

Stabantenne (GP)- Funktion und Eigenschaften

Vortrag von Ulrich Gerlach, DF4EU
gehalten am 29.April 2005 für OV M05

Übersicht

1. Vom Dipol zur Stabantenne.....	2
2. Ideale $\lambda/4$ -Stabantenne	3
3. Reale $\lambda/4$ -Stabantenne.....	5
4. Kurze Stabantenne.....	8
5. Harmonischer Betrieb der Stabantenne.....	9

1. Vom Dipol zur Stabantenne

Zum besseren Verständnis wird kurz auf die Ableitung der Stabantenne aus dem Dipol eingegangen. Dazu betrachten wir zunächst eine am Ende offene Leitung (*Leerlauf*), die von einem Generator von einer HF-Schwingung erregt wird.

Das Bild 1 zeigt Strom- und Spannungsverlauf der stehenden Wellen auf der Leitung. Am Ende der Leitung müssen sich auf jeden Fall ein Stromknoten und ein Spannungsbauch ausbilden.

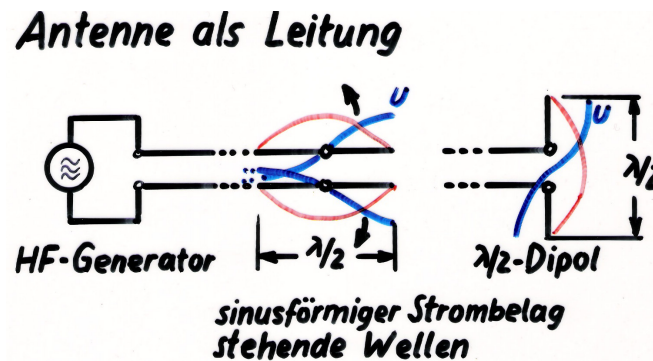


Bild 1: Entstehung der Dipolantenne

Wird am Ende der Leitung ein $\lambda/4$ -langes Stück rechtwinklig abgelenkt, so entsteht die $\lambda/2$ -Dipolantenne, die „Mutter aller Antennen“. Strom- und Spannungsverlauf bleiben wie bei dem entsprechenden Leitungsstück erhalten, d.h. am Ende der Dipolstäbe befinden sich stets ein Stromknoten und ein Spannungsbauch, während in der Mitte der $\lambda/2$ -Antenne sich stets Strombauch und Spannungsknoten befinden.

Im Bild 2 wird der Verlauf der elektrischen Feldlinien um die $\lambda/2$ -Dipolantenne dargestellt. Die Feldlinien beginnen an einem Dipolstab und laufen durch den umgebenden Raum zum anderen Dipolstab.

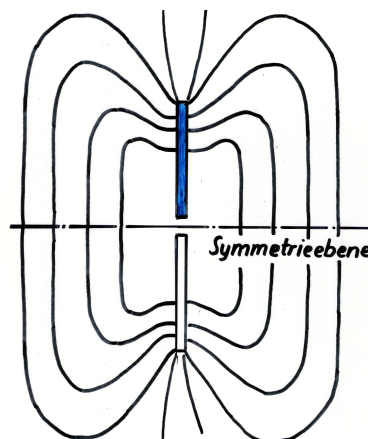


Bild 2: Elektrische Feldlinien um die $\lambda/2$ -Dipolantenne

Das Feldlinienbild ist *rotationssymmetrisch* um die Dipolachse ausgebildet. Es ist gekennzeichnet durch eine Symmetrieebene, die senkrecht zur Dipolachse angeordnet ist. Die Feldlinien durchstoßen diese Symmetrieebene senkrecht.

Die Stabantenne entsteht, wenn man die Symmetrieebene durch eine *ideal leitende* Fläche ersetzt. Das Feldlinienbild bleibt dadurch unverändert. Nach wie vor würden auf dieser Fläche die Feldlinien senkrecht stehen. Der obere Dipolstab würde es gar nicht „merken“, wenn der untere Stab entfernt würde. Der obere Dipolstab bildet so eine eigenständige Antenne, die elektromagnetische Wellen im oberen Halbraum abstrahlen kann. Da sie hierzu eine leitende Fläche benötigt, bezeichnet man sie als geerdete Antenne (engl. **ground plane** = GP bzw. Stabantenne).

