

Anlage 8A

**Verfahren zur Kombination der horizontalen und vertikalen Antennendiagramme
im mobilen Funkdienst**

1 Die Berechnung des 3-D-Antennenstrahlungsdiagramms

Im Folgenden wird beschrieben, wie das 3-D-Antennenstrahlungsdiagramm auf der Grundlage der folgenden Eingabewerte für die Tx- und Rx-Antennen zu berechnen ist:

- die Teilcodes der horizontalen und der vertikalen Antenne, 9XH bzw. 9XV,
- Azimut und Erhebungswinkel der Hauptstrahlrichtung, 9A bzw. 9B,
- Azimut und die Erhebungswinkel der Richtung, für die der Dämpfungswert des 3-D-Strahlungsdiagramms zu berechnen ist.

Das Berechnungsverfahren kann für Antennen mit entweder elektrischer oder mechanischer Neigung angewandt werden, wie in Absatz 1.1 bzw. 1.2 beschrieben. Es berücksichtigt die mechanische Elevation der gesamten Antennenanlage und bei elektrisch geneigten Antennen zusätzlich noch die konstante Antennenelevation in allen Azimuten. Dieses Verfahren bietet keine Lösung für Antennen mit sowohl mechanischer als auch elektrischer Neigung.

1.1 Berechnung für die elektrisch geneigte Antenne

Diese Berechnungsart ist hauptsächlich für horizontal quasi rundstrahlende Antennen mit elektrischer Neigung im vertikalen Diagramm, das heißt, eine in allen Azimuten konstante Elevationsneigung vorgesehen. Gerichtete sektorisierte Antennen mit minimierten Rückwärtskeulen, die auch elektrisch geneigt sein können, können ebenfalls mittels dieser Berechnungsart berechnet werden; sie können wahlweise aber auch mit Hilfe der Berechnungsart für mechanisch geneigte Antennen berechnet werden, ohne dass es zu einem signifikanten Fehler kommt.

Das Berechnungsverfahren für das 3-D-Strahlungsdiagramm für geneigte Antennen beruht auf der Einführung eines neuen Antennencodes des Typs „TA“, wobei die Form des Diagramms derjenigen des bereits bestehenden Diagramms des Typs „EA“ ähnlich ist. Wenn der Antennencode TA für das vertikale Diagramm 9XV verwendet wird, so bedeutet dies, dass das resultierende 3-D-Antennenstrahlungsdiagramm elektrisch geneigt ist. Der neue Antennencode TA kann natürlich auch für den Code 9XH (horizontale Antenne) verwendet werden, weil die Form dieses Antennendiagramms realistischer ist als das ähnliche elliptische Diagramm des Typs EA.

Diese Berechnungsart setzt voraus, dass das Teildiagramm 9XH für horizontale Antennen in jedem Azimut durch die Hauptkeule des geneigten vertikalen Antennendiagramms 9XV geformt wird. Die sich daraus ergebende 3-D-Antennendämpfung wird nach folgender Formel berechnet:

$$A_{\text{res}} = A_{\text{hor}} + A_{\text{vert}} [\text{dB}] \quad \text{wobei: } A_{\text{hor}} = \text{Dämpfung}(\text{ant_dia_9XH}, \text{azi} - \text{aziMax_9A}), \\ A_{\text{vert}} = \text{Dämpfung}(\text{ant_dia_9XV}, \text{ele} - \text{eleMax_9B}).$$

Das sich daraus ergebende 3-D-Strahlungsdiagramm enthält eine Diskontinuität an beiden Polen der sphärischen Koordinaten, das heißt, bei Elevationen von $\pm 90^\circ$. Dieser Nachteil beeinträchtigt die Berechnungsergebnisse nicht wesentlich. Der in der Praxis vorkommende Bereich der elektrisch erzeugten Neigung im Vertikaldiagramm übersteigt nicht oft die Werte von $\pm 20^\circ$ und der Bereich des Erhebungswinkels übersteigt selten die Werte von $\pm 45^\circ$; Grund dafür ist der Ausbreitungsweg, innerhalb dessen die 3-D-Antennendämpfung zu berechnen ist.

