

Die Resonanz der Antenne

Über die Resonanz der Antenne wird viel gesprochen, sehr persönliche und unterschiedliche Meinungen und Ansichten werden darüber zum besten gegeben, aber Hand aufs Herz: Wissen wir eigentlich genau, was die Resonanz ist und was sie bewirkt, besonders bei Antennen? Wir wollen darüber Klarheit schaffen und einen Nutzen sehen. Es kann aber schon hier versprochen werden: Wir werden dabei zu einigen sehr überraschenden Ergebnissen kommen.

Was ist eigentlich Resonanz?

Der Begriff stammt aus der Akustik, die der Resonanz ihren Namen gab. Lateinisch ist: resonare = widertönen, widerhallen, zurückklingen. Wir sprechen vom Resonanzkörper, wenn wir erleben, wie der dicke Bauch einer Bassgeige die schwachen Schwingungen der Saiten zu lautem Klingen bringt. In der Elektrophysik ist der Begriff Resonanz schärfer gefasst; dazu müssen wir etwas weiter ausholen. Sehen wir uns eine Dipolantenne für das 3,5-MHz-Band an. Sie ist rund 40 Meter lang. In der Länge des Leiters steckt die Induktivität L . Der gestreckte Leiter ist nichts anderes als eine abgewickelte Spule. In der dicken Masse des Leiters und in der Wirkung der beiden Antennenschenkel aufeinander steckt die Kapazität C ; L und C erscheinen hintereinander geschaltet und bilden einen Serienschwingkreis. Um unsere Überlegungen bequem zu machen, stellen wir die Antenne in einem Ersatzschaltbild als Spule und Kondensator dar. Die Spule mit der Induktivität L hat einen Blindwiderstand $X_L = \omega L$ und der Kondensator mit der Kapazität C einen Blindwiderstand $X_C = 1/\omega C$ (Bild 1). An den

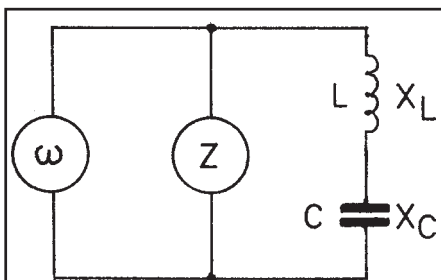


Bild 1: Die Antenne als Serienschwingkreis: Durchdrehsender, Impedanzmeter und L/C-Kreis.

Serienschwingkreis ist noch ein Impedanzmeter Z und ein Durchdrehsender mit der veränderbaren Kreisfrequenz $\omega = 2 \pi f$ geschaltet.

Ein Gedankenexperiment

Nun unternehmen wir ein Gedankenexperiment: Zunächst schließen wir die Spule kurz. Damit wirkt nur der Kondensator. Nun drehen wir die Frequenz bei 0 beginnend durch, so ergibt sich in Bild 2 die unterhalb der x-Achse liegende, dünne Kennlinie X_C , eine Hyper-

Die Kennlinie dieser Summe ist in Bild 2 die dick ausgezogene Kurve X . Es ist die Kennlinie des Serienschwingkreises. Beim Durchdrehen des Senders gibt es einen Augenblick, in dem die X -Kurve die x-Achse schneidet. X ist also Null. Dann ist der induktive Blindwiderstand genau so groß, wie der kapazitive Blindwiderstand $\omega L = 1/\omega C$. Diese Erscheinung heißt Resonanz. Hier heben sich Kapazität und Induktivität gegenseitig auf, das heißt $X = 0$ und der Kurzschluss ist perfekt. Es müsste ein unendlich großer Kurzschlussstrom fließen, wenn ...

