

# Konstruktionsprinzipien für UKW-Hochgewinn-Yagiantennen (2)

MARTIN STEYER – DK7ZB

Mit dem Nachbau von Yagiantennen haben viele Amateure Erfahrungen. Dabei sollte der Nachbauer auch Veränderungen vornehmen und deren Folgen abschätzen können. Dieser Beitrag soll dazu dienen, alles etwas realistischer zu sehen.

Nachdem es im ersten Teil um moderne Gestaltungsprinzipien von Hochgewinn-Yagis ging, befaßt sich der zweite mit der Bedeutung von Nebenkeulen, dem Einfluß der mechanischen Konstruktion und der Computersimulation.

## ■ Das G/T-Verhältnis

Jede Yagiantenne weist neben der Hauptstrahlungskeule rückwärtig nicht nur entgegen der Hauptstrahlrichtung, sondern auch im seitlichen Bereich noch Strahlungsanteile auf, die sinnvollerweise weitmöglichst reduziert werden sollten.

Charakteristisch sind zwei Nebenkeulen in einem Winkel von etwa je 40° links und rechts neben der Hauptkeule (Bilder 8 und 9). Die Anzahl der Nebenkeulen im vorderen und hinteren Bereich der Antenne steigt mit der Elementzahl; bei kurzen Yagis mit drei oder vier Elementen tritt dieser Effekt noch nicht in Erscheinung.

In der Flächendarstellung sieht das meist nicht dramatisch aus. Man muß sich jedoch klarmachen, daß eine Nebenkeule möglicherweise eine erhebliche räumliche Ausdehnung erreicht, da sie sich rund um den Paraboloid der Hauptkeule erstreckt. Damit kann ein merklicher Strahlungsanteil in unerwünschte Richtungen verlorengehen. Aus diesem Grund sollte man der Strahlungscharakteristik der Antenne einige Aufmerksamkeit schenken und eine Reduzierung der unerwünschten Nebenzipfel anstreben.

In der Vergangenheit gaben die Konstrukteure meist nur die Rückwärtsstrahlung bei 180° des Strahlungsdiagramms an. Dieser

Wert ist als V/R-Verhältnis (Vor/Rück-Verhältnis) bekannt, englisch F/B-Ratio (Front/Back). In der amerikanischen (ARRL-)Literatur hat sich ein anderer, aussagekräftigerer Wert durchgesetzt: Das F/R-Verhältnis (Front/Rear), das den gesamten Bereich zwischen 90° und 270° einbezieht. Es erfaßt also auch die unvermeidbaren Nebenzipfel, die u.U. erheblich sind und bei der F/B-Angabe unter den Tisch fallen.

Außerdem gibt es noch einen weiteren, in der speziellen Literatur zu findenden Wert, der G/T-Ratio (Gain/Temperature) bezeichnet wird. Alle Körper oberhalb des absoluten Nullpunkts (−273 °C = 0 K) rauschen, d.h., sie geben Strahlungsanteile ab, die über einen weiten Frequenzbereich nachweisbar sind. Rauschen gibt z.B. auch der warme Erdboden ab. Nebenzipfel einer Antenne nehmen dieses Rauschen auf, das bei hochempfindlichen Empfangsanlagen (EME!) zu deutlichen Empfindlichkeitseinbußen führen kann, wenn die Antennenanlage auf den eigentlich „kalten“ Himmel gerichtet wird.

Das Verhältnis aus dem Vorwärtsgewinn zu der über die Neben- und Rückzipfel aufgenommenen Rauschleistung, die schwache Empfangssignale zudecken kann, ist ein gutes Maß für die Qualität einer Antenne. Dabei steigt der G/T-Wert logischerweise

mit zunehmender Antennenlänge, da die Öffnungswinkel immer geringer werden. Ab etwa  $6\lambda$  Länge der Einzelantenne ist bei einer Vierer-Yagigruppe mit einem positiven G/T zu rechnen.

