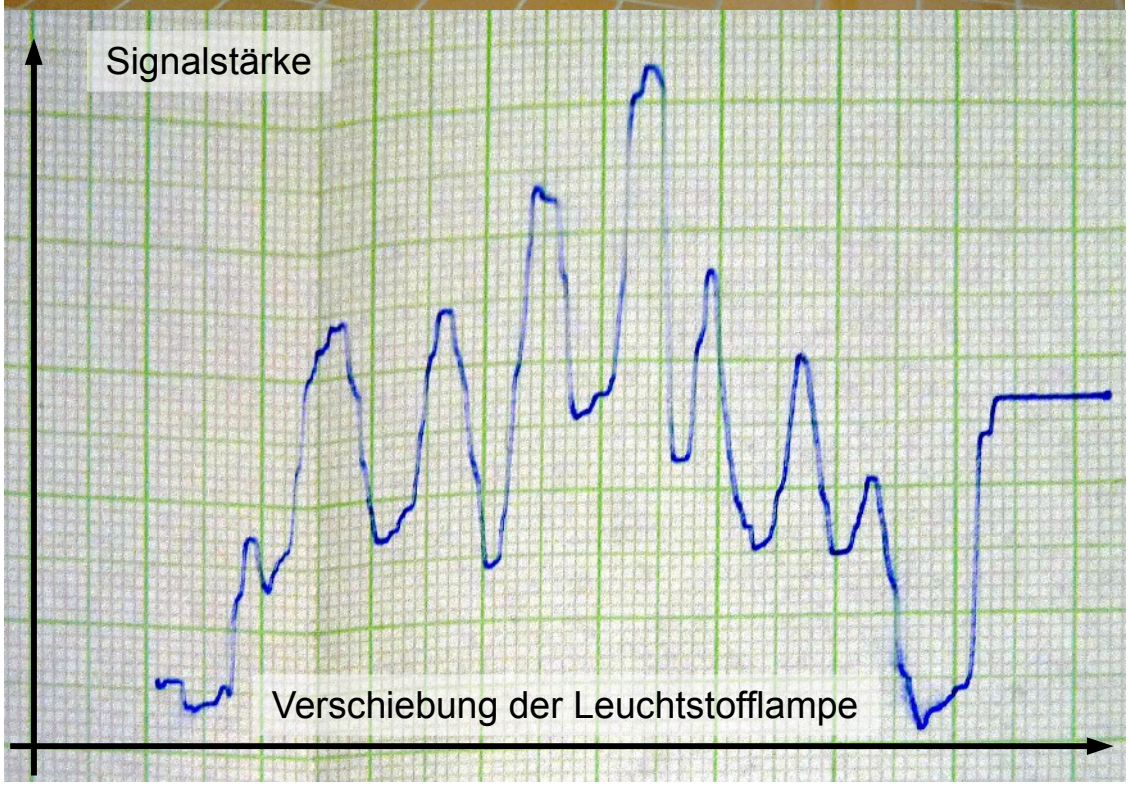
Modell eines Radiointerferometers



Matthias Schäfers
Adrian Lenkeit
St. Michael-Gymnasium Bad Münstereifel

Schüler experimentieren 2013

Gliederung

1. Kurzfassung

2. Einleitung

3. Funktionsweise eines Interferometers

4. Unser akustisches Interferometer
    4.1 Prototyp
    4.2 Das verbesserte Modell
    4.3 Rechnungen für das akustische Interferometer
    4.4 Probleme

5. Mikrowelleninterferometer
    5.1 Radiointerferometer mit zwei SAT-Schüsseln
    5.2 Das Mikrowellen-Seeinterferometer
    5.3 Das Reflexions-Interferometer

6. Danksagung

7. Literaturliste

1. Kurzfassung

Ziel unserer Schüler experimentieren Arbeit ist es ein funktionsfähiges Modell eines Radiointerferometers zu bauen. Der Vorteil gegenüber einer Einzelantenne besteht darin, dass ein Interferometer eine deutlich höhere Auflösung erzielt. Unsere ersten Versuche führten wir mit dem Prototypen eines akustischen Interferometers auf dem Schulhof durch. Der Prototyp bestand aus einem einfachen Brett an dessen Enden jeweils ein Kondensator-Mikrofon befestigt war. Da die ersten Versuche gut funktionierten, beschlossen wir unser akustisches Interferometer weiter zu verbessern. Aufgrund zu nehmend schlechter werdender Wetterverhältnisse führten wir unsere weiteren Versuche drinnen durch. Weil die Schallwellen von den Wänden reflektiert wurden, waren die Messungen aber beeinträchtigt, wodurch wir eine Alternative finden mussten.
Um die Probleme mit den Reflexionen und Störgeräuschen zu umgehen, beschlossen wir ein Mikrowelleninterferometer zu bauen, da Mikrowellen von normalen Wänden nicht reflektiert werden. Da man aber zwei SAT-Schüsseln wegen den unterschiedlichen Oszillatoren nicht einfach zusammenschalten kann, mussten wir andere Interferometer bauen, welche Messungen mit nur einem Empfänger ermöglichen.Wir testeten verschiedene Varianten von Interferometern, wie z.B. das Seeinterferometer und das Reflexionsinterferometer. Diese Interferometer funktionieren sehr gut und wir konnten zeigen, dass Theorie und Experiment gut übereinstimmen.

2. Einleitung

Weil wir uns beide sehr für Astronomie interessieren und weil Matthias für Schüex 2012 ein Modell des Astropeilers in Eschweiler gebaut hat, wollten wir uns einem schwierigeren Thema widmen. Wir beschlossen ein Modell eines Radiointerferometers zu bauen. Wir sind uns bewusst, dass dieses Thema komplex ist, aber trotzdem versuchen wir dieses Thema systematisch anzugehen.