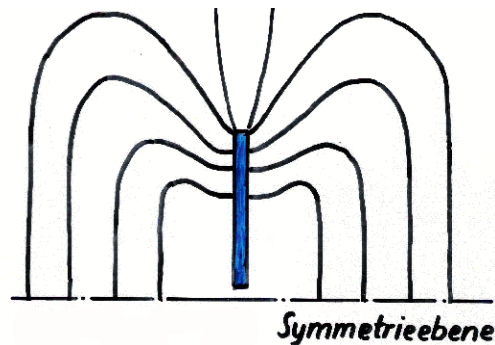


Bild 3: Elektrische Feldlinien um die $\lambda/4$ –Stabantenne

2. Die ideale $\lambda/4$ –Stabantenne

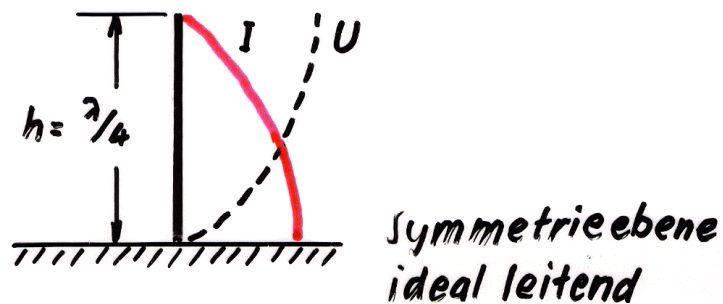


Bild 4: Die ideale $\lambda/4$ –Stabantenne

Wie der Name sagt, ist diese Antenne genau eine Viertelwellenlänge lang ($h = \lambda/4$). Der Stabdurchmesser d ist sehr viel kleiner als die Stabhöhe h . An ihrem oberen Ende weist die Stabantenne entsprechend ihrer Abstammung von der Dipolantenne immer einen Stromknoten sowie einen Spannungsbauch auf. Am unteren Ende zeigt sie stets einen Strombauch sowie einen Spannungsknoten. Die ideal leitende Fläche liegt auf Nullpotential. Das untere Ende der Antenne dient als Speisepunkt. Hier wird ein HF-Generator angeschlossen, dessen Schwingung auf die entsprechende Wellenlänge λ eingestellt ist. Betrachten wir den Stromfluss in diesem System. (Siehe Bild 5)

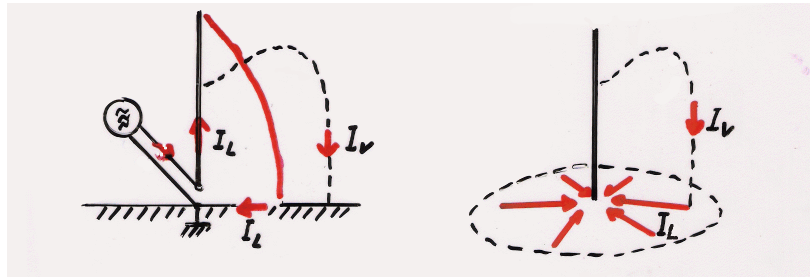


Bild 5: Stromfluss um die Stabantenne

Es fließt ein Leitungsstrom vom Generator durch die angeschlossene Verbindungsleitung zum Speisepunkt der Antenne. Dieser Leitungsstrom setzt sich im Antennenstab fort, nimmt jedoch in seiner Größe zur Spitze der Antenne hin ab, wie der (annähernd) sinusförmige Verlauf zeigt. Der Leitungsstrom setzt sich als Verschiebungsstrom (ein Verschiebungsstrom fließt auch bei der Auf- und Entladung eines Kondensators im Dielektrikum, d. h. bei Feldveränderungen) im Raum entlang der elektrischen Feldlinien fort, und zwar nimmt seine Größe entsprechend dem Verlauf der Spannung sinusförmig zur Spitze hin zu. D. h., in dem Maße wie der Leitungsstrom abnimmt, nimmt umgekehrt der Verschiebungsstrom zu. Mit den elektrischen Feldlinien trifft der Verschiebungsstrom auf der ideal leitenden Fläche auf und fließt als Leitungsstrom wieder zum Speisepunkt der Antenne und von dort zum Generator zurück. Aufgrund der Rotationssymmetrie des Feldlinienbildes fließen aus allen Richtungen Leitungsströme rund um die Antenne sternförmig zum Speisepunkt.

