

Eine Super-Antenne ?

oder

Wie man auch mit einfachen Mitteln Hochfrequenz abstrahlen kann

Teil 2 : Die einfache Antenne

Von Prof. Dr.-Ing. Gerd Janzen, DF6SJ

Einleitung

In Teil 1 dieser Antennenuntersuchungen im vorhergehenden Heft der cqDL wurde eine kommerziell gefertigte Vertikalantenne mit Hilfe des Antennensimulationsprogramms EZNEC untersucht [1]. Der technisch-mechanische Aufwand zur Verwirklichung dieser „Super-C“ genannten Antenne ist recht hoch, muß doch ein dreimensionales Würfelgebilde an das Ende eines kurzen Strahlers montiert werden [2]. Windwiderstand und Kippmoment dieses kopflastigen Gebildes dürften bei starkem Wind eine unangenehme Wirkung haben. Dazu kommt, daß ein mehr als 3 Quadratmeter großes Drahtnetz unter dieser Antenne montiert werden muß, welches schon bei geringfügig erhöhtem Aufbau über Grund Stabilitätsprobleme ergeben dürfte. Die Frage ist nun, ob nicht eine deutlich einfachere „klassische“, aber ebenfalls stark längenreduzierte Antennengeometrie ähnliche - nicht gleiche - Antennendaten in der Simulation und in der Praxis ergibt. Ein Vergleich mit den Antennendaten einer „Full-size“-Vertikalantenne der Länge $\lambda/4$ ist immer zweckmäßig, um mit den Vorstellungen über die Qualität einer Antenne, besonders was Gewinn und Abstrahlwinkel angeht, im realistischen Bereich zu bleiben.

Deshalb sollen die nachfolgenden Untersuchungen zuerst der klassischen Vertikalantenne mit Radials, dann der sehr stark verkürzten und am oberen Ende kapazitiv belasteten Antenne gewidmet werden. Die Untersuchungen sollen, wie bei der Super-C-Antenne, auf Frequenzen im 10m- und 20m-Band beschränkt werden. Ziel ist ein deutlich einfacherer Antennenentwurf als bei der genannten Super-C-Antenne für einen sehr kurzen Strahler, der vom 10m-Band bis zum 20m-Band ähnlich wie die genannte Antenne verwendet werden soll. Zum Antennenaufbau sollen handelsübliche und in jedem Baumarkt erhältliche Aluminiumrohre mit 10 mm bis 20 mm Durchmesser sowie 10mm-Alu-Winkelprofile mit Längen von 1 m und 2 m verwendet werden.

Vertikalantennen voller Größe mit 4 Radials

Um später Vergleichsdaten zu einer nicht längenreduzierten Antenne zur Verfügung zu haben, werden zuerst zwei sogenannte Groundplane-Antennen voller Größe für 28,5 MHz und 14,2 MHz entworfen und mit dem Antennensimulationsprogramm EZNEC [3] simuliert. Diese einfachen Geometrien mit nur wenigen Segmenten könnten sogar mit der aus dem Internet kostenlos herunter ladbaren Testversion (mit maximal 20 Segmenten) durchgerechnet werden. Bei den nachfolgenden Berechnungen wurden zur Erhöhung der Genauigkeit allerdings mehr Segmente verwendet.

10m-Groundplane

Die Längen der vorgesehenen 4 horizontal ausragenden Radials dieser Vertikalantenne werden zuerst mit dem Taschenrechner berechnet: bei 28,5 MHz beträgt die Wellenlänge $\lambda=300\text{m}/28,5=10,53\text{m}$, woraus für die Radiallänge $\lambda/4=2,63\text{m}$ folgt. Diese Daten werden als erste in das WIRES-Menü von EZNEC eingegeben, dann folgt der vertikale Strahlerdraht gleicher Länge. Die Antenne wird in EZNEC in einer Höhe von $h=4$ m über einem normalen Gartenboden (=Normalboden, siehe [7]) und aus Kupferdraht von 2 mm Durchmesser aufgebaut. Da die Simulationsrechnung des Eingangswiderstandes dieser Vertikalantenne mit der angegebenen Viertelwellenlänge noch einen leicht induktiven Wert ergibt, wird die Länge des Vertikalteils solange verringert, bis der Fußpunkt-widerstand etwa rein reell ist, also nur noch einen vernachlässigbaren Blindwiderstandsanteil aufweist. Die „Resonanz“ ist für 28,5 MHz bei der Strahlerlänge 2,61 m erreicht. Damit ist die „Full-size-Vertical“ bereits fertig simuliert. Der Eingangswiderstand beträgt $Z_A = 22,23 \ \Omega - j0,5 \ \Omega$, der Gewinn ist 0,79 dBi bei dem optimalen Abstrahlwinkel 14° . Das ist bestimmt keine schlechte Antenne ! Die Bandbreite ergibt sich aus der Aufzeichnung der SWR-Kurve über der Frequenz bei Anpassung des Realteils von $22,23 \ \Omega$ an $50 \ \Omega$ zu etwa 1 MHz.

Baut man diese Vertikalantenne statt $h=4$ m hoch in nur $h=0,05$ m Höhe über einem Normalboden auf, so erlebt man eine böse Überraschung: der Eingangswiderstand steigt aufgrund der Bodenverluste auf $34,2 \zeta$, der Antennengewinn sinkt um fast 1 dB auf nur mehr $-0,14$ dBi ab und, vielleicht das Ungünstigste, der Abstrahlwinkel steigt von sehr DX-freundlichen 14° auf steile 27° . Diese Antenne ist nicht mehr sehr vorteilhaft ! Ein einziger positiver Nebeneffekt, der durch die erhöhten Bodenverluste hervorgerufen wird, ist der Anstieg der $s=2$ -Bandbreite von $1,0$ MHz auf $1,55$ MHz. Da wir aber hier nicht tiefer in die Diskussion „normaler“ Vertikalantennen einsteigen wollen, sei für weitere Einzelheiten auf Tab. 1 und die sehr ausführliche Diskussion von Monopolen und Vertikalantennen in unterschiedlichsten Höhen über diversen Böden in [7] hingewiesen.

Hinweis: würde der ganze 4 m hoch stehende Monopol aus 20mm-Aluminium-Rohr statt aus 2mm Kupferdraht aufgebaut, so würde sich nicht viel ändern: neue Resonanzlänge des Vertikalteils $2,59$ m, Eingangswiderstand $ZA = 21,8 \zeta$, Gewinn $0,98$ dBi beim Abstrahlwinkel 14° . (Hier liegt eine der vielen Stärken eines Simulationsprogramms: man kann ohne Aufwand und ganz schnell mal den Drahtdurchmesser und das Metall ändern und sieht umgehend den Einfluß auf die wichtigen Antenneneigenschaften !)

20m-Groundplane

Die Länge der für das 20m-Band vorgesehenen 4 horizontalen Radials läßt sich aus der Wellenlänge $\lambda=300\text{m}/14,2=21,13$ m zu $\lambda/4=5,28$ m berechnen. Diese Antenne aus 2 mm-Kupferdraht soll in der Simulation zuerst in einer Höhe $h=4$ m über Normalboden aufgebaut werden. Auch hier ist wieder nur eine geringfügige Längenkorrektur des Strahlers erforderlich: $5,27\text{m}$ Länge führen auf den Eingangswiderstand $ZA = 23,0 \zeta$. Der Gewinn beträgt $0,47\text{dBi}$ beim optimalen Abstrahlwinkel 18° . Die Bandbreite zwischen den $s=2$ -Punkten beträgt 470 kHz. Auch das ist kein schlechter Strahler, aber wir sind ja auf viel kleinere Antennen aus ! Dennoch soll aber auch noch für diese 20m-Band-Vertikalantenne voller Größe simuliert werden, wie sie sich beim Aufbau in nur 5cm Höhe über Normalboden verhält. Es folgt wieder die negative Überraschung: der Eingangswiderstand der Antenne steigt auf $35,6 \zeta$, der Antennengewinn sinkt auf $-0,52$ dBi, der Hauptabstrahlwinkel steigt auf 27° und die Bandbreite erhöht sich auf 770 kHz. Weitere Daten mit 20mm-Alu-Strahler über Normal- und Stadtböden sind in Tab. 1 gegeben. Gewinn und Bandbreite sind bei diesen dickeren Strahlern etwas besser.

Tab. 1 Zusammenfassung der Daten der Vertikalantennen voller Größe für das 10m- und 20m-Band. Der Vertikalstrahler besitzt einen Durchmesser von 2 mm Kupferdraht bzw. 20 mm Aluminiumrohr. Die Antennen mit 4 horizontalen $\lambda/4$ -Radials stehen in Höhe $h=0,05$ m bzw. $h=4$ m über Normalboden (NB) oder Stadtboden (SB).

	Höhe über Bodentyp	Vert.-länge	Strahler (vertikal)	ZA/ζ	Gewinn	ω	Bandbreite
$\lambda/4$ -Strahler mit 4x $\lambda/4$ -Radials für 28,5 MHz	0,05m NB	2,59m	2mm Cu	34,2	-0,14 dBi	27°	1,55 MHz
	0,05m NB	2,50m	20mmAlu	33,6	-0,06 dBi	27°	1,55 MHz
	0,05m SB	2,57m	2mm Cu	31,7	-0,86 dBi	29°	1,41 MHz
	0,05m SB	2,53m	20mmAlu	31,3	-0,81 dBi	29°	2,1 MHz
	4m NB	2,61m	2mm Cu	22,2	0,79 dBi	14°	1,0 MHz
	4m NB	2,59m	20mmAlu	21,8	0,98 dBi	14°	1,4 MHz
	4m SB	2,61m	2mm Cu	22,6	1,44 dBi	17°	1,02 MHz
	4m SB	2,59m	20mmAlu	22,1	1,63 dBi	17°	1,52 MHz
$\lambda/4$ -Strahler mit 4x $\lambda/4$ -Radials für 14,2 MHz	0,05m NB	5,04m	2mm Cu	35,6	-0,52 dBi	27°	0,77 MHz
	0,05m NB	4,97m	20mmAlu	34,3	-0,40 dBi	27°	0,98 MHz
	0,05m SB	5,11m	2mm Cu	32,7	-1,23 dBi	29°	0,69 MHz
	0,05m SB	5,05m	20mmAlu	32,0	-1,14 dBi	30°	0,93 MHz
	4m NB	5,27m	2mm Cu	23,0	0,47 dBi	18°	0,47 MHz
	4m NB	5,26m	20mmAlu	22,8	0,60 dBi	18°	0,62 MHz
	4m SB	5,27m	2mm Cu	22,8	0,43 dBi	21°	0,47 MHz
	4m SB	5,25m	20mmAlu	22,6	0,57 dBi	21°	0,61 MHz

Aus der vielleicht verwirrenden Fülle von Zahlen in Tab. 1 läßt sich schnell eine Übersicht gewinnen: Antennen über Stadtboden weisen deutlich steilere und damit DX-ungünstigere Hauptabstrahlwinkel von 29° bis 30° auf als Antennen über HF-gutem Gartenboden. In Höhe von 4 m über Grund aufgebauete Antennen besitzen einen höheren Gewinn als direkt über dem Boden aufgestellte.