3. Funktionsweise eines Interferometers

Ein Interferometer besteht üblicherweise aus zwei Antennen die miteinander gekoppelt sind. Die Signale werden dann in einen Empfänger geleitet, damit sie ausgewertet werden können. Empfängt man Signale von einer Quelle die senkrecht auf das Interferometer strahlt, so addieren sich die beiden Signale der Antenne zum maximalen Wert, weil sie in gleicher Phase ankommen (Abb. 3.1 a). Wenn die Quelle z.B wegen der Erdrotation am Interferometer vorbeizieht und der Wegunterschied eine halbe Wellenlänge beträgt, dann kommen die Signale nicht mehr in gleicher Phase an. Dementsprechend löschen sich die Signale gegenseitig aus (Abb. 3.1 b). Beträgt der Wegunterschied wieder eine ganze Wellenlänge (Abb. 3.1 c), kommt das Signal wieder im gleichen Takt an und das Signal hat seinen maximalen Wert erreicht. Der Vorteil von dieser Technik besteht darin, dass das Interferometer eine deutlich höhere Auflösung erzielt als eine Einzelantenne (Abb. 3.2). Das bedeutet, dass aufgrund der vielen Maxima und Minima innerhalb der Empfangskeule viele Finger empfangen werden. Erhält man z.B. 7 Finger, dann hat man die 7-fache Auflösung der Einzelantenne (Abb. 3.2).

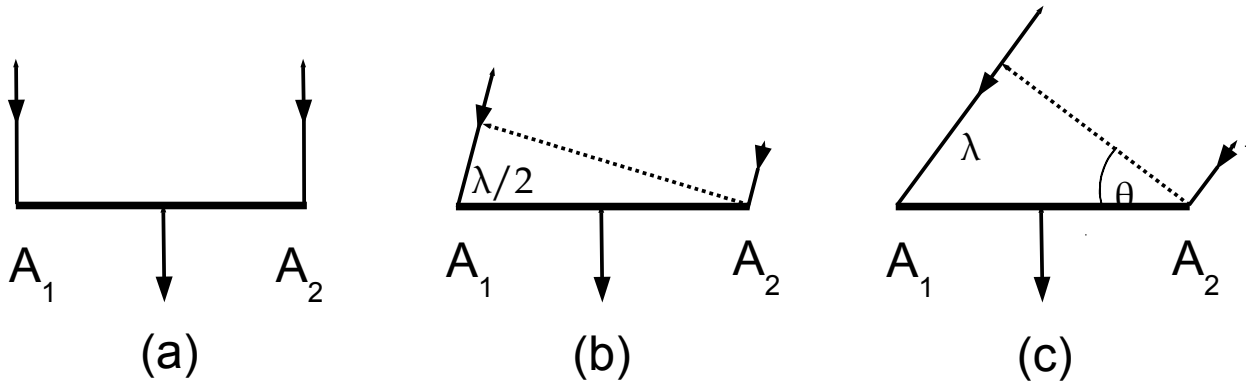
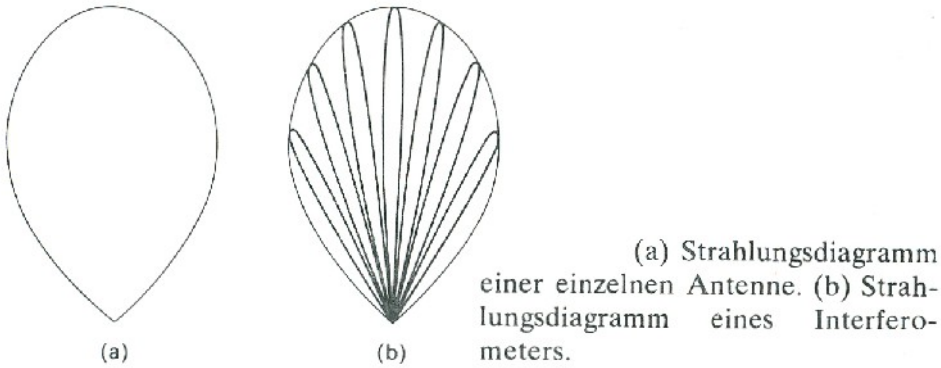


Abb. 3.1: Funktionsprinzip eines Interferometers nach [1], S. 65



(a) Strahlungsdiagramm einer einzelnen Antenne. (b) Strahlungsdiagramm eines Interferometers.

Abb. 3.2: Strahlungsdiagramm [1], S. 66

4. Unser akustisches Interferometer

4.1 Prototyp

Damit wir ein besseres Verständnis dafür bekommen konnten, wie ein Interferometer funktioniert, beschlossen wir ein Interferometer auf Basis von Schallwellen zu konstruieren. Wir bauten zuerst ein akustisches Interferometer aus zwei Kondensator-Mikrofonen. Die hierzu notwendige von uns gelötete Verstärkerschaltung ist in Abb. 4.1 dargestellt.

