

Bau und Untersuchung von Dipol-Antennen im GHz-Bereich



Tim Rambousky (14)

Fabian Jablonski (15)

Wettbewerb Jugend Forscht

Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht" des
Christian Gymnasiums Hermannsburg

Betreuung: StD Thomas Biedermann

Inhalt

| | |
|--|----|
| 1. Einleitung | 3 |
| 1.1 Die Radioastronomie-AG..... | 3 |
| 1.2 Was machen wir? | 3 |
| 2. Dipol | 3 |
| 2.1 Funktion eines Dipols | 3 |
| 2.1.1. Prinzip und Aufbau eines Dipols..... | 3 |
| 2.1.2. Anwendungsbeispiele | 4 |
| 2.2. Aufbau eines Dipols in der Praxis | 5 |
| 2.2.1. Verkürzungsfaktor | 5 |
| 2.2.2. Der Balun..... | 6 |
| 3. Untersuchungen an den Dipolen | 6 |
| 3.1. Simulation der Dipole mit der 3D-Momentenmethode..... | 7 |
| 3.2. Messungen mit dem Netzwerkanalysator | 9 |
| 3.3. Messungen nach eigenem Verfahren | 10 |
| 4. Zusammenfassung und Fazit..... | 11 |
| 6. Danksagung..... | 12 |
| 7. Quellenverzeichnis | 12 |

1. Einleitung

1.1 Die Radioastronomie-AG

Wie kamen wir eigentlich auf die Idee Dipol-Antennen zu bauen? In unserer Jugend-Forscht AG haben wir mit dem Thema Radioastronomie begonnen. Wir wollen ein Radioteleskop bauen, für das natürlich verschiedene Komponenten benötigt werden. Dazu gehören eine Satellitenschüssel (Parabolantenne), die wir gesponsert bekommen haben, eine Anlage zur Nachführung, also zum Steuern der Schüssel, einige angepasste Dipol-Antennen, zum Empfangen von elektromagnetischen Signalen, von denen wir eine von dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn / Effelsberg bekommen haben, eine Empfangsanlage zum Verarbeiten der empfangenen Signale und einen Voltage Controlled Oscillator (VCO) zum Senden von Signalen. Diese Projekte haben wir in verschiedene Gruppen unterteilt. Eine weitere Gruppe wird sich mit der Datenauswertung beschäftigen. Leider konnten wir die Anlage zur Nachführung der Satellitenantenne noch nicht bauen, da wir noch nicht alle notwendigen Teile beschaffen konnten. Im Rahmen der Einarbeitung in das Thema Radioastronomie haben wir uns dann gefragt, wie Antennen eigentlich genau funktionieren. Daher haben wir entschieden, uns im Rahmen dieses Jugend Forscht Projektes mit der Funktionsweise und dem Eigenbau von Dipol-Antennen zu beschäftigen.

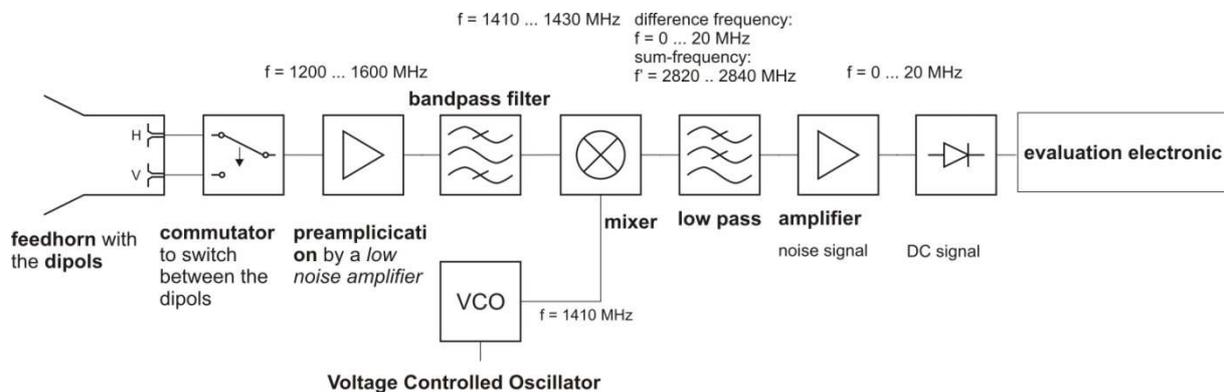


Abb. 1: Blockschaltbild einer Empfangsanlage für die Frequenz von 1,42 GHz

1.2 Was machen wir?

Wir haben beschlossen uns mit dem Aufbau und dem Funktionsprinzip von Dipolantennen für den Gigahertz-Frequenzbereich zu beschäftigen, solche Dipolantennen selbst zu bauen und deren Empfangsverhalten zu untersuchen. In der Radioastronomie-AG wollen wir vorerst interstellaren Wasserstoff messen, da dies das Element in unserer Galaxie ist, das am häufigsten vorkommt. Der interstellare Wasserstoff strahlt elektromagnetische Wellen ab, die eine Frequenz von 1,42 GHz haben und damit eine Wellenlänge von 21 cm. Wir haben zwei Dipole selbst entworfen und gebaut. Zusätzlich haben wir einen Referenzdipol (Kreuzdipol) von der Universität Bonn für Vergleichszwecke zur Verfügung. Wir haben drei verschiedene Methoden angewandt, um die Dipole zu charakterisieren und zu vermessen. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit soll schließlich ein passender Empfangsdipol für unser Radioteleskop entstehen.