Grundsätzlich kann man mit zwei Extremen zu einem guten G/T kommen: Entweder man optimiert auf maximale Vorwärtsstrahlung bei noch tragbaren Nebenzipfeln (z.B. SM5BSZ-Yagis nach [8]) oder reduziert die Nebenzipfel sehr stark, bekommt aber weniger Gewinn. Für EME ist also die Antenne mit dem höchsten Gewinn keineswegs automatisch die beste!

Außerdem ist es wichtig, zu beachten, daß die Nebenkeulen beim Zusammenschalten von Yagis zu Gruppen eine erhebliche Zunahme erfahren können. Daher erscheint es angebracht, von Anfang an auf ein sauberes Strahlungsdiagramm hinzuwirken.

Die minimale Standardausrüstung für EME-Anlagen besteht aus einer Vierergruppe von Langyagis in H-Anordnung. Deshalb hat sich VE7BQH, ein bekannter EME-DXer, die Mühe gemacht, für viel verwendete und renommierte 2-m-Antennen das G/T-Verhältnis zu bestimmen bzw. die Stockungsabstände für optimales G/T zu berechnen (Tabelle im Teil 1).

Die Antennen DK7ZB 9, 10, 12 und 14 entsprechen denen, die im FUNKAMATEUR schon vorgestellt wurden [6]. Besonders die hier zugrundegelegte DK7ZB-12-OPT mit 8-m-Boom stellt für eine Hochleistungsgruppe, aber auch als Einzelantenne, eine gute Wahl dar.

Wenn Sie andere in Deutschland verkaufte Antennen hier nicht finden, kann es daran liegen, daß man über deren tatsächliche Eigenschaften besser das Mäntelchen des Schweigens deckt ...

## ■ Der mögliche Gewinn

Hier ist der Zusammenhang recht eindeutig. Bei der Voraussetzung, daß eine optimale Elementbelegung des Booms vorliegt, ist der Gewinn ausschließlich proportional der absoluten Antennenlänge.

Ab etwa  $1,5\lambda$  Länge läßt sich eine Formel von Tom Ring, WA2PHW, anwenden [12], die er durch Analyse vieler Hochgewinn-Langyagis erstellt:

$$G = 10 \cdot \log(5,4075 \cdot B + 4,25).$$

Dabei ist der Gewinn G in dB angegeben, und B ist die Boomlänge, ausgedrückt in Wellenlängen,  $\lambda$ . Bei sehr langen Yagis sind u.U. 0,2 bis 0,3 dB mehr herauszuholen. Jeder Amateur kann so nachprüfen, ob seine gekaufte Antenne theoretisch überhaupt den angegebenen Gewinn erreichen kann. In der Praxis ist er immer niedriger, als man erhofft hat ...

Jedes Element stellt einen Schwingkreis mit einer bestimmten Resonanzfrequenz

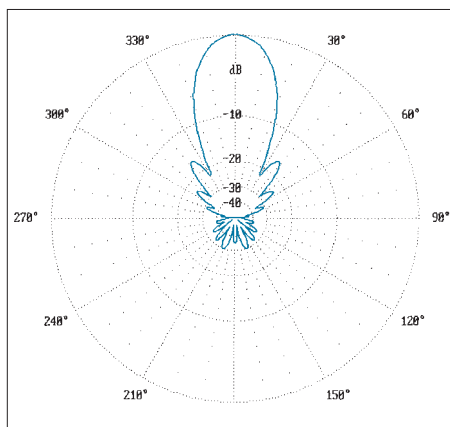


Bild 8: Horizontales Richtdiagramm (E-Ebene), erste Nebenzipfel mit 16 dB, alle rückwärtigen Nebenzipfel mit 30 dB oder besser unterdrückt.

