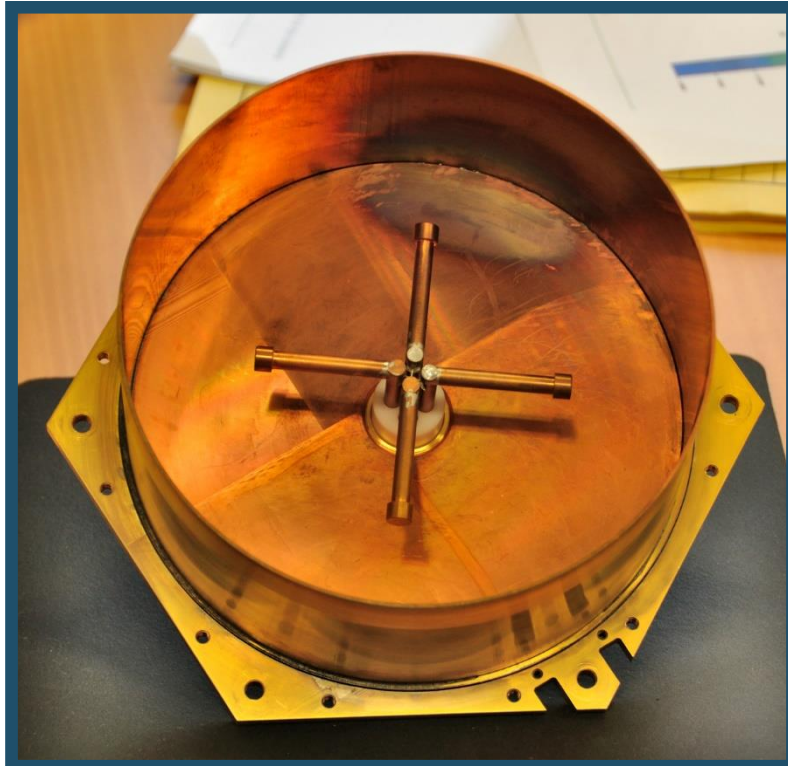


Untersuchung von polarisierten elektromagnetischen Wellen



Kristel Boeijink (16)

Helen Kohrs (14)

Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2016

Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“ des
Christian Gymnasium Hermannsburg
Betreuung: StD Thomas Biedermann

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Grundlagen.....	3
2.1 Elektromagnetische Wellen.....	3
2.2 Polarisierung	3
2.3 Dipol.....	4
2.4 Netz-Werk-Analysator (NWA)	4
2.5 Die Einheit DeziBel.....	4
2.6 Abstandsgesetz	5
3. Experimente.....	6
3.1 Versuchsaufbau	6
3.2 Versuch 1: Abstandsänderung.....	7
3.3 Versuch 2: Winkelverhalten im Fern- und Nahfeld.....	8
4. Fehleranalyse	11
5. Zusammenfassung	11
6. Danksagung.....	11
Quellenverzeichnis	11
Bibliographie	11

Das Bild auf der Titelseite zeigt einen Kreuzdipol für 1420 MHz, wie er im Radioteleskop in Effelsberg zum Einsatz gekommen war und der uns für unser Teleskop zur Verfügung gestellt wurde.

1. Einleitung

Wir haben uns vor einiger Zeit mit dem Thema polarisiertes Licht befasst und uns dabei auf sichtbares Licht beschränkt. Da wir uns in unserer AG auch mit Radioastronomie befassen, kam die Idee diese beiden Themen mit einander zu kombinieren.

Das Spektrum des sichtbaren Lichts, welches wir vorher mit Polarisationsfiltern untersucht haben, wurde dann durch Radiowellen ersetzt. Die Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen wurden danach mit mehreren Experimenten untersucht.

2. Grundlagen

2.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen sind eine Erscheinungsform von Energie. Sie bestehen aus einem magnetischen und einem elektrischen Feld, die jeweils senkrecht auf einander stehen und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung orientiert sind. Es handelt sich deshalb um Transversalwellen und können somit polarisiert werden.

Wellen sind charakterisiert durch ihre Frequenz f und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit c_v , daraus ergibt sich ihre Wellenlänge λ . Es besteht der Zusammenhang

$$\lambda = \frac{c_v}{f} \quad (1)$$

Bei elektromagnetischen Wellen ist ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum gleich der Lichtgeschwindigkeit c .