2. Dipol

2.1 Funktion eines Dipols

2.1.1. Prinzip und Aufbau eines Dipols

Was ist eigentlich ein Dipol oder eine Dipol-Antenne? Wie der Name schon sagt, handelt es sich hierbei um eine Antenne die also folglich für das Umwandeln von elektromagnetischen Wellen in elektrische Spannung und Strom und umgekehrt von Spannung und Strom in elektromagnetische

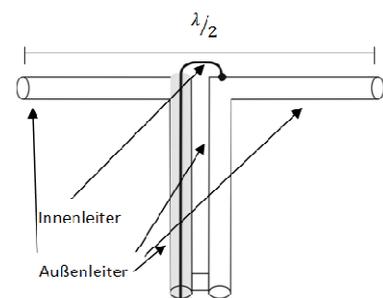


Abb. 2: Skizze unserer selbstgebauten Halbwellen-Dipol-Antennen

Wellen, oder kurz gesagt zum

Empfangen und Senden von Signalen zuständig ist. Seine Länge ist abhängig von der Wellenlänge λ der elektromagnetischen Welle, die man Empfangen oder Senden möchte und beträgt in der Theorie $\lambda/2$. In der Praxis muss diese elektrische Länge allerdings noch mit dem Verkürzungsfaktor multipliziert werden um auf die tatsächlich notwendige mechanische Länge des Dipols zu kommen. Der Verkürzungsfaktor wird später noch



Abb. 3 Stromverteilung auf einem $\lambda_0/2$ Dipol

genauer behandelt. Die Stromverteilung auf dem hier verwendeten Halbwellen-Dipol ist in Abb. 3 dargestellt. Da der Strom an den beiden Leitungsenden des Dipols nicht abfließen kann, muss er dort Null

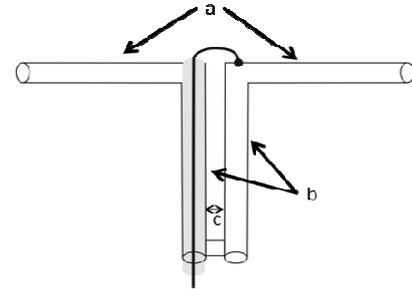


Abb. 4: Benennung der Teile des Dipols

sein. In der Mitte des Dipols wird dieser durch einen Generator gespeist (Antenne), oder speist selbst von dort einen Verstärker (Empfänger). Der Strom hat hier sein Maximum. Wir haben vier Dipole nach dem Prinzip aus Abb. 2 selbst gebaut. Um den Einfluss des Verkürzungsfaktors zu analysieren haben wir einen ungekürzten und einen verkürzten Dipol für eine Soll-Frequenz von 1,42 GHz gebaut [1]. Zusätzlich haben wir Dipole für 900 MHz und 1,8 GHz gebaut. In Tabelle 1 haben wir die verschiedenen Länge der Teile des Dipols genannt.

Der Kreuzdipol unterscheidet sich jedoch von unseren selbstgebauten Dipolen. Im Gegensatz zu unseren Dipolen besitzt er einen Außenleiter. Dieser Außenleiter hat die Aufgabe für ein optimales Sichtfenster auf den Parabolspiegel zu sorgen und elektromagnetische Strahlung von den Seiten abzuschirmen. Man kann daraus schließen, dass dieser Dipol einen bestimmten Abstand zu seiner Satellitenschüssel haben muss, um seine ideale Sendeleistung zu haben.

| Dipol | a in cm | b in cm | c in cm | Durchmesser in mm |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|-------------------|
| $\lambda/2$ Dipol ungekürzt 1,42 GHz | 5,28 | 5,28 | 1 | 5 |
| $\lambda/2$ Dipol gekürzt 1,42 GHz | 4,41 | 7,05 | 1 | 5 |
| Kreuzdipol 1,42 GHz | 4,05 | 7,7 | 0,35 | 5 |
| $\lambda/2$ Dipol gekürzt 900 MHz | 7,25 | 11,15 | 0,8 | 6 |
| $\lambda/2$ Dipol gekürzt 1,8 GHz | 3,4 | 5,45 | 0,13 | 3 |

Tabelle 1: Benennung der Längen der Teile des Dipols



Abb. zu Tabelle 1: Abbildung unserer selbst gebauten Dipole

2.1.2. Anwendungsbeispiele

Man kann Dipole nicht nur für das Messen von interstellarem Wasserstoff benutzen, sondern auch für alltägliche Zwecke. Jeder kennt die alten Fernseherantennen. Sie empfangen elektromagnetische Wellen, die umgewandelt werden zu Strom und Spannung, aus denen das Empfangsgerät ein Bild erzeugen kann. Ein weiteres Beispiel - ebenfalls ein wenig veraltet - sind die Handys mit ausklappbaren Antennen. Diese Antennen

sind nichts anderes als Dipole. Dasselbe gilt auch für die alten UKW-Radios. Diese Antennen sind etwas größer als unsere, weil diese mit einer niedrigeren Frequenz arbeiten. Wenn die Frequenz also kleiner ist, ist die Wellenlänge und damit der Dipol größer. Heutzutage sieht man diese Antennen gar nicht mehr, da sie mit Hilfe von ein paar Tricks verkleinert werden konnten. Einer wäre, dass die Wellenlänge mithilfe einer Spule verkürzt werden konnte, aber trotzdem kein nennenswerter Unterschied in dem daraus folgendem Signal kam. Aber auch WLAN-Router, SAT-Receiver und ähnlich Geräte arbeiten mit der gleichen Technik.

