

Das Doppel-Kegelhorn, eine Antenne für zwei Frequenzbereiche

The Double Conical Horn as a Dual Frequency Antenna

Von Roland Dill und Klaus Kark

*Mitteilung aus der Zentralen Forschung und Entwicklung
und aus dem Unternehmensbereich Sicherheitstechnik der SIEMENS AG*

Übersicht:

Ein Doppel-Kegelhorn, das aus zwei koaxial geschachtelten Kegelhörnern zusammengesetzt ist, wird mit Hilfe der Methode der Orthogonalentwicklung analysiert. Es kann so dimensioniert werden, daß es bei zwei verschiedenen Frequenzen nahezu identische Richtdiagramme besitzt. Das Doppel-Kegelhorn kann deshalb als Erreger für Reflektorantennen verwendet werden, um die Übertragungskapazität des Antennensystems zu verdoppeln. Ein Verfahren zur Bestimmung seiner geometrischen Abmessungen wird angegeben.

Abstract:

A double conical horn which consists of two coaxially arranged conical horns is analyzed by means of a mode-matching procedure. It can be dimensioned, to produce nearly identical radiation characteristics at two different frequencies. Therefore the double conical horn can serve as a feed of reflector antennas in order to double the transmission capacity of the antenna system. A design procedure for this feed is given.

Für die Dokumentation:

Doppel-Kegelhorn / zwei Frequenzbereiche / Reflektorantenne / Analyse / Dimensionierung

1. Einleitung

Bei Reflektorantennen verursachen nicht nur die Herstellung, sondern häufig auch die Installation und der Betrieb hohe Kosten. Um die Übertragungskapazität dieser Antennensysteme zu erhöhen und um sie somit so kostengünstig wie möglich zu nutzen, werden sie oft für das Senden und den Empfang von orthogonal zueinander polarisierten elektromagnetischen Wellen dimensioniert. Als kreuzpolarisationsarme Erreger werden Rillenhörner und auch Zweimoden-Hörner verwendet, die in [1] und [2] ausführlich analysiert werden. Seltener wird bisher die Übertragungskapazität eines Antennensystems er-

höht, indem man es bei zwei Frequenzen betreibt. In [3] und [4] wird die Kapazitätserhöhung bei Cassegrain- und Offset-Reflektor-Antennen durch den Einsatz eines frequenzselektiven Subreflektors erreicht (FSS: frequency selective surface). Dieser Subreflektor zeichnet sich dadurch aus, daß er in einem Frequenzbereich gute Transmissionseigenschaften, im anderen Frequenzbereich gute Reflexionseigenschaften besitzt. Nachteilig bei diesen Antennensystemen ist, daß immer noch zwei Erreger mit ähnlichen Strahlungseigenschaften benötigt werden und diese Erreger sowie der Subreflektor sehr genau positioniert werden müssen. Technisch sehr interessant ist es daher, ein Antennensystem mit nur einem Erreger bei

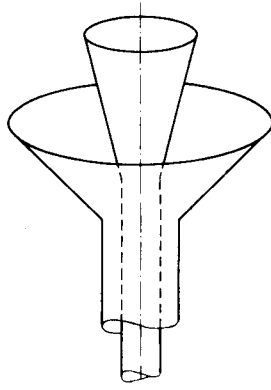


Bild 1: Doppel-Kegelhorn

zwei Frequenzen zu betreiben. Bisher stehen jedoch nur wenige Erreger zur Verfügung [5], die bei beiden Frequenzen gleiche Richtdiagramme besitzen, welche für die optimale Ausleuchtung eines Parabolreflektors meist auch noch rotationssymmetrisch sein müssen.

Das Doppel-Kegelhorn, das aus zwei koaxial geschichteten Kegelhörnern zusammengesetzt ist und in Bild 1 dargestellt ist, kann als Erreger für zwei verschiedene Frequenzen verwendet werden. Man kann es so dimensionieren, daß das innere Horn für den Empfang und das Senden des höheren Frequenzbereiches und das äußere Horn für den niedrigeren Frequenzbereich geeignet sind. Zum ersten Mal werden in dieser Arbeit die Strahlungseigenschaften des Doppel-Kegelhorns mit Hilfe einer exakten Methode berechnet und darauf aufbauend Hinweise für seine Dimensionierung gegeben.