Zu den elektromagnetischen Wellen gehört zum Beispiel das sichtbare Licht. Das sichtbare Licht umfasst Frequenzen von $3,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ bis $7,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, entsprechend einem Wellenlängenbereich von 770 nm (Rot) bis 390 nm (Blau). Dieses bildet dabei nur einen kleinen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums. Einen weitaus größeren Bereich umfassen die Radiowellen mit Frequenzen von 150 kHz bis 300 GHz, entsprechend einem Wellenlängenbereich von 2000 m bis 1 mm. In seinem kurzwelligen Bereich können die Radiowellen z.B. von Radioteleskopen erfasst werden.

Radioteleskope arbeiten vorwiegend mit Wellen im Dezimeter- bis zum Millimeterbereich, während Satellitenempfangsanlagen Wellenlängen im Zentimeterbereich bei Frequenzen zwischen 8 und 12 GHz verwenden.

2.2 Polarisation

Elektromagnetische Wellen können in alle möglichen Richtungen schwingen. Durch geeignete Maßnahmen kann diese Schwingungsrichtung aber beeinflusst werden, dann spricht man von einer polarisierten Schwingung. Dies kann man zum Beispiel bei einer herkömmlichen Lichtquelle erreichen, indem man einen Polarisationsfilter verwendet. Mit einem weiteren Filter lässt sich dieses polarisierte Licht blockieren, indem man den Filter orthogonal zu der Schwingungsrichtung ausrichtet. Bei Parallelität kann die Welle ungehindert passieren. Radiowellen, die von natürlichen Quellen stammen, sind in der Regel nicht polarisiert. Polarisierte Radiowellen entstehen aber, wenn sie von einem Objekt abgestrahlt werden, das für eine der beiden Feldkomponenten eine Vorzugsrichtung hat, wie z.B. bei einer Dipolantenne.

2.3 Dipol

Eine Antenne ist ein Bauteil, das eine elektrische Schwingung in eine elektromagnetische Welle umwandeln kann und umgekehrt. Mit ihr kann man also sowohl Radiowellen senden als auch empfangen. Im einfachsten Fall besteht sie aus einem gestreckten elektrischen Leiter. Bei Anlegen einer Wechselspannung sorgt man dafür, dass ein Wechselstrom fließt. Dabei entstehen ein wechselndes elektrisches Feld und ein wechselndes Magnetfeld, die zusammen in den umgebenden Raum abgestrahlt werden. Zur Einspeisung des Stromes wird der Leiter in der Regel in der Mitte geteilt. Die beiden Hälften des Stabes bezeichnet man dann als Dipol. Fasst man den Leiter selbst als Induktivität und seine Enden als Kapazität auf, so bildet er einen Schwingkreis mit einer bestimmten Resonanzfrequenz. Regt man einen solchen Dipol mit dieser Resonanzfrequenz an, sind seine Leistungsverluste minimal und seine Abstrahlung maximal. In erster Näherung ist das dann der Fall, wenn die beiden Dipolhälften jeweils die Länge von einem Viertel der Wellenlänge haben.

2.4 Netz-Werk-Analysator (NWA)

Der NWA ist ein Messgerät zur Untersuchung von Hochfrequenz-Bauteilen wie z.B. Filtern, Verstärkern oder eben auch unserer Dipole. Er enthält einen durchstimmbaren Hochfrequenz-Oszillator sowie ein Leistungsmessgerät für Hochfrequenzsignale. Zur Untersuchung von Bauteilen wird ein genau definiertes Signal erzeugt und vor und nach Durchlaufen der Messstrecke gemessen. Durch die sich ergebenden Veränderungen können die Eigenschaften der Bauteile genau bestimmt werden.

Für unsere Messungen benutzen wir von den Komponenten des NWA lediglich den Oszillator zur Erzeugung eines Hochfrequenzsignales bekannter Frequenz und Amplitude und das Leistungsmessgerät zur Messung der übertragenen Leistung.

2.5 Die Einheit DeziBel

Die Quasieinheit Dezibel wird am häufigsten für die Hochfrequenz-, Ton-, Automatisierungs- und Nachrichtentechnik eingesetzt, da sich dort die Spannungs-, und Leistungswerte meist über einen großen Bereich erstrecken. Aus diesem Grund wurde eine Einheit geschaffen, welche logarithmisch angegeben wird, diese heißt „Bel“. Am häufigsten benutzt man jedoch ein Zehntel Bel, welches auch als „DeziBel“ bekannt ist. Bel ist eine Quasieinheit, da bei Formeln die Einheiten durch das Dividieren wegfallen [1].

$$G_{dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad (2)$$

Doch wenn Dezibel einen Bezugswert hat wird daraus eine „echte Einheit“, wie zum Beispiel dBW oder dBmV:

$$P_{dBW} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{1W}\right) \quad (3)$$

<i>G in dB</i>	0	10	20	30	40	50
<i>P/1W</i>	1	10	100	1 000	10 000	100 000

Tab. 1: Zusammenhang zwischen *G* in dB und dem Leistungsverhältnis

Bei negativen Werten für *G* ist der entsprechende Kehrwert im Leistungsquotienten zu bilden. Wir haben einen Messbereich von 0 ... -50 dB, das heißt, dass wir unterhalb von -40

dB Signale messen, die 1/100 000 des maximalen Signals ausmachen. In diesem Bereich messen wir deshalb fast nur noch das Rauschen unserer Komponenten.

