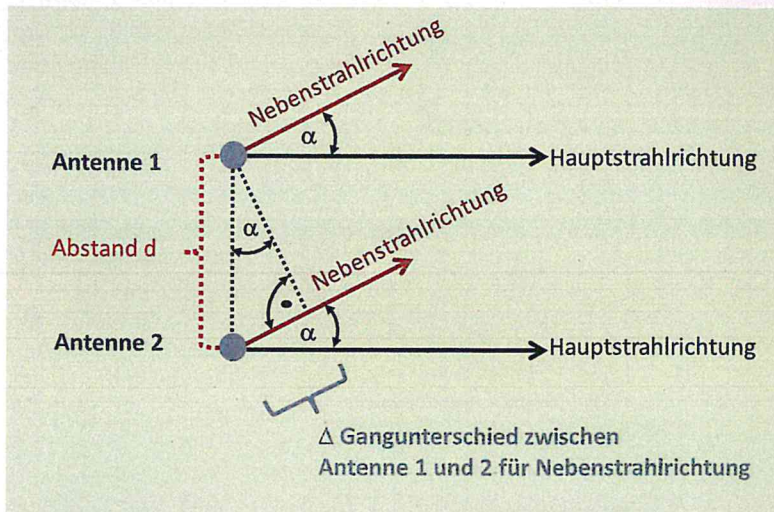


Leistungsstark, kostengünstig, superleicht und zerlegbar (2)

## Kleine Yagis richtig stocken

Prof. Dr. habil. Dirk W. Schubert, DK6DW

Yagi-Antennen für das 70-cm-Band sind leicht und handlich. Nach der Vorstellung einfacher Selbstbauvorschläge in Teil 1 geht es hier um das Stocken solcher Yagis.



**W**ie funktionieren also Stockung und Gewinnsteigerung, wenn Yagi-Antennen zum Einsatz kommen?

### Ein paar Worte zum Stocken

Funkwellen interferieren, zum Beispiel überlagern sich positive Beiträge mit negativen, was insgesamt eine Auslöschung bedeuten würde. Das nutzt man einfach aus. Betrachtet man die Intensitätsverteilung der 10-Element-Yagi-Antenne in **Bild 10** zum Beispiel in der X-Z-Ebene (Elevation), so fallen zwei deutliche Nebenmaxima („Keulen“) unter  $45^\circ$  (jeweils nach oben und unten) auf, deutlich gemacht durch die blauen Pfeile. Ordnet man nun zwei solche Antennen übereinander an, so kann der Abstand gezielt so gewählt werden, dass sich die beiden Nebenmaxima auslöschen. Die Aufmacher-Abbildung zeigt das Schema der Antennenstockung und der Geometrie zur Bestimmung des Gangunterschieds. Hier sieht man direkt, dass für das rechtwinklige Dreieck gilt:

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta}{d} \quad (1)$$

Damit es zur Auslöschung in der Nebenstrahlrichtung kommt, muss der Gangunterschied  $\Delta$  ein ungeradzahliges Viel-

faches der halben Wellenlänge sein:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ mit } k = 0; 1; 2; 3 \dots (2)$$

Im einfachsten Fall ergibt sich einfach:

$$\Delta = \lambda/2. \text{ Das führt dann auf:}$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\alpha)} \quad (3)$$

Angewandt auf die genannte Yagi-Antenne und die Nebenstrahlrichtung von  $45^\circ$  er-

Den Autor erreichen Sie unter:

Prof. Dr. habil. Dirk W. Schubert, DK6DW  
Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Martensstr. 7  
91058 Erlangen  
dirk.schubert@fau.de

gibt sich für 432 MHz ( $\lambda = 0,694$  m) ein Stockungsabstand  $d = 0,49$  m, um die Nebenstrahlrichtung auszulöschen.

Simulationen zeigen, dass dieser Stockungsabstand groß genug ist, um keinen merklichen Effekt auf die Eingangsimpedanz der Yagi-Antenne zu haben. Da die Nebenausstrahlung unter  $45^\circ$  ausgelöscht wird, bedeutet dies natürlich auch eine Gewinnsteigerung, denn irgendwo muss die Strahlung ja hin – bleibt die Hauptstrahlrichtung, in der immer ein Phasenunterschied von null vorliegt.

### Stockungs-Ergebnisse

Den Effekt sieht man in **Bild 11**, wo der Gewinn in Abhängigkeit vom Stockungsabstand gezeigt ist – der kleine Peak bei etwa  $d = 0,5$  m entspricht der Auslöschung der in Bild 10 gezeigten Nebenkeulen (blaue Pfeile in Bild 10).