1.2 Berechnung für die mechanisch geneigte Antenne

Diese Berechnungsart ist hauptsächlich für Richtantennen, die an ihrem Standort mechanisch geneigt werden, vorgesehen, zum Beispiel für eine geneigte Yagi-Antenne. Die Berechnung des Dämpfungswerts erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die sphärischen Koordinaten transformiert, um die anschließende Rechnung zu vereinfachen. Im zweiten Schritt wird die Antennendämpfung für eine Antenne in ihrer „Grund“-Position berechnet. Das Berechnungsverfahren, mit dem das horizontale und das vertikale Input-Strahlungsdiagramm kombiniert werden, kann auch angewandt werden, wenn diese Teilstrahlungsdiagramme mathematisch nicht kompatibel sind, d.h. bei ungleichen Werten für die Rückwärts-Dämpfung.

1.2.1 Transformation sphärischer Koordinaten

Abbildung 1 zeigt die Position der Antenne an ihrem Standort.

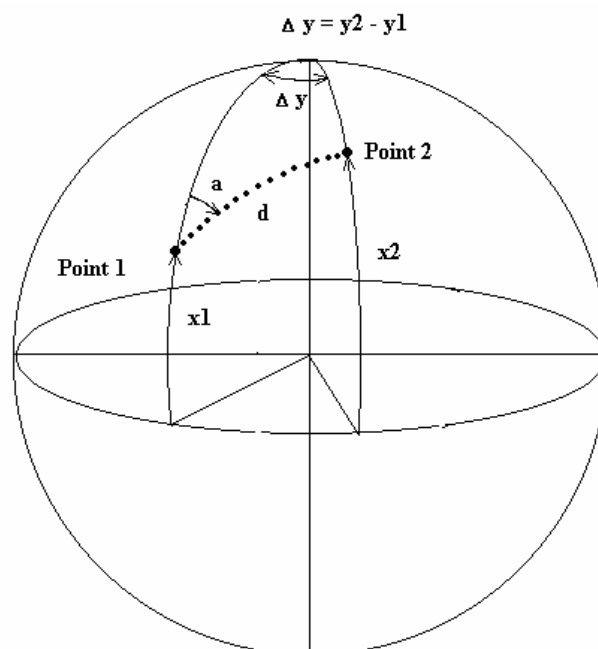


Abb.1.

Punkt 1 ist die Hauptstrahlrichtung der Antenne und Punkt 2 die Richtung, in der die Strahlungsdämpfung errechnet werden muss. Punkt 1 $[x1, y1]$ beschreibt die Ausrichtung der Antenne an ihrem Standort. Diese Ausrichtung wird durch den geografischen Azimut $y1$ und die Elevation $x1$ der Hauptstrahlrichtung (der Bezugsrichtung jeder Antenne) beschrieben, d.h. mittels der Parameter 9A und 9B. Für die Beschreibung der Strahlungseigenschaften der Antenne wird ein verändertes sphärisches Koordinatensystem ähnlich den geografischen Koordinaten der Erdkugel (Azimut y = Länge, Elevation x = Breite) verwendet.

Die komplizierte Geometrie der Antennenposition in Abb. 1 kann vereinfacht werden, wenn der Winkelabstand d und der entsprechende Azimut a von Punkt 2 in Bezug auf die Position von Punkt 1 bestimmt wird. Dies geschieht durch eine Drehung des sphärischen Koordinatensystems, mit dem Ergebnis, dass sich die Antenne in ihrer „Grund“-Position befindet. Die Strahlungseigenschaften der Antenne werden dann nur mittels der folgenden beiden Koordinaten beschrieben: des horizontalen Differenzwinkels hda und des vertikalen Differenzwinkels vda - statt der vier früheren, auf Eingabedaten beruhenden.

den Winkel. Die Neuberechnung für die Transformation kann einfach durch Kosinus- und Sinussätze erfolgen, die für das Euler'sche Kugeldreieck gelten und aus grundlegenden geodätischen Aufgaben allgemein bekannt sind. Für diese Sätze wird die in Abb.1 dargestellte Schreibweise benutzt und sie lauten wie folgt:

Transformation von Punkt 1, Punkt 2 in Entfernung d , Azimut a :

$$\cos d = \sin x_1 * \sin x_2 + \cos x_1 * \cos x_2 * \cos \Delta y \quad [1],$$

$$\sin a = (\cos x_1 * \cos \Delta y) / \sin d \quad [2].$$

Transformation von Punkt 1, Entfernung d , Azimut a in Punkt 2:

$$\sin x_2 = \sin x_1 * \cos d + \cos x_1 * \sin d * \cos a \quad [3],$$

$$\sin \Delta y = (\sin d * \sin a) / \cos x_2 \quad [4].$$

Als erster Schritt der Transformation wird anhand der Formel [1] der Winkelabstand d zwischen Punkt 1 und Punkt 2 errechnet (unter Verwendung der Inputparameter x_1, y_1, x_2, y_2); dann wird nach der folgenden umgestellten Formel [3] der Azimutwinkel a von Punkt 1 zu Punkt 2 errechnet:

$$\cos a = (\sin x_2 - \sin x_1 * \cos d) / (\cos x_1 * \text{SQR}(1 - \cos^2 d)), \quad \text{wobei SQR Quadrat wurzelfunktion bedeutet.}$$

Die notwendigen Werte von d und a können mit einer PC-Implementierung anhand der folgenden Formel errechnet werden:

$$\arccos(x) = 90 - \arctg(x / (1 - x^2)) \dots\dots [\text{deg}], \dots\dots \text{ABS}(x) < 1.$$

In einer PC-Implementierung ist es notwendig, die Singularität für $\Delta y = 0, 180$ Grad zu bearbeiten.

Im zweiten Schritt der Transformation werden anhand der zuvor errechneten Parameter d und a Werte der neuen Koordinaten hda und vda errechnet. Die Antenne wird nun in ihre „Grund“-Position gedreht, in der die Koordinate $x_1 = 0$ und die Koordinate $y_1 = 0$. Dadurch vereinfacht sich die Formel [3] wie folgt:

$$\sin vda = \sin d * \cos a.$$

Die zweite transformierte Koordinate hda wird anhand der unveränderten Formel [4] errechnet, d.h. nach der umgeschriebenen Formel:

$$\sin hda = \sin d * \sin a / \cos vda.$$

Die arcsin-Funktion in den letzten beiden Formeln kann in der PC-Implementierung mit folgender Formel errechnet werden:

$$\arcsin(x) = \arctg(x / (1 - x^2)) \quad \text{ABS}(x) < 1.$$

Bei einer PC-Implementierung des zweiten Transformationsschritts muss die Singularität wie oben beschrieben bearbeitet werden.

1.2.2 Kombination des horizontalen und des vertikalen Teilstrahlungsdiagramms zur Erzielung des 3-D-Strahlungsdiagramms

In diesem Teil der Berechnung wird die resultierende Dämpfung des 3-D-Strahlungsdiagramms für die folgenden Inputparameter evaluiert: *hCode*, *vCode*, *hda*, *vda* (wobei es sich bei den ersten beiden Parametern um in Anlage 6 beschriebenen Teile des Antennencodes und bei den letzten beiden Parametern um neue sphärische Koordinaten des unter 1.2.1 beschriebenen 3-D-Strahlungsdiagramms handelt), d.h. für die Richtung, in der die Antennendämpfung errechnet werden muss.

Das resultierende 3-D-Antennenstrahlungsdiagramm ist durch beiden horizontalen und vertikalen Grundebenen mittels *hCode* und *vCode* vollständig definiert. Die Dämpfung in der anderen Richtung kann entweder durch eine einfache oder durch eine anspruchsvolle Näherung evaluiert werden. *hCode* und *vCode* stellen zwei senkrechte Querschnitte des resultierenden 3-D-Strahlungsdiagramms dar; deshalb müssen die Dämpfungswerte für ihre Rückwärtskeule gleich sein, wie in Abb. 2 dargestellt ist.