2.2. Aufbau eines Dipols in der Praxis

2.2.1. Verkürzungsfaktor

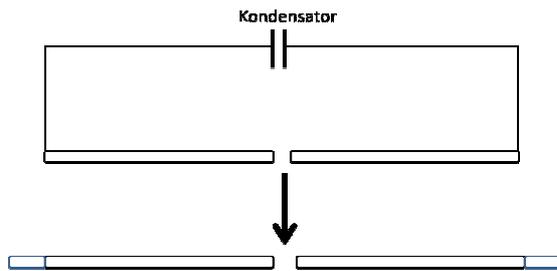


Abb. 3: Veranschaulichung des Effekts der kapazitiven Endbelastung

Bei unseren Recherchen sind wir auf etwas gestoßen, das sich Verkürzungsfaktor nennt [2]. Dies hat uns darauf aufmerksam gemacht, dass man zwischen der mechanischen Länge (die tatsächliche Länge des Dipols) und der elektrischen Länge (die Länge die elektrischen Wellen auf der Leitung sehen) unterscheidet. Diese Längen sind nur gleich, wenn die Antenne unendlich dünn wäre und sich im freien Raum befinden würde. Die Phasengeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen auf einem Antennenleiter endlicher Dicke ist aber geringer als die einer Welle im freien Raum. Folglich muss die mechanische Länge der Antenne gegenüber der gewünschten elektrischen Länge der Antenne verkürzt werden. Dieser Verkürzungsfaktor wird vom Verhältnis der Freiraumwellenlänge (hier $\lambda_0=1.42\text{GHz}$) zum Durchmesser λ_0/d bestimmt. Außerdem ist noch ein zweiter Faktor zu berücksichtigen, nämlich die kapazitive Endbelastung. Wie schon oben erklärt ist der Strom in der Theorie am Ende des Dipols gleich Null. Das trifft aber nicht in der Realität zu, da der Dipol Feldlinien erzeugt, die die beiden Dipolenden miteinander verbinden. Daher wirken die Dipolenden wie ein Kondensator. Da dieser geladen und entladen werden muss, ist der Strom an den Enden tatsächlich ungleich Null. Den Effekt des Kondensators kann man sich auch als Verlängerung des Dipols vorstellen. Folglich muss der Dipol erneut mechanisch verkürzt werden. In Abb. 4 ist der Zusammenhang zwischen den Verkürzungsfaktoren und dem Antennen-Leitungsdurchmesser angegeben [2]. Die obere Kurve zeigt den Verlauf des Verkürzungsfaktors aufgrund des endlichen Durchmessers für einen Halbwellen-Dipol. Die mittlere Kurve zeigt den gesamten Verkürzungsfaktor, einschließlich der Endkappen-Kapazitätseffekte, für den Halbwellen-Dipol und die untere Kurve zeigt schließlich den gesamten Verkürzungsfaktor für einen Ganzwellen-Dipol.

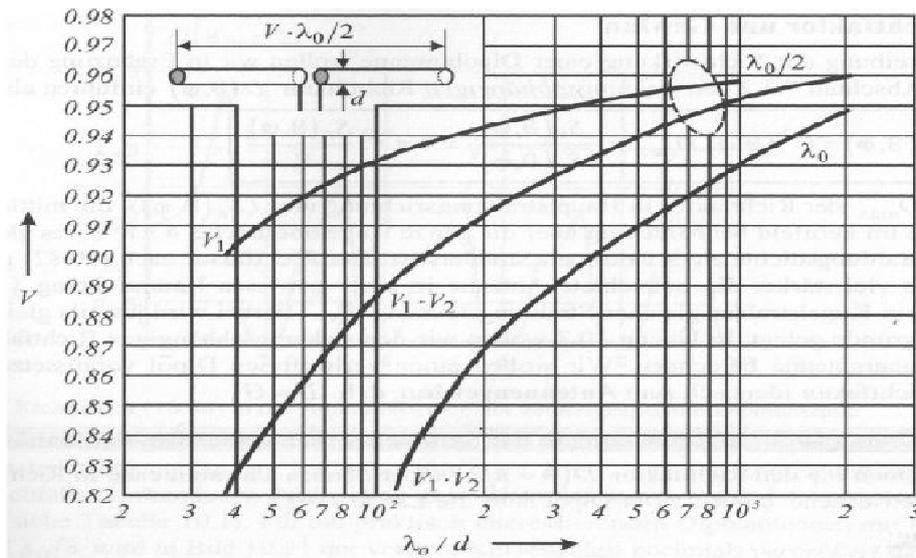


Abb. 4: Tabelle mit Verkürzungsfaktoren aus [2]: V_1 ist der Verkürzungsfaktor aufgrund der Antennendicke (oben), $V_1 \cdot V_2$ beinhaltet zusätzlich den Verkürzungsfaktor aufgrund der Endkapazitäten (für Halbwellen-Dipol \rightarrow Mitte, für Ganzwellen-Dipol \rightarrow unten)

2.2.2. Der Balun

An der Skizze unseres Dipols haben wir einen Teil noch nicht erklärt, den Balun. Balun kommt aus dem Englischen und steht für **balanced-unbalanced**. Seine Funktion ist die Wandlung zwischen einem symmetrischen Signal und einem unsymmetrischen Signal. Wie es in unserem Fall ist, liefert unser Dipol ein symmetrisches Signal, während unser Koaxialkabel ein unsymmetrisches System darstellt. Der Unterschied zwischen einer symmetrischen Leitung und einer unsymmetrischen Leitung ist, dass in der symmetrischen Leitung kein Massestrom fließt. Beim direkten Anschluss des Dipols an ein Koaxialkabel würde folglich der eine Dipolstab kurzgeschlossen und damit kein Signal mehr liefern. Der Balun besitzt nun die Aufgabe, die Phase des eigentlich kurzgeschlossenen Signals um 90° zu verschieben. Dies geschieht, indem das eine Signal einen um $\lambda_0/4$ längeren Weg zum Koaxial-Anschluss zurücklegen muss, als das Signal des anderen Dipolstabes [3].

3. Untersuchungen an den Dipolen

Wir haben insgesamt drei verschiedene Verfahren angewandt, um zu bestimmen, welcher Dipol am besten für unsere Radioastronomie-Anwendung geeignet ist. Dabei handelt es sich einmal um ein numerisches 3D-Simulationsverfahren zur Berechnung elektromagnetischer Felder. Bei den anderen Verfahren handelt es sich um praktische Messungen an den realen Dipolen.