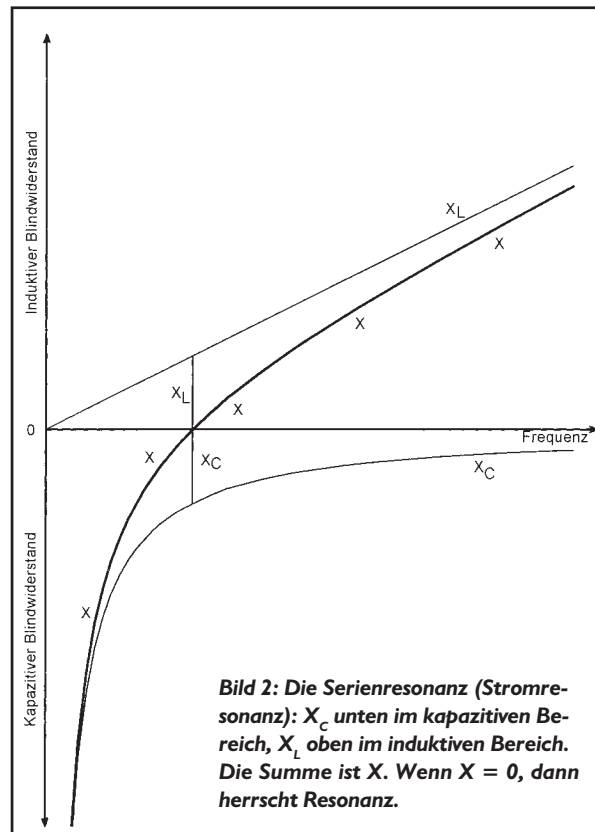


Bild 2: Die Serienresonanz (Stromresonanz): X_C unten im kapazitiven Bereich, X_L oben im induktiven Bereich. Die Summe ist X . Wenn $X = 0$, dann herrscht Resonanz.

Der Strahlungswiderstand

Der Strom fließt nur im beschränkten Maße; Natur und Physik haben ihm Grenzen gesetzt, denn in jedem praktischen Schwingkreis gibt es Widerstände. Die Antenne hat ihren Strahlungswiderstand R_r , er ist für den Strombauch der Antenne definiert. Es ist der Widerstand, der an dieser Stelle vom maximalen Strom durchflossen wird, die Leistung aufnimmt und in Strahlung umwandelt. Dieser Strahlungswiderstand muss noch in unseren Schwingkreis eingefügt werden, um ein getreues Abbild der wirklichen Antenne zu sein. Bild 3 stellt das Ersatzschaltbild einer stromgespeisten Antenne für den Resonanzfall dar: Im Serienschwingkreis liegen jetzt L , R_r und C in Reihe.

Beim Durchdrehen der Frequenz entsteht wieder eine Kur-

bel, die aus der Tiefe (großer kapazitiver Widerstand) kommend, sich langsam der x-Achse nähert, sie aber niemals erreicht (Asymptote) und immer im negativen Bereich bleibt. Nun schließen wir den Kondensator kurz. Damit wirkt nur die Spule. Wir drehen nochmals den Sender von 0 auf höhere Frequenzen durch und erhalten die Kennlinie X_L , die als dünne Gerade schräg emporsteigt und damit stets im positiven Bereich liegt. Sie hat ihren höchsten Widerstand, wenn die Frequenz am höchsten ist, und sie ist linear. Die Impedanz des Serienkreises ist die Summe des positiven Blindwiderstandes der Spule ωL und des negativen Blindwiderstandes des Kondensators $1/\omega C$, also $X = \omega L - 1/\omega C$.

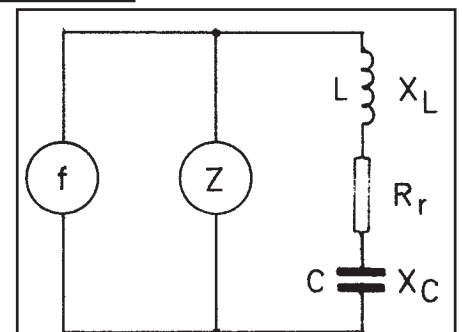
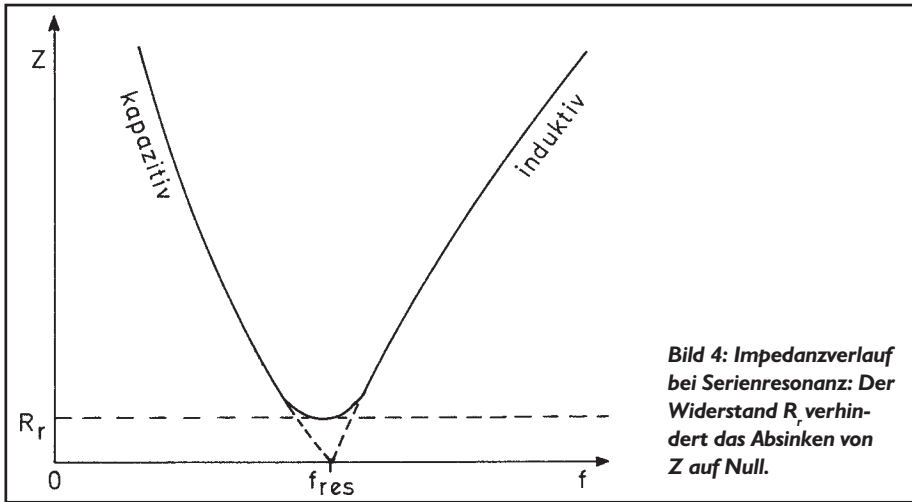


