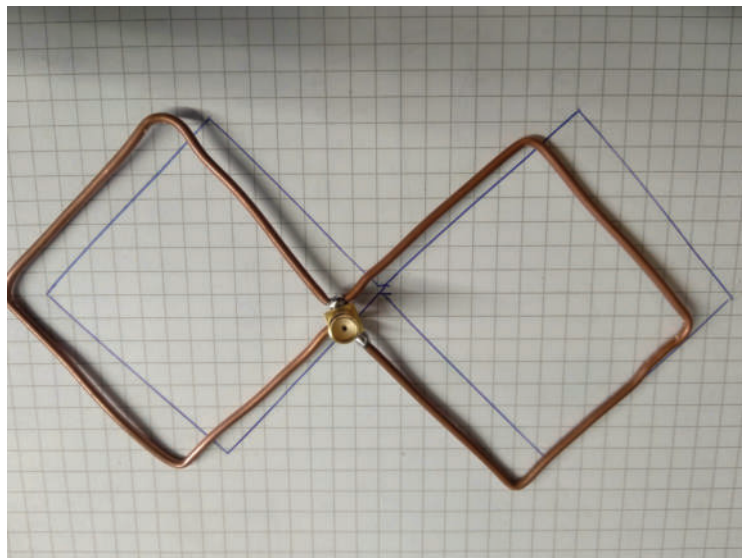


Abbildung 6: Die Antenne mit aufgelötetem SMA-Stecker

In die Mitte dieses Kupferdrahtes wurde anschließend ein SMA-Stecker gelötet und ein Loch in die Reflektorplatte gebohrt. Ein entsprechender Abstandshalter wurde in dem Konstruktionsprogramm Fusion 360 konstruiert und anschließend 3D-gedruckt.

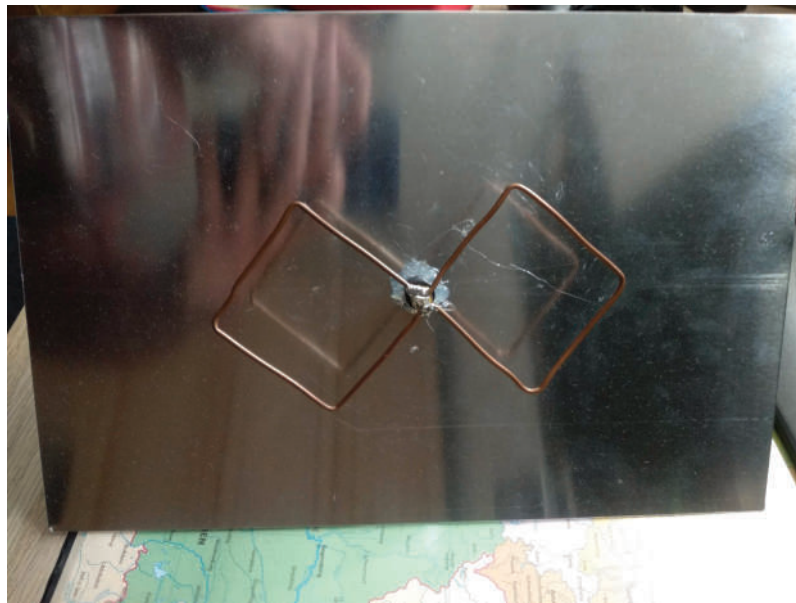


Abbildung 7: Die fertig montierte Antenne

Da die von der Antenne empfangenen Signale aufgrund von nicht vermeidbaren Ungenauigkeiten beim Bau und im Material trotz Biquad-Design nicht stark genug sind, habe ich mich außerdem dazu entschieden einen sogenannten LNA (Low-Noise-Amplifier) zu verbauen. Das von mir gewählte Modell ist in der Lage, Frequenzen im Bereich 50MHz-4GHz mit sehr wenig Störeinstreuung zu verstärken und von der Antenne empfangene Störungen zu reduzieren. Der Verstärker wird hierbei über Bias Tee mit Strom versorgt. Dies bedeutet, dass das an den Verstärker angeschlossenen SMA bzw. Koaxialkabel parallel zur Datenübertragung auch als Stromversorgung dient. Dieses Kabel ist an einen DVB-T Tuner Stick angeschlossen. Das von mir gewählte Modell ist hierbei in der Lage, Frequenzen im Bereich zwischen 500KHz-1766MHz zu verarbeiten und digital über eine USB-Schnittstelle an den angeschlossenen Computer weiterzugeben.