Strom- und Spannungsverlauf entlang der Stabantenne zeigen am unteren Ende, dass trotz des Spannungsknotens (entspricht Speisespannung = 0 V) ein Strombauch besteht. Hier muß also ein sehr kleiner Eingangswiderstand wirksam sein. Siehe hierzu Bild 6.

Tatsächlich ist die Speisespannung nicht 0 V, sondern besitzt einen geringen, von 0 abweichenden Wert damit überhaupt ein Strom fließen kann.

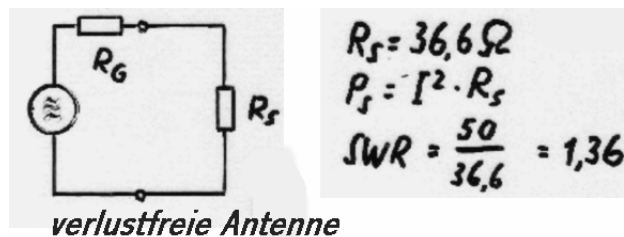


Bild 6: Eingangswiderstand der idealen $\lambda/4$ -Stabantenne

Da die ideale Antenne verlustfrei ist, ist als Eingangswiderstand nur der Strahlungswiderstand R_s der $\lambda/4$ -Stabantenne wirksam. Dieser beträgt rein rechnerisch $36,6 \Omega$ und ist gerade so groß, daß in ihm die gesamte abgestrahlte Leistung P_s verbraucht wird. Mit diesem Widerstandswert wird das Stehwellenverhältnis SWR an einem 50Ω -Kabel $1,36$.

Die $\lambda/4$ -Stabantenne weist eine ausgeprägte Richtwirkung auf. (siehe Bild 7)

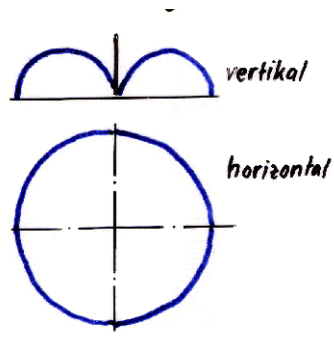


Bild 7: Richtwirkung der $\lambda/4$ –Stabantenne

Das in Bild 7 gezeigte vertikale Richtdiagramm ist rotationssymmetrisch um die senkrechte Antennenachse. Dieses Diagramm ist in Bild 8 räumlich dargestellt, wobei die Blickrichtung schräg von oben ist. Es entspricht der Freiraumcharakteristik eines vertikalen $\lambda/2$ - Dipols im oberen Halbraum. (halbierte Achtercharakteristik)

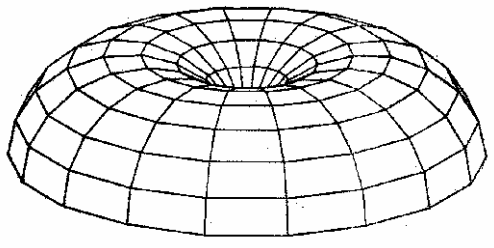


Bild 8: Räumliche Darstellung der Richtwirkung der $\lambda/4$ –Stabantenne

Die maximale Abstrahlung findet in Richtung der Symmetrieebene statt, während senkrecht nach oben gar keine Abstrahlung erfolgt.

Das horizontale Richtdiagramm ist kreisförmig. D. h., dass die Abstrahlung in jeder Richtung gleich gut ist. (Rundstrahlcharakteristik) Der Kreis wird in der räumlichen Darstellung sichtbar, wenn man genau von oben auf die Form von Bild 8 schaut.

3. Die reale $\lambda/4$ - Stabantenne

Bei der realen $\lambda/4$ - Stabantenne finden die nicht idealen Eigenschaften Berücksichtigung. So werden die unterschiedlichen Verluste berücksichtigt und auch, dass der Antennenstab eine endliche Dicke hat (Draht oder Rohrdurchmesser).

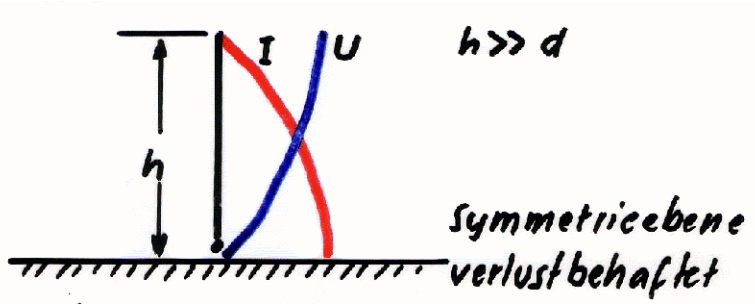


Bild 9: Die reale $\lambda/4$ - Stabantenne

Wie das Bild 9 zeigt, bleiben Strom- und Spannungsverlauf entlang der Stabantenne grundsätzlich erhalten. Wegen der endlichen Dicke des Antennenstabes erhält die Antenne eine erhöhte Kapazität. Um die hierdurch erniedrigte Resonanzfrequenz auf den ursprünglichen Wert zu bringen, muß der Stab geringfügig verkürzt werden (*einige Prozent*).