Bild 3: Das Ersatzschaltbild der stromgespeisten Antenne wird durch den Strahlungswiderstand R_r ergänzt.



ve, die den Verlauf von Z darstellt (Bild 4). Da nur der Betrag von Z angegeben ist, verläuft sie nur im Positiven. Bei Resonanz müsste sie sich auf die x-Achse senken, weil ja dort $Z = 0$ ist (gestrichelter Verlauf). Das kann sie aber nicht, denn der Strahlungswiderstand R_r verhindert diesen Kurzschluss. Der Eingangswiderstand senkt sich nur auf den Wert R_r , tiefer geht es nicht. Von $f = 0$ bis zur Resonanzfrequenz überwiegt die Wirkung der Kapazität: Die Impedanz ist kapazitiv. Von der Resonanzfrequenz bis in höchste Frequenzen überwiegt die Induktivität: Die Impedanz ist induktiv. So war es auch auf Bild 2 zu sehen. Bei Resonanz gibt es weder eine kapazitive noch eine induktive Komponente, also muss $Z = R_r$ und damit rein ohmisch sein. Wenn eine stromgespeiste Antenne für die eingespeiste Frequenz zu lang ist, überwiegt die Induktivität. Ihre Impedanz enthält eine induktive Komponente. Ist die Antenne für die Frequenz zu kurz, so überwiegt die kapazitive Komponente. Aus dem bisher Dargestellten lassen sich folgende Tatsachen erkennen:

Resonanz

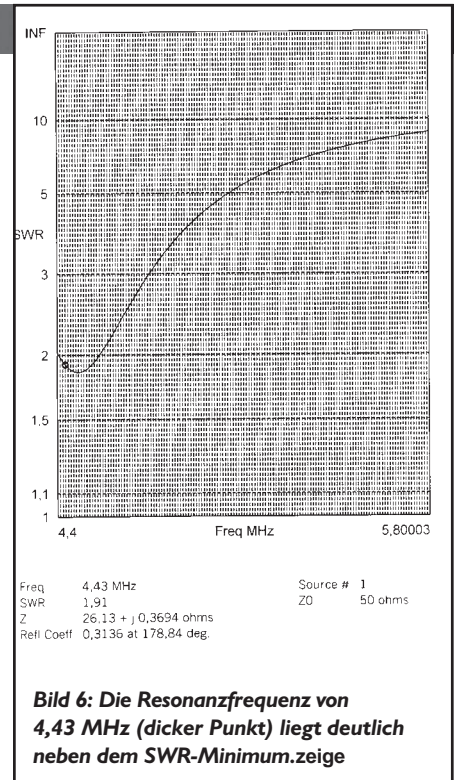
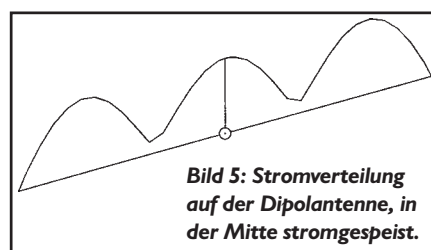
1. Der Blindwiderstand X_L ist positiv, der Blindwiderstand X_C ist negativ. Sie sind entgegengesetzt gerichtet.
2. Bei Resonanz sind X_L und X_C gleich groß und heben sich daher auf.
3. Bei Resonanz sinkt der Eingangswiderstand auf den Strahlungswiderstand R_r herab.
4. Bei stromgespeisten Antennen ist unterhalb der Resonanzfrequenz die Impedanz kapazitiv, oberhalb der Resonanzfrequenz ist die Impedanz induktiv.
5. Bei Resonanz gibt es keine kapazitive und keine induktive Komponente. Es wirkt nur der rein ohmsche Strahlungswiderstand R_r .
6. Eine zu lange, stromgespeiste Antenne reagiert induktiv, eine zu kurze Antenne reagiert kapazitiv.

Und die Praxis?