Da der Gain meiner selbstgebauten Antenne im Vergleich zu professionellem Equipment bei weitem nicht so hoch ist, war mein Ziel, die von der Milchstraße emittierte Wasserstofflinie sichtbar zu machen, da hier viele Sterne relativ nah an der Erde und beisammen sind. Bei meinem ersten Versuch wurde die Antenne auf eine alte Satellitenschüssel montiert und gegen Süden ausgerichtet. Mit Hilfe der Software Stellarium war es wie in Abbildung 8 zu sehen schnell und einfach möglich

herauszufinden, zu welchem Zeitpunkt ein möglichst naher Teil der Milchstraße im Süden zu sehen ist.



Abbildung 8: Die Milchstraße in Stellarium im Süden um 06:48 Uhr am 10.03.2022

Zu diesem Zeitpunkt habe ich nun versucht mit der Software SDR++ die Strahlung des Wasserstoffs zu empfangen. Diese Software stellt die Strahlungsintensität auf der ausgewählten Frequenz grafisch dar, und zeigt außerdem ein Wasserfalldiagramm, das die empfangenen Daten über einen längeren Zeitraum sichtbar macht. Leider hat dieser Versuch nicht funktioniert, da die Intensität der Wasserstofflinie zu niedrig ist. Nach einiger Recherche und einigen kleinen Optimierungen an der Antenne bin ich auf folgenden Software gestoßen: <https://github.com/byggemandboesen/H-line-software>

Diese in Python von Victor Boesen geschriebene Software, verwendet ein zur Astrofotografie ähnliches Prinzip, um auch schwache Signale darzustellen. Während in der Astrofotografie die Belichtungszeit erhöht wird, um auch Lichtschwache Objekte zu fotografieren, speichert die Software eine angegebene Anzahl von Momentaufnahmen. Diese werden übereinandergelegt und in Form eines wie in der Abbildung 9 zu sehendes Diagramm gespeichert. Mit Hilfe dieser Software ist es mir am 10.03.2022 um 06:48 erstmals gelungen, die Wasserstofflinie zu finden. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 zu sehen.