Die ideal leitende Fläche wird jetzt durch den realen Erdboden ersetzt. Der Widerstand des Erdbodens ist nicht mehr null und muß daher berücksichtigt werden. Wie bei der idealen Stabantenne fließen aus allen Richtungen Leitungsströme sternförmig zum Antennenfußpunkt zurück (siehe Bild 5). Diese Ströme verursachen am Widerstand des Erdbodens Verluste (*Wirkleistung*), die natürlich nicht mehr zur Abstrahlung gelangen. Besonders wegen der hohen Stromdichte direkt unterhalb des Antennenfußpunktes muß man daher möglichst hier durch Einrichtung eines Erdnetzes sowie eines Tiefenerders die Leitfähigkeit des Erdbodens erhöhen. (Bild 10).

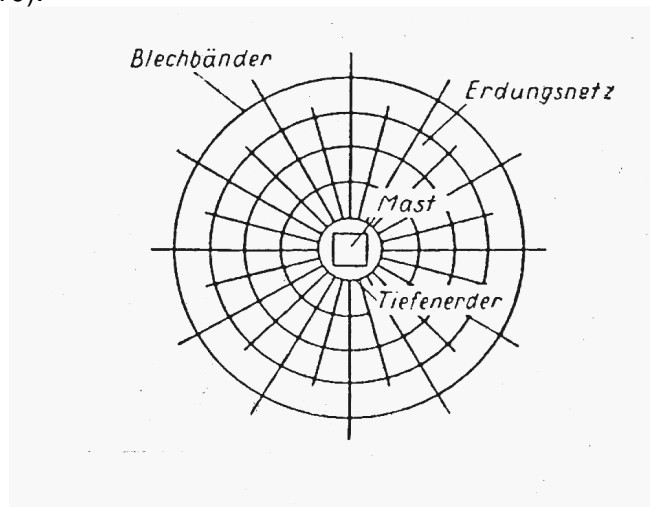


Bild 10: Erdnetz und Tiefenerder

Weitere Verluste entstehen beispielsweise durch den Wirkwiderstand des Antennenstabes oder durch das Sprühen (*Corona*) der Antennenspitze infolge der hohen Spannung, die dort vorherrscht. (*u. U. einige kV*). Sämtliche Verlustwiderstände werden hier im Verlustwiderstand R_v zusammengefasst.

Bild 11 zeigt die Ersatzschaltung der $\lambda/4$ - Stabantenne mit den Wirkwiderständen R_s und R_v . Der Wirkungsgrad η der Antenne wird durch die Verluste natürlich enorm verschlechtert. Das Stehwellenverhältnis verbessert sich allerdings! (*Achtung: Das SWR sagt nichts über die Abstrahlung aus! Wenn die Verluste groß genug sind, kann sich sogar ein SWR von 1 einstellen! Im Beispiel von Bild 11 $R_v = 20 \Omega$ wählen*).

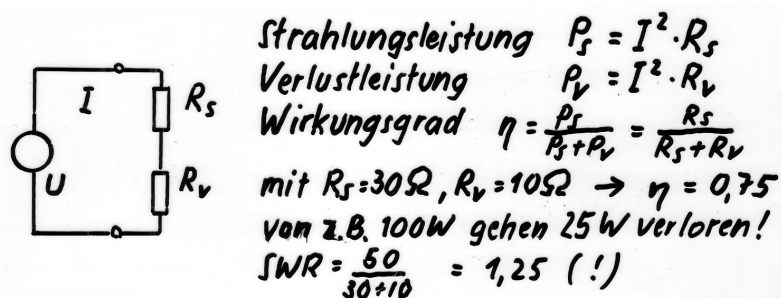


Bild 11: Ersatzschaltbild der realen $\lambda/4$ - Stabantenne

Da Strom- und Spannungsverlauf gegenüber der idealen Stabantenne unverändert sind, bleibt auch die Richtwirkung im Prinzip erhalten. Allerdings zeigt sich, dass in Bodennähe bedingt durch die Verluste die Strahlungskeule etwas vom Erdboden abhebt. Siehe dazu in Bild 12 die Richtwirkung in der vertikalen Ebene. Die Richtwirkung in der Horizontalebene bleibt unverändert. (*Rundstrahlcharakteristik*).