Abb. 1 zeigt beispielhaft Strahlungsdiagramme einer in 4 m Höhe über Normalboden und einer in 0,05 m Höhe über Stadtboden aufgestellten 10m-Band-Antenne voller Länge mit dem maximalen Gewinn von 0,98 dBi beim Abstrahlwinkel 14° bei Normalboden. Direkt über Stadtboden beträgt der höchste Gewinn unter 29° nur -0,81 dBi. Für Nahverkehr interessant sein könnte bei der 4 m hoch aufgestellten Antenne die deutliche Steilstahlung unter 52° mit einem Gewinn von 0,03 dBi.

2m lange Vertikalantenne mit 6 Radials und kapazitivem Hut

Nun zu den stark verkürzten Vertikalantennen: Es soll bewußt auf ein Metallgitter, wie unter der Super-C-Antenne angebracht, verzichtet werden. Anstelle des Netzes sind bei unseren verkleinerten Antennen Radials vorgesehen, die hier aus 6 Stück 2 m langen 10 mm-Aluminiumrohren bestehen sollen. Die 2m-Längen werden verwendet, um die teuren Alurohre aus dem Baumarkt optimal und ohne Verschnitt ausnützen zu können. Mit 2 m Länge sind diese Radials weder bei 28,5 MHz noch bei 14,2 MHz resonant. Als Strahlerstab ist aus Stabilitätsgründen ein etwas dickeres 20mm-Alu-Rohr vorgesehen. Dieser Strahlerstab soll ebenfalls 2m lang sein und am oberen Ende einen sechseckigen „Hut“ aus leichten, aber verwindungssteifen Alu-Winkelprofilen 10 mm x 10mm x 1mm tragen. Der Hut besteht aus 6 Speichen der Länge 1m, die von einem Mittelpunkt abgehen. Die sechs freien Enden werden wiederum mit 6x 1m-Längen des genannten Aluwinkelprofils verbunden. So entsteht ein sehr stabiles Gestell, das aus 6 aneinander liegenden gleichseitigen Dreiecken der Kantenlänge 1m besteht, Abb. 2. (Beim tatsächlichen Aufbau dieses Sechseckgestells sollte man unbedingt darauf achten, daß die eloxierten Winkelprofile an den Verschraubungsstellen abgekratzt und damit gegeneinander gut leitfähig gemacht werden). Die Eingabe dieser Geometrie in das WIRES-Menü von EZNEC kann, wenn man es ungeschickt anfängt, sehr mühsam sein, da man zur Festlegung der äußeren Endpunkte der 6 Speichen immer wieder Winkelfunktionen bemühen muß - wie gesagt, wenn man es umständlich liebt. Viel geschickter ist die in EZNEC 3.0 enthaltene automatische Radialerzeugung, die wir hier zur Erzeugung unseres Sechseckhutes „mißbrauchen“. Definiert werden muß nur ein Gebilde aus den Drähten 2 und 3 wie in Abb. 2, links, zu sehen ist, dann ruft man den automatischen Radialgenerator auf (Menü WIRES, Other, Create Radials), befiehlt im Menü die Erzeugung von 6 Radials - und alles ist mit einem Schlag fertig, Abb. 2, rechts. Als Draht-„durchmesser“ wird für das hier verwendete 10mm-Winkelprofil ebenfalls 10 mm angenommen, was nicht allzu falsch sein dürfte. Abb. 3 zeigt eine fertige 1m lange Antenne mit dem beschriebenen kapazitivem Hut mit den 6 strahlig vom Speisepunkt abgehenden 2m-Radials. Auf den Drähten ist die Segmentierung zu erkennen.

10m-Vertikal der Länge 2m mit kapazitivem Hut

Läßt man die Simulation der geschilderten Geometrie mit 2 m langem Vertikalteil für 28,5 MHz für eine Aufbauhöhe von 4 m über Normalboden durch den Rechner laufen, so ergibt sich für diese kapazitiv endbelastete Vertikalantenne der Länge 2m ein Fußpunktwidestand $Z_A = 75,33 \zeta + j399,5 \zeta$. Wie man erkennt, ist der Blindanteil des komplexen Eingangswiderstands stark positiv, also induktiv - der Strahler ist für das 10m-Band „elektrisch“ viel zu lang - und verlangt daher nach einer kapazitiven Kompensation. Der kapazitive Blindwiderstand des notwendigen Serienkondensators am Fußpunkt beträgt $jX_C = -j399,5 \zeta$. Ein Kondensator der Kapazität $C_{komp} = 1/(X_C \cdot 2\pi \cdot 28,5 \text{ MHz}) = 14 \text{ pF}$ erfüllt dies. Gemeinhin werden Kondensatoren als verlustlose Bauelemente angesehen. Um auch wirklich wahre Verhältnisse zu schaffen, wollen wir das hier so nicht vorgeben, sondern eine realistische Kondensatorgüte $Q_C = 1000$ annehmen. Damit wird dann ein Verlustwiderstand $R_{vkond} = 399,5 \zeta / 1000 = 0,4 \zeta$ in den Antennenkreis eingebracht. Diese Werte werden im Menü LOADS in EZNEC eingegeben. Das Ergebnis nach erneuter Rechnung ergibt nun den Eingangswiderstand $Z_A = 75,73 \zeta + j0,644 \zeta$. Am nun vernachlässigbaren Blindanteil $+j0,644 \zeta$ erkennt man, daß die Kompensation durch den 14 pF-Kondensator bei 28,5 MHz korrekt wirkt. Die Antennendaten lauten: Gewinn 1,01 dBi bei 14°. In LOAD Data von EZNEC kann man nachsehen, wie groß die Absolutverluste im Kondensator bei z.B. 100 W angebotener HF-Leistung sind: es sind gerade einmal 0,53 W oder 0,023dB.

Die Frequenzbandbreite dieser verkürzten Vertikalantenne läßt sich aus der SWR-Kurve ablesen. Abb. 4 zeigt zwei Welligkeitskurven $s = SWR$ über der Frequenz von 27 MHz bis 30 MHz. Die untere der beiden Kurven ergibt sich für die bei 28,5 MHz optimal kompensierte Antenne bei direktem Anschluß an ein 75 ζ -System. Das bietet sich hier an, weist die Antenne doch bei 28,5 MHz fast genau 75 ζ Eingangswiderstand auf. Dieselbe Kurve gilt auch, wenn eine breitbandige Anpassung von 75 ζ an 50 ζ vorgenommen worden wäre, beispielsweise mit einem Breitbandtransformator 1,5:1. Die Bandbreite zwischen den beiden $s=2$ -Frequenzen ergibt sich zu

etwa 1,43 MHz. Wird die Antenne direkt an ein 50 Ω -System angeschlossen, so gilt die obere der beiden SWR-Kurven. Man erkennt die Fehlanpassung von $s=75\Omega/50\Omega=1,5$ bei 28,5 MHz. In diesem Fall ergibt sich jedoch eine verringerte $s=2$ -Bandbreite von etwa 0,94 MHz.

20m-Vertikal der Länge 2m mit kapazitivem Hut

Wird die Simulationsrechnung für 14,2 MHz durchgeführt, so ergibt sich für den 2 m langen Strahler mit kapazitivem Hut der Fußpunkt Widerstand $Z_A = 7,824 \Omega - j 89,4 \Omega$. Dieser Strahler verlangt zuerst nach einer induktiven Verlängerung mit $jX_L = +j 89,4 \Omega$ am Fußpunkt, weil der Eingangswiderstand mit einem kapazitiven Blindanteil behaftet ist. Eine Spule der Induktivität $L_{komp} = X_L / (2\pi \cdot 14,2 \text{ MHz}) = 1 \mu\text{H}$ bringt dies zustande. Als Verlustwiderstand wirkt bei einer angenommenen Spulengüte $QL = 100$ ein Wirkwiderstand $R_{v\text{spule}} = 89,4 \Omega / 100 = 0,89 \Omega$. Nach Eingabe der Kompensationswerte in LOADS von EZNEC können die richtigen Antennendaten ausgerechnet werden: Eingangswiderstand der kompensierten Antenne bei 14,2 MHz: $Z_A = 8,694 \Omega + j 0,65 \Omega$, Gewinn $-0,24 \text{ dBi}$ beim Hauptabstrahlwinkel 20° . In LOAD Data läßt sich die in der Kompensationspule umgesetzte absolute Verlustleistung (bei 100 W Eingangsleistung) nachschlagen: $P_{\text{verlust}} = 10,24 \text{ W}$ oder, relativ, $0,469 \text{ dB}$.

Die Frequenzbandbreite der verkürzten Vertikalantenne ergibt sich aus der Berechnung und Darstellung der SWR-Kurve. Abb. 5 zeigt den Verlauf der Welligkeit über der Frequenz von 14,0 MHz bis 14,5 MHz. Diese Kurve ergibt sich natürlich nur, wenn die Antenne kompensiert und angepaßt ist. Letzteres bedeutet wieder, daß eine geeignete breitbandige Transformationsmaßnahme von $8,7 \Omega$ nach 50Ω vorgenommen worden sein muß. Es ist zu erkennen, daß die hier vorgenommene Kompensation und Anpassung wie erwartet bei 14,2 MHz zum besten SWR-Wert führt. Die $s=2$ -Bandbreite liegt ungefähr zwischen 14,01 MHz und 14,355 MHz und erreicht damit den Wert 345 kHz.

Abb. 6 zeigt in einem Diagramm die Strahlungseigenschaften dieser verkürzten Antenne im Vergleich zu der $\lambda/4$ -Antenne voller Größe. Die kapazitiv belastete und statt über 5 m nur 2 m lange Vertikalantenne für das 20m-Band hat noch einen beachtlichen Gewinn von $-0,24 \text{ dBi}$ und ist damit nur (unfeststellbare) $0,65 \text{ dB}$ schwächer als die Full-size-Vertikalantenne. Auch hat sich der Abstrahlwinkel bei der kleinen Antenne nur unwesentlich von 18° auf 20° erhöht. Die Bandbreite erstreckt sich über das gesamte 20m-Band. Damit ist diese in jeder Dimension (Höhe und Radials) um den Faktor $5,27 \text{ m} / 2 \text{ m} = 2,64$ verkleinerte 2 m lange Hut-Antenne ein sehr guter Ersatz für die „große“ Vertikalantenne.

Hinweis: Warum bei der Kompensation nicht direkt der kompensierende Blindwiderstand X_{komp} bzw. X_{Lkomp} in EZNEC eingegeben wird, was durchaus möglich wäre, sondern der Komponentenwert C_{komp} bzw. L_{komp} , ist in Teil 1 ausführlich beschrieben [1].

1 m lange Vertikalantenne mit 6 Radials und kapazitivem Hut

In diesem Kapitel soll untersucht werden, wie sich die Daten der kapazitiv belasteten Vertikalantenne ändern, wenn der senkrechte Vertikalstab von 2 m auf nur mehr 1 m verkürzt wird. Die 6x 2m-Radials und der sechseckige kapazitive Hut aus 12x 1m-Winkelstangen werden beibehalten.