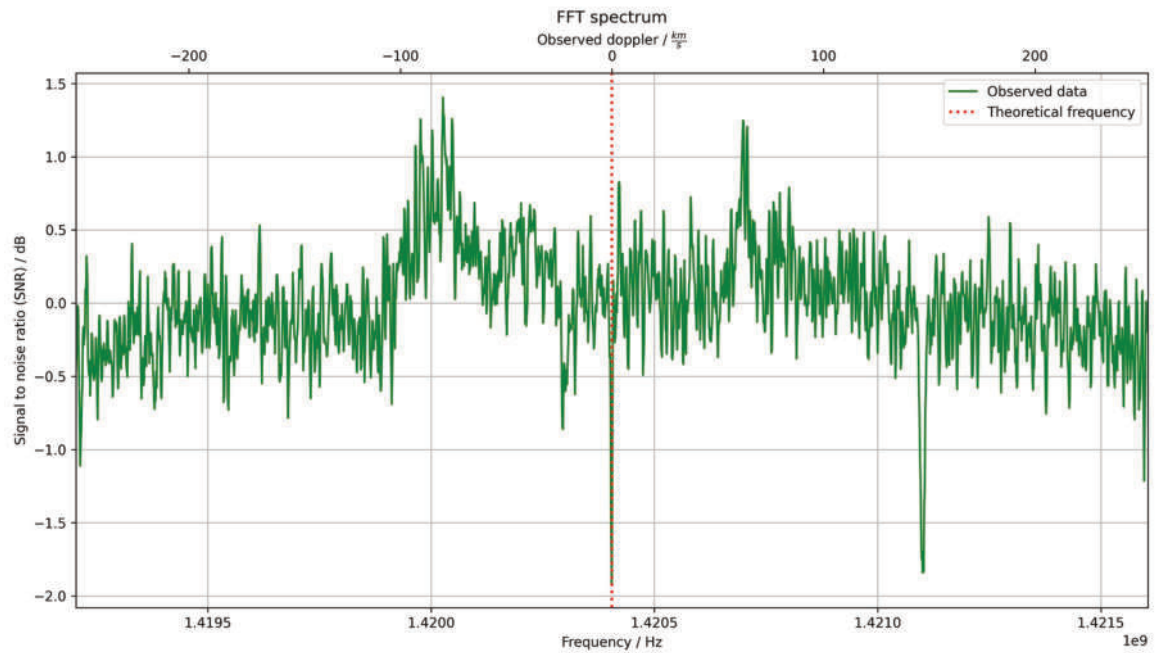


Abbildung 9: Die erste Aufnahme der Wasserstofflinie durch meine Antenne

Wie in der Abbildung 9 zu sehen, gibt es eine Strahlungserhöhung bei ca. 1420MHz. Der starke schmale Ausschlag nach unten ist hierbei auf ein Software/Hardware-Problem zurückzuführen. Aufgrund des Dopplereffekts sind die Peaks nicht genau bei 1420MHz sondern leicht verschoben. Zum Vergleich habe ich eine weitere Aufnahme gemacht, bei der ich die Antenne in eine andere Richtung gedreht habe:

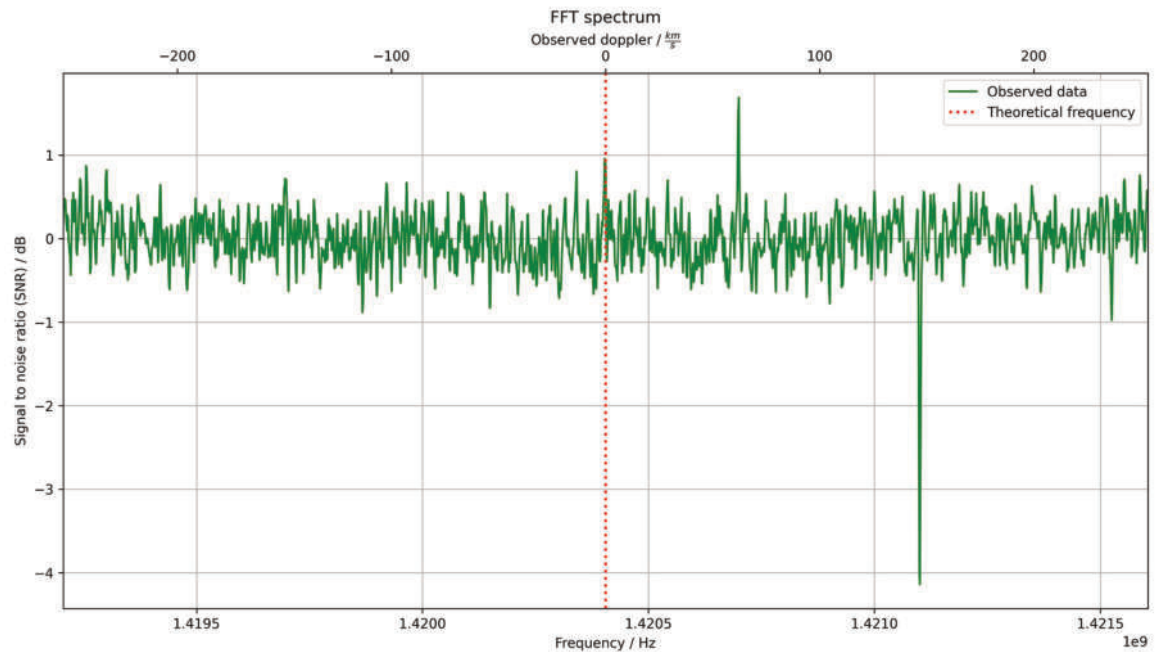


Abbildung 10: Eine weitere Aufnahme in einer anderen Richtung

Bei Abbildung 10 muss beachtet werden, dass es einen starken Ausschlag nach unten gegeben hat, wodurch das Diagramm gestaucht wurde. Auch dieser Ausschlag ist auf einen Messfehler zurückzuführen. Trotzdem lässt sich erkennen, dass ein deutlich schwächeres Signal als bei Abbildung 9 im Frequenzbereich um 1420MHz empfangen wurde. Beide Aufnahmen wurden direkt hintereinander zur beinahe selben Uhrzeit erstellt. Hierbei wurden jeweils 500 Momentaufnahmen übereinandergelegt.