2. Analyse des Doppel-Kegelhorns

Die Antenneneigenschaften des einfachen Kegelhorns sind schon häufig und mit unterschiedlichen Methoden analysiert worden, z. B. [2, 6, 7]. Bei der Berechnung der Richtdiagramme erhält man auch mit Näherungsmethoden, wie der Aperturfeldmethode [8], hinreichend genaue Ergebnisse. Diese Näherungsmethoden sind jedoch für die Analyse des Doppel-Kegelhorns nicht geeignet, da durch die koaxiale Anordnung die ursprünglichen Eigen-

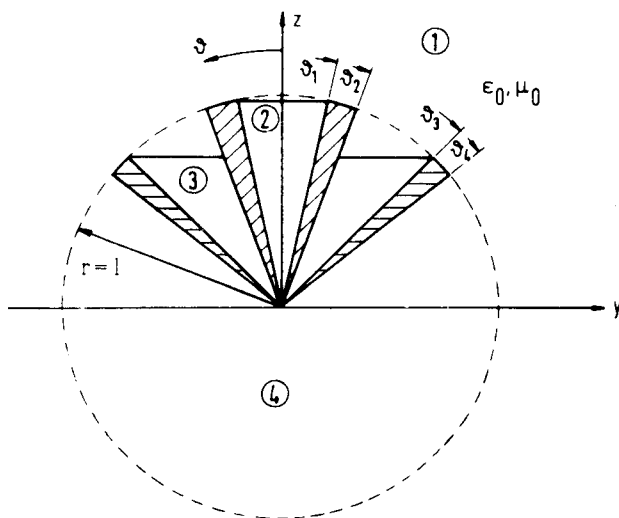


Bild 2: Modell zur Analyse des Doppel-Kegelhorns. Die endliche Wandstärke der beiden Kegelhörner wird berücksichtigt. ϑ_1 und ϑ_3 sind die inneren, ϑ_2 und ϑ_4 die äußeren Hornöffnungswinkel

schaften der beiden Hörner sich stark ändern können. Die gegenseitige Beeinflussung der zwei Hörner ist von deren Dimensionierungen abhängig und kann nur mit Hilfe einer exakten Analyse der Gesamtanordnung berechnet werden. Für diesen Zweck ist die Methode der Orthogonalentwicklung sehr gut geeignet; ein Antennenmodell des Doppel-Kegelhorns ist in Bild 2 dargestellt. In diesem Modell besitzen die beiden Kegelhörner die gleiche geometrische Länge l , weil durch diese Dimensionierungsvorgabe die feldtheoretische Analyse erheblich vereinfacht wird, die möglichen Strahlungseigenschaften des Doppel-Kegelhorns jedoch nicht wesentlich eingeschränkt werden.

Für die feldtheoretische Analyse wird das Antennenmodell in vier Raumbereiche unterteilt, deren geometrische Abmessungen in Kugelkoordinaten beschrieben werden können. Es wird angenommen, daß im Ursprung des Kugelkoordinatensystems eine Quelle und eine Senke jeweils punktförmig angeordnet sind. Die Quelle kann in die Raumteile 2 und 3 die für die technische Anwendung interessante H_{11} -Welle einspeisen; die Senke koppelt nur diese Welle wieder aus. Diese Annahmen idealisieren die Funktionen von Anschlußleitungen. In jedem Raumteil können die H_{1i} - und E_{1i} -Eigenwellen, die an der Unstetigkeitsstelle bei $r=l$ angeregt werden, mit Hilfe eines elektrischen \vec{A}^H und eines magnetischen Vektorpotentials \vec{A}^E beschrieben werden. Beide Vektorpotentiale besitzen nur eine Komponente in Ausbreitungsrichtung r , und es gilt allgemein:

$$A_r^{H,E}(r, \vartheta, \varphi) = f_1(r) f_2(\vartheta) f_3(\varphi) e^{j\omega t} \quad (1)$$

mit

$$f_1(r) = A_i \hat{J}_{\nu_i}(kr) + B_i \hat{N}_{\nu_i}(kr)$$

$$f_2(\vartheta) = C_i P_{\nu_i}^1(\cos \vartheta) + D_i P_{\nu_i}^1(-\cos \vartheta)$$

$$f_3^H(\varphi) = E \cos(\varphi) - F \sin(\varphi)$$

$$f_3^E(\varphi) = E \sin(\varphi) + F \cos(\varphi)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 2\pi/\lambda_0.$$