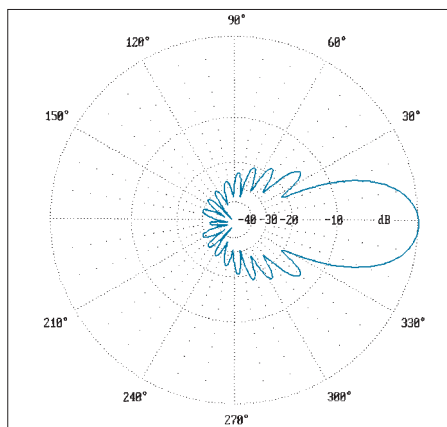
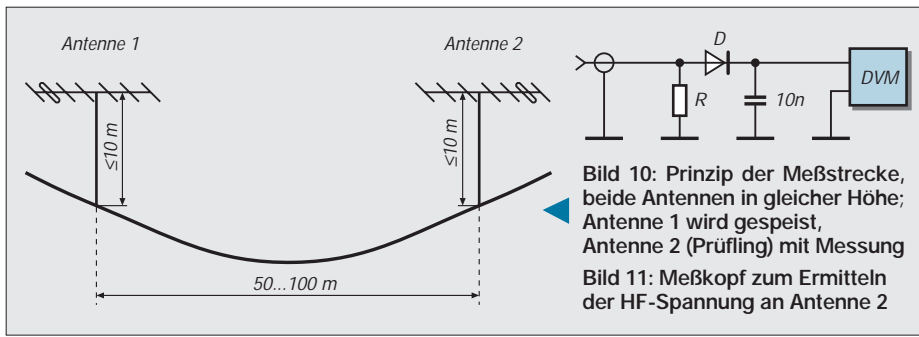


Bild 9: Vertikales Richtdiagramm (H-Ebene) der 12-Element-Langyagi. Die Meßergebnisse decken sich wie in Bild 8 mit den errechneten Werten.



**Bild 10:** Prinzip der Meßstrecke, beide Antennen in gleicher Höhe; Antenne 1 wird gespeist, Antenne 2 (Prüfling) mit Messung  
**Bild 11:** Meßkopf zum Ermitteln der HF-Spannung an Antenne 2

dar. Interessant ist dabei, daß innerhalb des Antennensystems durch die vorhandenen Interaktionen kein einziges Element für sich betrachtet auf der Betriebsfrequenz resonant ist – auch nicht der Strahler!

## Einfluß von Elementdurchmesser und -material

Als verbreitete Meinung gilt, daß ein dünnes Element mit einem hohen L/C-Verhältnis eine hohe Güte besäße und damit deswegen mehr Gewinn zu erzielen sei, als bei dickeren Elementen mit einem niedrigeren L/C-Verhältnis. Theoretisch ist das richtig, allerdings bleiben dabei jedoch zwei Dinge unberücksichtigt, deren Einfluß im UKW-Bereich überwiegt: der Skin-Effekt und ohmsche Verluste.

Vergleichbar ist das mit einer Spule, die mit einem Kondensator zu einem Schwingkreis verbunden wird. Ein hohes L/C-Verhältnis sollte in der Theorie erreicht werden, wenn man keine parallelgeschaltete, getrennte Kapazität einsetzt, sondern nur die Eigenkapazität nutzt. Die damit erhöhte Windungszahl führt aber zu überproportional hohen Verlusten in der Spule und stellt keineswegs eine brauchbare Alternative dar!

Was bedeutet das für die Praxis? Schon auf 2 m und erst recht auf den höheren Frequenzen stellen Elemente mit 8 mm oder 10 mm Durchmesser eine bessere Wahl als dünnere dar. Sie haben eine größere Bandbreite (unkritischer bezüglich mechanischer Toleranzen!) und führen zu geringfügig höheren Gewinnen als dünnere Elemente. Die HF-Eindringtiefe beträgt auf 145 MHz nur 40 µm, was deutlich macht, warum größere Durchmesser und hochleitfähige Materialien gefordert sind. Hier entsteht naturgemäß ein Konflikt mit den Forderungen nach mechanischer Stabilität des Booms und geringer Windlast.

Zwei Faustregeln lassen sich als Kompromiß formulieren:

- Als Elementmaterial kommt nur Aluminium in Frage. Besser wären Kupfer oder Silber, doch sind beide aus Masse- und Kostengründen wohl kaum zu realisieren. Denkbar ungeeignet, obwohl korrosionsfest, ist Edelstahl [7], [12].
- Kleinster Elementdurchmesser sollte bei Langyagis als Kompromiß hinsichtlich

niedriger Windlast 4 mm sein; dabei lassen sich handelsübliche Aluminium-Schweißstäbe verwenden.