Gerüstet mit dem bisher erarbeiteten Wissen können wir getrost in die Praxis einsteigen. Wir bauen uns ganz einfach einen Dipol auf. Wir speisen diese Antenne aus einem Transceiver, der zu einem Leistungs-Mess-Sender umgestaltet worden ist. Der Transceiver kann also alle Frequenzen von 1,5 MHz bis 30 MHz mit einer Leistung bis zu 100 Watt abgeben und entspricht weitgehend einem Durchdrehender. Vom Transceiver zum Speisepunkt der Antenne ziehen wir ein gutes 50- Ω -Kabel, das verlustarm ist. Als altgediente Funkamateure schleifen wir zwischen Kabelende und Antennenklemmen noch ein SWR-Meter zur Messung der Welligkeit ein. Ein anderes Messgerät, wie ein Impedanzmeter, steht uns im allgemeinen nicht zur Verfügung. Wir wählen die Stelle zwischen Kabelende und Antenne als besten Ort für das SWR-Meter, weil nur dort die einzig mögliche, genaue Messung der Welligkeit erfolgen kann.

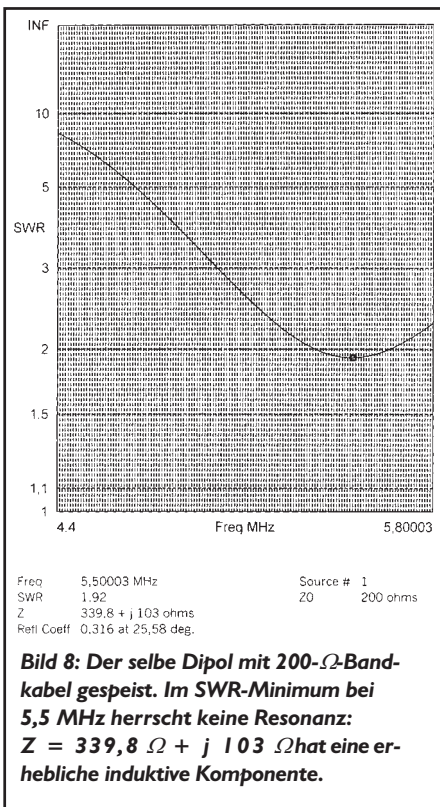
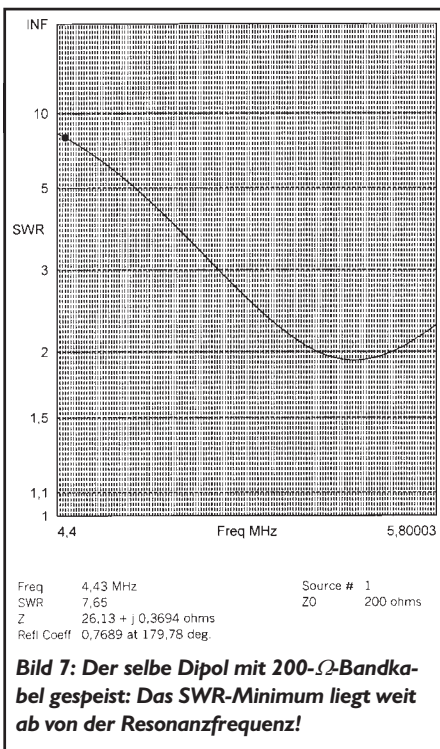
Dem Funkamateure ist nun die Aufgabe gestellt, die Resonanzfrequenz dieser Antenne festzustellen. Was wird er machen? Er beobachtet das SWR-Meter und dreht die Frequenz seines Senders so weit durch, bis das SWR auf ein Minimum zurück gegangen ist. Wenn er das Minimum entdeckt hat, wird er uns stolz verkünden, dass er die Resonanzfrequenz der Antenne gefunden hat. Und das ist leider nicht ganz richtig.

Als deutliches Beispiel wählen wir eine Dipolantenne, 2×50 m lang und aus einem Rohr von 10 cm Durchmesser bestehend. Der