$\hat{J}_{\nu_i}(kr)$ und $\hat{N}_{\nu_i}(kr)$ sind die Riccati-Bessel- bzw. Riccati-Neumann-Funktionen der Ordnung ν_i ; $P_{\nu_i}^1(\cos \vartheta)$ sind die zugeordneten Legendre-Funktionen 1. Art von ganzzahliger Ordnung 1 und vom Grad ν_i . A_i, B_i, C_i, D_i, E und F sind Konstanten. Aus den Vektorpotentialen können die Feldkomponenten der H_{1i} - und E_{1i} -Eigenwellen mit Hilfe der folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\vec{E} = \text{rot}(A_r^H \vec{e}_r) \quad \vec{H} = -1/(j\omega\mu_0) \text{rot rot}(A_r^H \vec{e}_r)$$

$$\vec{H} = \text{rot}(A_r^E \vec{e}_r) \quad \vec{E} = 1/(j\omega\epsilon_0) \text{rot rot}(A_r^E \vec{e}_r). \quad (2)$$

Für jede Eigenwelle sind die Konstanten E und F durch die φ -Abhängigkeit der anregenden H_{11} -Welle vorgegeben, und der Quotient D_i/C_i und der Eigenwert ν_i können aus den Randbedingungen in ϑ -Richtung berechnet werden (im Raumteil 4 gilt $C_i=0$, in den Raumteilen 1 und 2 gilt $D_i=0$ und im Raumteil 1 erhält man ganzzahlige $\nu_i=n$). Der Quotient B_i/A_i wird in den Raumteilen 2, 3 und 4 durch die Eigenschaften der Quelle und Senke und im Raumteil 1 durch die Ausstrahlungsbedingung bestimmt. Zur Erfüllung der Rand- und Stetigkeitsbedingungen an der Stelle $r=l$ werden die transversalen elektrischen und magnetischen Felder der vier Bereiche als Summe über die Felder der jeweiligen H_{1i} - und E_{1i} -Eigenwellen entwickelt; die Anregungskoeffizienten der Wellen sind zunächst noch unbekannt. Sie können jedoch mit Hilfe einer gegenläufigen Orthogonal-

entwicklung [9,10] bestimmt werden, wenn man die Amplitude der anregenden H_{11} -Welle vorgibt. Die gegenläufige Entwicklungsrichtung für die elektrische und magnetische Feldstärke ist durch die unterschiedlichen Randbedingungen für die elektrische und magnetische Feldstärke im Raumteil 1 bei $\vartheta_1 < \vartheta < \vartheta_2$ und $\vartheta_3 < \vartheta < \vartheta_4$ vorgegeben [2].

Mit Hilfe der Orthogonalentwicklung erhält man schließlich ein unendlich dimensionales lineares Gleichungssystem zur Berechnung der unbekanntenen Anregungskoeffizienten. Für die numerische Lösung wird das Gleichungssystem durch endlich viele Gleichungen approximiert; d.h. in jedem Raumteil werden nur endlich viele Eigenwellen angesetzt. Das Verhältnis der angesetzten Eigenwellen zueinander beeinflusst sehr stark die Konvergenzgeschwindigkeit bei der numerischen Auswertung, und nur die richtige Wahl garantiert auch die Konvergenz zur korrekten Lösung [11].

Hat man einmal die Orthogonalentwicklung durchgeführt und damit die Koeffizienten der Eigenwellen berechnet, kann man alle Antenneneigenschaften mit geringem Rechenzeitverbrauch bestimmen. Interessant ist vor allem, wie die Richtcharakteristiken der beiden Kegelhörner durch die koaxiale Schachtelung beeinflusst werden.