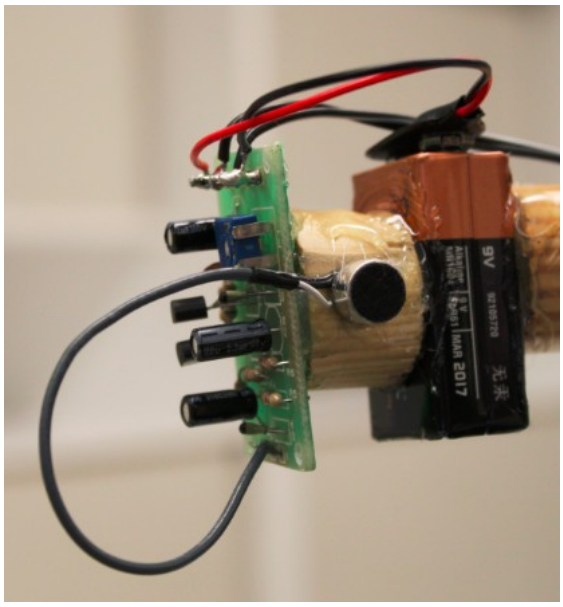


Abb. 4.1: Verstärkerschaltung mit Kondensator-Mikrofon

Abb. 4.2: Prototyp unseres akustischen Interferometers

Die Kondensator-Mikrofone befestigten wir auf einem Brett, um Schallwellen von einem ca. 2 Meter entfernten Lautsprecher aufzuzeichnen. Der Lautsprecher spielte einen Sinus-Ton von 5000 Hz und

10000 Hz ab, während das Brett langsam nach links und rechts gedreht wurde (Abb. 4.2). Die Ergebnisse unserer 5000 Hz-Messungen sind in Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 zu finden.

Die beiden aufgezeichneten Stereospuren (Abb. 4.3 und Abb. 4.4) haben wir am Computer zu einer Monospur (Abb. 4.5) addiert. Anhand der Abbildung 4.5 erkennt man, dass unser akustisches Interferometer gut funktioniert, da Auslöschung und Verstärkung gut zu erkennen sind.

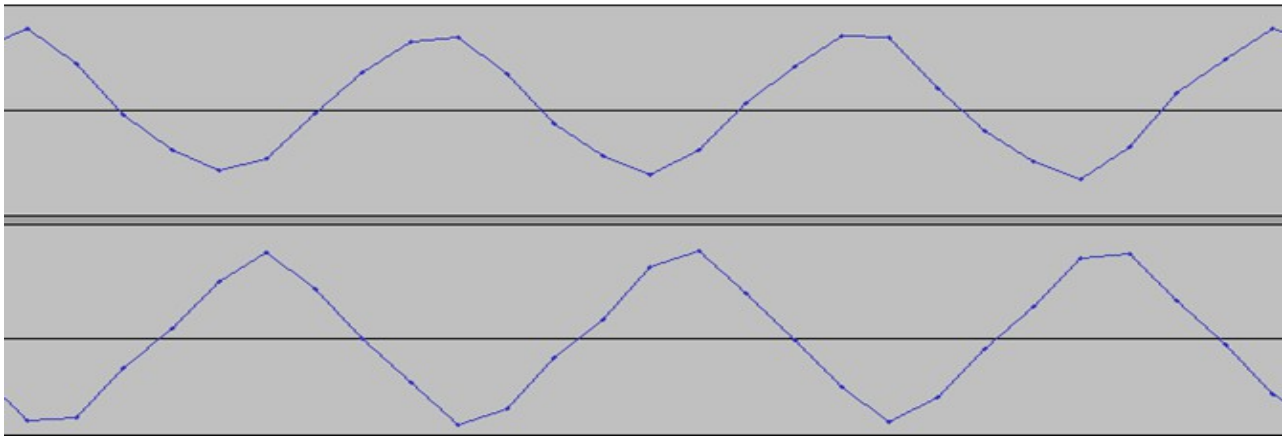


Abb. 4.3: Auslöschung (Ausschnitt der Aufnahme von Abbildung 4.5)
oben linker Kanal, unten rechter Kanal f = 5000 Hz

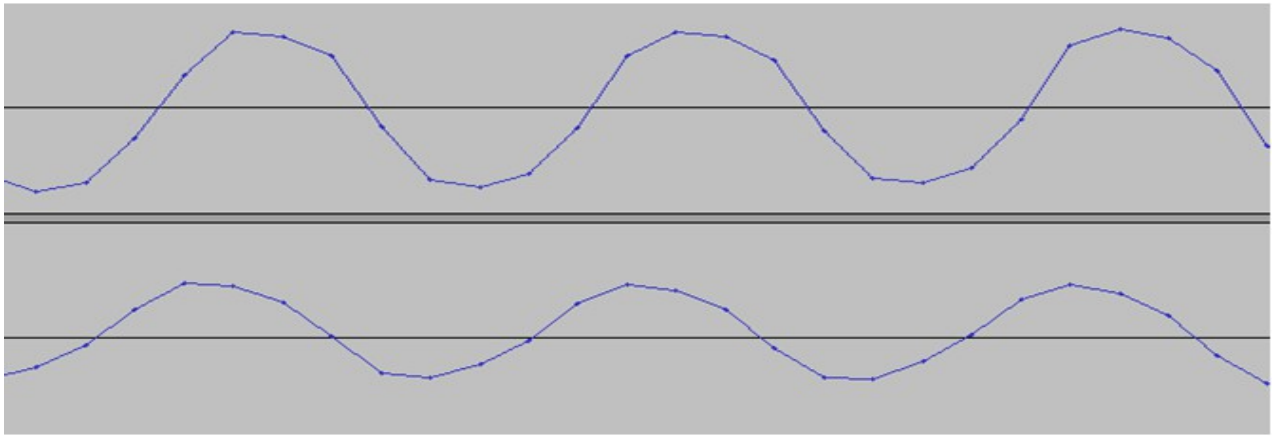


Abb. 4.4: Verstärkung (Ausschnitt der Aufnahme von Abbildung 4.5)
oben linker Kanal, unten rechter Kanal f = 5000 Hz