10m-Vertikal der Länge 1m mit kapazitivem Hut

Nach den notwendigen Änderungen der Antennengeometrie in EZNEC ergibt sich für die noch unkompenzierte 1 m lange Vertikalantenne bei 28,5 MHz der Eingangswiderstand $Z_A = 8,614 \Omega + j 81,52 \Omega$. Wird diese Antenne bei der angegebenen Frequenz mit der Kapazität $C_{komp} = 1 / (81,52 \Omega \cdot 2\pi \cdot 28,5 \text{ MHz}) = 68,5 \text{ pF}$ kompensiert und wird der Verlustwiderstand der Kapazität mit $81,52 \Omega / 1000 = 0,08 \Omega$ angesetzt, so ergibt sich der Eingangswiderstand der kompensierten Antenne zu $Z_A = 8,694 \Omega$ und der Antennengewinn zu $0,77 \text{ dBi}$ bei 15° Abstrahlwinkel. Die Verluste im Kompensationskondensator belaufen sich bei einer Eingangsleistung 100 W auf absolut $0,92 \text{ W}$ oder, relativ, $0,04 \text{ dB}$. Die Bandbreite dieser extrem kurzen Antenne läßt sich zwischen den Welligkeitspunkten $s=2$ zu etwa 735 kHz ermitteln. In Abb. 7 sind die Strahlungsdiagramme dieser und der „normalen“ $\lambda/4$ -Antenne zu sehen. Beide Antennen stehen in $h=4 \text{ m}$ Höhe über Normalboden. Die Diagramme zeigen nur bei der DX-unwichtigen Steilstrahlung einen deutlichen Unterschied. Hieraus darf geschlossen werden, daß bei Betrieb im 10m-Band die nur 1m lange Hut-Antenne für DX-Betrieb nicht schlechter ist als die Vertikalantennen voller Länge.

20m-Vertikal der Länge 1m mit kapazitivem Hut

Im 20m-Band ist die betrachtete 1m-Antennengeometrie „elektrisch“ noch deutlich kürzer als bei Betrieb im 10m-Band. Die wichtigen Daten des Kurzstrahlers lauten: Eingangswiderstand (ohne Kompensation) $Z_A = 2,16 \zeta - j 148,6 \zeta$. Aus dem negativen Blindanteil des Eingangswiderstandes ergibt sich die Notwendigkeit einer großen induktiven und daher relativ stark verlustbehafteten Kompensation durch eine Induktivität der Größe $L_{komp} = 148,6 \zeta / (2\pi \cdot 14,2 \text{ MHz}) = 1,67 \mu\text{H}$. Mit der Spulengüte $QL=100$ beträgt der Verlustwiderstand $R_{spule} = 148,6 \zeta / 100 = 1,49 \zeta$. Werden diese Kompensationswerte in das LOADS-Menü von EZNEC eingetragen, so ergibt die neue Simulationsrechnung der bei 14,2 MHz kompensierten Antenne $Z_A = 3,65 \zeta + j 0,362 \zeta$. Der Antennengewinn beträgt $-2,33 \text{ dBi}$ bei Abstrahlung unter dem Winkel 21° . Die Spulenverluste belaufen sich nun bereits auf $40,8 \text{ W}$ bei 100 W angenommener Eingangsleistung oder auf $2,28 \text{ dB}$. Die Bandbreite folgt wieder aus der SWR-Kurve: zwischen $14,11 \text{ MHz}$ und $14,27 \text{ MHz}$ ist die Welligkeit $s=2$ unterschritten, woraus sich eine $s=2$ -Bandbreite von ca. 160 kHz ergibt. In Abb. 8 ist das Strahlungsdiagramm der 1m-Hut-Antenne (Kennzeichnung durch Punkt bei 21°) im Vergleich zur unverkürzten $\lambda/4$ -Antenne zu sehen. Der Gewinn der jetzt „elektrisch“ sehr kurzen Antenne ist um fast 3 dB verringert, der Abstrahlwinkel ist aber nur unbedeutend angehoben: $-2,33 \text{ dBi}$ bei 21° gegenüber $0,6 \text{ dBi}$ bei 18° .

Vergleich der beschriebenen Vertikalantennen

Abb. 9 zeigt die fünf hier und in [1] diskutierten Antennengeometrien maßstäblich nebeneinander. Die sehr starke Verringerung der geometrischen Maße (Strahler- und Radiallänge) ist besonders zwischen der $5,27 \text{ m}$ langen Vertikalantenne für 20m-Band-Betrieb und der nur 1 m hohen Hut-Antenne und der Super-C-Antenne zu erkennen. In den Tab. 2 und 3 sind noch einmal alle wichtigen Daten dieser Vertikalantennen zusammengefaßt. Die Übersicht beginnt jeweils mit der „normalen“ resonanten, also unverkürzten $\lambda/4$ -Groundplane-Antenne voller Größe mit 4 horizontal ausgespannten $\lambda/4$ -Radials, dann folgen die vorstehend berechneten stark verkürzten Monopolantennen mit den vertikalen Längen 2 m und 1 m mit großem kapazitivem Hut am Ende des Strahlerstabes. Zum direkten Vergleich schließen sich die in [1] simulierte „Super-C“-Antennen mit dem großen Drahtnetzwürfel und dem Grundnetz an. Alle Antennen stehen in Höhen $h=4 \text{ m}$ und $h=0,05 \text{ m}$ über normalem Gartenboden (=Normalboden, NB) oder über HF-schlechtem Stadtboden (SB). Angegeben ist weiter der Fußpunktwiderstand der noch unkompenzierten Antennen, dann der reine Wirkwiderstand der entweder induktiv oder kapazitiv kompensierten Antennen. Es folgen der Antennengewinn in dBi (also im Vergleich zum Isotropstrahler) und der zugehörige optimale Abstrahlwinkel ω , dann die $s=2$ -Bandbreite sowie die absoluten Kompensationsverluste bei einer angenommenen Eingangsleistung von 100 W und die relativen Kompensationsverluste in dB.

Auf den ersten Blick ist die Zahlenfülle recht verwirrend, doch selbst, wenn man die Zahlenkolonnen ein Weilchen studiert hat und gewisse Tendenzen „gut/schlecht“ feststellt, bleibt doch eine grundsätzliche Frage zu beantworten: was ist eigentlich eine gute Antenne ?

Man könnte definieren, daß eine gute Antenne ohne aufwendige Anpaßmaßnahmen an ein Koaxialkabel anzuschließen sein sollte. Aber dann fiel ein Großteil von Antennen, vor allem die kurzen, automatisch weg. Ist dann die Bandbreite wichtig ? Ja, schon, aber wir werden sehen, daß eine große Bandbreite oft ein Zeichen für eine besonders verlustreiche Antenne ist. Es ist aber wohl unstrittig, daß ein hoher Antennengewinn und ein flacher Abstrahlwinkel eine gute (DX-)Antenne ausmachen. Für Nahverkehr auf Kurzwelle wäre ein steiler Abstrahlwinkel besser, doch soll in der nachfolgenden Diskussion das Schwergewicht auf gute DX-Antennen gelegt werden. Was ist aber wichtiger: ein hoher Gewinn oder ein flacher Abstrahlwinkel, wenn beides zugleich nicht zu bekommen ist ? Das ist eine komplizierte Frage, die auf Anhieb nur schwer zu beantworten ist. Doch machen wir uns ein einfaches, fast primitives Modell unter Auslassung der Erdkrümmung: die F-Schicht der Ionosphäre liegt in etwa 300 km Höhe. Wenn wir unter dem Erhebungswinkel ω in Richtung dieser höchsten Ionosphärenschicht strahlen, so trifft der Strahl diese Schicht in einer (Horizontal-)Entfernung von etwa $300 \text{ km}/\tan \omega$. Diese einfache Annahme gilt nur, wenn der Abstrahlwinkel ω nicht zu groß ist; nimmt man die Erdkrümmung mit in die Betrachtung auf, so reicht der Strahl nicht so weit. Zahlenbeispiel 1: $\omega = 20^\circ \rightarrow 824 \text{ km}$. Beispiel 2: $\omega = 45^\circ \rightarrow 300 \text{ km}$. Wollen wir den halben Erdball umrunden, so sind $20000 \text{ km}/(300 \text{ km}/\tan \omega)$ Reflexionen notwendig. Bei $\omega = 20^\circ$ ergibt das $20000 \text{ km}/824 \text{ km} = 24$ Reflexionen, bei $\omega = 45^\circ$ sind es $20000 \text{ km}/300 \text{ km} = 67$ Reflexionen. Etwa die Hälfte dieser Reflexionen erfolgt an der Ionosphäre, die andere Hälfte an der Erdoberfläche. Jede Reflexion ist unvollkommen, bringt also eine erhebliche Dämpfung für den Wellenstrahlweg in die Südsee. Wie schon bemerkt ist die Sprungentfernung unter Berücksichtigung der Erdkrümmung etwas kürzer, es sind also unter beiden Abstrahlwinkeln noch mehr Reflexionen als 24 bzw. 67 bis zur Südsee

notwendig, aber am prinzipiellen Gedankengang ändert sich nichts. Doch es kommt noch eine weitere Dämpfungserhöhung hinzu: durch den Zickzackweg des Wellenstrahls zwischen Ionosphäre und Erde muß eine größere als die „gerade“ Entfernung überwunden werden. Für nicht zu kleine Abstrahlwinkel ω ist dies auf dem Weg zur Südsee mit den obigen Daten angenähert $20000 \text{ km}/\cos\omega$, also bei $\omega=20^\circ$ etwa 21300 km, bei $\omega=45^\circ$ aber schon 28300 km. Diese größere Entfernung ergibt, auch wieder einfach gerechnet, bereits 2,5 dB mehr Dämpfung; dies entspricht etwa einem halben S-Punkt. Fassen wir zusammen: ein steiler Abstrahlwinkel verursacht also sowohl eine höhere Gesamt-Reflexionsdämpfung als auch eine größere Freiraumdämpfung (=Streckendämpfung) als ein flacher Abstrahlwinkel.

Vergleich der 10m-Band-Antennen

In Tab. 2 sind die Daten aller hier mit EZNEC simulierten Vertikalantennen für das 10m-Band zusammen gefaßt. Welches sind die Antennen mit hohem Gewinn ?

Die Antenne mit dem höchstem Gewinn in Tab. 2 ist mit 1,58 dBi der 2 m lange kapazitiv belastete Monopol, der 4 m über einem (HF-schlechten) Stadtboden angebracht ist. Nicht wesentlich schlechter (1,01 dBi) strahlt dieser 2m-Monopol über (HF-besserem) Normalboden. Das ist auf den ersten Blick verwunderlich, und die Problematik, was gut, was schlecht ist, wird schon hier sehr deutlich. Über Normalboden beträgt der Abstrahlwinkel 14° , über Stadtboden aber 17° . Welche Antenne ist nun die bessere ? Doch sehr wahrscheinlich die mit dem flacheren Abstrahlwinkel, weil diese auf dem Weg zur Südsee mit deutlich weniger Reflexionen an Ionosphäre und Erde auskommt als die 3° steiler strahlende. Rechnen wir wieder sehr angenähert: Zahl der Reflexionen bei $\omega=14^\circ$ ca. 16, bei $\omega=17^\circ$ aber schon 20. Und eine einzige Reflexion mehr verursacht sicher schon eine höhere Dämpfung als der Unterschied (1,58-1,01) dBi = 0,57 dB zwischen den beiden Gewinnwerten ausmacht. Nach dieser Primitivrechnung ist also, wenn DX gewünscht wird, ein nur geringfügig flacherer Abstrahlwinkel sehr viel mehr wert als ein etwas höherer Gewinn. Die Erfahrung des Funkamateurs bestätigt diese Schlussfolgerung sehr nachhaltig. Also sollte man den Gewinn einer Antenne nicht überbewerten, sondern nach einem flachen Abstrahlwinkel streben.