Die Analyse der Gesamtanordnung zeigt, daß das innere Horn im allgemeinen die Strahlungscharakteristik des äußeren Horns nur wenig beeinflusst. Dies liegt zum einen daran, daß wegen des kleinen Aperturdurchmessers des inneren Horns die elektromagnetischen Felder der H_{11} -Welle im äußeren Horn kaum gestört werden. Zum anderen transportieren die im inneren Horn durch Strahlungskopplung angeregten Wellen relativ wenig Energie, da wegen des kleinen Horndurchmessers ihre transversalen elektrischen und magnetischen Feldkomponenten eine Phasendifferenz bis zu 90° besitzen können [2].

Der Einfluß des äußeren Horns auf die Eigenschaften des inneren Horns soll an Hand der abgestrahlten Kreuzpolarisation [12] des inneren Horns untersucht werden, da diese Größe sehr empfindlich auf Änderungen der Antennengeometrie reagiert. In **Bild 3** ist die abgestrahlte Kreuzpolarisation x_σ des inneren Horns in Abhängigkeit vom Aperturöffnungswinkel ϑ_3 des äußeren Horns dargestellt; Kurvenparameter ist der normierte Aperturdurchmesser des inneren Horns $2a_i/\lambda_0 = 2l/\lambda_0 \sin \vartheta_1$. Es zeigt sich, daß das äußere Horn einen sehr großen Einfluß haben kann – um so mehr, je kleiner die Direktivität und der Aperturdurchmesser des inneren Horns sind. Das äußere Horn wirkt wie ein coaxialer Topf, in dem höhere Wellen mehr oder weniger stark angeregt werden können. Wegen des großen äußeren Horndurchmessers transportieren diese Wellen soviel Energie, daß ihr Beitrag zur Strahlungscharakteristik der Gesamtanordnung nicht vernachlässigt werden kann.

3. Dimensionierung von Doppel-Kegelhörnern

Bei der Dimensionierung eines Doppel-Kegelhorns für zwei Frequenzbereiche wird zunächst die gegenseitige Beeinflussung der beiden Kegelhörner vernachlässigt. Dann kann man die geometrischen Abmessungen des Doppel-Kegelhorns näherungsweise mit Hilfe der Direktivitätskurven des Kegelhorns bestimmen. In **Bild 4** sind diese Kurven in Abhängigkeit vom normierten Apertur-

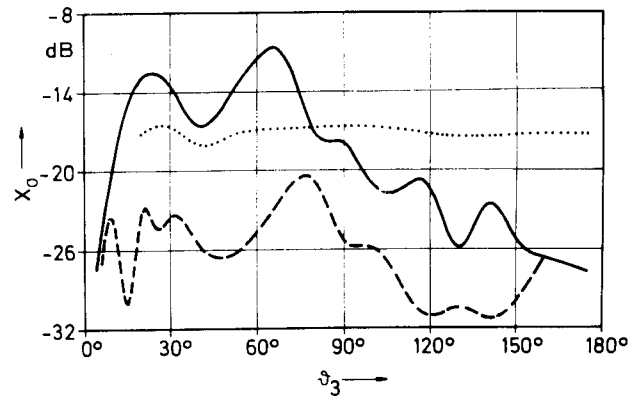


Bild 3: Abgestrahlte Kreuzpolarisation x_σ des inneren Horns als Funktion des Öffnungswinkels ϑ_3 des äußeren Horns
 ————— $2a_i/\lambda_0 = 0,725$ ($l/\lambda_0 = 5,2$, $\vartheta_1 = 4,0^\circ$)
 - - - - - $2a_i/\lambda_0 = 1,15$ ($l/\lambda_0 = 5,5$, $\vartheta_1 = 6,0^\circ$)
 $2a_i/\lambda_0 = 4,17$ ($l/\lambda_0 = 6,3$, $\vartheta_1 = 19,3^\circ$)

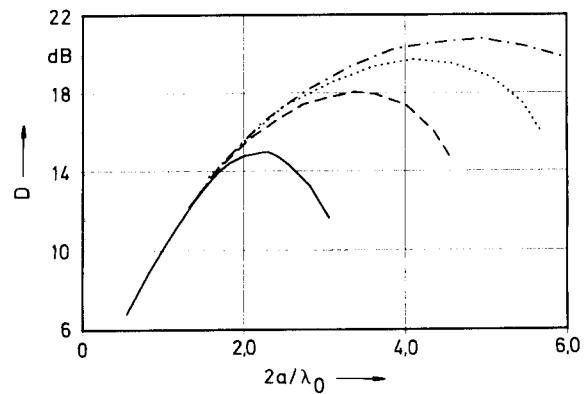


Bild 4: Direktivität D des Kegelhorns in Abhängigkeit vom normierten Aperturdurchmesser $2a/\lambda_0$
 ————— $l/\lambda_0 = 2,0$
 - - - - - $l/\lambda_0 = 4,0$
 $l/\lambda_0 = 6,0$
 - · - · - $l/\lambda_0 = 8,0$