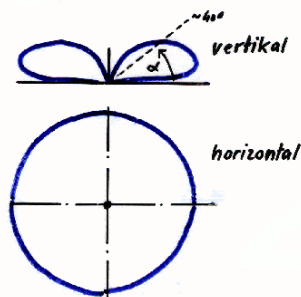


Bild 12: Richtwirkung der realen $\lambda/4$ -Stabantenne

Die reale $\lambda/4$ -Stabantenne ist aufgrund ihres kreisförmigen Horizontaldiagramms für Senden und Empfangen im gesamten azimutalen (= *horizontalen*) Winkelbereich von 0 bis 360 Grad gleich gut geeignet. Ohne jede mechanische Drehung können vertikal polarisierte Signale aus allen Richtungen empfangen bzw. gesendet werden. Da keine räumliche Selektivität vorliegt, empfängt man allerdings auch die Störungen aus allen Richtungen. Beim Senden wird die Strahlung in alle Richtungen gleich gut abgegeben. Allerdings mit dem Nachteil, dass bei der üblichen Verbindung zwischen zwei Stationen der größte Teil der Strahlungsleistung in unerwünschte Richtungen abgegeben wird. Dadurch wird die Feldstärke am Empfangsort stark verkleinert. Für Rundfunksender ist die Antenne dagegen optimal geeignet.

Das Vertikaldiagramm zeigt, dass die reale $\lambda/4$ -Stabantenne eine etwas schmalere Strahlungskeule besitzt als die ideale Antenne. Dennoch wird ein großer Teil der Strahlung in ungenützt großen Elevationswinkeln (= *Vertikalwinkeln*) abgegeben. Für DX sind kleine Elevationswinkel von ca. 5 bis 10 Grad erforderlich, um wirklich große Entfernungen (bis zu 3500 km durch Reflexion an der F2-Schicht überbrücken zu können. Gerade in diesem Winkelbereich hebt aber die Strahlungskeule vom Erdboden ab! Bei einem Winkel von ca. 40 Grad geht die Strahlung auf den halben Wert der maximalen Strahlung in Bodennähe zurück. (= *Halbwertsbreite*). Die Steilstrahlung im Bereich von ca. 30 bis 50 Grad ermöglicht nur ca. 500 km zu überbrücken. Siehe hierzu Bild 13.