Noch mehr Gewinn ist möglich, wenn man die Strahlung der Haupttrichtung, genaugenommen der „Keule“, auf einen schmaleren Bereich konzentriert – man erzwingt Auslöschung für die Flanken

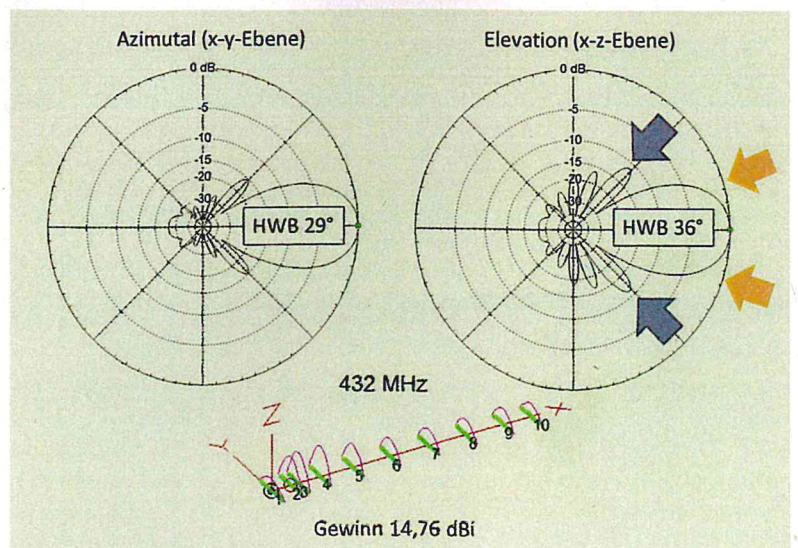
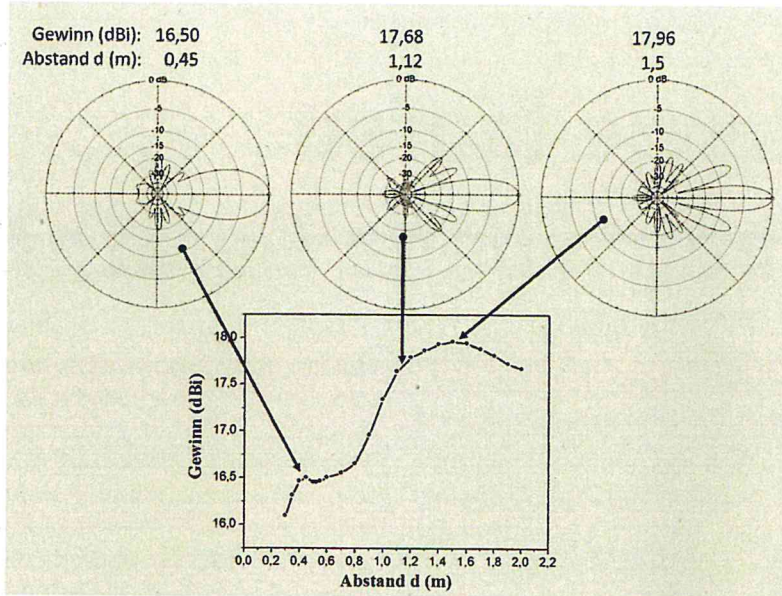
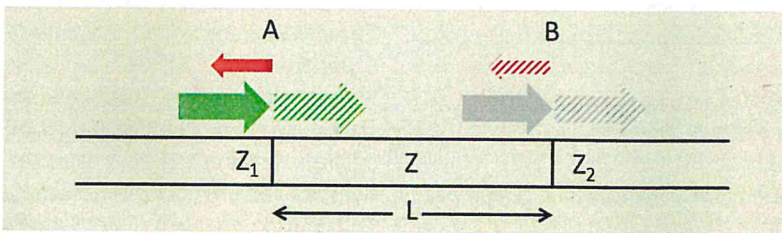


Bild 10: Abstrahlcharakteristik einer 10-Element-Yagi, Simulation mit EZNEC [7]



**Bild 11:** Gewinn von zwei gestockten Yagis als Funktion des Stockungsabstands



**Bild 13:** Schema der einfallenden, transmittierten und reflektierten Wellen an den Stellen A und B mit entsprechenden Impedanzübergängen. Stelle A kann ein Leitungsende oder der Speisepunkt einer Antenne sein

(gelbe Pfeile in Bild 10) der Hauptkeule, allerdings entstehen dann aber wieder mehr Nebenkeulen in Richtungen, die dann eben nicht mehr ausgelöscht werden.

Bild 11 zeigt diesen Effekt deutlich; es wird durch **Bild 12** unterstützt.