Dieses Rauschen entsteht unter anderem durch die Wärme in unseren Komponenten. Für diese thermische Rauschleistung bezogen auf ein 1 mW in dBm gilt:

$$P_{dBm} = 10 \cdot \lg \left(\frac{k \cdot T_R \cdot \Delta f}{1 \text{ mW}} \right) \quad (4)$$

P_{dBm} = Rauschleistung

T_R = Rauschtemperatur

Δf = Bandbreite des Rauschens

2.6 Abstandsgesetz

Das Abstandsgesetz kann auf den Strahlensatz für Flächen zurückgeführt werden. Die von einer Quelle Q ausgehende Strahlung wird in allen Richtungen abgestrahlt und durchsetzt so auch die Fläche A1 im Abstand r1. Vergrößert man den Abstand auf r2, wird die von den gleichen Begrenzungen umrahmte Fläche A2 größer, erhält aber nach wie vor die gleiche Strahlung. Pro Flächeneinheit ist die Strahlung somit kleiner geworden. Da sich die Fläche mit dem Quadrat des Abstandes vergrößert, nimmt folglich die Strahlung pro Flächeneinheit mit dem Quadrat des Abstandes ab.

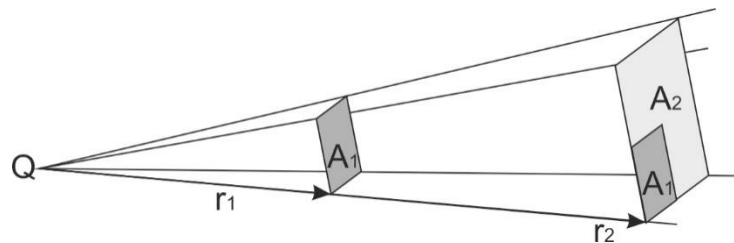


Abb. 1: Strahlensatz für Flächen

Das Abstandsgesetz gilt für räumlich ausgedehnte Quellen jedoch nur in größerer Entfernung, da dort erst die Wellenfronten der elektromagnetischen Wellen parallel sind. Im Nahbereich der Quelle können andere Übertragungswege (z.B. Induktion) das Gesetz verfälschen.

Bei unseren Versuchen verwenden wir eine Frequenz von 850 MHz, um Störungen in anderen sensiblen Frequenzbereichen zu vermeiden. Die zugehörige Wellenlänge ergibt sich nach Glg. (1) zu

$$\lambda = \frac{2,997 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{850 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 0,35 \text{ m}$$

Ein optimaler Dipol zur Abstrahlung dieser Wellenlänge müsste demnach eine Stablänge von 8,8 cm haben. Tatsächlich verwenden wir aber einen Dipol mit 4,5 cm bzw. 5,5 cm Stablänge, sodass unsere Anpassung nicht optimal ist. Das Fernfeld beginnt dementsprechend bei ca. 3,5 m Abstand (10-facher Wellenlänge), was wir aber wegen der von uns verwendeten geringen Abstrahlenergie nicht vermessen konnten.