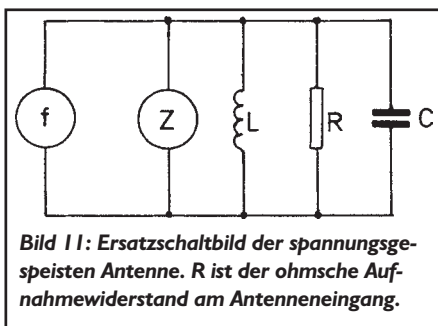
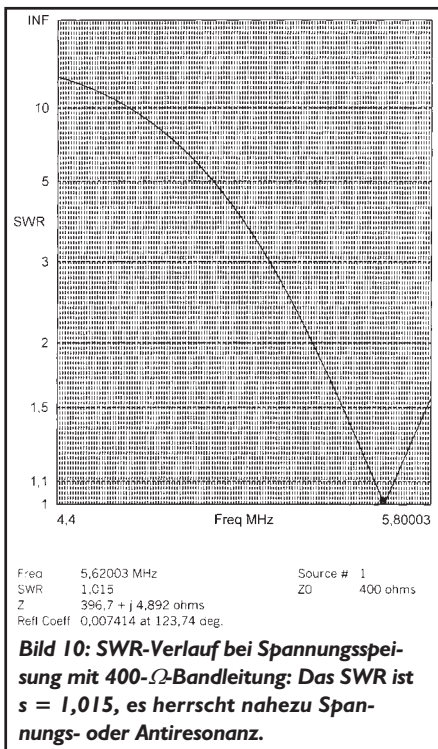
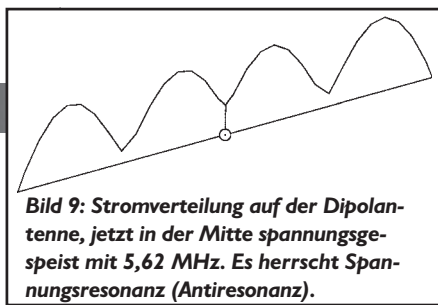
Dipol ist 10,7 m hoch und hängt über normaler Erde. Wir erregen ihn so, dass er mit drei Halbwellen schwingt. Dabei stellt sich die Stromverteilung von Bild 5 ein. Der Dipol ist im Strommaximum gespeist, also in Stromspeisung erregt. Wie steht es nun mit seiner Resonanz? Darüber gibt Bild 6 Auskunft: Es zeigt uns den Verlauf der Welligkeit, wie sie von der eingespeisten Frequenz abhängt. Die Resonanzfrequenz ist mit einem dicken Punkt markiert. Deutlich ist zu sehen, dass die niedrigste Welligkeit, das SWR-Minimum, rechts daneben liegt und zwar um 46 kHz höher. Noch krasser wird die Differenz zwischen Resonanz und SWR-Minimum, wenn wir hochohmig einspeisen. Erregen wir die gleiche Antenne über ein 200- Ω -Bandkabel, so erhalten wir die SWR-Kurve von Bild 7. Die Resonanz liegt bei 4,43 MHz, das SWR-Minimum liegt bei 5,500 MHz, ein Unterschied von mehr als 1 MHz! Um deutlich zu machen, dass wir in diesem Minimum keine Resonanz haben, sind die Werte der Impedanz in Bild 8 ausgedrückt: Der dicke Markierungspunkt liegt nun im SWR-Minimum und an der Speisestelle des Dipols herrscht folgende Impedanz:

$Z = 339,8 \Omega + j 103 \Omega$. Bei Resonanz muss der imaginäre j -Wert gleich Null sein. Um die Verhältnisse vollkommen klar zu machen, speisen wir die selbe Antenne mit einem 400- Ω -Bandkabel und suchen das Strom-Minimum, das wir bei 5,620 MHz erreichen. Es stellt sich die Stromverteilung von Bild 9 ein. Um die Energie des Senders in ihn hinein zu bringen, muss er mit hoher Span-

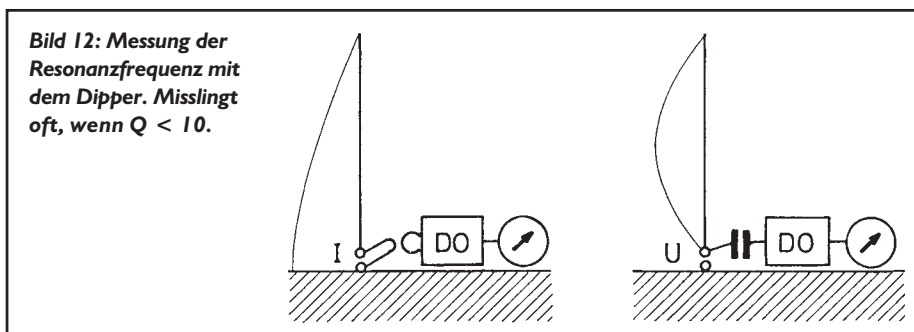


nung gespeist werden. Wir sprechen von Spannungsspeisung. Die SWR-Kurve der Welligkeit zeigt Bild 10: Hier fallen das SWR-Minimum und die Resonanzfrequenz beinahe zusammen. Das SWR ist $s = 1,015$. Wäre $s = 1,000$, so fallen SWR-Minimum und Resonanz exakt zusammen, aber nur dann.