Ein sehr guter Kompromiss aus Gewinnsteigerung und möglichst schwachen Nebenkeulen ist ein Stockungsabstand, der sich aus der Halbwertsbreite HWB (hier 36°, s. Bild 10), ergibt:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{HWB}{2}\right)} \quad (4)$$

Die HWB von 36° liefert  $d = 1,12$  m mit einer Gewinnsteigerung von etwa 3 dB zwei gestockte Yagis gegenüber einer (agi) – Halbierung des Winkelbereiches in einer Ebene der Hauptstrahlrichtung bedeutet Verdopplung (3 dB) des Gewinns der einzelnen Yagi.

Nahezu beliebig können Antennengruppen aufgebaut, systematisch die Nebenkeulen reduziert und die Hauptstrahlrichtung schmaler und schmaler gemacht werden – schnell kommt man auf spannende Mathematik mit Dingen wie Binomialkoeffizienten [8] und Fibonacci-Zahlen [9] ...

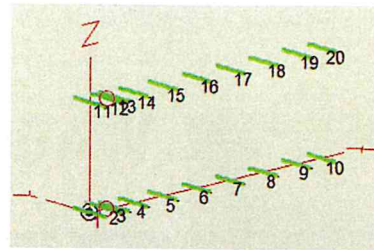
## Wie wird gespeist?

Schaltet man zwei Yagis mit je  $50 \Omega$  parallel, so ergeben sich  $25 \Omega$ , die man mit zwei parallelen Viertelwellenstücken aus  $75\text{-}\Omega$ -Koaxialkabel wieder auf etwa  $50 \Omega$  transformieren kann. Oder aber man versieht die Yagis vor dem Parallelschalten mit je einem Viertelwellenstück aus  $75\text{-}\Omega$ -Koaxialkabel, das ergibt dann je Yagi etwa  $100 \Omega$ , also nach Parallelschalten etwa  $50 \Omega$ . Das ist nichts Neues und in [10] Lehrinhalt.

Entscheidend ist, dass zwei unterschiedliche Impedanzen (rein real)  $Z_1$  und  $Z_2$  durch ein Viertelwellenstück angepasst werden können, wenn die Impedanz  $Z$  der Viertelwellenleitung mit

$$Z = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (5)$$

gewählt wird. Ein einfacher Zugang ist mithilfe von **Bild 13** möglich und vermeidet einen komplizierten Matrixformalismus wie in [11]. Kommt eine Welle von links (grüner Pfeil), so erfolgt eine Teilreflexion (roter Pfeil) an der Stelle A, da hier ein Impedanzsprung auftritt. Ein Teil der Welle (grün schraffierter Pfeil) läuft weiter nach rechts bis zur Stelle B



**Bild 12:** Anordnungsschema für Bild 11

(blauer Pfeil), auch hier erfolgt wieder eine Teilreflexion (roter schraffierter Pfeil), und natürlich läuft ein Teil weiter (blauer schraffierter Pfeil). Wenn man es schafft, dass sich die an A und B reflektierten Anteile dann links von A gerade auslöschten, so kann die Impedanz von  $Z_1$  auf  $Z_2$  transformiert werden.

Das bedeutet, dass die Welle, die von A nach B und dann wieder nach A läuft (rot schraffiert), gegenüber der an A reflektierten Welle eine Phase von 180° bzw.  $\lambda/2$  annehmen muss. Das bedeutet eine Länge  $L$  für das Zwischenstück der Transformationsleitung (mit der Impedanz  $Z$ ) von:

$$L = (2k + 1) \frac{\lambda}{4} \cdot \text{Verkürzungsfaktor}$$

Nun müssen nur noch die beiden reflektierten Wellen gleich groß sein.

Für die Reflexionen (rote Pfeile) an den Stellen A und B gilt:

$$r_A = \frac{Z - Z_1}{Z + Z_1} \quad (6)$$

$$r_B = \frac{Z_2 - Z}{Z + Z_2} \quad (7)$$

Aus der Forderung gleicher Reflexionen  $r_A = r_B$  folgt

$$\frac{Z - Z_1}{Z + Z_1} = \frac{Z_2 - Z}{Z + Z_2} \quad (8)$$

bzw. direkt Gleichung (5), die das so genannte geometrische Mittel der Impedanzen errechnet. Sind die Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  nicht sehr verschieden (in der gleichen Größenordnung), so können die Nenner in Gleichung 6 und 7 als nahezu gleichgroß betrachtet werden, was auf eine häufig verwendete Näherung führt:

$$Z \approx \frac{Z_1 + Z_2}{2} \quad (9)$$

Dies ist das so genannte arithmetische Mittel.