Grundsätzlich gilt, daß ein dünneres Element verlängert werden muß, um dieselbe Resonanzfrequenz wie ein dickeres zu erzielen. Diese Tatsache ist allgemein bekannt. Seltener beachtet bleibt ein weiterer Effekt: Die Reaktanz eines Elementes beeinflusst entscheidend dessen Verhältnis von Durchmesser zu Länge.

Reaktanzmäßig unverstimmte Elemente bzw. die mit induktiven Blindanteilen (Strahler und Reflektor) werden durch Durchmesseränderungen weniger stark beeinflusst als die mit hohen kapazitiven Blindanteilen (Direktoren).

Die Folge ist, daß mit abnehmender Direktorlänge und Zunahme des kapazitiven Blindanteils beim Übergang auf dünnere Elemente ein größerer Korrekturfaktor berücksichtigt werden muß. Mit einfacher, linearer Umrechnung erhält man so nie den möglichen Gewinn und optimierte Strahlungsdiagramme!

## Elementbefestigung

Damit kommen wir zum heikelsten Kapitel in der Amateurpraxis. Alle Umrechnungsformeln, die für metallisch leitende oder auch isoliert den Boom durchdringende Befestigung angegeben werden, sind sehr ungenau. Wenn man ein Element leitend durch den Boom befestigt, verringert sich die Induktivität in dem Stück, das das Tragrohr durchdringt. Einfacher ausgedrückt: Das Element wird zum Teil kurzgeschlossen. Dieser Effekt hängt von der Reaktanz und den in den Elementen fließenden Strömen ab. Genauer betrachtet hängt er von der Stärke der dort auftretenden magnetischen Feldkomponente ab [9]. Dabei gibt es keine linearen Abhängigkeiten für alle Elemente.

Auf 2 m spielen diese Faktoren eine untergeordnete Rolle, auf 70 cm und erst recht noch auf höheren Bändern kommt der Berücksichtigung dieser Tatsache eine entscheidende Bedeutung zu. Hier dürfte einer der Gründe zu suchen sein, daß die gemessenen Richtdiagramme bei 23-cm- oder 13-cm-Yagis immer schlechter sind als die vergleichbarer Yagis auf niedrigeren Fre-

quenzen; nach dem Reziprozitätsgesetz dürfte das eigentlich nicht der Fall sein.

Um diesen kaum berechenbaren Einflüssen bzw. langwierigen Experimenten zu entgehen, bin ich zur isolierten Befestigung der Elemente zurückgekehrt, die eindeutigeren Bedingungen zuläßt. Benutzt man Elemente mit 10 mm Durchmesser und handelsüblichen Befestigungshaltern [13], so führen geringfügige Abweichungen bei richtig konzipierten Hochgewinnyagis nicht zu Mißerfolgen.

## Computer-Optimierung

Grundlage ist der NEC-Standard (Numerical Electromagnetics Code) des amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory. Inzwischen gibt es relativ preiswerte Programme, die am NEC-Standard kalibriert sind und erstaunlich genaue Resultate liefern. Die auf einer abgespeckten „MININEC“-Variante basierenden älteren Programme sind dagegen für Yagis relativ ungenau.

Dabei werden Elemente und Abstände in n-dimensionale Vektoren zerlegt und diese berechnet. Da hierzu u.U. Zehntausende von komplizierten Rechenschritten notwendig sind, ist es für Amateure erst seit einigen Jahren unter Nutzung der rasanten Entwicklung auf dem PC-Sektor möglich, entsprechende Programme einzusetzen.

Vor dem unkritischen Einsatz von selbstoptimierenden Programmen sei gewarnt: Man muß schon selbst Erfahrung und Wissen über Yagiantennen einbringen, um zu erkennen, ob das gefundene Optimierungsergebnis realistisch ist.