3. Experimente

3.1 Versuchsaufbau

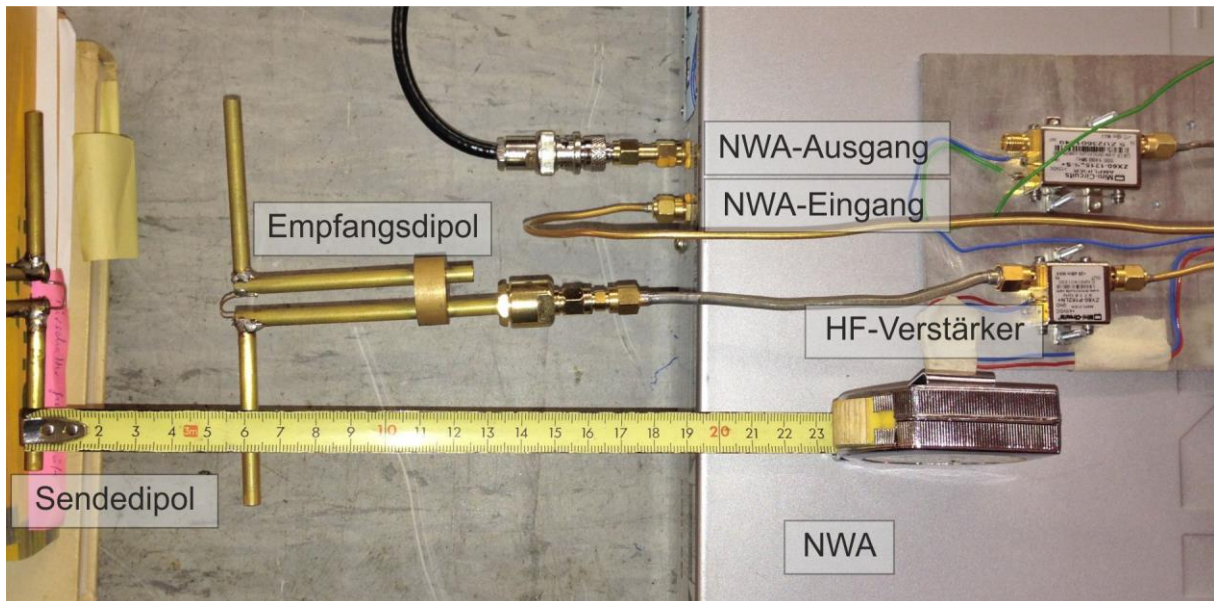


Abb. 2: Übersicht über den verwendeten Messaufbau

Der NWA erzeugt ein Signal mit einer Frequenz von 850 MHz, dieses wird mit dem ersten Dipol (ganz links in Abb. 1) als elektromagnetische Welle ausgesendet. Die Sendeleistung kann mit dem im NWA integrierten digitalen Abschwächer von 0 bis 31 dB abgeschwächt werden. Mit dem Empfangsdipol wird die vom Sendedipol ausgesandte Welle wieder empfangen und in ein Spannungssignal umgewandelt. Dieses Signal wird mit einem rauscharmen HF-Verstärker (rechts im Bild) um 24 dB verstärkt und kann nun über den entsprechenden Eingang des NWA ausgewertet werden. Dieser zeigt dann die Empfangsleistung an. Die Steuerung des NWA und das Auslesen der Messdaten erfolgt über ein entsprechendes Computerprogramm (s. Abb. 2). Im unteren Teil des Screenshots sieht man die Ausgabe des Leistungsmessgerätes. Die einzelnen Messwerte wurden manuell protokolliert und in Excel weiterverarbeitet.

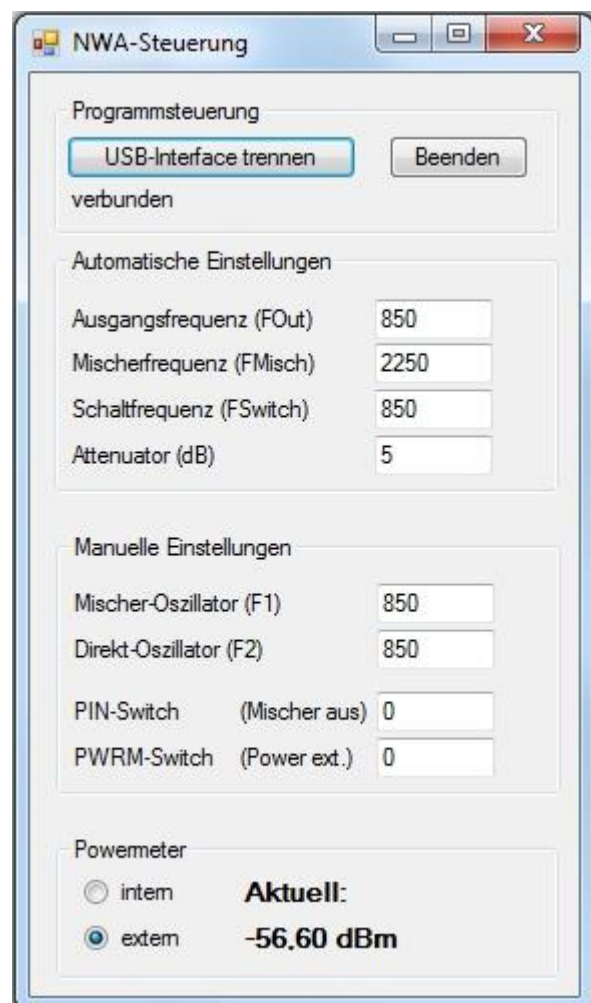


Abb. 2: Bedienoberfläche des NWA-Steuerprogramms

3.2 Versuch 1: Abstandsänderung

In diesem Experiment wird bei parallel ausgerichteten Dipolen der Abstand im Bereich von 2 cm bis 24 cm in Schritten von 2 cm variiert. Dieser Versuch wurde mit drei verschiedenen Abschwächereinstellungen (5 dB, 15 dB, 30 dB) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 wiedergegeben:

Abstand in cm	Pegel in dB bei Attenuator...			rel. Leistung		
	5 dB	15 dB	30 dB	5 dB	15 dB	30 dB
2	-0,02	-11,67	-24,08	1,000	1,000	1,000
4	-7,09	-16,43	-29,92	0,196	0,334	0,261
6	-10,78	-20,25	-33,04	0,084	0,139	0,127
8	-13,32	-23,23	-36,46	0,047	0,070	0,058
10	-15,57	-26,73	-37,93	0,028	0,031	0,041
12	-17,23	-29,49	-40,42	0,019	0,017	0,023
14	-18,6	-31,84	-42,46	0,014	0,010	0,015
16	-20,01	-34,51	-44,44	0,010	0,005	0,009
18	-21,46	-36,73	-47,03	0,007	0,003	0,005
20	-23,32	-38,85	-47,36	0,005	0,002	0,005
22	-25,23	-40,22	-48,00	0,003	0,001	0,004
24	-27,17	-41,22	-47,35	0,002	0,001	0,005

Tab. 2: Messwerte zur Abstandsänderung

In den rechten 3 Spalten ist die relative Leistung – bezogen auf die Anfangsleistung bei minimalem Abstand – eingetragen., die entsprechenden graphischen Darstellungen finden sich in Abb. 3.

Man erkennt geringfügige Abweichungen vom erwarteten Abstandsgesetz, dem zu folge die Leistung mit dem Quadrat des Abstandes abnehmen müsste. Eine genauere Analyse zeigt, dass die entsprechenden Potenzen im Bereich zwischen -1,5 und -2,3 streuen (Erwartungswert: -2).

Aus Abb. 4 kann man entnehmen, dass bei 30 dB Abschwächung das unvermeidliche Rauschen das Signal überdeckt, sodass hier bei größeren Abständen kein auswertbares Signal mehr vorliegt.

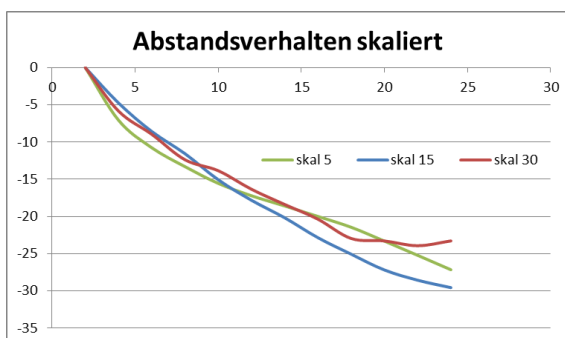
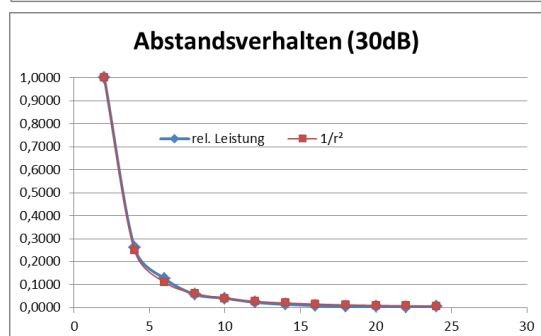
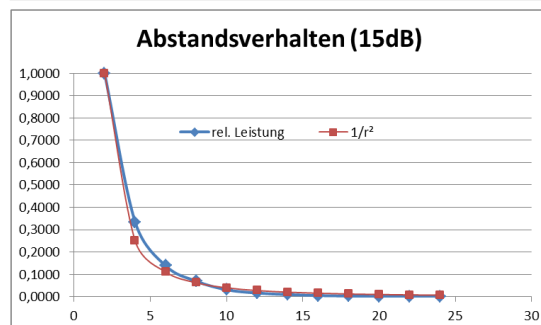
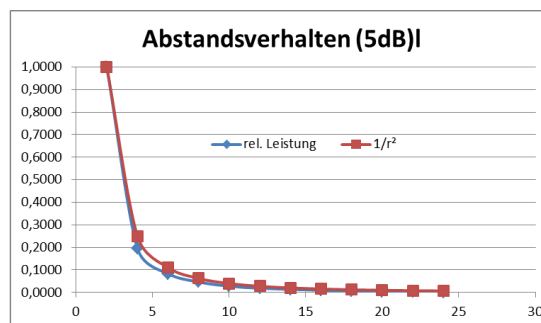