4.2 Messgenauigkeit der Antenne

Dank der Firma Spinner in Westerham war es mir möglich, die Antenne professionell zu vermessen. Zum einen wurde das Stehwellenverhältnis (kurz VSWR) gemessen. Das Stehwellenverhältnis gibt einfach gesagt an, wie viel von der empfangenen Welle reflektiert wird, und somit wie stark die Übertragungsverluste in der Antenne sind. Ein SWR-Wert von 1 ist hierbei perfekt und bedeutet, dass keine Welle auf der angepeilten Frequenz reflektiert wird.

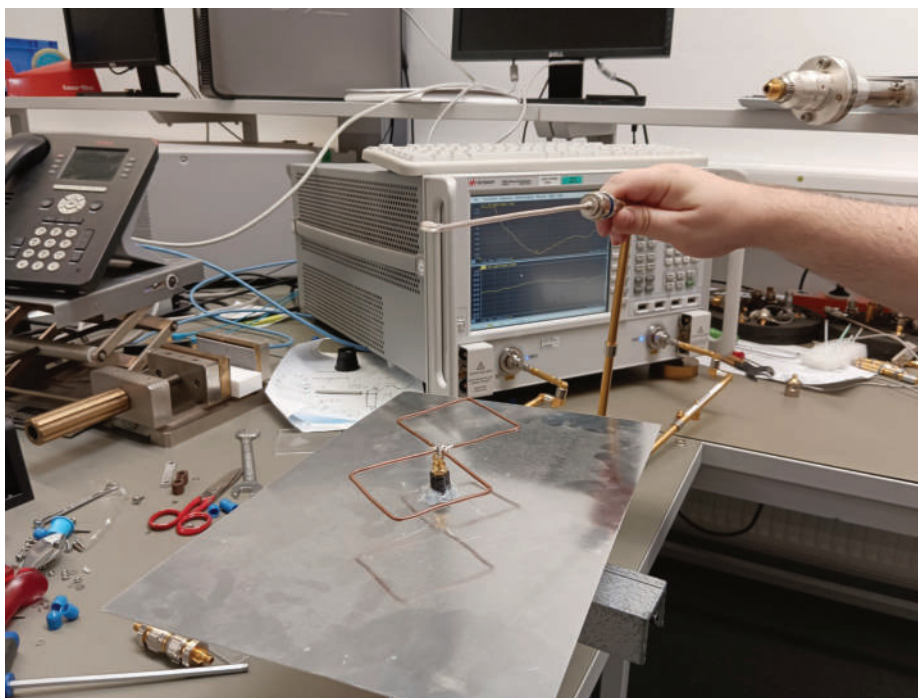


Abbildung 11: Die Antenne beim vermessen

Auf dem Bild ist der Messaufbau zu sehen. Die Antenne wurde hierbei in einen Schraubstock eingespannt und mit Hilfe einer Schnüffelsonde der SWR-Wert gemessen.