Die Situation ist mit folgender Analogie deutlich zu machen: Ein Yagi-Optimierungsprogramm hat dieselbe Situation wie ein Wanderer auf einer hügeligen Hochfläche. Er kann jeweils aus einer Senke heraus den nächsten, erkennbar höchsten Hügel erklimmen. Oben angekommen, findet er jedoch durchaus weitere Hügel, die höher sind. Computeralgorithmen sind sehr wohl in der Lage, den jeweils höchsten Punkt der Umgebung zu finden. Rechenprogramme können aber nicht zielgerichtet den gefundenen „Hügel“ verlassen, um durch ein „Tal“ einen höheren „Hügel“ zu erreichen.

Optimiert werden kann jeweils auf einzelne Parameter oder auf einen Kompromiß zwischen verschiedenen Faktoren. Zum Optimieren dient eine „Evolutions“-Strategie: Es werden kleine Veränderungen von Elementlängen und -abständen simuliert. Dann erfolgt eine neue Berechnung. Ist das Ergebnis besser als vorher, geht die Berechnung weiter. Bei schlechteren Werten wird die eingeschlagene Richtung verworfen. Mit dieser Methode kommt man auch bei hochkomplexen Zusammenhängen mit einer

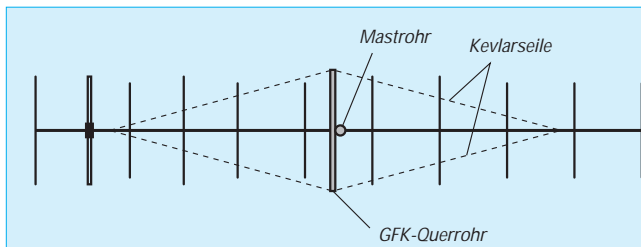


Bild 12: Boom, Elemente und Verspannung in der Aufsicht

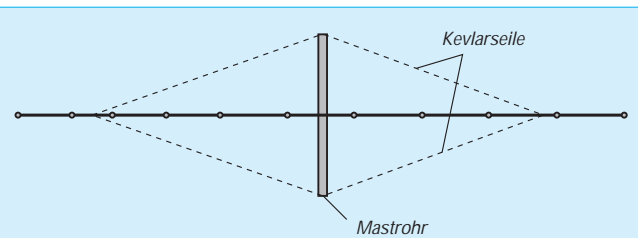


Bild 13: Seitenansicht mit der vertikalen Verspannung

überschaubaren Anzahl von Schritten zu brauchbaren Ergebnissen.

Am Anfang muß allerdings immer ein vernünftiges Design stehen. Es gibt kein Programm, das auf Knopfdruck eine optimale n-Element-Yagi für einen beliebigen Frequenzbereich liefert. Eine gewisse Ausnahme ist die „Brute-Force-Methode“, die zu einer gegebenen Boomlänge immer eine Yagi mit maximalem Gewinn ohne Berücksichtigung der übrigen Parameter findet [8].

Diese Methode ist konvergent, solange im Ausgangsdesign die richtige Anzahl an Direktoren vorgegeben wurde. Dabei lassen sich überflüssige Direktoren des Ausgangsdesigns entfernen, aber keine zusätzlichen einfügen. Die Ergebnisse führen allerdings zu in der Praxis kaum realisierungswürdigen Entwürfen, da sich ein Strahlungswiderstand unter  $10 \Omega$  einstellt.

### ■ Konstruktionsprinzipien für die Praxis

Ein Dipol hat im Freiraum je nach Schlankheitsgrad  $50$  bis  $70 \Omega$  Strahlungswiderstand. Fügt man Reflektoren und Direktoren hinzu, entsteht durch Phasenverschiebung in den Parasitärelementen eine Richtwirkung. Zwangsläufig hat das starke Rückwirkungen auf den Strahler, der dadurch bei Änderung des ohmschen Anteils einen Blindanteil (Reaktanz) erhält.