durchmesser $2a/\lambda_0$ dargestellt; Kurvenparameter ist die normierte Hornlänge l/λ_0 . Für die Dimensionierung des Doppel-Kegelhorns ist es besonders interessant, daß für kleine normierte Aperturdurchmesser die normierte Länge des Kegelhorns kaum einen Einfluß auf die Direktivität besitzt und daß bei Zunahme des Aperturdurchmessers die Direktivität nach Erreichen eines Maximums wieder abnimmt. Deshalb kann man nach Vorgabe der Direktivität und der Betriebsfrequenzen die beiden Kegelhörner so dimensionieren, daß sie näherungsweise gleiche Richtdiagramme, jedoch unterschiedliche geometrische Abmessungen besitzen. Im folgenden Dimensionierungsschritt müssen dann mit Hilfe der exakten Analyse die Geometriedaten geringfügig variiert werden; so lange, bis die Eigenschaften des Doppel-Kegelhorns den gewünschten Anforderungen genügen.

Die Abmessungen eines Doppel-Kegelhorns mit einer Direktivität von 8 dB und für ein Frequenzverhältnis von $f_1/f_2 = 2,65$ wurden nach der beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Unter der Bedingung, daß beide Kegelhörner die gleiche geometrische Länge l besitzen, kann man die Vorgaben erfüllen, wenn die normierten Abmessungen des inneren und äußeren Kegelhorns $l/\lambda_1 = 4,1$, $2a_i/\lambda_1 = 0,66$ bzw. $l/\lambda_2 = 1,55$, $2a_a/\lambda_2 = 0,76$ betragen. In

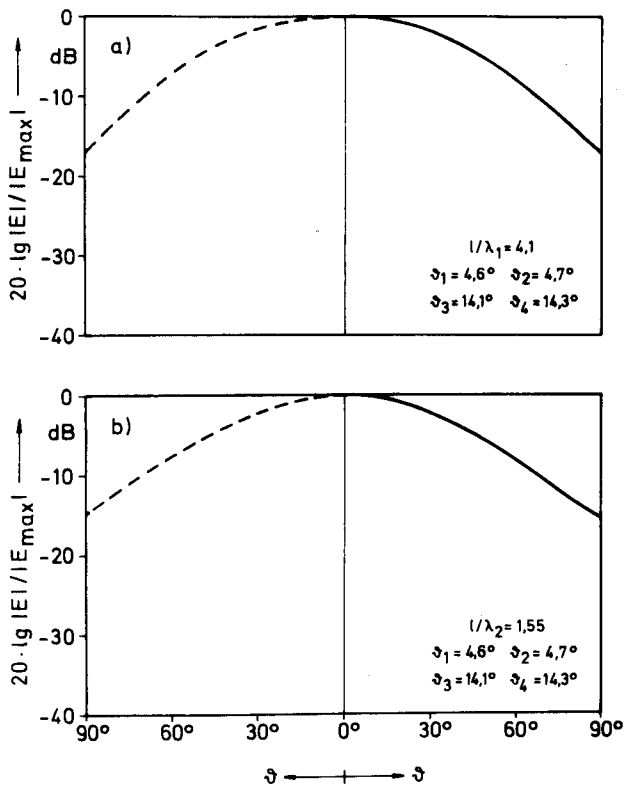


Bild 5: Fernfeldrichtdiagramme a) des inneren Kegelhorns und b) des äußeren Kegelhorns in der E -Ebene (—) und in der H -Ebene (---)

Bild 5a sind die Richtdiagramme in der E - und H -Ebene des inneren Horns, in Bild 5b die des äußeren Horns dargestellt. Man erkennt, daß das Doppel-Kegelhorn bei beiden Frequenzen nahezu gleiche Richtdiagramme besitzt, die außerdem auch rotationssymmetrisch sind.