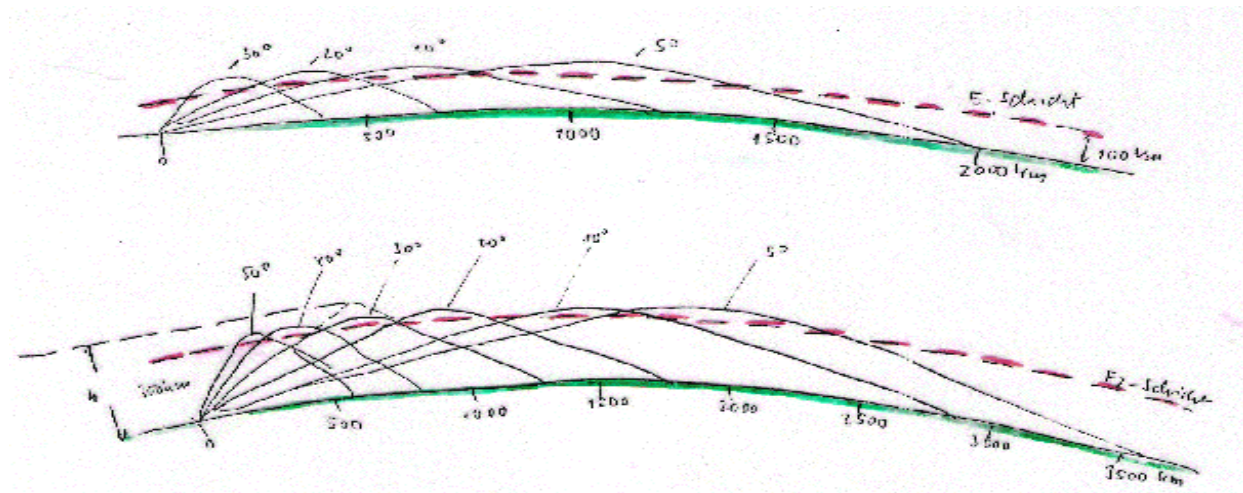


Bild 13: Sprungentfernung in Abhängigkeit vom Elevationswinkel

Die $\lambda/4$ - Stabantenne läßt sich auch erhöht aufstellen. Dazu ist es erforderlich, die leitende Symmetrieebene mitzunehmen. Es muß jedoch keine Fläche aufgespannt werden, sondern es ist ausreichend, anstelle der Fläche einige geerdete Stäbe oder Drähte (= Radials) horizontal in radialer Richtung auszuspannen.

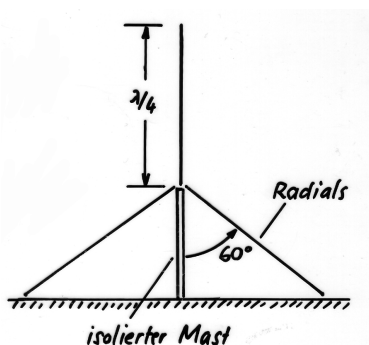


Bild 14: Erhöht aufgebaute Stabantenne

Die Länge der Radials sollte $\lambda/4$ betragen. Durch den erhöhten Aufbau werden die Erdverluste verringert. Außerdem ist die Antenne nicht mehr dem Störnebel in Bodennähe so stark ausgesetzt. Wenn die Radials schräg nach unten abgespannt werden, wie im Bild 14 gezeigt, vergrößert sich der Strahlungswiderstand. Bei einem Winkel von etwa 60 Grad stellen sich ca. 50Ω ein, so daß ein entsprechendes Koaxkabel direkt angeschlossen werden kann. Bei einem Winkel von 0 Grad geht die Anordnung in den symmetrischen $\lambda/2$ - Dipol über, dessen Strahlungswiderstand ca. 60Ω beträgt. Die Radials können auch zur Abspannung des Mastes genutzt werden. Die Richtwirkung bleibt praktisch unverändert gegenüber der direkt am Boden aufgebauten Antenne. Lediglich tritt eine geringfügige Verbesserung bei kleinen Elevationswinkeln auf. (für DX günstiger)

4. Die kurze Stabantenne

Die geforderte Antennenhöhe bei Resonanz von $\lambda/4$ ist bei den längeren Kurzwellenbändern oft zu groß, um sie als Mast zu errichten. Z. B. ist für den Betrieb auf dem 80 m –Band eine Antennenhöhe von 20 m erforderlich.

Man kann die Höhe der Stabantenne jedoch einfach kürzen. Sie ist dann bei der geforderten Betriebsfrequenz nicht mehr in Resonanz, die Resonanz läßt sich aber durch geeignete kapazitive oder induktive Belastung herbeiführen.

Durch Einfügen einer Spule geeigneter Größe in Fußpunktnähe kann die Resonanzfrequenz auf den gewünschten Wert herabgesetzt werden.

Ebenso läßt sich die Resonanzfrequenz durch Anfügen einer Dachkapazität an der Spitze der Antenne verringern. Beispiele hierfür sind in Bild 15 dargestellt.