Als erstes haben wir die Dipole mit der 3D-Simulationssoftware für elektromagnetische Felder mit dem Namen "Concept", die auf der Momenten-Methode basiert und an der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) entwickelt wurde, simuliert. Der Vorteil daran ist, dass nicht nur die Eingangsimpedanz berechnet wird, sondern auch das elektromagnetische Feld grafisch dargestellt werden kann. Allerdings kann eine numerische Simulation die Wirklichkeit nie vollkommen perfekt darstellen, da bei der Modellierung des Problems meist vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen. Allerdings eignen sich solche Simulationen um einen Einblick in die prinzipiellen physikalischen Zusammenhänge zu bekommen und abzuschätzen welche Parameteränderungen zu welchen Ergebnisveränderungen führen. Deshalb mussten wir neben den Simulationen noch messtechnische Untersuchungen an den realen Dipol-Antennen durchführen.

Am Wehrwissenschaftlichen Institut (WIS) in Munster wurde uns ein vektorieller Netzwerkanalysator für Messungen zur Verfügung gestellt. Das Prinzip eines Netzwerkanalysators ist, ein harmonisches Signal am Ausgang des Gerätes in ein Kabel zu speisen. Ist das Kabel nicht an die Antenne angeschlossen, wird das Signal

am Ende des Kabels total reflektiert und gelangt wieder in den Netzwerkanalysator. Wenn man nun an das Kabel einen Dipol anschließt, wird ein Teil der Leistung des vom Netzwerkanalysator gesendeten harmonischen Signals vom Dipol abgestrahlt und die restliche Leistung wieder reflektiert. Nun misst der Netzwerkanalysator den reflektierten Anteil mit Phasenbezug. Präziser ausgedrückt messen wir den Eingangsreflexionsfaktor S_{11} als Streuparamter. Der Netzwerkanalysator durchfährt dabei einen einstellbaren Frequenzbereich mit einer ebenfalls einstellbaren Schrittweite. Bei den Frequenzen, für die der Dipol zur Abstrahlung besser geeignet ist, wird am Netzwerkanalysator ein kleineres Signal angezeigt. Für die Frequenz, bei der wir das kleinste Signal empfangen hat unser Dipol also die besten Sende- bzw. Empfangseigenschaften. Bei den Messungen haben wir für jeden Dipol die Frequenzen durchfahren und die Messdaten abgespeichert. Da aber so ein Netzwerkanalysator sehr teuer ist und wir ihn nicht immer benutzen können, haben wir uns ein weiteres Verfahren ausgedacht.

Wir schließen den einen Dipol an einen Voltage Controlled Oscillator (VCO) an. Dies ist ein Gerät welches ein monofrequentes Sendesignal mit einer einstellbaren Frequenz erzeugt. Der andere Dipol wird an ein Powermeter, welches die Leistung des empfangenen Signals angibt, angeschlossen. Vor den Sende-Dipol wird ein 30dB Abschwächer und hinter den Empfangsdipol wird ein Low Noise Amplifier (LNA) mit 20dB Verstärkung angebracht. Wir konnten nun die Messwerte am Powermeter ablesen und daraus Diagramme erstellen. In diesen Diagrammen finden wir allerdings zwei verschiedene maximale Leistungswerte, sogenannte Peaks. Den einen vom Sende- und den anderen vom Empfangsdipol. Dieses Verfahren ist nicht so optimal wie jenes mit dem Netzwerkanalysator, aber dafür sehr einfach und für unsere Zwecke ausreichend, da wir immer noch die professionellen Messergebnisse (Netzwerkanalysator) als Referenz haben.

Wir haben insgesamt drei verschiedene Dipole untersucht, von denen wir zwei selbst hergestellt haben. Alle Dipole sind für die Freiraumwellenlänge von $\lambda_0=21\text{cm}$, also einer Frequenz von 1,42GHz vorgesehen. Bei den drei Dipolen handelt es sich um einen ungekürzten $\lambda_0/2$ Dipol, einen um den entsprechenden Verkürzungsfaktor verkürzten $\lambda_0/2$ Dipol und einen Kreuzdipol mit Gehäuse (von der Universität Bonn). Dieser ist aus zwei normalen Dipolen zusammengesetzt. Uns ist allerdings bei den Messungen im WIS aufgefallen, dass der Kreuzdipol die maximale Empfangseigenschaft bei 1,42GHz nur aufweist, falls sich in einem Abstand von etwa einem halben Meter eine große leitende Ebene befindet. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass sich die Empfangseigenschaften mit der elektrischen Umgebung ändern und somit eine Rückwirkung der abgestrahlten Felder auf die Antenne selbst - z.B. durch Reflexion - stattfindet. Dies hat zur Folge, dass sich der spätere Empfangsdipol für die Radioastronomie-Anwendung nur in der vorgesehenen Position im Brennpunkt des Parabolspiegels endgültig anpassen (kalibrieren) lässt.