Abb. 4: Skalierung der Messwerte

Abb. 3: Abstandsverhalten

3.3 Versuch 2: Winkelverhalten im Fern- und Nahfeld

In diesem Versuch wurde der Winkel zwischen den beiden Dipolen einmal bei einem Abstand von 4 cm und einmal bei 20 cm im Bereich von 0 bis 180° in Schritten von 15° geändert. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 wiedergegeben:

Winkel	Pegel in dB bei Attenuator 30 dB			
	Fernfeld 20 cm		Nahfeld 4 cm	
0	-21,83	0,84	-36,00	0,84
15	-21,09	1,00	-35,63	0,92
30	-21,09	1,00	-35,26	1,00
45	-22,57	0,71	-35,63	0,92
60	-24,08	0,50	-36,36	0,78
75	-26,00	0,32	-39,54	0,37
90	-34,96	0,04	-43,18	0,16
105	-43,80	0,01	-50,98	0,03
120	-29,92	0,13	-44,49	0,12
135	-26,39	0,30	-40,55	0,30
150	-22,57	0,71	-37,44	0,61
165	-21,83	0,84	-36,00	0,84
180	-21,09	1,00	-35,63	0,92

Tab. 3: Messergebnisse bei Drehung des Dipols

Abb. 5 zeigt zunächst den Verlauf bei 20 cm Abstand. Die relative Leistung gleicht, wie man gut sehen kann, recht genau einer quadrierten Cosinus Funktion, wie sie bei einer Leistungsübertragung zu erwarten ist.

Die Abweichung bei dem Winkel 150° kommt vermutlich durch Messfehler.

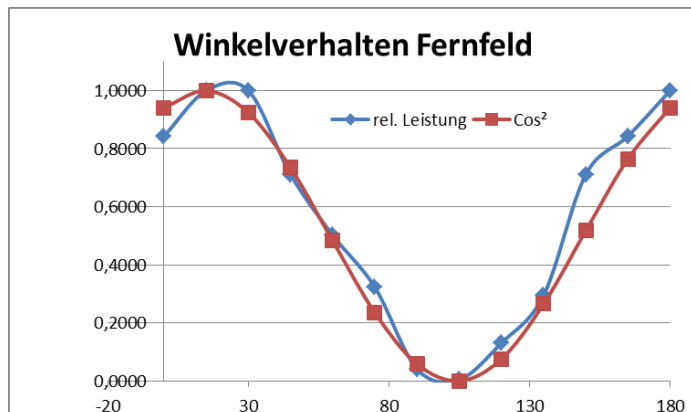


Abb. 5: Messwerte und Erwartungswerte im Fernfeld

Den Verlauf der relativen Leistung kann man auch berechnen, wie es im Folgenden beschrieben wird:

Die Leistung ergibt sich aus der Spannung und der Stromstärke.

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

Spannung und Stromstärke sind gleichzeitig ausschlaggebend für die Feldstärken, da sie die Ursache für das magnetische und elektrische Feld sind.

Die folgende Gleichung stellt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld dar:

$$\vec{S} = \frac{P}{A} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (6) \quad (\text{Maxwell})$$

\vec{S} ist hier der Vektor, der die Leistung pro Fläche angibt. Der Betrag des Vektors ist die Intensität der Welle. Da das elektrische und magnetische Feld orthogonal zueinander stehen kann man die Gleichung nach Umformung folgendermaßen schreiben:

$$P = \frac{A}{\mu_0} \cdot E \cdot B \quad (7)$$

Zur Berechnung der gemessenen Leistung, multipliziert man den ursprünglichen maximalen Wert bei Parallelität der Dipole mit dem Cosinus des Winkels, da der Dipol nicht mehr die vollständige Länge des Leiters effektiv nutzt, wie es in Abb. 6 gezeigt wird. Die Konstanten, also μ_0 und die ebenfalls unveränderte Fläche A , beeinflussen den Verlauf der gemessenen Leistung nicht. Ausschlaggebend für die Messung sind also E und B .

$$P = E \cdot B \quad (8)$$

Daraus resultiert für eine gemessene Feldstärke:

$$B = B_0 \cdot \cos(\alpha) \quad (9)$$

Für die Leistung müssen beide Feldstärken miteinander multipliziert werden.

$$(B_0 \cdot \cos(\alpha)) \cdot (E_0 \cdot \cos(\alpha)) = P_{In} \quad (10)$$

Bei der relativen Leistung bezeichnen wir die eigentlichen Werte die bei Parallelität gemessen wurden als 100%. Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned} & (1 \cdot \cos(\alpha)) \cdot (1 \cdot \cos(\alpha)) \\ & = (1 \cdot \cos(\alpha))^2 \\ & = \cos^2(\alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