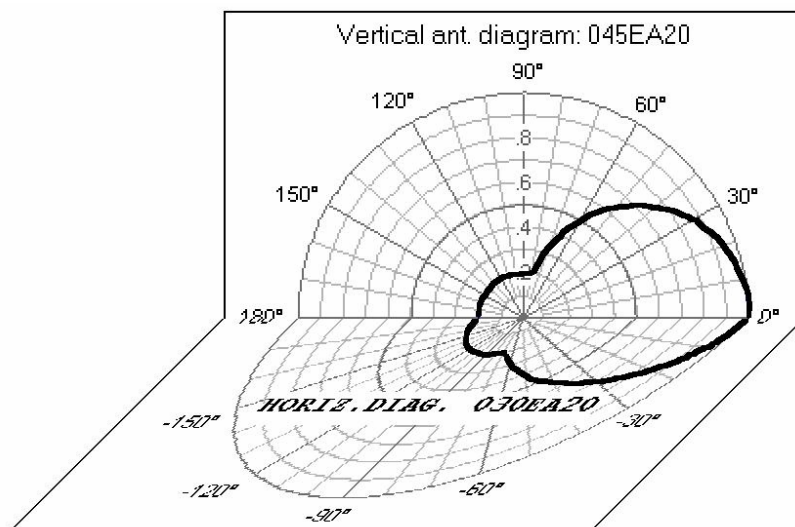


Abb.2.

In der Realität enthalten manche Koordinierungsanfragen Antennencodes, die mathematisch nicht miteinander kompatibel sind; dies wird in Abb. 3 dargestellt.

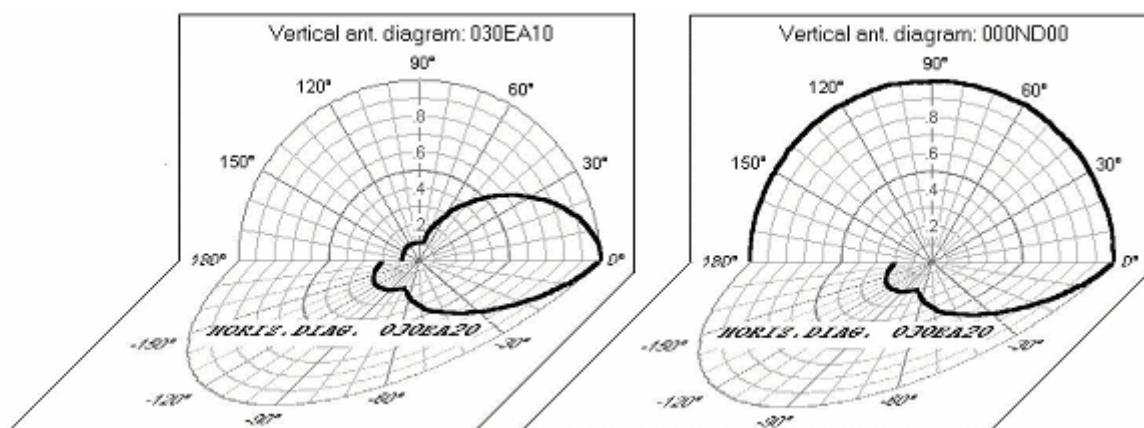


Abb.3.

Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass derjenige, der eine Koordinierungsanfrage stellt, zum Ausdruck bringen will, dass er bezüglich eines gerichteten horizontalen Antennencodes keine Einschränkungen aufgrund des vertikalen Antennencodes

000ND00 fordern möchte. Diese Interpretation ist aus mathematischer Sicht jedoch Unsinn, weil sie zu der Mehrdeutigkeit und Diskontinuität des 3-D-Strahlungsdiagramms führt, wie Abb. 3 zeigt.