3.1. Simulation der Dipole mit der 3D-Momentenmethode

Wie oben bereits erwähnt haben wir die Computersimulationen mit der Software Concept-II durchgeführt, die auf der sogenannten Momentenmethode basiert. Die Geometriemodelle bestehen aus ideal leitenden Flächen oder Drähten, wobei wir für unsere Anwendung nur Drähte benutzt haben. Die Drähte werden intern nun so segmentiert, dass ein Segment nicht länger als ein Zehntel der kürzesten verwendeten Wellenlänge ist. Die Drähte werden über einen Generator gespeist, wobei wir stets eine Speisespannung von 1V und einen inneren Generatorwiderstand von 50 Ohm verwendet haben. Über sogenannte Basisfunktionen werden nun die Stromverteilung auf den Drähten und beispielsweise die Eingangsimpedanz am Antenneneingang bestimmt. Ausgehend von dieser Stromverteilung kann dann in einem weiteren Schritt das elektromagnetische Feld für jeden Punkt im dreidimensionalen Raum bestimmt werden. Somit lassen sich die sogenannten Abstrahldiagramme erzeugen. Für einen in x-Richtung orientierten Dipol im freien Raum ist die

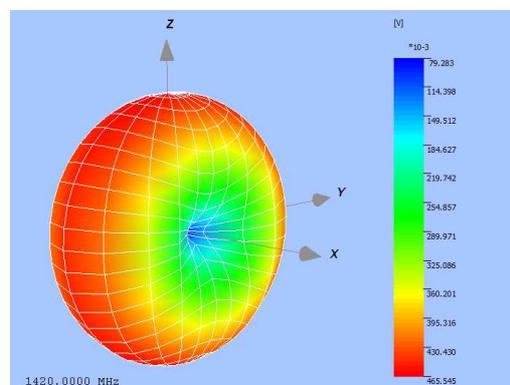


Abb. 7: Abstrahlcharakteristik eines 1,42 GHz Dipols im Freiraum

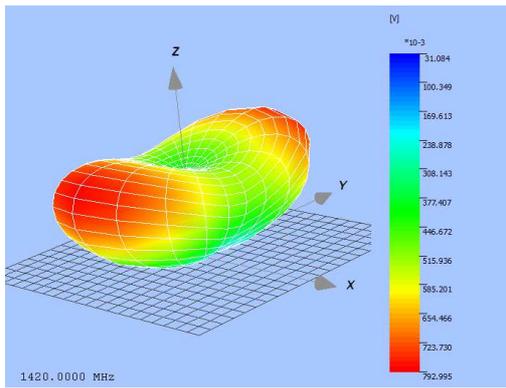


Abb. 8: Abstrahlcharakteristik eines 1,42 GHz Dipols über einer leitenden Fläche

typische Abstrahlcharakteristik (in Form eines „Donut“) in Abb. 7 dargestellt. Man erkennt die bekannte Eigenschaft eines Dipols, dass die größte Abstrahlung rotationssymmetrisch senkrecht zum Dipol erfolgt und in Längsrichtung verschwindet. Befindet sich der Dipol parallel zu einer leitenden Fläche verändert sich das Abstrahlverhalten drastisch. Die leitende Fläche wirkt nun wie ein Spiegel und man erhält eine relativ stark gerichtete Abstrahlung, die von der leitenden Oberfläche weg zeigt. Dies zeigt Abb. 8 für einen 1,42 GHz Dipol der sich in einem Abstand von 8,8cm parallel über einer unendlich ausgedehnten perfekt leitenden Fläche befindet. Die genaue Form der Abstrahlung für eine bestimmte Frequenz hängt auch vom Abstand des Dipols zur

leitenden Fläche ab. Für das Radioastronomie-Projekt bedeutet dies, dass auch die Umgebung (Gehäuse etc.) berücksichtigt werden muss.

In unserer Simulation wird uns zusätzlich zur Abstrahlungscharakteristik noch die Eingangsimpedanz in Ohm angegeben. Je geringer die Eingangsimpedanz, desto besser strahlt der Dipol bei der entsprechenden Frequenz ab. In Abb. 9 wird ein Diagramm für alle unsere Dipole angezeigt, allerdings können wir den Kreuzdipol nur offen darstellen, da wir ihn sonst im Fokus eines Parabolspiegels simulieren müssten, was zwar mit Concept-II möglich, aber für uns viel zu kompliziert ist.

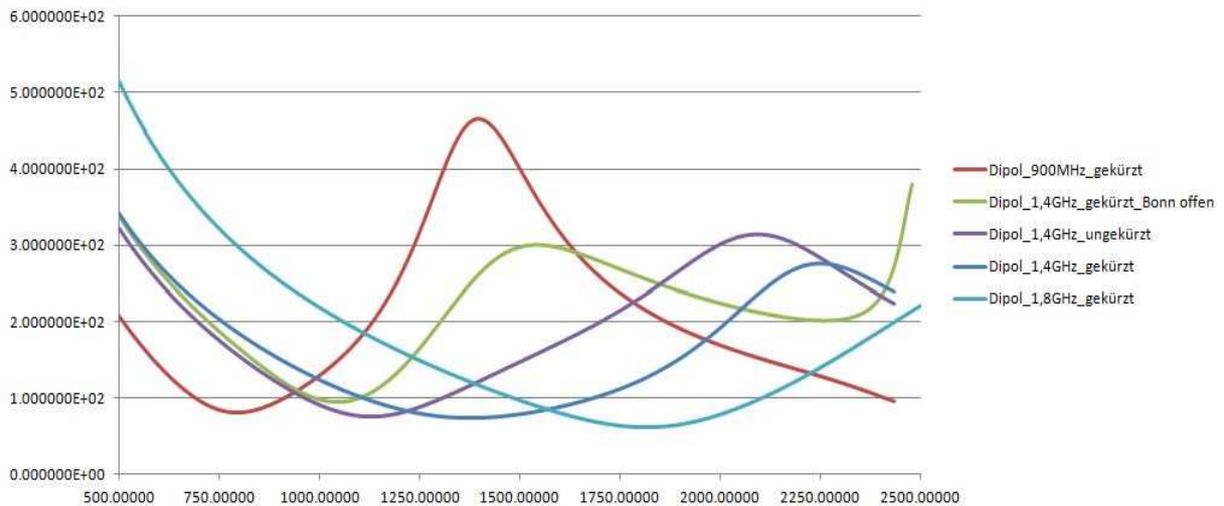


Abb. 9: Diagramm mit Messwerten der Simulation

Wie man Abb. 9 entnehmen kann, haben nur zwei Dipole ihre geringste Eingangsimpedanz bei ihrer Sollfrequenz. Der gekürzte Dipol für 1,42 GHz und der gekürzte Dipol für 1,8 GHz. Allerdings war zu erwarten, dass der ungekürzte Dipol, da er durch den fehlenden Verkürzungsfaktor nicht der Realität angepasst ist, und der Kreuzdipol, da er sich nicht in seiner angepassten Umgebung(Gehäuse) befindet, nicht bei ihrer Sollfrequenz ihre geringste Eingangsimpedanz haben. Unerwartet hingegen ist, dass der Dipol mit einer Sollfrequenz von 900MHz seine geringste Eingangsimpedanz bei ca. 800 MHz hat.