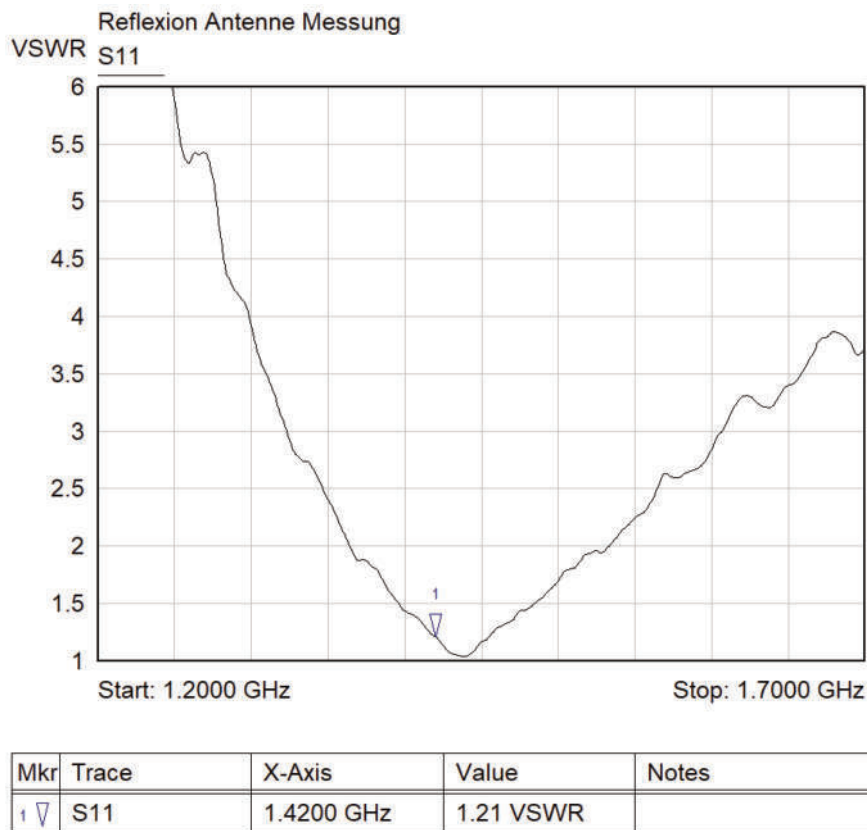


Abbildung 12: VSWR Messung

Dieses Diagramm zeigt die Messdaten der VSWR-Messung im Bereich zwischen 1,2 und 1,7 GHz. Der Marker zeigt auf 1420MHz. Hierbei ist zu erkennen, dass der SWR-Wert bei 1,21 liegt, was für eine solche Antenne sehr gut ist. Ein Großteil der empfangenen Welle wird hierbei nicht zurückgestrahlt.

Als zweite Messung wurde eine Pseudogainmessung durchgeführt. Der Gain bei einer gerichteten Antenne beschreibt normalerweise das Verhältnis, der Empfangsverstärkung aus der Empfängerrichtung im Vergleich zu der Empfangsstärke eines Kugelförmigen Empfängers. Um trotzdem ungefähre Aussagen treffen zu können, wurde die Antenne im bereits gezeigten Versuchsaufbau erneut vermessen, nur dass diesmal die Empfangsverstärkung in dB aus drei verschiedenen Richtungen gemessen wurde.

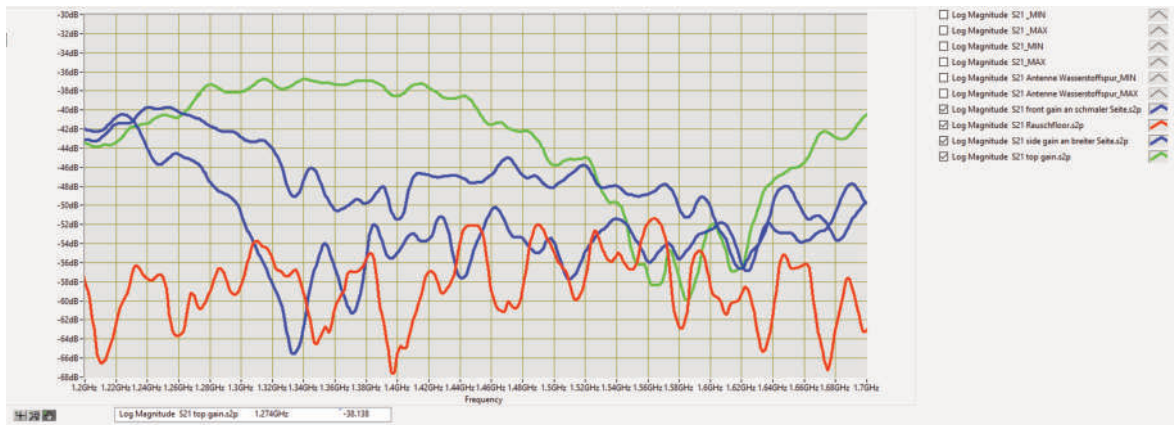


Abbildung 13: Grün: Empfangsverstärkung direkt vor der Antenne und dem Reflektor
 Blau: Empfangsverstärkung im gleichen Abstand von den Seiten
 Rot: Hintergrundstrahlung