Genau so ist es bei niederohmiger Stromspeisung: Das Minimum der Welligkeit und die Resonanz fallen niemals auf einer Frequenz zusammen. Es gibt nur eine Ausnahme: Das SWR muss $s = 1,000$ sein, nur dann liegen das SWR-Minimum und die Resonanz auf der selben Frequenz.



Wenn die Antenne in Spannungsspeisung erregt wird, so gelten dafür völlig andere Verhältnisse und auch ein anderes Ersatzschaltbild: Es ist ein Parallelschwingkreis und in Bild 11 zu sehen. Spule und Kondensator liegen parallel. Der Aufnahmewiderstand ist dazu parallel geschaltet. Er ist mit dem Strahlungswiderstand nicht identisch. Die Impe-



danz des Parallelkreises ist hoch, was genau der Spannungsspeisung entspricht. Hier gelten andere Regeln:

Antiresonanz = Spannungsresonanz

1. X_L und X_C sind entgegengesetzt gerichtet.
2. Bei Antiresonanz sind X_L und X_C gleich groß und heben sich daher auf, nur noch der Aufnahmewiderstand bleibt übrig.
3. Bei Antiresonanz steigt der Eingangswiderstand auf das Maximum des Aufnahmewiderstandes.
4. Bei spannungsgespeisten Antennen ist unterhalb der Antiresonanzfrequenz die Impedanz induktiv und oberhalb der Antiresonanzfrequenz kapazitiv.
5. Bei Antiresonanz gibt es keine kapazitive und keine induktive Komponente. Es wirkt nur der rein ohmsche Strahlungswiderstand R , im Strombauch, der durch den Antennenschwingkreis auf den höheren Eingangswiderstand hinauf transformiert wird.
6. Eine zu lange, spannungsgespeiste Antenne reagiert kapazitiv, eine zu kurze Antenne reagiert induktiv.

Messung mit dem Dip-Oszillator

Wir müssen nicht unbedingt die Resonanz der Antenne mit dem SWR-Meter messen, indem wir mühselig die Frequenz suchen, wo das SWR $s = 1$ ist. Wir können auch mit einem Dip-Oszillator (Grid-Dipper) die Resonanzfrequenz ermitteln. Bild 12 zeigt dazu das Vorgehen. Eine stromgespeiste Antenne wird mit einer kleinen Drahtschleife an den Dipper gekoppelt und der (meist breite) Dip festgestellt. Eine spannungsgespeiste Antenne wird mit einem kleinen Kondensator an den Dipper gekoppelt und die Resonanzfrequenz gemessen. Beide Messmethoden haben Nachteile:

1. Die Frequenzanzeige des Dippers ist nicht sehr genau. Dies kann durch einen Frequenzzähler bereinigt werden. Entweder ist er in den Dipper integriert, oder er wird von außen dazugeschaltet.
2. Wenn die elektrische Güte der Antenne kleiner als etwa $Q = 10$ ist, wird der Dip so flach, dass sich die Resonanzfrequenz nicht mehr genau bestimmen lässt.

Recht praktisch ist ein aktives Stehwellenmessgerät, ein so genannter SWR-Analyzer,

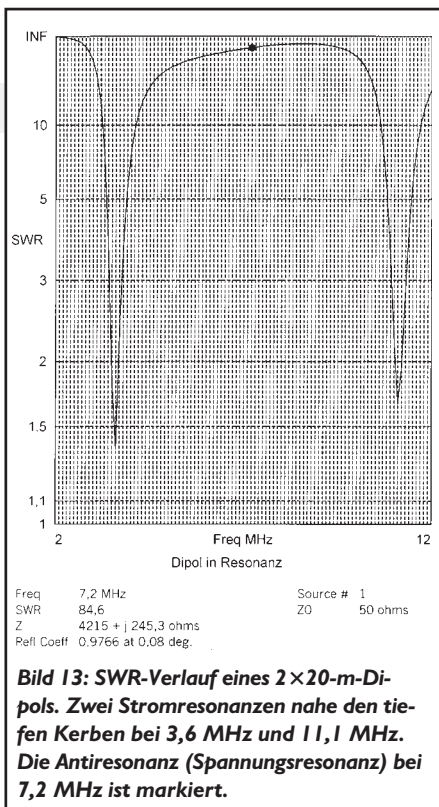


Bild 13: SWR-Verlauf eines 2×20-m-Dipols. Zwei Stromresonanzen nahe den tiefen Kerben bei 3,6 MHz und 11,1 MHz. Die Antiresonanz (Spannungsresonanz) bei 7,2 MHz ist markiert.