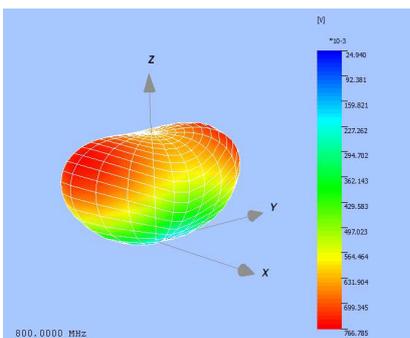


Abb. 10: Abstrahlcharakteristik des 900 MHz Dipols bei 800 MHz

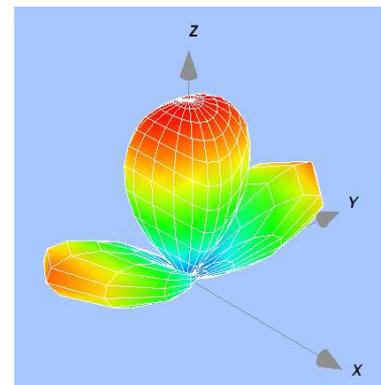


Abb. 11: Abstrahlcharakteristik des 900 MHz Dipols bei 2500 MHz

Interessant ist noch, dass die Eingangsimpedanz nach dem ersten Minimum ansteigt, ein Maximum erreicht und dann ein zweites Minimum entsteht. Sehr schön sieht man das bei dem Dipol mit einer Sollfrequenz 900 MHz und dem offenen Kreuzdipol. Um diese Erkenntnis weiter zu untersuchen, schauen wir uns die Abstrahlcharakteristik bei den Frequenzen, bei denen die Minima erscheinen, einmal an. Der Unterschied zwischen Abb. 10 und Abb. 8 ist nicht allzu groß, hier liegen also bekannte Verhältnisse vor. Allerdings hat sich in Abb. 11 eine andere Form gebildet. Hier treten sogenannte Nebenkeulen auf.

3.2. Messungen mit dem Netzwerkanalysator

Wie schon bei der Darstellung der Funktionsweise eines Netzwerkanalysators gesagt wurde, sendet dieser eine elektromagnetische Leistung in den Dipol, wo ein Teil dieser Leistung abgestrahlt (gesendet) wird und der andere Teil reflektiert wird. Im Diagramm wird angegeben, wie groß der reflektierte Anteil gegenüber der eingespeisten Leistung ist. Je weniger Leistung reflektiert wird, desto mehr Leistung wird abgestrahlt und desto besser ist der Dipol für die jeweilige Frequenz als Sende oder Empfangsantenne geeignet.

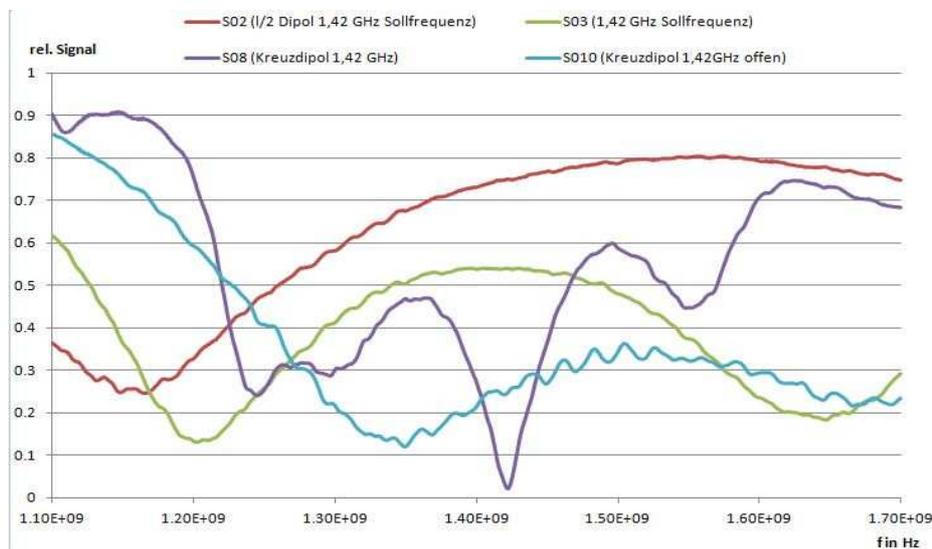


Abb. 12: S-11 Parameter der 1,42 GHz Dipole (Sollfrequenz)

In Abb. 12 sind die Messwerte des Netzwerkanalysators für den ungekürzten $\lambda_0/2$ Dipol (S02-rot), den gekürzten $\lambda_0/2$ Dipol (S03-grün), den geschlossenen Kreuzdipol mit einem idealen Abstand zu einer metallischen