Bei der Kombination der Antennenteildiagramme ist deshalb als erstes zu prüfen, ob die Diagramme zueinander kompatibel sind. Wenn sie nicht kompatibel sind, wird das vertikale Antennendiagramm an das horizontale angepasst. Die Anpassung der beiden Antennendiagramme erfolgt durch die folgende Glättungsfunktion:

$$A_{VD_back} = A_{VD_back_O} * \text{SQR}(\sin^2 vda + rb * \cos^2 vda) \dots\dots [5] ,$$

wobei: A_{VD_back} = die Dämpfung der angepassten Rückwärtskeule der Vertikalantenne,

$A_{VD_back_O}$ = die Dämpfung der ursprünglichen (unveränderten) Rückwärtskeule der Vertikalantenne,

rb = das Rückwärtsdämpfungsverhältnis der ursprünglichen vertikalen und horizontalen Antennendiagramme im Winkel $vda = \pm 180$ Grad .

Die Glättungsfunktion wirkt sich auf die Rückwärtskeule des vertikalen Antennendiagramms nur dort aus, wo das Diagramm neu geformt wird; die Keule in Hauptstrahlrichtung bleibt unverändert.

Das Ergebnis des Anpassungsprozesses wird in dem Beispiel in Abb.4 dargestellt.

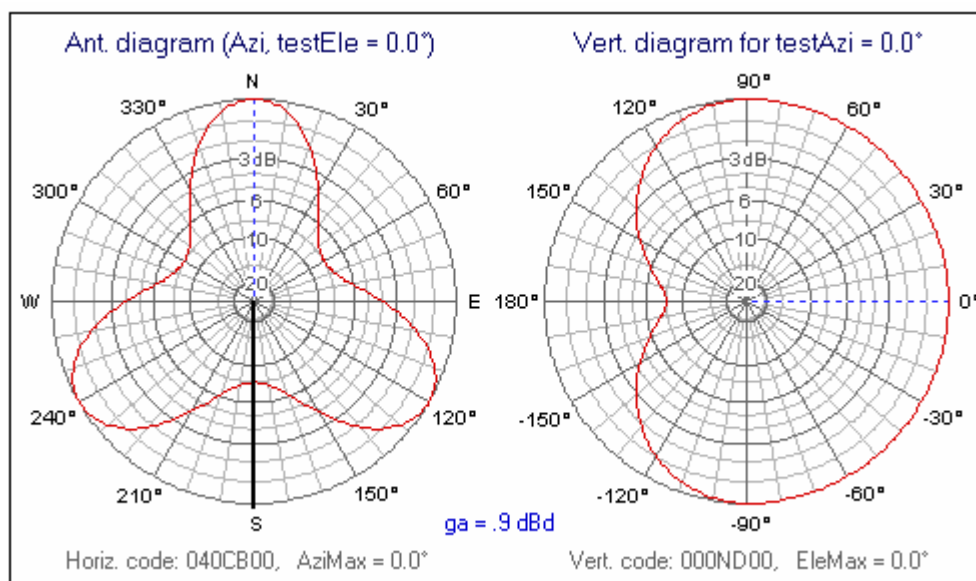
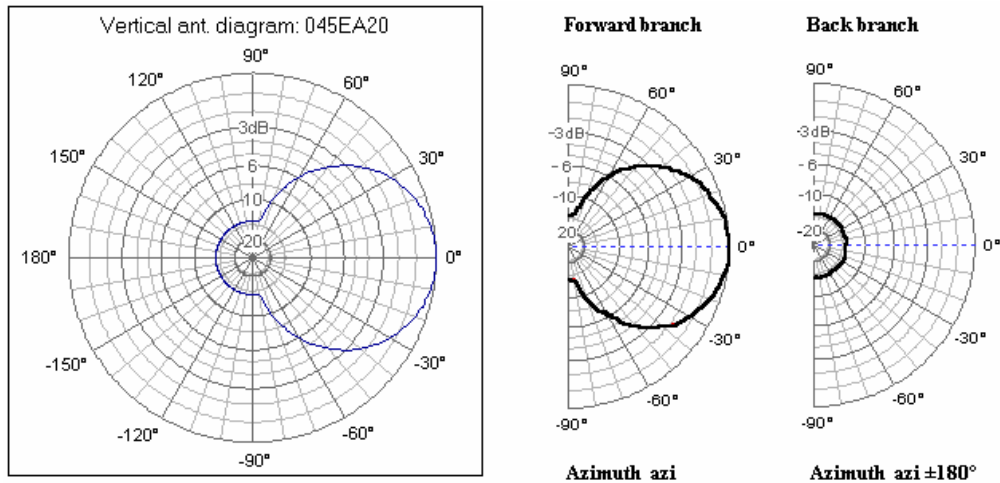


Abb.4.