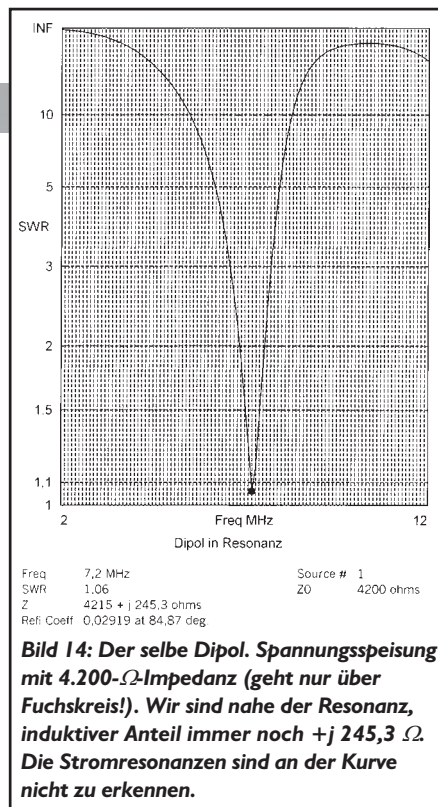


Bild 14: Der selbe Dipol. Spannungspeisung mit 4.200-Ω-Impedanz (geht nur über Fuchskreis!). Wir sind nahe der Resonanz, induktiver Anteil immer noch +j 245,3 Ω. Die Stromresonanzen sind an der Kurve nicht zu erkennen.

der bereits einen Frequenzzähler in sich enthält. Damit lässt sich die Resonanzfrequenz der Antenne recht befriedigend feststellen.

Überblick

Lassen wir zum Schluss die Tatsachen Revue passieren: Eine 2×20 m lange Dipolantenne von 10 cm Dicke (Reuse) ist in 10,7 m Höhe verspannt. Sie besteht aus Kupfer und schwebt über normalem Gartenboden. Für EZNEC 2000 ist sie in 15+1+15 Segmente eingeteilt. Wir stellen zuerst die Resonanzen für Stromspeisung mit 50-Ω-Koaxialkabel fest (Bild 13). Beim Durchdrehen der Frequenz von 2 MHz bis 12 MHz stechen uns zwei tiefe SWR-Täler in die Augen: 3,6 MHz und 11,1 MHz. In ihrer Nähe müssen die Resonanzstellen sein. Die erste Resonanz bei 3,6 MHz erfolgt, weil die Antenne jetzt eine Halbwelle lang ist. Die zweite Resonanz bei 11,1 MHz erfolgt, weil nun die Antenne drei Halbwellen lang ist. Dies ist ungefähr das Dreifache von 3,6 MHz.

In der Mitte zwischen den beiden Tälern ist oben ein dicker Punkt bei 7,2 MHz eingetragen. Dort ist die Stelle der Antiresonanz, die für die Spannungspeisung der Antenne gilt. Mit 50-Ω-Speisung ist hier nichts mehr zu machen. Wir brauchen zwischen Antenne und Kabel einen Koppler, oder wir speisen über einen Feeder (Hühnerleiter) und stationsseitigen Koppler. Wenn wir den im Ausgang auf 4.200 Ω stellen, erhalten wir den SWR-Verlauf von Bild 14. Das SWR im Kabel ist $s = 1,06$, also sehr gut, wir sind nahe der Stelle der Antiresonanz, oder der Spannungsresonanz.

Resonanz bedeutet für die Stromresonanz, dass der Strom ein Maximum hat. Davon leitet sich der Aberglaube her, dass dieser maximale Strom nach außen auch eine maximale

Strahlung hervorruft. Generationen von Funkamateuren haben daran geglaubt, dass man durch genauen Zuschnitt der Antenne diese Resonanz erreicht und damit besonders gute Ergebnisse einfährt. Man hat geschnippelt und angelötet, bis das SWR $s = 1,000000$ war, und manchmal machte der Glaube selig.

Antiresonanz oder Spannungsresonanz heißt, dass jetzt eine maximale Spannung an den Antennenenden herrscht. Dem entsprechend muss auch der Strom in den Strombäuschen maximal sein, was eigentlich maximale Strahlung bedeuten sollte. Das ist es leider nicht. Auch hier kann der Zuschnitt der Antenne (pruning) nicht zu stärkeren Signalen verhelfen.