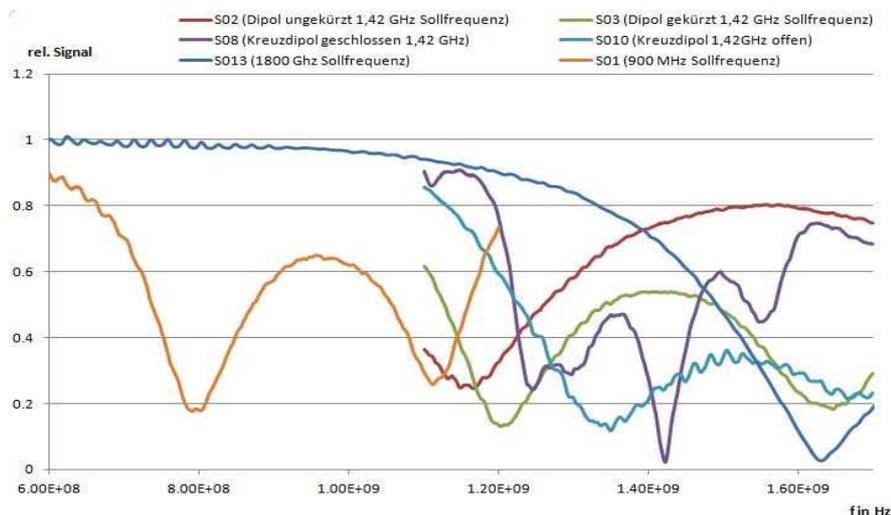


Abb. 13: S-11 Parameter aller Dipole

Fläche (S08-lila) und den offenen Kreuzdipol (S010-hellblau) dargestellt. Alle verwendeten Dipole haben eine Sollfrequenz von 1,42 GHz. Zusätzlich sind in Abb. 13 noch die verkürzten 900 MHz (S01-orange) und 1,8 GHz (S013-dunkelblau)Dipole eingezeichnet.

Man erkennt, dass nur der Kreuzdipol aus Bonn im geschlossenen Gehäuse und mit idealem Abstand zu einer großflächigen Metallplatte, das Impedanzminimum genau bei 1,42 GHz trifft. Obwohl die Simulation eine ideale Abstrahlung bei den gekürzten 1,42GHz und 1,8GHz Dipolen gezeigt hat, kann man in den Diagrammen erkennen, dass dies in der Realität nicht so ist. Dies liegt daran, dass die Dipole in der Simulation sehr vereinfacht modelliert wurden. Der gesamte Speiseteil, also der Übergang vom Koaxialkabel über den Balun zu den eigentlichen Dipolstäben wurde nicht modelliert, sondern lediglich ein idealer Generator in die Mitte des verkürzten $\lambda_0/2$ Dipolstabes gesetzt.

Allerdings gibt es auch Gemeinsamkeiten mit der Simulation. Der 900 MHz Dipol und der ungekürzte 1,4GHz Dipol verlaufen in beiden Fällen recht ähnlich. Außerdem konnte mit den Messungen ebenfalls gezeigt werden, dass der ungekürzte Dipol bei niedrigeren Frequenzen abstrahlt und somit der Verkürzungsfaktor auch im Experiment notwendig ist.

3.3. Messungen nach eigenem Verfahren

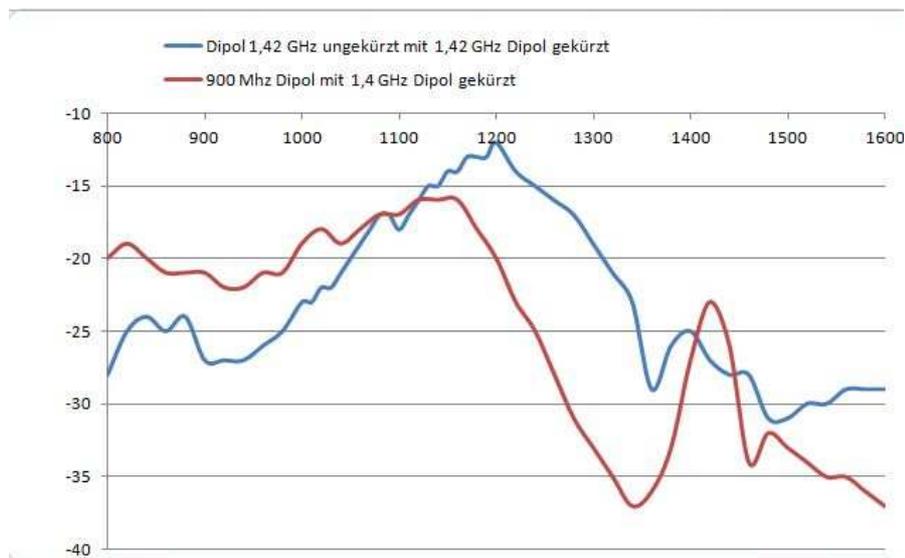


Abb. 14: Messungen mit VCO und Powermeter

In Abb. 14 sind die Messwerte für unsere eigenen Messungen angegeben. Die Einheit der Abszisse ist MHz, die der Ordinate ist dBm, ein logarithmisches relatives Maß für die Leistung, bezogen auf den Referenzleistungswert von 1 mW. Der Vorteil daran ist, dass man sehr große Unterschiede in einem übersichtlichen Diagramm darstellen kann. Hier ist derjenige Dipol bei einer bestimmten Frequenz am besten geeignet, bei der er am meisten Leistung empfängt. In unserem Verfahren sind die Diagramme Mischungen aus den Charakteristiken des Sende- und Empfangsdipols. Folglich können wir die Peaks nur finden, wenn wir die Ergebnisse der Messungen mit dem Netzwerkanalysator als Referenz nehmen. Wenn wir den blauen Graphen betrachten, finden wir bei 1,2 GHz und bei 1,1GHz einen Peak. Diese Peaks kennzeichnen vermutlich die optimalen Frequenzen des gekürzten und den ungekürzten Dipol mit einer Sollfrequenz von 1,42 GHz. Da unser VCO leider nicht in den Frequenzbereich kommt, in dem wir den Peak für den Dipol mit einer Sollfrequenz von 900 MHz erwarten, können wir zur Bestätigung nur nach dem Peak des verkürzten Empfangsdipols suchen. Dieser liegt mit etwa 1,15 GHz etwa bei derselben Frequenz wie im vorherigen Fall, was auch einleuchtend ist.