Im vorherigen Teil sind wir davon ausgegangen, dass die Spannung und die Stromstärke in Phase schwingen. Tatsächlich aber, ist die Stromstärke, und somit auch die magnetische Feldstärke, der Spannung eine Viertel Periode (90°) voraus. Dies liegt an dem Dipol als entarteten Schwingkreis. Dadurch kommt man auf die beiden Gleichungen:

$$B = (B_0 \cdot \cos(\omega t)) \cdot \cos(\alpha) \quad (12)$$

$$E = (E_0 \cdot \sin(\omega t)) \cdot \cos(\alpha) \quad (13)$$

Die zwei Gleichungen müssen, wie in dem Part ohne Phasenverschiebung auch, miteinander multipliziert werden.

$$B \cdot E = (B_0 \cdot \cos(\omega t)) \cdot \cos(\alpha) \cdot (E_0 \cdot \sin(\omega t)) \cdot \cos(\alpha) \quad (14)$$

$$B \cdot E = \cos(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (B_0 \cdot \cos(\omega t)) \cdot (E_0 \cdot \sin(\omega t))$$

$$B \cdot E = \cos^2(\alpha) \cdot (B_0 \cdot \cos(\omega t)) \cdot (E_0 \cdot \sin(\omega t))$$

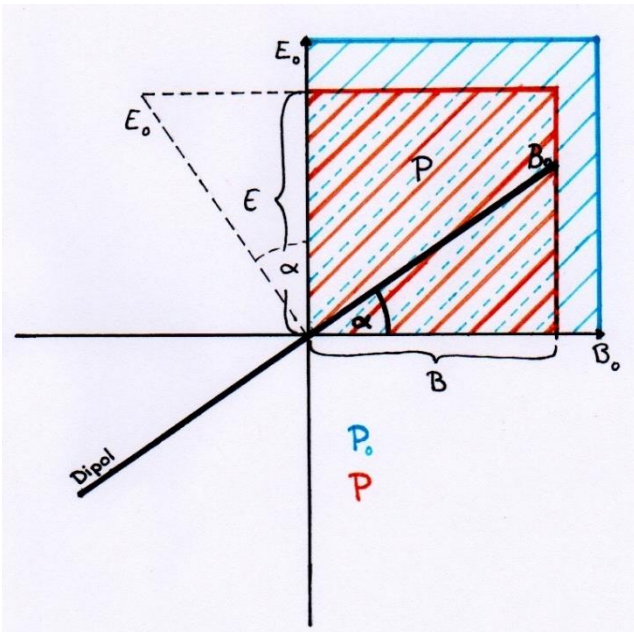


Abb. 6: Auswirkung des Winkels

Wenn wir diese Gleichung wieder auf den Einheitskreis übertragen, werden B_0 und E_0 auf 100% gesetzt.

$$B \cdot E = \cos^2(\alpha) \cdot ((1 \cdot \cos(\omega t)) \cdot (1 \cdot \sin(\omega t))) \quad (15)$$

$$B \cdot E = \cos^2(\alpha) \cdot (\cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t))$$

$$B \cdot E = \cos^2(\alpha) \cdot 0,5 \sin(2\omega t) \quad (16)$$

Ausschlaggebend bei dieser Gleichung ist, dass wir am Ende wieder auf $\cos^2(\alpha)$ kommen, denn der Faktor der hinter \cos^2 steht, gehört mit zu der Rechnung die die 100% bestimmen (vorgegeben durch den gemessenen Wert bei Parallelität der Dipole), die danach durch die Winkelveränderung mit \cos^2 des Winkels multipliziert werden müssen.

$$B \cdot E = \cos^2(\alpha) \cdot 1 \quad (17)$$

$$B \cdot E = \cos^2(\alpha) \quad (18)$$

Neben der Begründung über die Felder, ist auch die Begründung des \cos^2 mit dem Ohm'schen Gesetz möglich. Es gilt:

$$I = \frac{U}{R} \quad (19)$$

In der Gleichung für die Leistung (5) kann man für die Stromstärke I dann $\frac{U}{R}$ einsetzen. Dazu kommt der zusätzlichen Faktor, der aus der Winkeländerung hervor geht.

$$P = U \cdot \cos(\alpha) \cdot I \cdot \cos(\alpha)$$

$$P = U \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{U}{R} \cdot \cos(\alpha)$$