Tab. 2 Daten kompensierter Vertikalantennen bei 28,5 MHz.

Es werden Vertikalantennen voller Strahler- und Radiallängen mit verkürzten Vertikalstrahlern der Längen 2 m und 1 m und die sogenannte Super-C-Antenne verglichen. Die Antennen stehen entweder direkt (0,05m) oder in 4 m Höhe über einem Normalboden (NB) oder Stadtboden (SB).

28,5 MHz	Höhe über Bodentyp	Vert.-länge	Z_A/ζ (unkomp)	Z_A/ζ (komp)	Gewinn	ω	Bandbreite	Komp. Verluste	Verluste (relativ)
Lambda/4-Strahler mit voller Länge, 4 Radials	0,05m NB	2,50m	33,6	33,6	-0,06 dBi	27°	1,55 MHz	0	0
	4m NB	2,59m	21,8	21,8	0,98 dBi	14°	1,4 MHz	0	0
	0,05m SB	2,53m	31,3	31,3	-0,81 dBi	29°	2,1 MHz	0	0
	4m SB	2,59m	22,1	22,1	1,63 dBi	17°	1,52 MHz	0	0
Vertikal-Strahler mit kapazitivem Hut und 6x 2m-Radials	0,05m NB	2 m	161+j438	161	-0,58 dBi	27°	3,0 MHz	0,25 W	0,01 dB
	4m NB	2 m	75,3+j400	75,7	1,01 dBi	14°	1,43 MHz	0,53 W	0,02 dB
	0,05m SB	2 m	144+j424	144	-1,48 dBi	30°	3,0 MHz	0,28 W	0,01 dB
	4m SB	2 m	76,9+j400	76,9	1,58 dBi	17°	1,44 MHz	0,52 W	0,02 dB
	0,05m NB	1 m	20,4+j99	20,5	-1,12 dBi	30°	1,7 MHz	0,49 W	0,02 dB
	4m NB	1 m	8,6+j82	8,7	0,77 dBi	15°	0,74 MHz	0,92 W	0,04 dB
	0,05m SB	1 m	18,8+j94	18,9	-2,18 dBi	32°	1,59 MHz	0,5 W	0,02 dB
	4m SB	1 m	8,8+j82	8,9	1,16 dBi	18°	0,73 MHz	0,9 W	0,04 dB
Super-C-Antenne, siehe [1,2]	0,05m NB	0,91m	4,9-j26	5,2	-1,38 dBi	30°	1,73 MHz	5,0 W	0,22 dB
	4m NB	0,91m	1,5-j32	1,8	1,07 dBi	15°	0,54 MHz	17,8 W	0,85 dB
	0,05m SB	0,91m	4,3-j27	4,6	-2,35 dBi	32°	1,54 MHz	5,9 W	0,27 dB
	4m SB	0,91m	1,5-j32	1,8	1,38 dBi	18°	0,55 MHz	17,5 W	0,84 dB

Welches sind in unserer Aufstellung die flach strahlenden Antennen ? Die geringsten Abstrahlwinkel mit 14° und 15° weisen die am höchsten über dem Normalboden (NB) aufgestellten Antennen auf, fast unabhängig davon wie groß, kurz, lang oder dick sie sind. Sogar die $\lambda/4$ -Antenne voller Länge strahlt nicht flacher als 14° . Die nächstbesseren Antennen sind die, die 4 m hoch über dem schlechteren Stadtboden (SB) aufgebaut sind. Bezüglich des Abstrahlwinkels besonders schlechte Antennen sind alle direkt auf dem Boden stehenden Antennen und dort besonders die auf schlechtem Stadtboden angebrachten, die unter den DX-ungünstigen Steilwinkeln

von 27° bis 32° strahlen. (Bei $\omega=32^\circ$ wären nach unserer Primitivbetrachtung bereits 42 Reflexionen bis zur Rückseite der Erde nötig !).

Auffällig ist, daß die kapazitiv belastete 2 m lange und 4 m über Grund (NB und SB) stehenden Vertikalantennen für das 10m-Band etwas höhere Gewinnwerte aufweisen als die gleichartig aufgestellten „großen“ $\lambda/4$ -Antennen. Das liegt daran, daß der hier verwendete 2 m lange Vertikalteil bei 10 m Wellenlänge nicht sonderlich verkürzt ist ($\lambda/4=2,5$ m) und daß durch den kapazitiven Hut eben „zufällig“ ein noch höherer Gewinn erreicht wird.

Ein paar Worte zur Bandbreite: Vergleicht man die in Tab. 2 aufgeführte $s=2$ -Bandbreite jeweils bei Antennen desselben Typs, so stellt man fest, daß die „schlechten“ Antennen die höhere Bandbreite besitzen. Das ist verständlich, wenn man Antennen als verlustbehaftete „offene“ Resonanzkreise betrachtet. Stärker gedämpfte Resonanzkreise weisen stets eine höhere Bandbreite auf als schwach gedämpfte. Sucht man also unter den hier simulierten Antennen eine besonders breitbandige, so wird man im allgemeinen auf hohen Gewinn und flachen Abstrahlwinkel verzichten müssen. Sieht man sich die Tabellenwerte sehr aufmerksam an, so erkennt man, daß die nicht längenreduzierten „großen“ $\lambda/4$ -Antennen auch bei guten sonstigen Antennendaten recht breitbandig sind. Das ist der prinzipielle Vorteil der „Full-size“-Strahler.

Als „bester“ Strahler im 10m-Band mit den vorteilhaftesten Daten ist wohl die in 4 m Höhe aufgebaute 2 m lange und mit kapazitivem Hut versehene Antenne anzusehen: Abstrahlwinkel 14° bis 17°, Gewinn über 1 dBi, Bandbreite 1,4 MHz. Nicht viel schlechter in Gewinn und Abstrahlwinkel ist der nur 1m lange Strahler mit allerdings nur der halben Bandbreite. In der Praxis muß jetzt aber in Betracht gezogen werden, daß der Fußpunkt-widerstand der beiden eben verglichenen Antennen noch an 50 ζ angepaßt werden muß. Es könnte einfacher sein, 75 ζ an 50 ζ anzupassen, aber aufwendig, den beim kürzeren Strahler vorliegenden niedrigen Wirkwiderstand 9 ζ an den Wellenwiderstand des 50 ζ -Koaxialkabels anzupassen..

Ist nun die in [1] simulierte Super-C-Antenne besser oder schlechter als die kurze 10m-Band-Antennen mit kapazitivem Hut ? Vergleichen wir die Strahlungsdiagramme, sie geben die umfassendste und direkteste Auskunft. In Abb. 10 sind die Strahlungsdiagramme der direkt über Normalboden aufgebauten Super-C-Antenne und der 1m kurzen Hut-Antenne zu erkennen: es ist kaum ein Unterschied festzustellen. Es hätte sich also nicht gelohnt, einen derart großen Material- und Mechanik-Aufwand für die „Würfelantenne“ zu treiben. Werden beide Antennen in 4 m Höhe aufgebaut, Abb. 11, so ändert sich zwar die Form des Strahlungsdiagramms, ein Qualitätsunterschied zwischen den beiden kurzen Antennen ist aber kaum auszumachen.

Vergleich der 20m-Band-Antennen

Nach dem oben Geschriebenen haben wir aus Tab. 3 sehr schnell die guten Antennen für das 20m-Band herausgefunden: es sind die mit den flachsten Abstrahlwinkeln, die hier bei 20° liegen. Und alle diese Antennen sind wieder die möglichst hoch und, wenn möglich, die über HF-gutem Normalboden aufgebauten. Den höchsten Gewinn unter den verkürzten Antennen weist mit -0,24 dBi die 4 m hoch über Normalboden errichtete 2 m lange kapazitiv belastete Monopolantenne auf. Sie ist von den zur Diskussion stehenden 20m-Band-Antennen sowieso die beste, liegt ihr Abstrahlwinkel doch beim niedrigsten Wert 20°. Nur die außer Konkurrenz laufende „große“ Monopolantenne voller Länge besitzt noch einen flacheren Abstrahlwinkel (18°) und einen höheren Gewinn (0,41 dBi). Besonders ungünstige Antennen sind wieder die direkt über dem Boden stehenden; hier liegen die Abstrahlwinkel bei 29° bis 32° und die Gewinnwerte bei -2,6 dBi bis -6,9 dBi. Auch die „richtigen“ $\lambda/4$ -Antennen sind bei bodennahem Aufbau keine guten Flachstrahler: Erhebungswinkel bei 27°/29° mit bescheidenem Gewinn.

Beachtenswert und auf den ersten Gedanken nicht verständlich ist die Tatsache, daß die in der Tabelle angegebenen Kompensationsverluste gar nicht die „schreckliche“ Rolle spielen, die wir ihnen vielleicht zuschieben. Man betrachte dazu den 1m langen Vertikalstrahler in 4 m Höhe über Grund mit der Kompensationsverlustleistung von etwa 40 W (bei 100 W Leistungsangebot) und dem gar nicht so schlechten Antennengewinn von -2,33 dBi (Normalboden) bzw. -2,93 dBi (Stadtboden) und vergleiche diese Werte mit denen der 2 m langen in 5 cm über Stadtboden stehenden Antenne. Diese weist nur eine Kompensationsspulenverlustleistung von 2,4 W auf und hat dennoch einen deutlich niedrigeren Gewinn von nur -3,88 dBi. Wie kommt das, und wohin verschwindet denn hier die angebotene HF-Leistung ? Die Erklärung ist nach einigem Nachdenken einleuchtend: die sehr bodennah aufgestellte Antenne verliert einen Großteil ihrer HF-Leistung an den Boden, die Spule ist als „Verlustobjekt“ hier gar nicht so wichtig. Die erstgenannte, 4 m hoch aufgestellte, aber mit 1m nur halb so lange und deswegen stark induktiv kompensierte Antenne besitzt hingegen hohe Spulenverluste bei nur geringen Bodenverlusten.

Tab. 3 Daten kompensierter Antennen bei 14,2 MHz.

Es werden Vertikalantennen voller Strahler- und Radiallängen mit deutlich verkürzten Vertikalstrahlern der Längen 2 m und 1 m und die sogenannte Super-C-Antenne verglichen. Die Antennen stehen entweder direkt (0,05m) oder in 4 m Höhe über einem Normalboden (NB) oder Stadtboden (SB).