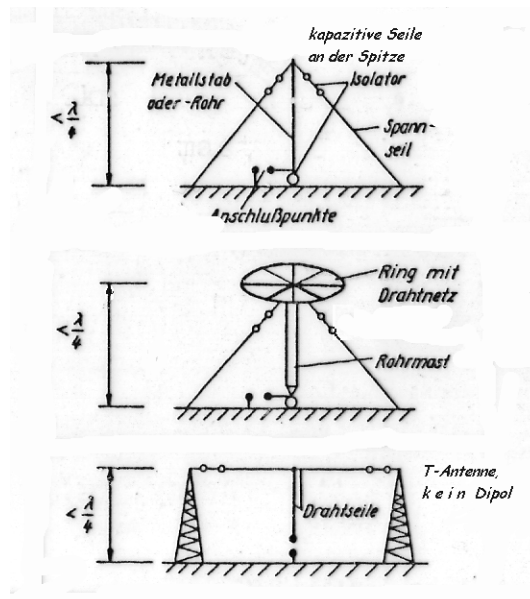


Bild 15: Die kapazitiv belastete Stabantenne

Nachteilig bei der kurzen Stabantenne ($h < \lambda/4$) ist, dass ihr Strahlungswiderstand R_s stark mit der Verkürzung der Antenne abnimmt. R_s kann auf wenige Ohm bzw. bis auf Bruchteile eines Ohms absinken. Siehe hierzu die Graphik in Bild 16. Es wird hier nur der Bereich von h/λ unterhalb 0,25 betrachtet. Bei solch kleinen Strahlungswiderständen werden natürlich die Erdverluste immer kritischer. Liegt beispielsweise $R_s = 1 \Omega$ und die Verluste R_v betragen 10Ω , so errechnet sich daraus ein Wirkungsgrad von $\eta = 1/11 = 0,1$. Es werden also nur ca. 10 % der zugeführten Leistung abgestrahlt! Gleichzeitig wird die Anpassung an 50Ω sehr schwierig. Ein Transformator zur Widerstandstransformation wird im Allgemeinen vorgesehen.

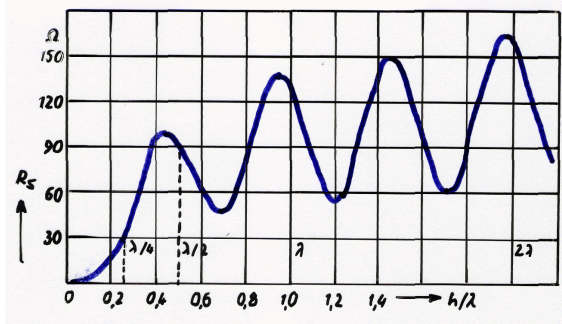


Bild 16: Strahlungswiderstand in Abhängigkeit von h/λ

Die Strahlungseigenschaften werden durch die starke Verkürzung der Antenne kaum verändert. Horizontal- und Vertikaldiagramm bleiben so, wie bei der realen Stabantenne in Bild 12 dargestellt.

5. Betrieb der Stabantenne in ihren Harmonischen

Der Betrieb der Stabantenne in ihren Harmonischen ermöglicht wie beim Dipol den Betrieb auf mehreren harmonisch zueinander liegenden Bändern.

Die Stabantenne wird für das tiefste im Betrieb benötigte Band ausgelegt. Für das 40 m-Band muß die Höhe dann $\lambda/4 = 10 \text{ m}$ betragen. (z.B. bei $f = 7,05 \text{ MHz}$: genau $h = 10,6 \text{ m}$, abzüglich ca. 5 % für die Antennenverkürzung, weil der Stabdurchmesser nicht 0 ist.)

Strom- und Spannungsbelag auf der Stabantenne im harmonischen Betrieb sind in Bild 17 dargestellt.

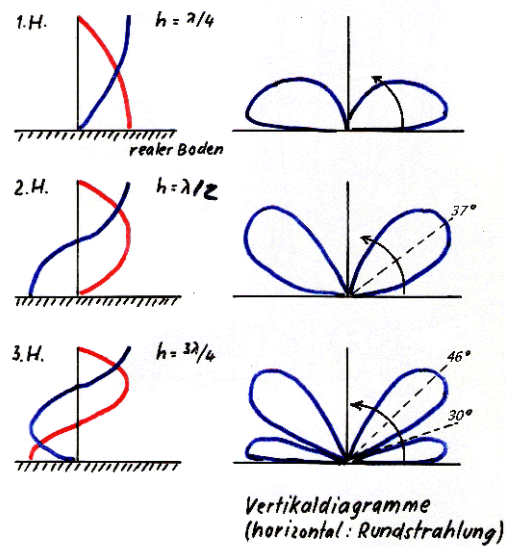


Bild 17: Harmonischer Betrieb der Stabantenne

Dem Betrieb in der 2. Harmonischen entspricht die Höhe von $2 \cdot \lambda/4$, in der 3. Harmonischen von $3 \cdot \lambda/4$ usw.. Man erkennt allein aus dem Zustand von Strom und Spannung am Fußpunkt (= Speisepunkt), dass bei der 2. Harmonischen der Eingangswiderstand hochohmig sein muß (einige 100Ω), denn trotz des Spannungsbauches fließt nur ein geringer Strom. Bei der 3. Harmonischen ist der Eingangswiderstand dagegen wieder niederohmig (etwas kleiner als bei der 1. Harmonischen), denn trotz der geringen Spannung am Speisepunkt haben wir hier jetzt den Strombauch.