Um den Beweis dafür anzutreten, haben wir die Gewinne in der Umgebung von Resonanzen und Antiresonanzen mit EZNEC untersucht, ob nicht doch wohl die Resonanz zu höheren Gewinnen beiträgt. Sie tat es nicht. Davon zeugt die Gewinntabelle 1.

Gewinne

Frequenz	Resonanz	Antiresonanz	Resonanz
3,50 MHz	8,47 dBi		
3,55 MHz	8,44 dBi		
3,60 MHz	8,40 dBi		
3,65 MHz	8,36 dBi		
3,70 MHz	8,32 dBi		
7,10 MHz		1,02 dBi	
7,15 MHz		0,82 dBi	
7,20 MHz		0,62 dBi	
7,25 MHz		0,40 dBi	
7,30 MHz		0,18 dBi	
11,00 MHz			7,90 dBi
11,05 MHz			7,68 dBi
11,10 MHz			7,44 dBi
11,15 MHz			7,20 dBi
11,20 MHz			6,95 dBi

In Sprüngen von 50 kHz sind wir über die Resonanzstellen gegangen. Dabei war nicht die geringste „Resonanzüberhöhung“ festzustellen. Im Gegenteil, die Gewinne wurden mit der Erhöhung der Frequenz jeweils niedriger. Mit dem Schnippeln auf Resonanzlänge ist also gar nichts zu erreichen. Etwas anderes ist es, wenn man durch Längenänderung die Anpassung verbessern will. Dagegen ist nichts einzuwenden.

Die Impedanz im soeben durchfahrenen Frequenzbereich ist es wert, gezeigt zu werden. Aus den einzelnen Impedanzwerten des gesamten Bereiches, die nach dem Schema $R + jX$ (induktiv) bzw. $R - jX$ (kapazitiv) von EZNEC ausgegeben werden, wird zunächst die Impedanz berechnet: $Z = (R^2 + (jX)^2)^{1/2}$. Diese Werte sind in Bild 15 mit dem Verlauf der Frequenz dargestellt. Das kapazitive bzw. induktive Verhalten der Antenne wechselt mit jeder Resonanzstelle, die am Minimum oder am Maximum der Impedanz liegt. R sind die Stromresonanzen, A sind die Spannungsresonanzen (Antiresonanzen). Beim ersten R steht eine Halbwelle des Stromes auf dem Dipol. Beim ersten A sind es zwei Halbwellen, beim zweiten R sind es drei Halbwellen und beim zweiten A vier Halbwellen. So verlaufen die Impedanzen und Resonanzen mit der Frequenz weiter. Niedrige Impedanzen erfordern Stromspeisung, hohe Spannungspeisung.

FUNK Redaktion, 2007

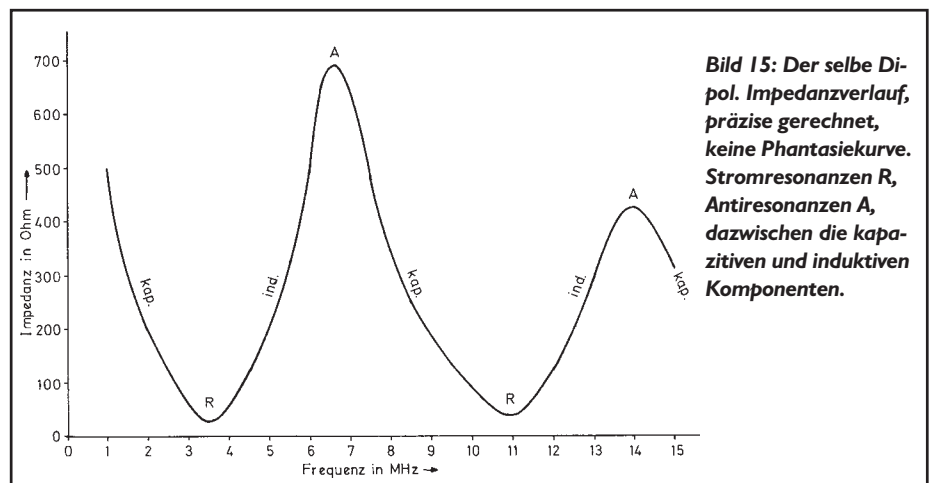


Bild 15: Der selbe Dipol. Impedanzverlauf, präzise gerechnet, keine Phantasiekurve. Stromresonanzen R, Antiresonanzen A, dazwischen die kapazitiven und induktiven Komponenten.