14,2 MHz	Höhe über Bodentyp	Vert.-länge	ZA/ζ (unkomp)	ZA/ζ (komp)	Gewinn	ω	Bandbreite	Komp. Verluste	Verluste (relativ)
Lambda/4-Strahler mit voller Länge, 4 Radials	0,05m NB	4,97m	34,3	34,3	-0,40 dBi	27°	980 kHz	0	0
	4m NB	5,26m	22,8	22,8	0,60 dBi	18°	620 kHz	0	0
	0,05m SB	5,05m	32,0	33	-1,14 dBi	30°	930 kHz	0	0
	4 m SB	5,25m	22,6	22,6	0,57 dBi	21°	610 kHz	0	0
Vertikal-Strahler mit kapazitivem Hut und 6x 2m-Radials	0,05m NB	2 m	22,5-j38	22,9	-2,62 dBi	29°	1000kHz	1,7 W	0,07 dB
	4m NB	2 m	7,8-j89	8,7	-0,24 dBi	20°	345 kHz	10,2 W	0,47 dB
	0,05m SB	2 m	20,7-j50	21,2	-3,88 dBi	32°	920 kHz	2,4 W	0,1 dB
	4m SB	2 m	7,4-j89	8,3	-0,66 dBi	23°	330 kHz	10,8 W	0,5 dB
	0,05m NB	1 m	7,1-j122	8,3	-4,3 dBi	30°	390 kHz	14,7 W	0,69 dB
	4m NB	1 m	2,2 -j149	3,7	-2,33 dBi	21°	160 kHz	40,8 W	2,28 dB
	0,05m SB	1 m	6,8-j128	8,1	-5,74 dBi	32°	370 kHz	15,9 W	0,75 dB
	4m SB	1 m	2,0-j149	3,5	-2,93 dBi	24°	150 kHz	42,4 W	2,39 dB
Super-C-Antenne, siehe [1,2]	0,05m NB	0,91m	2,0-j102	3,0	-5,44 dBi	30°	253 kHz	33,2 W	1,75 dB
	4m NB	0,91m	0,47-j111	1,6	-4,4 dBi	21°	118 kHz	70,2 W	5,26 dB
	0,05m SB	0,91m	1,9-j104	2,9	-6,9 dBi	32°	240 kHz	36,0 W	1,94 dB
	4m SB	0,91m	0,44-j111	1,5	-5,14 dBi	24°	120 kHz	71,6 W	5,46 dB

Sucht man sich aus Tab. 3 die optimale kurze Antenne heraus, so fällt die Wahl auf die schon erwähnte 4 m hoch über Normalboden stehende 2 m lange kapazitiv belastete Vertikalantenne. Sie strahlt flach ab (20°), hat einen hohen Gewinn (-0,24 dBi) und eine Bandbreite, die das ganz 20m-Band mit einer Welligkeit unter $s=2$ abdeckt. Eine Anpassung des Fußpunktwiderstandes $7,8 \zeta$ an 50ζ ist allerdings notwendig. Dieser um den Faktor 2,64 längenverkürzte Strahler ist nur unwesentlich schlechter als die 5,27 m lange und mit 4x über 5 m langen Radials versehene $\lambda/4$ -Antenne mit 0,41 dBi Gewinn, Abstrahlwinkel 18° und Bandbreite 480 kHz. Und es dürfte Schwierigkeiten bereiten, diese „Full-size“-Antenne mit ihren über 5m langen Radials in 4 m Höhe über Grund zu errichten ! Ganz anders bei der nur 1 m langen Hut-Antenne: dieser extrem kurze Strahler stellt noch eine beachtliche Antenne dar. Bedenkt man, daß der Längenverkürzungsfaktor hier bereits $5,27\text{m}/1\text{m}=5,27$ beträgt, so sind -2,33 dBi Gewinn bei einem Abstrahlwinkel von 21° nicht schlecht ! Und hier ist es technisch tatsächlich möglich, das Gebilde in 4 m Höhe über dem Boden aufzustellen.

Aus Tab. 3 für die 20m-Band-Antennen geht zusammenfassend hervor, daß die guten, flach (ca. 20°) strahlenden Antennen weitgehend unabhängig von ihrer Länge (2m, 1m oder 0,91m) immer diejenigen sind, die möglichst hoch über einem Normalboden stehen, hier also in $h=4$ m Höhe. Die beiden mit dem kapazitiven Sechseck-Hut versehenen Strahler weisen dazu hin auch noch einen recht hohen Gewinn auf (-0,24 dBi bzw. -2,33 dBi), während sich die Super-C-Antenne im 20m-Band als nicht so gut erweist (-4,4 dBi).

Statt des vielleicht öden Vergleichs von Zahlenreihen sollen wieder die Strahlungsdiagramme der Antennen verglichen werden und für sich selbst sprechen. Bei bodennahem Aufbau ergeben sich für die extrem kurze Hut-Antenne und die Super-C-Antenne die beiden in Abb. 12 gezeigten Strahlungsdiagramme. Die Hut-Antenne strahlt in Richtung 30° 1,14 dB mehr ab als die Super-C-Antenne. Auch bei erhöhtem Aufbau über Normalboden, Abb. 13, hat die mechanisch einfachere Hut-Antenne klar die Nase vorn: es liegt ein mehr als 2 dB höherer Gewinn unter dem Hauptabstrahlwinkel 20° bzw. 21° vor. Über schlechtem Stadtboden ist der Vorteil der Hut-Antenne noch größer.

Woran liegt es, daß die in Tab. 2 zusammen gefaßten 10m-Band-Antennen generell höhere Gewinne und flachere Abstrahlwinkel zeigen als die 20m-Band-Antennen der Tab. 3 ? Das liegt an zwei Tatsachen: wir hatten angenommen, daß alle Antennen entweder 2 m oder 1m oder 0,91m lang sind. Im 10m-Band sind diese Strahler relativ zur Wellenlänge doppelt so lang wie die 20m-Band-Antennen, außerdem stehen sie, auch wieder bezogen auf die Wellenlänge, immer doppelt so hoch über dem Untergrund wie die 20m-Band-Strahler. Die kleinere Wellenlänge verbessert hier also einige der grundlegende Daten

Schlußfolgerungen

Die Daten der hier und in [1] simulierten kurzen Antennen zeigen, daß es nicht notwendig ist, ein kompliziertes kapazitives und dickes „Würfelgebilde“ an das Ende eines kurzen Strahlers zu montieren. Für recht gute Abstrahleigenschaften reicht auch ein schlichter und sehr einfach herzustellender kapazitiver Hut. Dieser leichte Hut weist auch bezüglich der Mechanik und Windstabilität erhebliche Vorteile gegenüber einem komplizierten dreidimensionalen Gebilde auf. Und das für einen flachen DX-Abstrahlwinkel Wichtigste: es ist bedeutend leichter, eine filigran und mit wenig Masse am oberen Strahlerende aufgebaute Antenne möglichst hoch über den Boden zu erheben, als ein plumpes und schweres kopflastiges Antennengebilde.

Was ist noch zu tun, um eine gut strahlende Vertikalantenne zu bauen ?

- Die wichtigste „Bauvorschrift“ für eine gute DX-Vertikalantenne ist, daß man sie samt ihren „Gegen-gewichten“ (Radials) möglichst hoch über Grund aufstellt und sie, wenn möglich, über HF-gutem Grund aufbaut (Stichwort: „elevated radials“).
- „Möglichst hoch“ ist ein relativer Begriff, er bedeutet aber immer, daß man wenigstens meterhoch über den Boden gehen muß. Eine in nur 1m Höhe errichtete Vertikalantenne ist, was Abstrahlwinkel und Gewinn angehen, qualitätsmäßig schon weit näher an der hier verwendeten guten 4m-Höhe als an der bodennahen Höhe von nur 5 cm. Daß jeder zusätzliche Zentimeter mehr über Grund die Abstrahlung verbessert, ist in [7] nachgewiesen.
- Ein HF-guter Grund für alle Antennen ist feuchter Gartenboden, Sumpf, am besten aber Salzwasser. Antennen-schlecht sind Beton, Straße oder Fels unter einer Antenne.
- Steht eine Vertikalantenne mitsamt ihren Radials in wenigstens Meterhöhe über einem HF-mäßig nicht zu schlechten Grund, dann spielt - entgegen weit verbreiteter Meinung - die Anzahl der Radials keine allzu große Rolle mehr: schon 3 bis 4 Radials reichen meist aus. Beweis: siehe [7], Seite 104.
- Der Einfluß der tatsächlichen Vertikallänge der Antenne auf die Abstrahleigenschaften ist nicht so bedeutend. Auch eine geometrisch verkürzte, aber dafür am oberen Ende des Vertikalteils stark kapazitiv belastete Antenne ist eine gute Antenne.
- Ein hoher Aufbauort über Grund ist leichter machbar, wenn die Antenne in Länge und Radialgröße verkürzt ist und – sehr wichtig! – oben (am Strahlerende) kapazitiv und nicht unten (am Speisepunkt) induktiv verlängert wird. Eine kapazitive Verlängerung bringt keine ohmschen Verluste in den Antennenkreis, eine induktive Verlängerung hingegen verursacht meist große Zusatzverluste.
- Die durch eine Strahlerverkürzung eventuell eingehandelten Nachteile wirken sich nicht so stark auf den angestrebten flachen Abstrahlwinkel und den hohen Gewinn aus, wie der nun möglich gewordene höhere Aufbau der verkleinerten Antenne über Grund verbessert.
- Man sollte von keiner (kurzen) Antenne, auch wenn sie „Super“ heißt, Wunder erwarten, einfachere Geometrien wie die hier gezeigten mit schlichtem kapazitivem Hut können gleiche, wenn nicht bessere Abstrahlergebnisse liefern.

Und zum Schluß zwei „Weisheiten“ :

- jeder Draht, auch der kürzeste und krummste, strahlt irgendwie
- ist ein Vertikalstrahler über dem Meer aufgebaut, so kann auch eine aufwendige „Land-Antenne“ kaum mit dem Stück Draht über Salzwasser konkurrieren.

Literatur

- [1] Gerd Janzen, DF6SJ, Eine Super-Antenne ? Teil 1, cq DL (2003) ????
- [2] GAP Antenna Products, <http://www.gapantenna.com/superc.htm>
- [3] Roy Lewallen, W7EL, P.O.Box 6658, Beaverton, OR, 97007, USA; <http://eznec.com>
- [4] Gerd Janzen, DF6SJ, EZNEC 3.0 - Antennensimulation unter Windows, Funkamateure 10,11,12(2000)
- [5] Gerd Janzen, DF6SJ, Antennensimulation mit EZNEC,
Vortrag auf der 4. Kurzwellen-Fachtagung des DARC, März 2001, München
- [6] Gerd Janzen, Kurze Antennen, Franckh-Verlag, Stuttgart, 1986
- [7] Gerd Janzen, Monopolantennen und Vertikalantennen, Kempten, 1999

Die Bücher [6] und [7] sind nur vom Autor direkt beziehbar:

Prof. Dr.-Ing. Gerd Janzen, DF6SJ, Hochvogelstraße 29, 87435 Kempten

Bilder

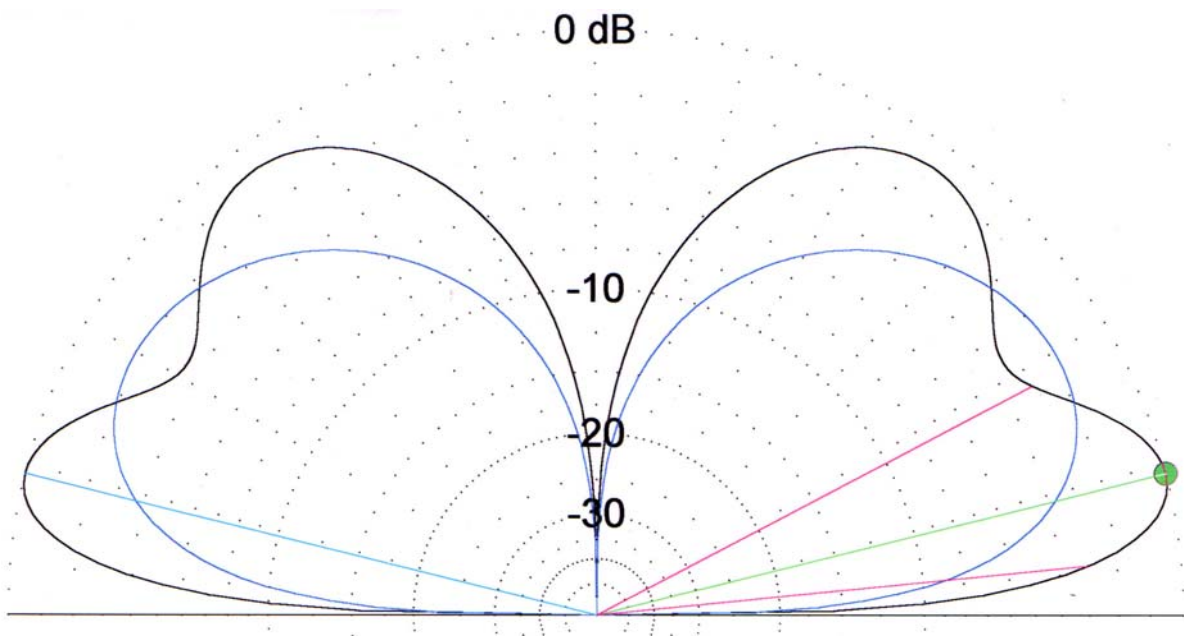


Abb. 1 Strahlungsdiagramme einer $\lambda/4$ großen 10m-Band-Antenne bei 28,5 MHz. (Radials $4 \times \lambda/4$, Vertikalteil aus 20mm-Alu-Rohr). Über Normalboden ($h=4\text{m}$) ergibt sich ein Gewinn von 0,98 dBi beim Abstrahlwinkel 14° (=Kennzeichnungspunkt im Diagramm), direkt über Stadtboden ($h=0,05\text{m}$) liegt ein Gewinn von -0,81dBi bei 29° vor.

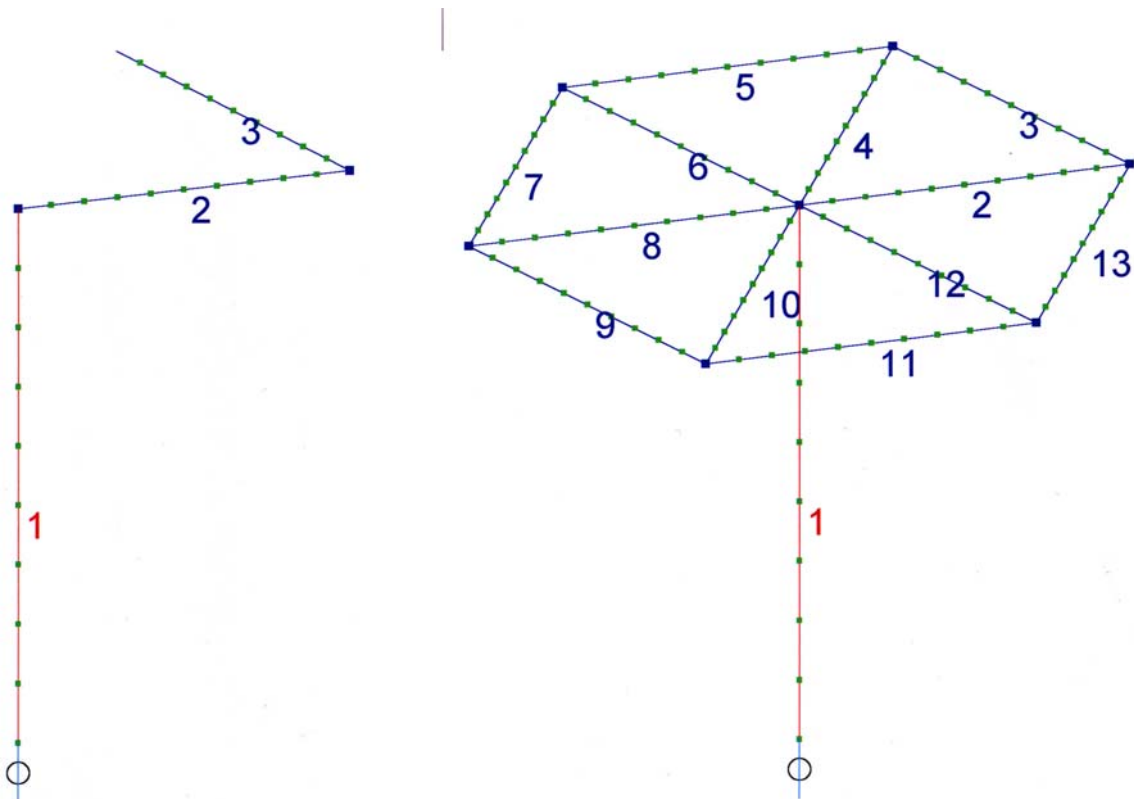


Abb. 2 Einfache Erzeugung der Drahtdaten des Sechseckhutes für WIRES in EZNEC. Verwendet wird ein Winkelement aus einem Radialdraht von 1 m Länge (Draht 2) mit angesetztem und unter 60° abgehendem ebenfalls 1m langen Draht 3, linkes Teilbild. Durch eine Versechsfachung im Menü „Create Radials“ wird hieraus automatisch der vollständige kapazitive Hut aus den Drähten 2 bis 13 definiert, rechtes Teilbild. Längs der Drähte sind die Segmentierungen zu erkennen.

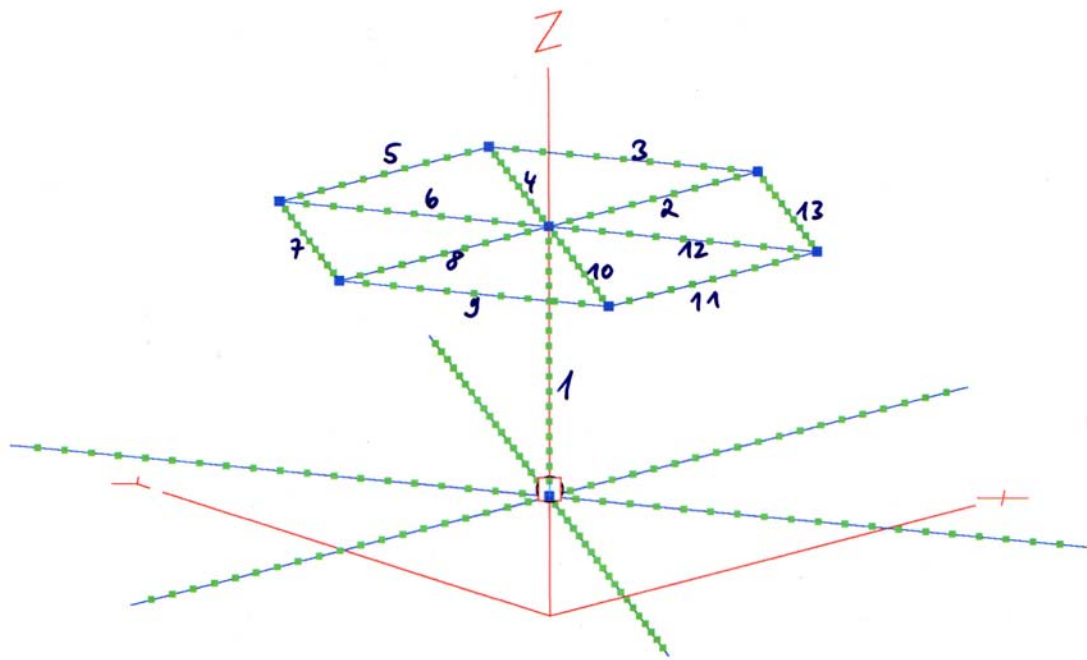


Abb. 3 Kapazitiv belastete Vertikalantenne der Länge 1m mit 6 Radials der Länge 2m. Die Punkte auf den Drähten kennzeichnen die Segmente, die EZNEC zur Berechnung der Antennendaten benötigt. Am Fußpunkt des Vertikalteils sind der Einspeisepunkt (Kreis) und die Kompensationsstelle (Quadrat) zu erkennen.

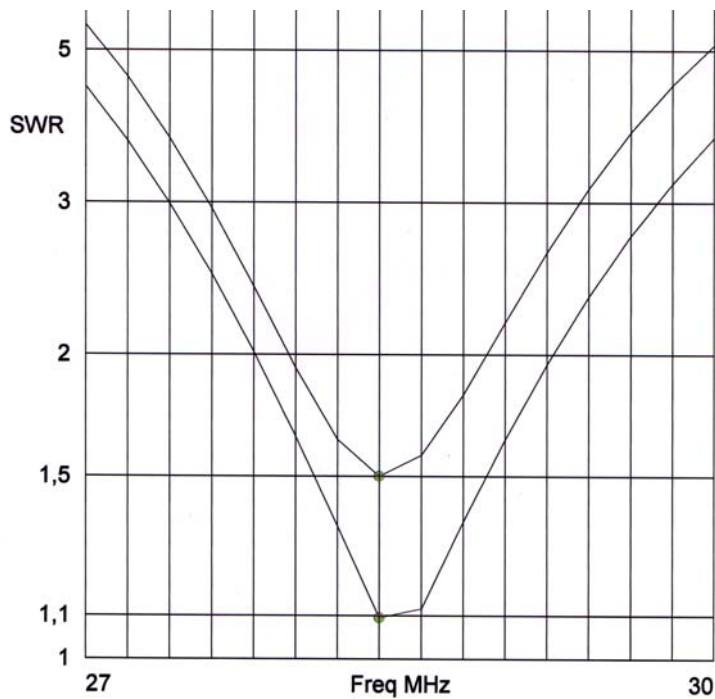


Abb. 4 Welligkeitsverläufe über der Frequenz im 10m-Band für einen 2 m langen Vertikalstrahler mit kapazitivem Hut. Die beiden Kurven unterscheiden sich in der Anpassung. Die bis zum Welligkeitswert $s=1,1$ herablaufende Kurve gilt bei einer breitbandigen Anpassung an 75Ω , die andere gilt ohne Anpassungsmaßnahme bei direktem Anschluß an ein 50Ω -Kabel. ($h=4m$ über Normalboden).

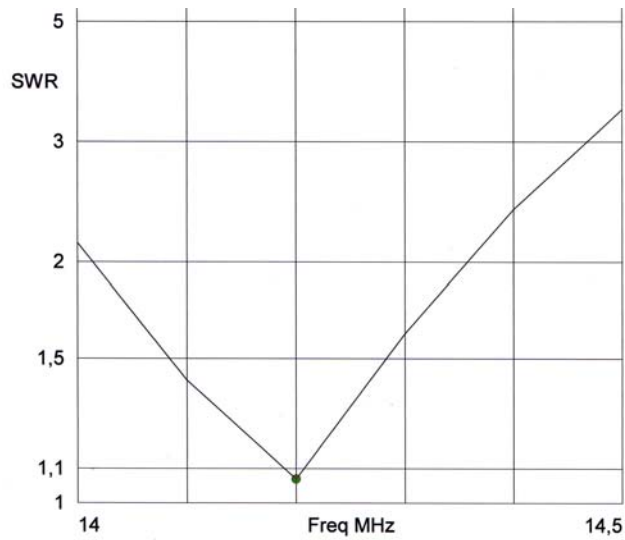


Abb. 5 Welligkeits $s=SWR$ über der Frequenz im 20m-Band für einen 2 m langen Vertikalstrahler mit kapazitivem Hut. Kompensation und Anpassung sind für 14,2 MHz vorgesehen.