4. Schlußbemerkung

Zwei koaxial geschachtelte Kegelhörner können so dimensioniert werden, daß die Anordnung nahezu identische Richtdiagramme bei zwei unterschiedlichen Fre-

quenzen besitzt. Eine Antenne mit diesen Eigenschaften kann als Erreger von Reflektorantennen verwendet werden, um die Übertragungskapazität dieser Antennensysteme zu erhöhen. Die dabei erreichbare Kreuzpolarisationsentkopplung liegt in der Größenordnung der eines Kegelhorns. Eine bessere Entkopplung kann man erreichen, indem man an Stelle der Kegelhörner zwei Rillenhörner koaxial schachtelt. Der Aufwand zur mathematischen Analyse und zum Design dieses Doppel-Rillenhorns wird aber erheblich größer als beim Doppel-Kegelhorn.

Technisch interessant ist auch die Möglichkeit, das Doppel-Kegelhorn als Sende/Empfangsweiche zu nutzen, um schon in der Antenne Sende- und Empfangssignal voneinander zu trennen. Dazu kann es auch so dimensioniert werden, daß das innere und äußere Horn bei einer Frequenz gleiche Strahlungseigenschaften besitzen.

Teile der Arbeit entstanden während der Tätigkeit der Autoren am Institut für Hochfrequenztechnik der TH Darmstadt. Die Verfasser danken Herrn Prof. Dr.-Ing. Anton Vlcek für die hilfreichen Diskussionen.

Literatur:

- [1] Clarricoats, P.J.B.; Olver, A.D.: Corrugated Horns for Microwave Antennas. London: Peter Peregrinus Ltd, 1984.
- [2] Dill, R.: Systematische Untersuchung der Eigenschaften von Kegelstrukturen als Mikrowellenantennen mit Hilfe der Orthogonalentwicklung. VDI Fortschrittberichte, Reihe 21, Nr. 19, 1987.
- [3] Agrawal, V.D.; Imbriale, W.A.: Design of a Dichroic Cassegrain Subreflector. Trans. IEEE AP-27 (1979) S. 466—473.
- [4] Derneryd, A.G.; Ingvarson, P.; Johansson, F.S.; Pettersson, L.E.; Schuley, N.V.: Design of a Dichroic Subreflector for an Offset Reflector Antenna. Intern. Symp. on Antennas, Nice, France, JINA-1986, S. 370—374.
- [5] Jenken, M.E.J.; Knoblen, M.H.M.; Wellington, K.J.: A Dual Frequency, Dual Polarized Feed for Radioastronomical Applications. Nachr. techn. Z. 25 (1972) S. 374—376.
- [6] Fasold, D.: Das Fernfeld von Kegelhornantennen bei Anregung durch E_{mn} - und H_{mn} -Wellen. Nachr. techn. Z. 30 (1977) S. 324—329.
- [7] Narasimhan, M.S.; Sheshadri, M.S.: GTD Analysis of the Radiation Patterns of Conical Horns. Trans. IEEE AP-26 (1978) S. 774—778.
- [8] Koch, G.: Die verschiedenen Ansätze des Kirchhoffschen Prinzips und ihre Anwendung auf die Beugungsprobleme bei elektromagnetischen Wellen. Arch. el. Übertr. 14 (1960) S. 77—98 und S. 132—153.
- [9] Piefke, G.: Feldtheorie III. Mannheim: Bibliographisches Institut, 1977.
- [10] Dill, R.: Rigorous Analysis of the Dual-mode Conical Horn. Proc. of 3rd Intern. IGTE-Symp. Graz, Österreich, 1988, S. 56—63.
- [11] Lee, W.S.; Jones, W.R.; Cambell, J.: Convergence of Numerical Solutions of Iritype Discontinuity Problems. Trans. IEEE MTT-19 (1971) S. 528—536.
- [12] Dill, R.: Optimierung der Kreuzpolarisationseigenschaften von Zweimoden-Hörnern, Frequenz 42 (1988) 1, S. 2—7.

Dr.-Ing. R. Dill, Grünwalderstraße 108, 8000 München 90

Dr.-Ing. K. Kark, Eschenstraße 62, 8044 Unterschleißheim

(Eingegangen am 5. März 1990)