Wie schon in Bild 16 dargestellt, zeigt der Strahlungswiderstand außerhalb der Resonanzstellen der Antenne einen periodischen Verlauf in Abhängigkeit von h/λ . Ebenfalls periodisch mit h/λ variiert der Blindanteil des Antenneneingangswiderstandes. Bei der Resonanzfrequenz ist der Blindwiderstand (per Definition) null. Im Frequenzbereich unterhalb der 1. Harmonischen verhält sich die Antenne kapazitiv, zwischen der 1. und 2. Harmonischen induktiv, zwischen der 2. und 3. Harmonischen wieder kapazitiv, usw.. (Induktives Verhalten stellt sich immer oberhalb einer ungeradzahigen Harmonischen, kapazitives Verhalten bei Überschreiten einer geradzahigen Harmonischen ein.)

Diese starken Veränderungen des komplexen Eingangswiderstandes (bestehend aus Strahlungswiderstand und Blindwiderstand) machen die Anpassung der Stabantenne an den Senderausgang bzw. an die Antennenzuleitung auf den verschiedenen Bändern sehr schwierig.

Auch die Richtwirkung der Stabantenne verändert sich stark, wenn sie in ihren Harmonischen betrieben wird. Während das Horizontaldiagramm in allen Fällen unverändert seine Rundstrahlcharakteristik beibehält, verändern sich die Vertikaldiagramme sehr stark. (Siehe dazu Bild 17).

Die Richtwirkung der in der 1. Harmonischen betriebenen Stabantenne ist bereits in Abschnitt 3 beschrieben.

Bei der 2. Harmonischen hebt die Strahlungskeule des Vertikaldiagramms stark von der Horizontalebene ab. Die Abstrahlung ist deutlich verstärkt nach oben gerichtet und für DX-Betrieb ungeeignet. Für den Nahbereich (bis einige 100 km) lässt sich die Antenne gut verwenden. Maximale Abstrahlung erfolgt unter einem Elevationswinkel von 37° .

Bei der 3. Harmonischen fächert die Strahlungskeule des Vertikaldiagramms auf. Es gibt eine schwach ausgeprägte Strahlungskeule in Bodennähe und eine größere Keule mit maximaler Abstrahlung unter einem Elevationswinkel von 46 Grad. Dazwischen liegt eine Nullstelle im Strahlungsdiagramm mit einem Elevationswinkel von 30 Grad. Die Antenne besitzt zwar bei kleineren Elevationswinkeln (<10 Grad) Strahlungsanteile, der größte Teil der Strahlung geht jedoch für DX ungenützt im größeren Elevationswinkelbereich verloren.

Bild 18 gibt eine räumliche Vorstellung der Strahlungskeulen für die 2. und 3. Harmonische.

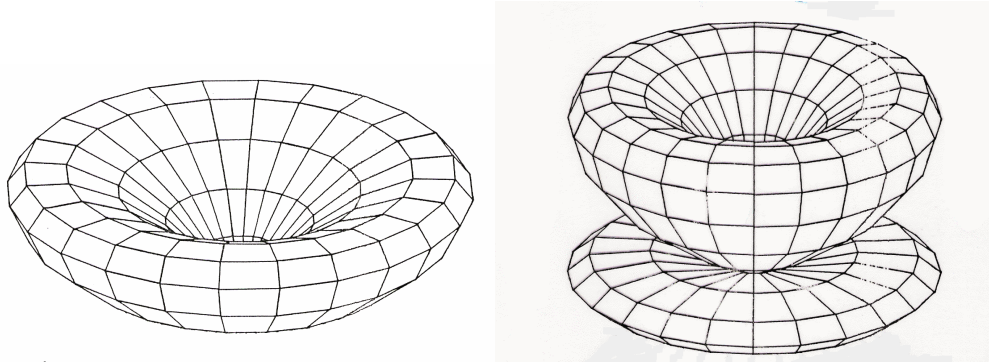


Bild 18: Räumliche Darstellung der Strahlungscharakteristik für die 2. (links) und 3. (rechts) Harmonische

Mit zunehmender Zahl der Harmonischen wird die Strahlungskeule immer stärker aufgefächert. Da durch Umgebungseinflüsse Maxima und Minima verwischen, geht die Antennencharakteristik in einen Kugelstrahler für den oberen Halbraum über.