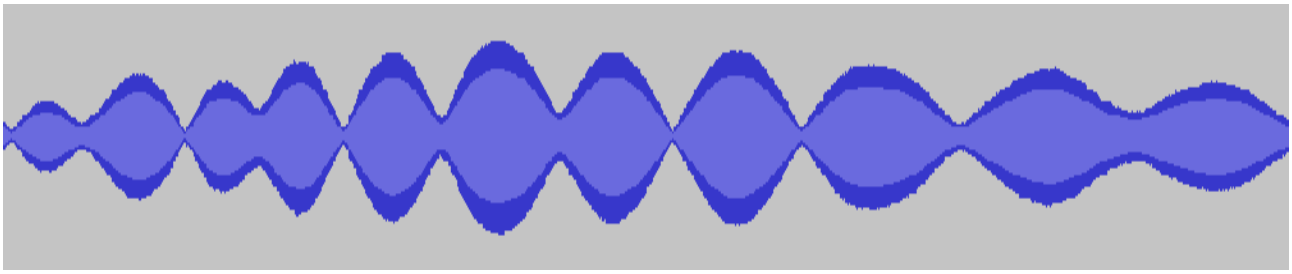


Abb. 4.5: Interferenz gesamte Aufnahme f = 5000 Hz

4.2 Das verbesserte Modell

Unser verbessertes akustische Interferometer sollte in der Lage sein zwei verschiedene Situationen zu simulieren:

1. Von der Erde aus wird gemessenen, während sie sich dreht und die Quelle still steht.
2. Von der Erde aus wird gemessenen, während sie still steht und die Quelle sich bewegt.

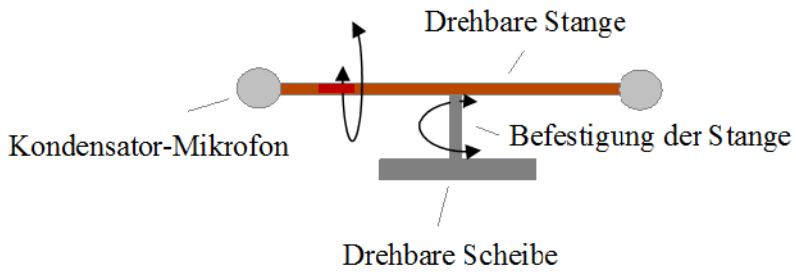


Abb. 4.6: Aufbau des akustischen Interferometers

Das Interferometer sollte außerdem in der Lage sein, sich in der Elevation (Vertikale) und im Azimut (Horizontale) zu drehen. Dies kann ermöglicht werden, indem das Interferometer auf einer horizontal drehbaren Scheibe gelagert wird. Die vertikale Drehung wird ermöglicht, indem die Empfänger an einem Stab befestigt sind, der sich vertikal drehen lässt. Die Winkel können jeweils mit einem Winkelmesser abgelesen werden. Um die Signale der Schallquelle zu empfangen, benutzten wir wieder unsere Kondensator-Mikrofone, welche weit voneinander entfernt sein sollten, damit die Daten zur Auswertung eine gute Qualität haben. Um die Daten auszuwerten reicht ein normaler Laptop mit einem Audioprogramm, in unseren Fall „GoldWave“.

Um das Interferometer zu testen haben wir erneut einen Sinus-Ton mit einer Frequenz von 10000 Hz abgespielt. Das Signal der Mikrofone haben wir über den Computer aufgezeichnet, während das Interferometer langsam gedreht wurde. Wenn Interferenzen entstehen, dann sollte sich die Lautstärke des aufgenommenen Tons ändern, was auch der Fall war.

Abb. 4.7: Das fertiggestellte akustische Interferometer

Um die Aufnahme aber auszuwerten fehlte der Winkel im Azimut in Grad. Außerdem war die Länge der Aufnahmen zu groß um sie in Excel zu importieren. Daraufhin überlegten wir uns, dass wir die Datei-Größe dadurch verringern können, in dem wir nur kurze Aufnahmen machten, die zwei bis drei Auslöschungen des Signals enthielten.
Um dies zu ermöglichen mussten wir den notwendigen Winkel im Azimut in Grad berechnen.

4.3 Rechnungen für das akustische Interferometer

In diesen Abschnitt erklären wir wie wir errechnet haben, wie weit wir unser Interferometer im Modell „Drehende Erde“ drehen müssen um zwei mal Auslöschung zu registrieren.

Als erstes mussten wir die Wellenlänge bei 10.000Hz ausrechnen.

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \lambda = \frac{340\mathrm{m}/s}{10000\mathrm{Hz}} \qquad \lambda = 0{,}034\,m = 3{,}4\,cm$$

λ = Wellenlänge
c = Schallgeschwindigkeit
f = Frequenz

Dazu teilten wir die Schallgeschwindigkeit von 340 Metern pro Sekunde durch die Frequenz von 10.000 Hz. Dementsprechend betrug die Wellenlänge 3,4 cm.

Im zweiten Schritt mussten wir den Umfang ausrechnen.

Die Stange an der unsere Kondensator-Mikrofone befestigt waren hatte eine Länge von 144 cm bzw. einen Radius von 72 cm. Wenn wir also den doppelten Radius oder den Durchmesser mit π multiplizieren erhalten wir einen Umfang von 452,40 cm.

U = Umfang
r = Radius

$$U = 2\mathrm{r} \cdot \pi$$
$$U = 452{,}40\,cm$$

Im letzten Schritt rechneten wir den benötigte Drehwinkel aus:

$$\frac{452{,}40\,cm}{360\,°} = 1{,}257\,cm\ pro\ Grad$$
$$\frac{3{,}4\,cm}{1{,}257\,cm\ pro\ Grad} = 2{,}7\,°$$

Bevor wir den finalen Drehwinkel ausrechnen konnten, mussten wir erst einmal die Bogenlänge von einem Grad berechnen. Wenn wir also den Umfang von 452,40 cm durch 360° teilen wissen wir, dass ein Grad 1,257 cm entspricht. Wenn wir jetzt die Wellenlänge λ = 3,4 cm durch ein Grad, also 1,257 cm teilen erhalten wir eine Drehweite von 2,7°.