Die Rückwärtskeule des vertikalen Antennendiagramms mit dem vda -Winkelbereich von $+90$ bis ± 180 Grad und von -90 bis ± 180 Grad wurde der vorhandenen Rückdämpfung des horizontalen Diagramms für $hda = 180$ Grad stetig angepasst. Die Keule in Hauptstrahlrichtung des vertikalen Antennendiagramms war weiterhin rundstrahlend, d.h. sie blieb unverändert.

Im zweiten Schritt der Kombination der Antennenteildiagramme wird das resultierende vertikale Antennendiagramm über verschiedene Azimutwinkel hda interpoliert. Das vertikale Antennendiagramm besteht aus der Keule in Hauptstrahlrichtung und der Rückwärtskeule. Die Keule in Hauptstrahlrichtung und die Rückwärtskeule des vertikalen Antennendiagramms werden schließlich angeglichen.


Abb.5.

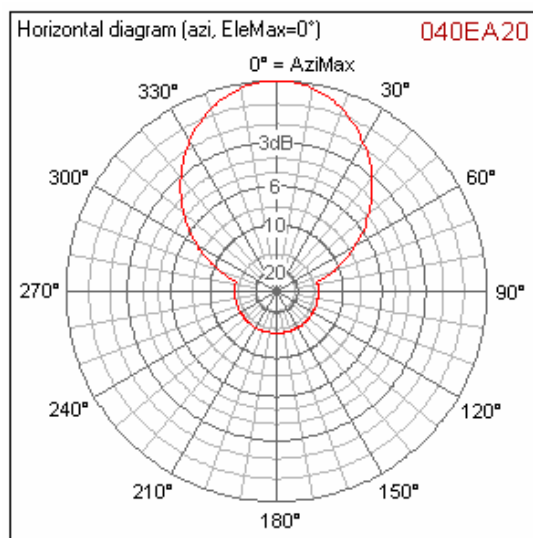
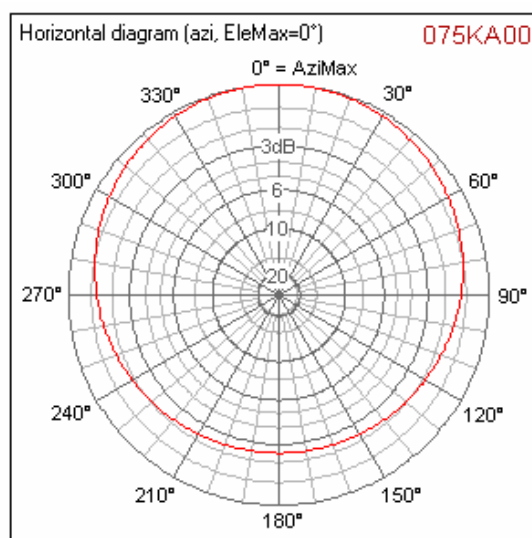
Es werden zwei unterschiedliche Interpolationsarten verwendet: die proportionale und die lineare Interpolation. Welche Interpolationsart geeignet ist, hängt von der Form des horizontalen Antennendiagramms ab.

Die proportionale Interpolation der Ausgangsdiagramme der Vertikalantennen wird für ein gerichtetes horizontales Antennendiagramm mit einer oder mehreren Keulen verwendet. Der Interpolationsgewichtungskoeffizient w wird anhand der Dämpfung des horizontalen Antennendiagramms im genannten Winkel von hda ermittelt und wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$w = (1 - h) / (1 - hb) .$$

Hierbei ist: h die Dämpfung des horizontalen Antennendiagramms im Azimut hda ,
 hb die Dämpfung des horizontalen Antennendiagramms in rückwärtiger Richtung ($hda = 180$ Grad) .