Wie hier zu sehen, ist die Grüne Linie bei 1420MHz um ca. 8dB stärker. Der richtige Gain wurde aufgrund von Ungenauigkeiten im Messaufbau auf ca. 5dB geschätzt.

Anhand der beiden Vermessungen der Antenne, lässt sich mit ziemlicher Sicherheit schließen, dass diese in der Lage ist, den Frequenzbereich der vom Wasserstoff emittierten Welle, zu empfangen. Dadurch lässt sich außerdem sagen, dass die aufgezeichneten Messungen mit der Antenne wirklich die Wasserstofflinie und nichts anderes gemessen haben.

4.3 Langzeitmessung

Aufgrund von Lieferengpässen von dem für die Messungen benötigtem Raspberry Pi, wurde diese erst am 1.9 durchgeführt. Die Antenne wurde hierbei wie auf dem Bild zu sehen auf dem Kamin montiert und gegen Süden ausgerichtet, da laut Stellarium hier gegen 20 Uhr Ortszeit die Milchstraße zu sehen sein sollte.



Abbildung 14: Antenne montiert auf dem Kamin

Des Weiteren wurde ein Skript geschrieben, dass die Messsoftware alle 5 Min startete, um eine Messung durchzuführen. Nach einem Messzeitraum von ca. 2 Stunden, in denen sehr gute Messergebnisse erzielt hätten werden sollen, wurden anschließend die Daten ausgewertet. Hierbei stellte sich leider heraus, dass die Messsoftware auf dem Raspberry Pi nicht richtig funktionierte und fehlerhafte Daten lieferte.

Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes mit der Ungewissheit, ob die verwendete Software überhaupt korrekt mit der vorhandenen Hardware funktioniert, wurde der Versuch nicht wiederholt. Dieses Problem ist leider während des Tests des Skripts und der Installation nicht aufgefallen. Trotzdem war es mir an dem Abend noch möglich, mit einer anderen Version der Software auf dem bereits für die ersten Messungen verwendeten Laptop, folgende Messung (Abbildung 15) zu machen. In dieser Messung ist die Wasserstofflinie nun sehr genau zu sehen, und bestätigt noch einmal, dass die Antenne funktioniert.