Wenn wir also unser Interferometer um 2,7° im Azimut (Horizontale) drehen, reicht dies um zwei mal Auslöschung zu registrieren, ohne die Größe der Aufnahmedateien unnötig in die Höhe zu treiben.

4.4 Probleme

Obwohl wir mit dem akustischen Interferometer gute Messungen zu Stande bringen konnten, gab es auch Probleme. So konnten wir z.B. nicht in einem kleinen geschlossenen Raum messen, weil der Schall von den Wänden reflektiert wird und somit Störungen verursacht. Messungen im Freien führten auch zu Problemen, weil die Kondensator-Mikrofone alle Umgebungsgeräusche aufnahmen. Damit waren Messungen mit dem akustischen Interferometer störanfällig.

5. Mikrowelleninterferometer

5.1 Radiointerferometer mit zwei Satellitenschüsseln

Um die Probleme mit den Reflexionen und Störgeräuschen zu umgehen, beschlossen wir ein Mikrowelleninterferometer zu bauen, da Mikrowellen von normalen Wänden nicht reflektiert werden. Dazu benötigten wir zwei SAT-Schüsseln mit LNBs die als Empfänger dienen sowie einen Mikrowellensender.
Als Mikrowellenquelle dient uns eine Leuchtstofflampe. Diese sendet nicht nur Licht, sondern auch Mikrowellen geringer Intensität aus. Die Intensität dieser Mikrowellenstrahlung schwankt mit einer Frequenz 100 Hz, da die Ladungen in der Leuchtstofflampe 50x in der Sekunde hin und 50x in der Sekunde her beschleunigt werden. Und bekanntlich strahlen beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen ab, darunter auch Mikrowellen. Unsere LNBs sind empfindlich genug um diese Mikrowellenstrahlung zu empfangen.

Nun stellten wir die beiden SAT-Schüsseln in einem Abstand von ca. 3 m auf. Die Leuchtstofflampe stand mittig in einem Abstand von ca. 4 m von der Verbindungslinie der beiden SAT-Schüsseln entfernt. Die von den beiden LNBs empfangenen Signale addierten wir nun mithilfe eines T-Stücks und leiteten das Signal zum Verstärker weiter. Um den Aufbau zu testen, bewegten wir die Leuchtstofflampe langsam von links nach rechts und zeichneten das Signal dabei mit einem analogen x-t-Schreiber auf. Ein Signal konnten wir zwar empfangen, aber Interferenzen konnten wir nicht registrieren. Nach zahlreichen Fehlversuchen bekamen wir den Tipp, dass die in den LNBs verbauten Oszillatoren nicht mit genau der gleichen Frequenz schwingen, weshalb man keine Interferenzen aufzeichnen kann. Was nun?

5.2 Das Mikrowellen-Seeinterferometer

Um dieses Problem zu lösen, mussten wir Interferometer finden, welche mit nur einem Empfänger funktionieren. Nach intensiver Recherche im Internet stießen wir auf das Seeinterferometer.

Bei einem Seeinterferometer steht das Radioteleskop z.B. auf einer Klippe an einem See. Es basiert darauf, das die Strahlen der Quelle auf direktem Wege in den Empfänger treffen sowie zuerst auf den See treffen und von dort in den Empfänger reflektiert werden. Der zweite Weg ist dadurch länger als der erste, wodurch Interferenzen entstehen, wenn die Erde sich dreht.

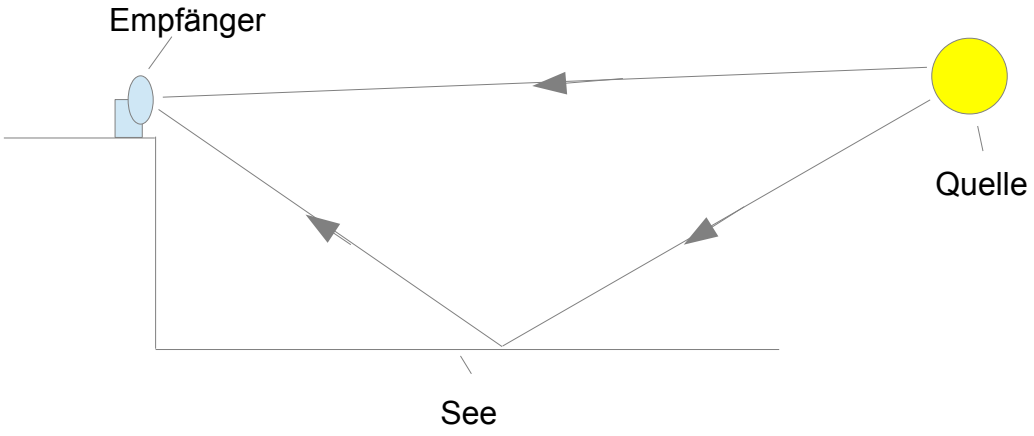


Abb. 5.1: Skizze des Seeinterferometers

Um das Seeinterferometer genauer zu verstehen, beschlossen wir es nachzubauen. Wir haben einen Mikrowellen-Sender und -Empfänger über dem Boden befestigt. Zwischen dem Sender und dem Empfänger

haben wir eine dicke Metallplatte gelegt, die den See darstellt (Abb. 5.2). Um zu testen, ob Interferenzen entstehen, haben wir den Sender in 0,25 cm Schritten nach vorne bewegt und die Spannung notiert. Aus diesen Daten haben wir ein Diagramm erstellt (Abb. 5.3).