Mit der proportionalen Interpolation wird gewährleistet – wie zum Beispiel in Abb. 4 zu sehen ist –, dass die vertikalen Antennendiagramme in den hda -Symmetrieachsen der horizontalen Antennendiagramme 0, 120, 240 Grad identisch sind. Der Fall eines horizontalen Richtdiagramms mit einer Keule ist in Abb. 6 dargestellt.


Abb.6.

Abb.7.

Im Fall der Abb. 6 garantiert die proportionale Interpolation, dass die Rückwärtskeulen aller vertikalen Antennendiagramme im *hda*-Azimutbereich von 80 bis 280 Grad identisch sind, weil dort eine konstante Dämpfung des horizontalen Antennendiagramms gegeben ist.

Die lineare Interpolation wird nur für horizontale Antennendiagramme mit geringer Richtwirkung verwendet. Abb. 7 zeigt ein Beispiel für ein typisches horizontales Antennendiagramm mit geringer Richtwirkung. Der Gewichtungskoeffizient w für die Interpolation wird mittels *hda* innerhalb des Winkelintervalls zwischen den Azimutwinkeln von der Keule in Hauptstrahlrichtung und der Rückwärtskeule bestimmt und in folgender Formel ausgedrückt:

$$w = \text{ABS}(hda / 180) .$$

Im dritten Schritt der Kombination von Antennenteildiagrammen wird abschließend geprüft, ob das interpolierte vertikale Antennendiagramm und die horizontale Antenne im bewerteten Azimut *hda* insgesamt kompatibel sind. Der Grund für diese letzte Prüfung ist in Abb.8 dargestellt. Wenn die zuvor analysierten Antennendiagramme nicht in einem Azimut miteinander kompatibel sind, muss das vertikale Antennendiagramm an das horizontale angepasst werden.

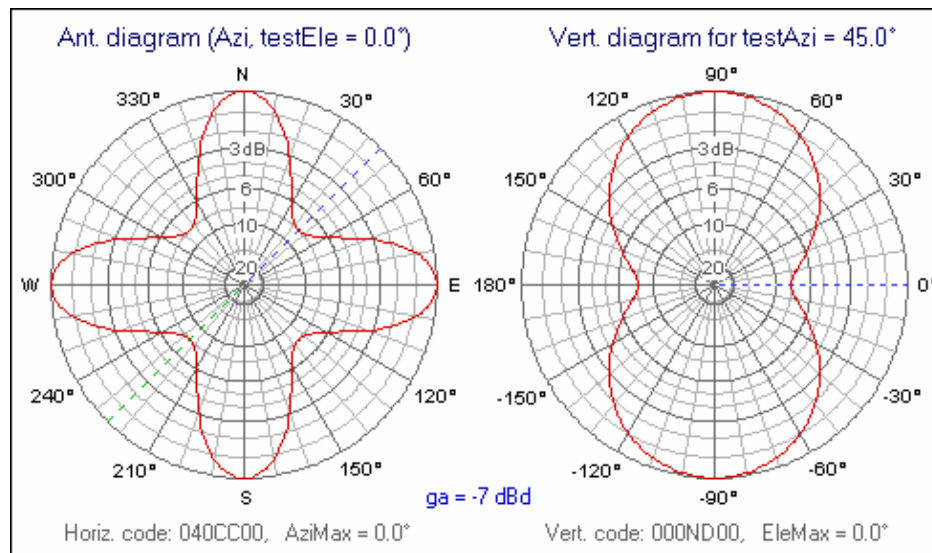


Abb.8.

Das Beispiel in Abb.8 zeigt den Fall, in dem beide Antennenteildiagramme kompatibel und beide Keulen des ursprünglichen Vertikaldiagramms identisch, d.h. rundstrahlend, sind. Das vorher berechnete, vertikale Rundstrahlungsdiagramm muss deshalb bei Azimuten, bei denen die Dämpfung der Teildiagramme unterschiedlich ist, z.B. beim Azimut *hda* = 45 Grad, auf die Form des horizontalen Antennendiagramms abgestimmt werden.

Die Anpassung der beiden Antennenteildiagramme erfolgt durch eine Glättungsfunktion in Anlehnung an [5].