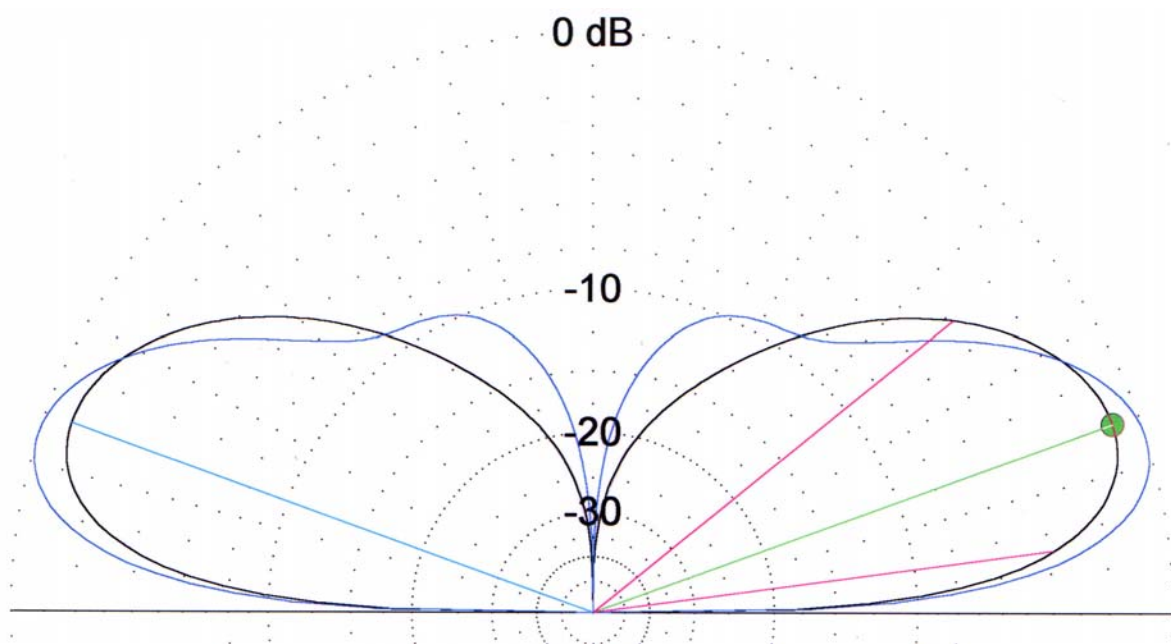


Abb. 6 Strahlungsdiagramme des 20m-Band- $\lambda/4$ -Strahlers voller Größe und des um den Faktor 2,6 in jeder Dimension verkleinerten Vertikalstrahlers der Länge 2 m mit kapazitivem Hut. Abstrahlwinkel und Gewinn der kurzen Hutantenne (=Kennzeichnungspunkt) unterscheiden sich nur geringfügig von der $\lambda/4$ -Antenne. (14,2 MHz, $h=4$ m über Normalboden).

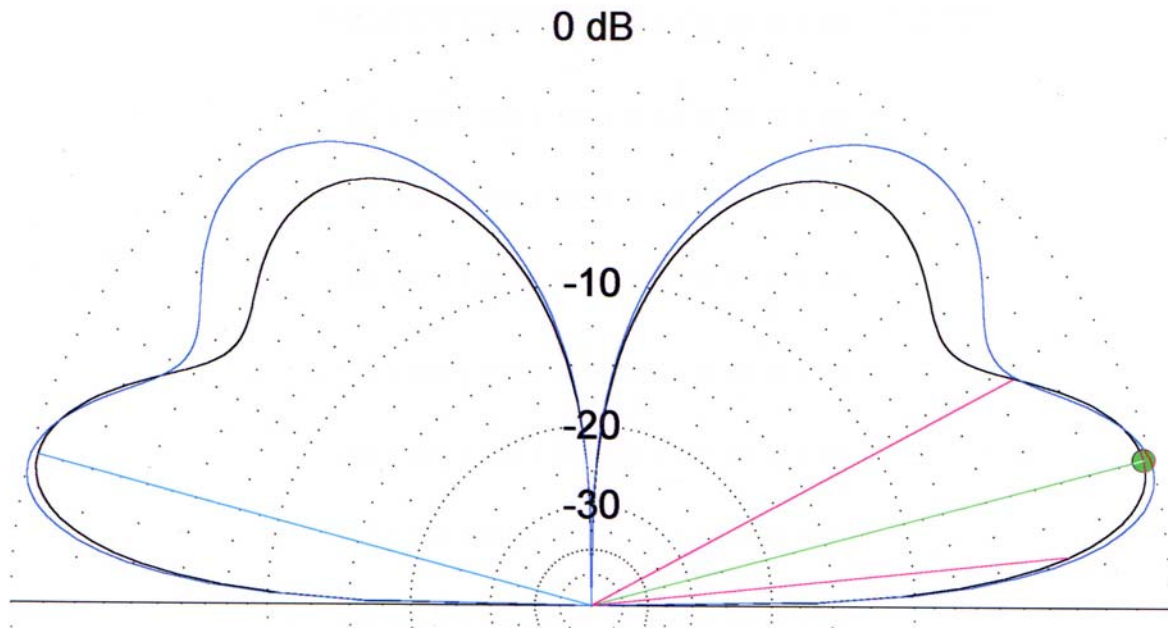


Abb. 7 Strahlungsdiagramme des 10m-Band- $\lambda/4$ -Strahlers voller Größe und den auf 1 m Vertikallänge verkürzten Vertikalstrahlers mit kapazitivem Hut. Gewinn und Hauptabstrahlwinkel der kurzen Hutantenne (=Kennzeichnungspunkt) unterscheiden sich nur unwesentlich ($0,77 \text{ dBi}/15^\circ$ gegenüber $0,98 \text{ dBi}/14^\circ$). Die Steilstahlung der $\lambda/4$ -Antenne ist größer. Gemeinsame Daten beider Antennen: $28,5 \text{ MHz}$, $h=4 \text{ m}$ über Normalboden.

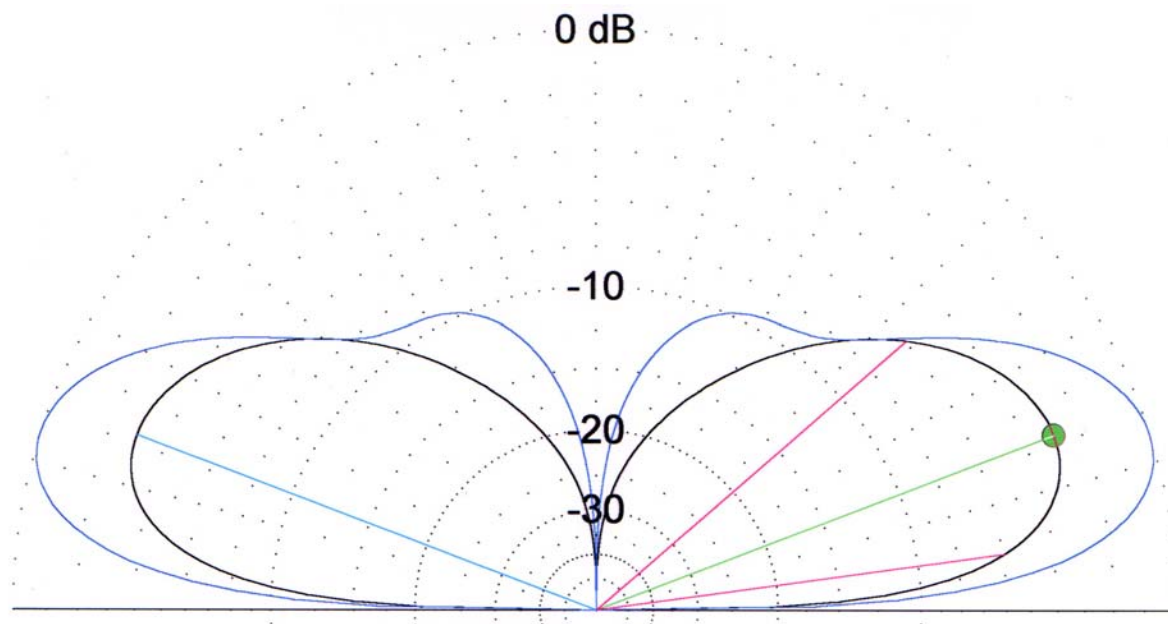


Abb. 8 Strahlungsdiagramme des 20m-Band- $\lambda/4$ -Strahlers voller Größe und des um den Faktor 5,3 in der Vertikallänge (=1 m) sehr stark verkleinerten Strahlers mit kapazitivem Hut ($-2,33 \text{ dBi}$ bei 21° gegenüber $0,6 \text{ dBi}$ bei 18°). Der Gewinn der sehr kurzen Hut-Antenne (=Kennzeichnungspunkt) ist also um fast 3 dB verringert. Gemeinsame Daten beider Antennen: $14,2 \text{ MHz}$, $h=4 \text{ m}$ über Normalboden.

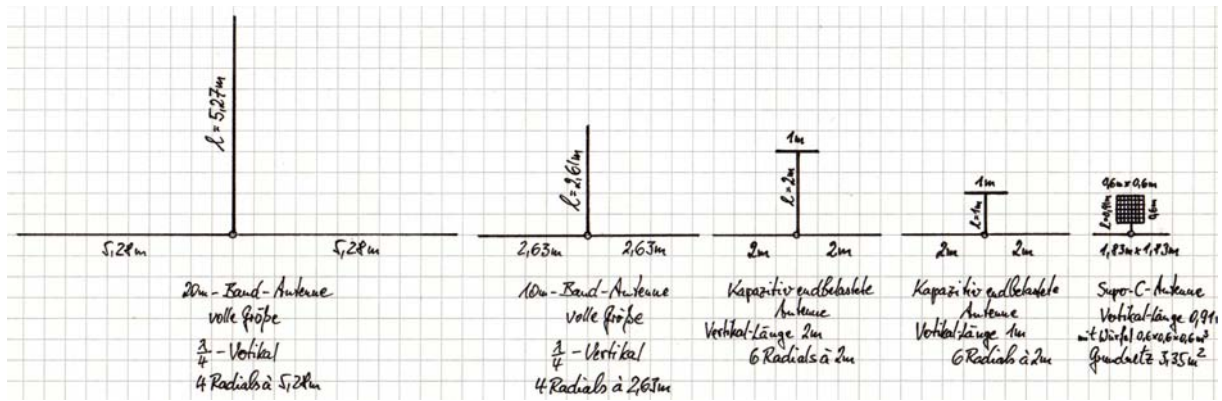


Abb. 9 Maßstäbliche Skizzen der Geometrie der fünf miteinander verglichenen Vertikalantennen.