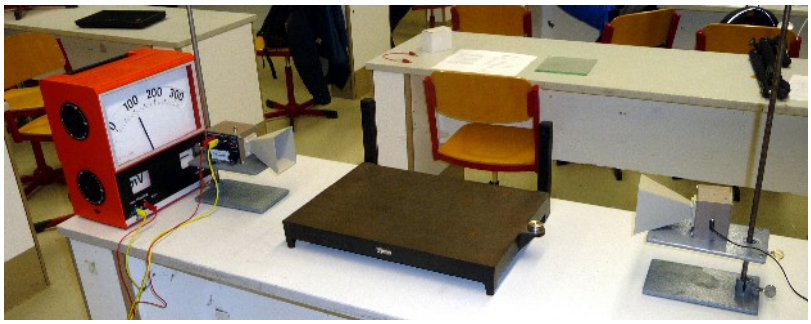


Abb. 5.2: Aufbau des Mikrowellen-Seeinterferometers

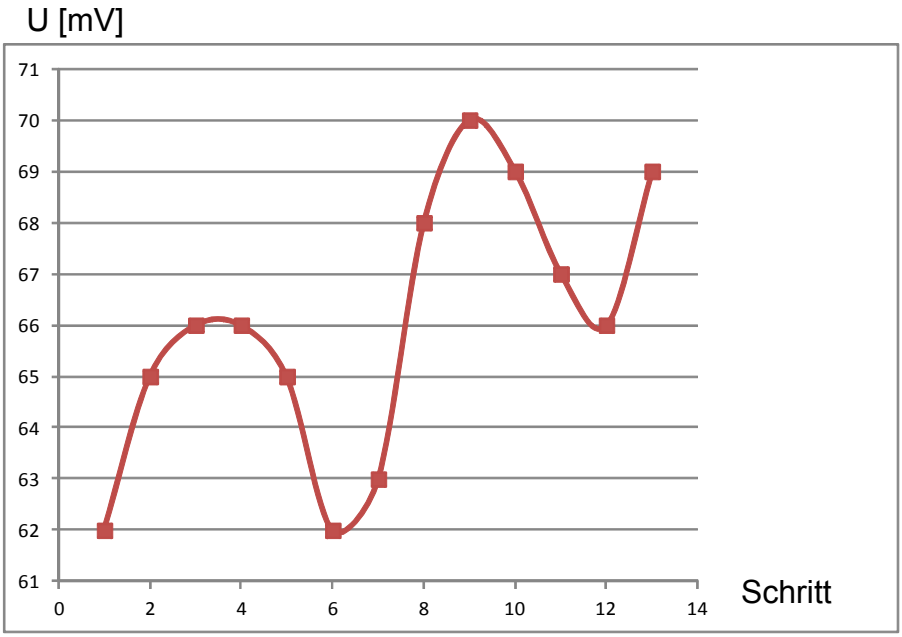


Abb. 5.3: Diagramm der ersten Messung

Im obigen Diagramm (Abb. 5.3) kann man erkennen, dass die Signalstärke stetig steigt und abnimmt. Außerdem wird das Signal stärker, je geringer die Entfernung zwischen Sender und Empfänger ist. Beim Messen stellten wir außerdem fest, das man auf die Polarisationsrichtung der Mikrowellen achten muss, da sonst kein Signal empfangen wird.

Dieser Versuch entsprach aber nicht der Wirklichkeit, da sich die Quelle nicht auf den Empfänger zu bewegt, sondern die Erde rotiert und sich von der Quelle wegdreht. Um dies zu erfüllen, mussten wir die Versuchsanordnung leicht verändern. Im Gegensatz zu unserem ersten Versuch stellten wir die Metallplatte, die unseren See darstellte, senkrecht auf. Die Rotation der Erde konnten wir nun durch verändern des Winkels, in dem der Mikrowellensender auf die Metallplatte strahlte, darstellen (Abb. 5.4).

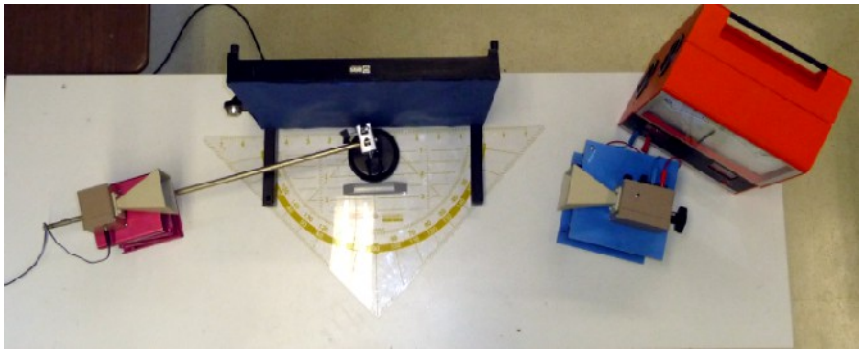


Abb. 5.4: Aufbau des zweiten Versuchs

Bei den neuen Messergebnissen im unteren Diagramm (Abb. 5.5) kann man mehrere durch Interferenzen entstandene Maxima und Minima erkennen.