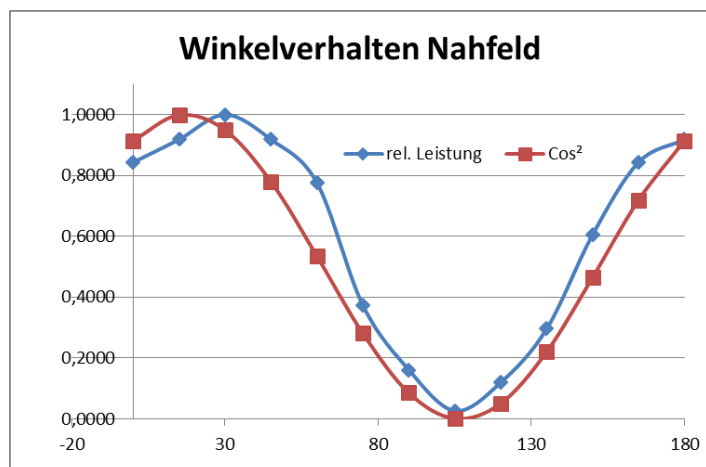
$$P = \frac{U^2}{R} \cdot \cos(\alpha)^2$$

Der Widerstand R ist konstant und beeinflusst somit den Verlauf der Messung nicht. Die variierende Spannung mit dem Widerstand bestimmt bei Parallelität den Wert von 100%. Im Einheitskreis werden sie deshalb durch 1 ersetzt.

$$P = 1 \cdot \cos(\alpha)^2$$

$$P = \cos(\alpha)^2$$

Der Verlauf der relativen Leistung bei einem Abstand von 4 cm ähnelt dem Verlauf der Messung bei 20 cm. Auffällig ist aber, dass die Werte immer über dem Erwartungswert von \cos^2 liegen. Dies lässt darauf schließen, dass auf die Messung im Nahfeld noch ein weiterer Faktor mit einspielt der die Messwerte erhöht.



4. Fehleranalyse

Es gibt mehrere Faktoren, die bei unseren Messungen zu Fehlern oder Ungenauigkeiten führen können.

Wir sind zum Beispiel nicht in der Lage die Sendeleistung weit genug hoch zu regeln um dann im richtigen Fernfeld (ab 3,5 m Abstand) zu messen, da wir sonst sämtliche Systeme stören würden. Deshalb mussten wir den Abstand und die Sendeleistung einschränken.

Außerdem verwenden wir nicht die Resonanzfrequenz des Dipols, wie schon eher in dem Abschnitt des Dipols und des Abstandsgesetzes erklärt wurde.

Falls im nahen Umfeld des Messaufbaus Metallteile waren, haben diese die Messung vermutlich auch beeinflusst. Dazu kommt Strahlung von anderen Teilen (Rauschen). Da es aber keine Quellen mit der Messfrequenz im Umfeld gibt (außer unserem sendenden Dipol) wird dies keine großen Auswirkungen gehabt haben.

Der letzte wichtige Faktor ist, dass diese Messung manuell erfolgte. Beide Versuche, also die Einstellung des Abstandes und des Winkels, erfolgten von Hand was Ungenauigkeiten mit sich bringt.

5. Zusammenfassung

Unser Ziel war es mehr über die Eigenschaften von polarisierten elektromagnetischen Wellen, in unserem Fall Radiowellen, in Erfahrung zu bringen. Bei unseren Messungen mit den Dipolen hat sich herausgestellt, dass bei Abstandsänderung das Abstandsgesetz gilt. Messreihen, bei denen der Winkel zwischen den Dipolen variiert wurde, weisen den Verlauf einer \cos^2 Funktion auf. In den Messungen mit größerem Abstand zwischen den Dipolen fittete der Graph der relativen Leistung sehr gut mit dem der Erwartungswerte. In der Messung bei einem Abstand von 4 cm machen sich andere Faktoren bemerkbar, die die Messwerte beeinflussen.

Abb. 7: Messwerte und Erwartungswerte im Nahfeld

6. Danksagung

Wir möchten uns zu allererst bei unserem Betreuer Thomas Biedermann bedanken, der uns immer mit Ratschlägen zur Seite stand und sich auch außerhalb der AG-Zeit für uns Zeit genommen hat. Außerdem wollen wir uns bei Susanne Biedermann bedanken, die dafür sorgt, dass immer etwas da ist, an dem man sich stärken kann.

Auch Kristels Eltern möchten wir erwähnen, die immer wieder nach der AG die Autofahrt auf sich nehmen, um mich abzuholen.

Quellenverzeichnis

- [1] AG Jugend forscht: „HF-Technik – die Einheit deziBel“, Materialzusammenstellung zur Radioastronomie, Dezember 2012

Bibliographie

Krauss, John D.: Radio Astronomy, Quasar Books, 1986

Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Hannover, 1998