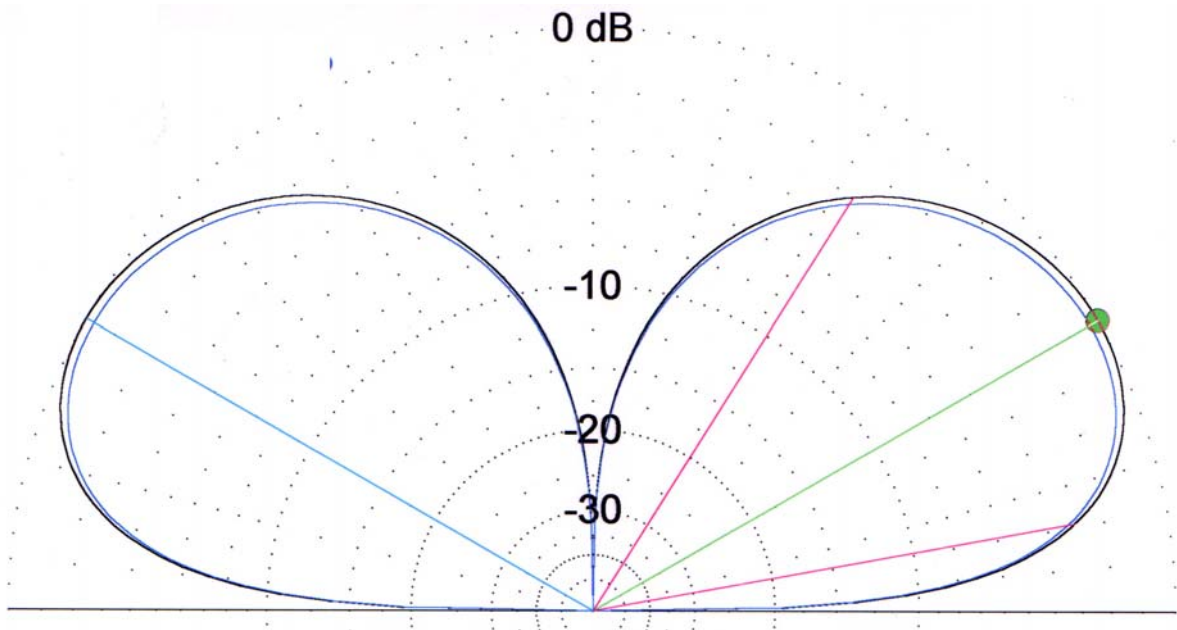


Abb.10 Strahlungsdiagramme der kapazitiv belasteten 1m langen Vertikalantenne und der Super-C-Antenne. Aufbauhöhe $h=0,05$ m über Normalboden. Betriebsfrequenz 28,5 MHz. Der Gewinn des Vertikalstrahlers mit Hut beträgt -1,12 dBi unter dem Winkel 30°. Super-C-Antenne: -1,38 dBi bei 30°.

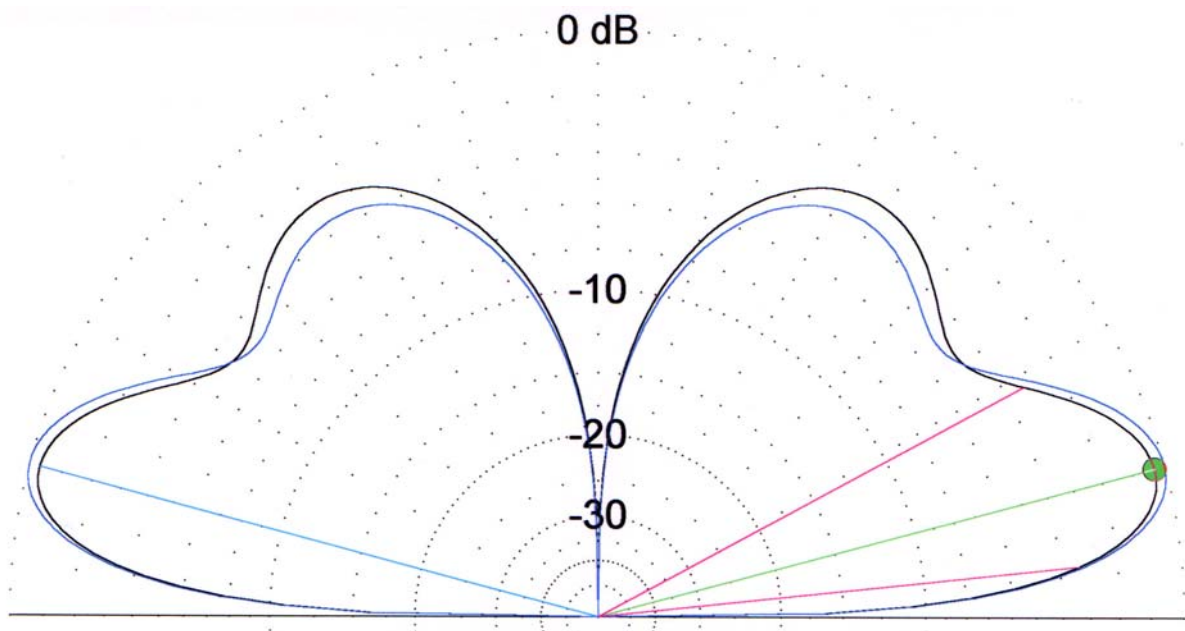


Abb.11 Strahlungsdiagramme der kapazitiv belasteten 1m langen Vertikalantenne und der Super-C-Antenne. Aufbauhöhe $h=0,05$ m über Normalboden. Betriebsfrequenz 28,5 MHz. Der Gewinn des Vertikalstrahlers mit Hut beträgt 0,77 dBi unter dem Winkel 15° . Super-C-Antenne: 1,07 dBi bei 15° .

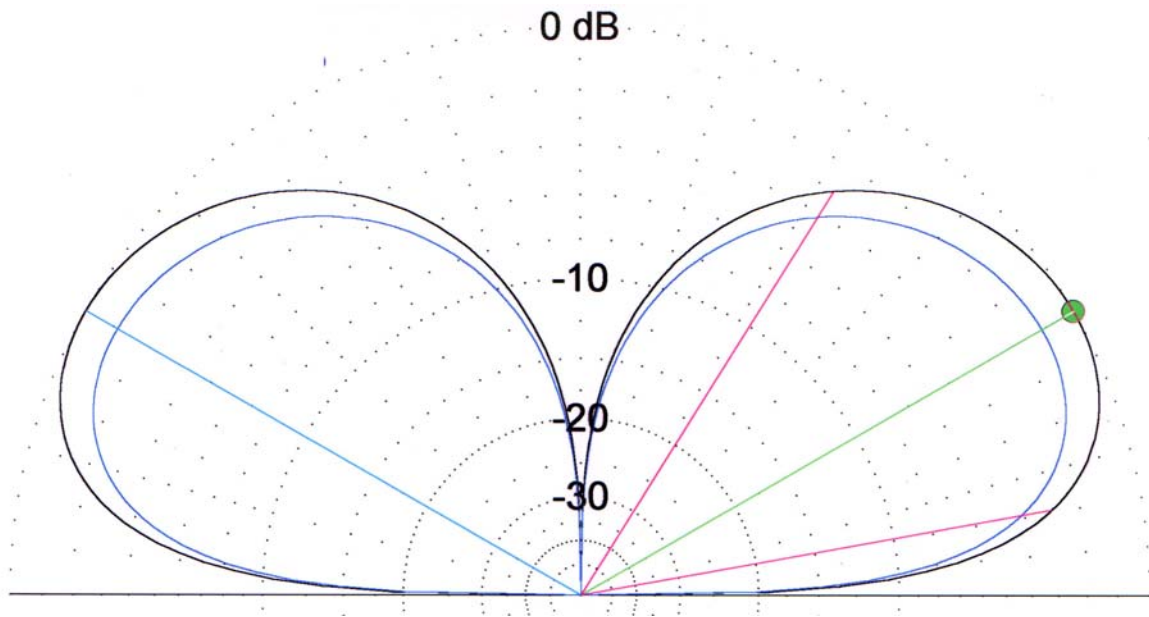


Abb.12 Strahlungsdiagramme der kapazitiv belasteten 1m langen Vertikalantenne und der Super-C-Antenne. Aufbauhöhe $h=0,05$ m über Normalboden. Betriebsfrequenz 14,2 MHz. Der Gewinn des Vertikalstrahlers mit Hut beträgt -4,3 dBi unter dem Winkel 30° . Super-C-Antenne: -5,44 dBi bei 30° .

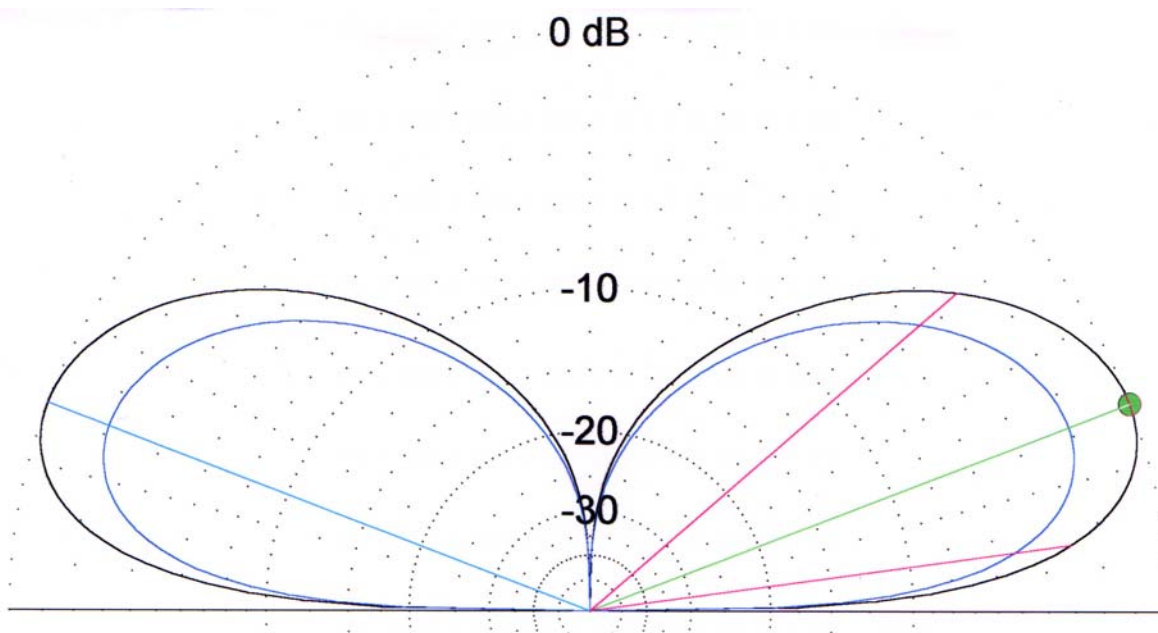


Abb.13 Strahlungsdiagramme der kapazitiv belasteten 1m langen Vertikalantenne und der Super-C-Antenne. Aufbauhöhe $h=4$ m über Normalboden. Betriebsfrequenz 14,2 MHz. Der Gewinn des Vertikalstrahlers mit Hut beträgt -2,33 dBi unter dem Winkel 20° . Super-C-Antenne: -4,4 dBi bei 21° .