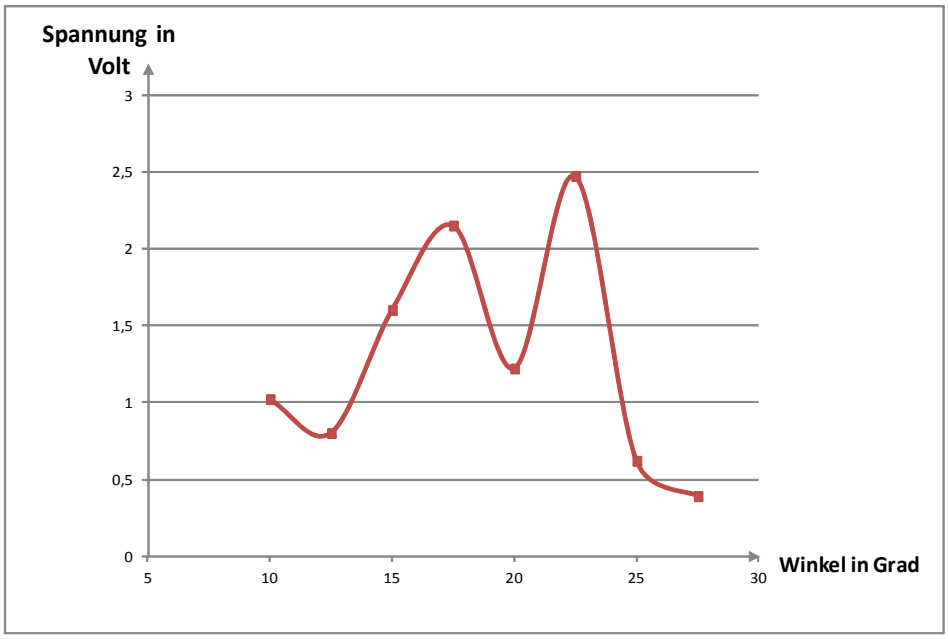


Abb. 5.5: Diagramm der neuen Messung

5.3 Das Reflexions-Interferometer

Nachdem unsere Messungen mit dem Seeinterferometer erfolgreich waren, suchten wir im Internet nach weiteren Ideen für den Bau eines Interferometers mit nur einem Empfänger. Auf der Internetseite der *Stony Brook University* erhielten wir Anregung für den Bau eines Reflexionsinterferometers [4].

Das Reflexions-Interferometer benutzt wie das Seeinterferometer nur einen Empfänger. Die Signale, die es aufnnimmt werden über vier Reflektoren in den Empfänger reflektiert (Abb. 5.6). Durch Verschieben der Quelle lassen sich Interferenzen erzeugen.

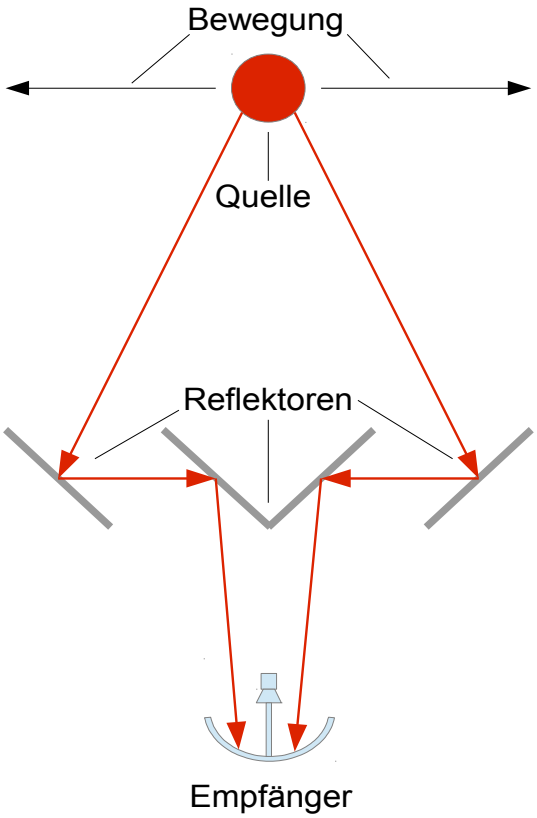


Abb. 5.6: Skizze des ersten Reflexionsinterferometers

Das Reflexions-Interferometer schien sehr interessant für uns zu sein, da wir ein kleines Radioteleskop (Satellitenschüssel) besitzen, welches an einer Fernrohrmontierung befestigt ist. Als Quelle verwenden wir wie oben erwähnt eine Leuchtstofflampe. Als Reflektoren dienen uns große Sperrholzplatten die mit Alufolie überzogen sind. Ein analoger LNB dient als Empfänger. Nach dem Einschalten der Lampe war zuerst kein Signal zu messen. Als Fehlerquelle stellte sich heraus, dass die Reflektoren nicht fein genug justiert waren, wodurch das Signal nicht in den Empfänger reflektiert wurde.
Das Reflexions-Interferometer hatte aber noch einige Fehler. So konnte bei ungenauer Ausrichtung die Quelle direkt in den Empfänger strahlen, wodurch das Signal unbrauchbar wurde (Abb. 5.6 und Abb. 5.7). Um dieses Problem zu lösen, beschlossen wir, denn Aufbau leicht zu verändern (Abb. 5.8).