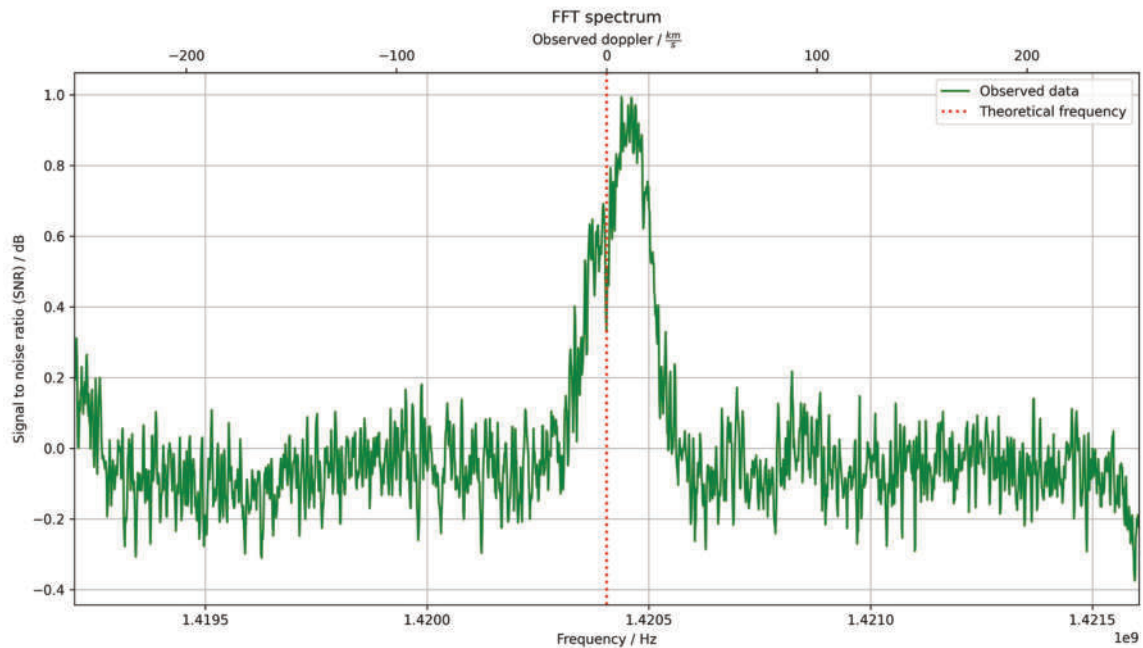


Abbildung 15: Die Wasserstofflinie ist hier deutlich zu erkennen

5 Allgemeines Fazit

Diese W-Seminararbeit hat zur Zielsetzung, die Grundlagen der Wasserstofflinie aufzuzeigen, sowie die Frage zu beantworten, ob es möglich ist, mit einfachen Mitteln die Wasserstofflinie nachzuweisen. Diese Frage kann nun eindeutig beantwortet werden, da es wie in der Arbeit aufgezeigt, möglich ist. Es wird mit solch einer Antenne, wegen der zu geringen Auflösung, zwar kaum möglich sein neue Entdeckungen zu machen, allerdings wurde bei der Planung, beim Bau und den Versuchen, viel über die Wissenschaft der Radioteleskopie erlernt. Alle Zielsetzungen der Arbeit konnten dabei erfüllt werden, und die am Anfang der Arbeit aufgeworfene Frage über die Möglichkeit des Nachweises der Linie von Amateuren konnte eindeutig mit ja beantwortet werden.

6 Literaturverzeichnis

- 1: Woodruff Turner Sullivan : Classics in Radio Astronomy , ISBN:978-94-009-7754-9, 1982
- 2: Jörn Bleck-Neuhaus : Elementare Teilchen: Moderne Physik von den Atomen bis zum Standard-Modell , ISBN:978-3-540-85300-8, 2010
- 3: Jeff Mangum, The Galaxies of the Virgo Cluster, 2011,
<https://safe.nrao.edu/wiki/bin/view/Main/ExgalHIPProject>, aufgerufen am: 26.08.22 18:40
- 4: Jim Branson, Splitting of the Hydrogen Ground State , 2013,
https://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130_notes/node361.html, aufgerufen am: 18.08.22 01:30
- 5: Peter Kalberla, Unsere Milchstraße im Licht der 21-cm Line, 2009,
https://www.astro.uni-bonn.de/hisurvey/euhou/ar_111.pdf, aufgerufen am: 18.08.22 01:45
- 6: Robert E. Belford, Quantization: Planck, Einstein, Energy, and Photons , 2020,
[https://batch.libretexts.org/print/url=https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Arkansas_Little_Rock/Chem_1402%3A_General_Chemistry_1_\(Belford\)/Text/6%3A_The_Structure_of_Atoms/6.2%3A_Quantization%3A_Planck%2C_Einstein%2C_Energy%2C_and_Photons.pdf](https://batch.libretexts.org/print/url=https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Arkansas_Little_Rock/Chem_1402%3A_General_Chemistry_1_(Belford)/Text/6%3A_The_Structure_of_Atoms/6.2%3A_Quantization%3A_Planck%2C_Einstein%2C_Energy%2C_and_Photons.pdf), aufgerufen am: 18.08.22 02:00

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr_model.jpg Jia.liu, Public domain, via Wikimedia Commons, aufgerufen am 26.09.22 13:08

Abbildung 2 und 3: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen-SpinFlip.svg> Tiltec, Public domain, via Wikimedia Commons, aufgerufen am 26.09.22 13:09

Erklärung zur Seminararbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche gekennzeichnet habe.

Bruckmühl, den

.....

Unterschrift