Denn der Empfangsdipol ist für beide Fälle ja derselbe verkürzte Dipol mit der Sollfrequenz von 1,42 GHz. Scheinbar haben wir bei unser Sollfrequenz von 1,42 GHz ein sehr deutliches und schmales Leistungsmaximum. Bedeutet dies, dass nun unser eigentlicher 900 MHz Dipol für unsere Wunschfrequenz von 1,42 GHz am besten geeignet ist ? Betrachtet man die orangene Kurve in Abb. 13 erkennt man schnell, dass sich vermutlich gerade im Bereich von 1,4 GHz wieder ein Minimum ergibt, wenn man die Kurve zu höheren Frequenzen hin interpoliert. Es handelt sich also vermutlich um eine Oberschwingung auf dem 900 MHz Dipol. Für unsere Zwecke ist es aber trotzdem kein idealer Dipol, da bei Oberschwingungen durch das Auftreten von Nebenkeulen die Abstrahlcharakteristik unbrauchbar wird.

4. Zusammenfassung und Fazit

Bei unseren theoretischen und praktischen Arbeiten haben wir gelernt, dass sich reale Halbwellen-Dipolantennen für den Gigahertz-Frequenzbereich in einer realen Umgebung nicht so verhalten, wie das die ideale Beschreibung eines Dipols im Lehrbuch verspricht. Dies hat folgende Gründe:

- Die Dipolstäbe sind nicht unendlich dünn, sondern haben einen endlichen Durchmesser.
- Die Enden der Dipole wirken als Kapazität.
- Die Speisung des symmetrischen Dipols erfolgt durch ein unsymmetrisches Koaxialkabel, was zur Notwendigkeit einer Transformation durch einen Balun führt.
- Das System Antenne-Generator muss Impedanz angepasst sein (hier 50 Ohm)
- Die (unmittelbare) Umgebung in der sich die Antenne befindet, beeinflusst sowohl die Eingangsimpedanz als auch Abstrahlcharakteristik einer Antenne

Wir haben mittels numerischer Simulation die Notwendigkeit eines Verkürzungsfaktors bestätigt und die Abstrahlcharakteristik und die Eingangsimpedanz für verschiedene Dipolmodelle simuliert. Insgesamt haben wir 4 Dipole selbst gebaut. Diese Dipole haben eine Sollfrequenz von 900 MHz (verkürzt), 1,42 GHz (verkürzt+ungekürzt) und 1,8 GHz (verkürzt).

Mit einem vektoriiellen Netzwerkanalysator haben wir für diese Dipole die Reflexions-Streuparameter (S11-Parameter) messtechnisch bestimmt. Dabei mussten wir feststellen, dass die Frequenzen für die beste Abstrahlung (gleichzeitig bester Empfang) von den Soll-Frequenzen abwichen. Dies liegt daran, dass die Dipole nicht im freien Raum betrieben wurden, sondern Reflexionen von leitenden Umgebungen (z.B. Fußboden) auftraten. Selbst unser Referenz-Kreuzdipol erreichte seine beste Abstrahlung bei 1,42 GHz nur in einem bestimmten Abstand zu einer großflächigen Metallplatte.

Mit dem von einem anderen Team aus der Radioastronomie-AG gebauten VCO konnten wir unsere Dipolantennen als Sende- und Empfangsantenne testen, wobei wir zur Vermeidung von Störstrahlungen in die Umgebung das Signal des VCO mit einem Dämpfungsglied soweit herabgesetzt haben, dass wir mit der uns zur Verfügung stehenden Messtechnik noch auswertbare Signale bekommen konnten. Dabei hatten Sende- und Empfangsantenne eine unterschiedliche optimale Frequenz. Im empfangenen Signal konnten wir diese beiden Frequenzen als lokale Maxima der empfangenen Leistung erkennen.

Mit unseren Ergebnissen haben wir ein eingehendes Verständnis über Theorie und praktische Anwendung von Dipolantennen erworben, um im weiteren Verlauf der Radioastronomie-AG eine auf unsere Bedürfnisse angepasste Dipol-Antenne zum Empfang der elektromagnetischen Signale des interstellaren Wasserstoffs bei 1,42 GHz fertigzustellen. Entscheidend war die Erkenntnis, dass die Umgebung, in der sich die Dipolantenne befindet, sowie z.B. das Antennengehäuse oder die Parabolschüssel, einen Einfluss auf die optimale Eingangsimpedanz und die Abstrahl-/Empfangscharakteristik hat. Daher kann eine endgültige Kalibrierung der Dipolantenne erst in der endgültigen Position erfolgen.

6. Danksagung

Wir bedanken uns ganz herzlich bei Herrn Biedermann, der uns die Grundlagen der HF-Technik vermittelt hat, seine Zeit für uns geopfert und uns umfassend unterstützt hat. Außerdem danken wir auch der restlichen Familie Biedermann die uns immer mit gutem Essen und Getränken versorgt hat. Zusätzlich gilt unser Dank dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien (WIS) in Munster, das uns einige für unser Projekt notwendige Messgeräte zur Verfügung gestellt hat. Dank gilt auch Lucas und Simon, die uns ihren VCO und Ihr Powermeter geliehen haben und allen anderen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Jugend-Forscht- und Radioastronomie-AG des Christian-Gymnasium Hermannsburg.

7. Quellenverzeichnis

- [1] <http://www.activefrance.com/Antennas/page3.html>
- [2] Klaus Kark: *Antennen und Strahlungsfelder*, 2. Auflage, Vieweg, 2006
- [3] Holger Heuermann: *Hochfrequenztechnik*, 2. Auflage, Vieweg, 2009