Abb. 5.7: Aufbau des Reflexions-Interferometer

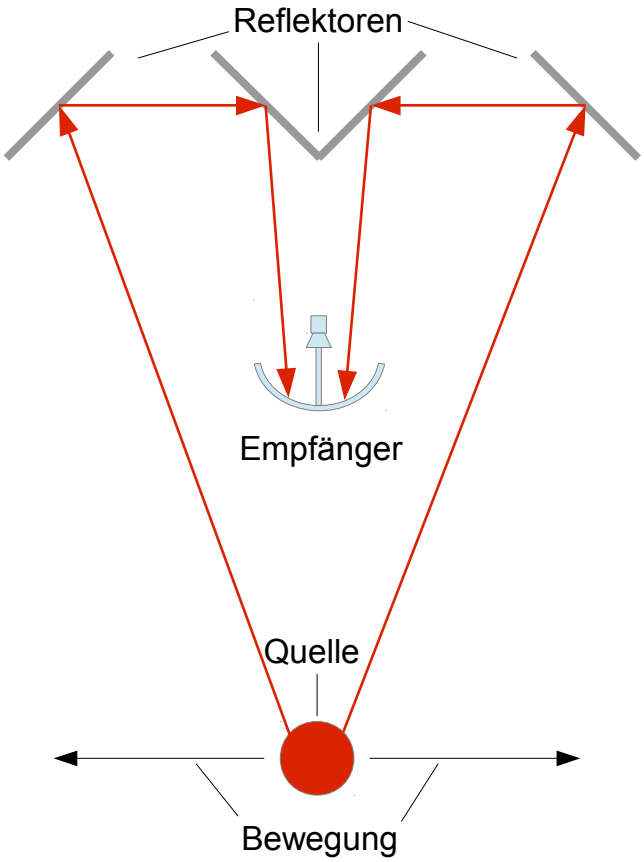
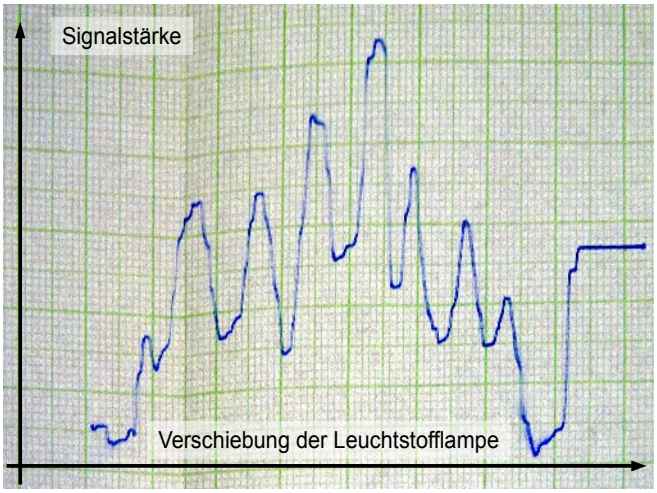


Abb. 5.8: Neuer Aufbau des Reflexionsinterferometers

Abb. 5.9: Aufbau des neuen Reflexions-Interferometer Nr.2

Die Leuchtstofflampe konnte nun nicht mehr auf direktem Wege in den Empfänger strahlen. Außerdem mussten wir die äußeren Reflektoren drehen, damit die Signale der Quelle in den Empfänger reflektiert werden. Um die empfangenen Signale auszuwerten, benutzen wir wieder den alten x-t-Schreiber.

Die Leuchtstofflampe bewegten wir langsam von rechts nach links, wodurch Interferenz entstehen sollte, ein Signal wurde aber nicht empfangen. Da wir ein ähnliches Problem schon einmal hatten, wussten wir, dass wir die Reflektoren neu justieren mussten. Nach dem Umstellen der Reflektoren und einem erneutem Test stellten wir fest, das starke Interferenzen entstanden. Das aufgezeichnete Signal (Abb. 5.10, links) hatte eine hohe Qualität, weil viele Maxima und Minima entstanden und die Signalstärke zur Mitte hin zunahm. Ein Vergleich mit Abb. 5.10 (rechts) zeigt, dass wir mit unseren Messungen zufrieden sein können.



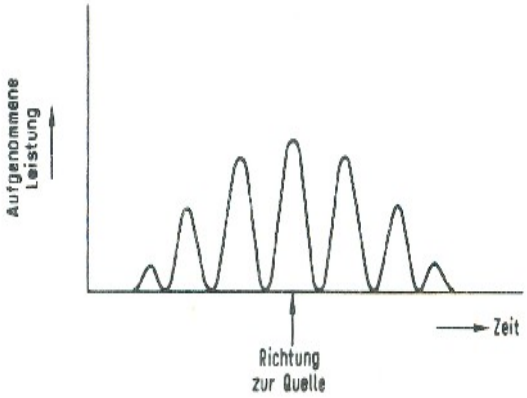


Abb. 5.10: Diagramm unserer Messung (links) und der Idealfall [1] (rechts)

Um zu überprüfen ob unsere experimentellen Werte mit den theoretischen Werten übereinstimmen, haben wir folgende Rechnung angefertigt.

Für die Halbwertsbreite einer Antenne mit dem Durchmesser D gilt:

$\Theta_A = \frac{\lambda}{D}$ (Winkel im Bogenmaß) oder $\Theta_A = 57{,}3° \frac{\lambda}{D}$ (Winkel in Grad)

Für die Halbwertsbreite einer Einzelkeule in einem Interferometer mit der Basislänge L gilt:

$\Theta_I = \frac{\lambda}{L}$ (Winkel im Bogenmaß) oder $\Theta_I = 57{,}3° \frac{\lambda}{L}$ (Winkel in Grad)

$$\frac{\Theta_A}{\Theta_I} = \frac{\frac{\lambda}{D}}{\frac{\lambda}{L}} = \frac{L}{D} = \frac{3\ m}{0{,}36\ m} = 8{,}33 \approx 8$$

Da unsere Antenne einen Durchmesser von 0,36 m hat und der Abstand der beiden Aluminiumreflektoren einen Abstand von 3 m hatte, folgt, dass wir 8 Einzelkeulen registrieren müssen, was auch der Fall war. Somit haben wir gezeigt, dass im Rahmen der Messfehler Theorie und Experiment übereinstimmen.

7. Danksagung

Ganz herzlich möchten wir uns bei Herr Thum und Herr Stein bedanken, die uns bei der Realisierung unseres Projektes mit Rat zur Seite standen.

8. Literaturliste

1. Das Radiouniversum J.S.Hey, 1971
2. Radioastronomie Peter Wellmann, 1957
3. Die phantastische Welt der Radioastronomie Gerrit L. Verschuur, 1988
4. http://www.astro.sunysb.edu/metchev/PHY517_AST443/solar_diameter.pdf