Der Blindanteil läßt sich kompensieren.  $-j$  (kapazitiv) bedeutet eine Verlängerung des Strahlers,  $+j$  (induktiv) eine Verkürzung. Dies wiederum hat Rückwirkungen auf die Parasitärelemente zur Folge; das Spiel beginnt von vorn. Am Ende der Optimierung auf Gewinn, Bandbreite, Rückdämpfung und wenig Nebenzipfel (G/T-Verhältnis) ist der ohmsche Strahlungswiderstand immer niedriger als  $50 \Omega$ !

Die beste Rückdämpfung erzielt man mit einem relativ geringen Abstand des Reflektors; dabei sinkt jedoch der Strahlungswiderstand des Erregers deutlich ab. Das ist einer der Gründe, warum ein niedrigerer Strahlungswiderstand als  $50 \Omega$  bessere Richtdiagramme ergibt. Ein weiterer besteht darin, daß zum Anheben des Strahlungswiderstandes für eine übliche  $50\text{-}\Omega/200\text{-}\Omega$ -Anpassung mit einem Faltdipol der erste Direktor sehr nahe am Strahler liegen

muß. Als Folge gibt es einen Sprung im Stromprofil (s.o.), der zu einem schlechteren Richtdiagramm führt.

Geht man mit dem Strahlungswiderstand sehr weit nach unten, steigt zwar der Gewinn, allerdings bei deutlich reduzierter Bandbreite und schlechtem V/R-Verhältnis. Zudem können dabei die Verluste dramatisch zunehmen.

Das alles sind die Gründe, warum  $25$  bis  $30 \Omega$  meiner Meinung nach zum besten Kompromiß zwischen Gewinn, Bandbreite und Richtdiagramm führen. Konsequenterweise wurde dafür eine neue Anpaßtechnik mit  $28 \Omega$  für 2-m-Yagis entwickelt [6]. Die resultierenden Antennen sind trotz hoher Gewinne noch nicht sehr kritisch bezüglich der Toleranzen beim Nachbau, so daß alle Nachbauer bisher die propagierten Eigenschaften erzielt haben.

### ■ Konstruktion von langen Tragrohren

Mit Amateurmitteln stabile Tragrohrkonstruktionen zu erreichen ist nicht einfach, zumal dabei Masse und Windlast u.U. sehr schnell zunehmen. Üblich sind Unterzüge oder Abspannungen nach oben, die jedoch horizontale Schwingungen bei Windböen nicht ganz vermeiden können und bei mir schon zum Bruch des Booms in seitlicher Richtung geführt haben.

Dazu der praktische Lösungsvorschlag einer extrem leichten, dennoch stabilen Konstruktion: Ein Vierkantboom mit  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$  wird aus zwei Stücken zu je  $4 \text{ m}$  zusammengesetzt. Mit vier Kevlarseilen [14] wird dann ein Spanngerüst mit Hilfe eines GFK-Rohres erstellt, das direkt unterhalb der Antennenebene quer am Haltemast befestigt ist. Bild 12 zeigt das in der horizontalen Aufsicht; entsprechend werden auch zwei Seile für die vertikale Abspannung eingesetzt, die sich am Haltemast unterhalb der Antenne und am nach oben verlängerten Rohr befinden (Bild 13).

Kevlarseile sind leicht, nichtleitend und besitzen eine hohe Zugfestigkeit. Da ihre Längenänderung bei Temperaturschwankungen minimal bleibt, kann man so eine außerordentlich stabile Antenne bei geringster Masse erhalten. Auch vertikales Schwenken (EME!) führt nicht zum Verwinden, da die Stabilität erhalten bleibt.

Bei Kenntnis der behandelten Tatsachen läßt sich auch mit Amateurmitteln experimentell überprüfen, ob die oben geschilderten Zusammenhänge zutreffen.

### ■ Antennenmessungen

Das Messen des absoluten Gewinns gelingt dem Amateur kaum mit ausreichender Genauigkeit. Bild 10 zeigt eine geeignete Methode zum Vergleich von Antennen bzw. um festzustellen, wie sich Veränderungen im Antennensystem auswirken.

Dazu speist man eine stark bündelnde Yagi als Sendeantenne (zum Vermeiden von Erdbodenreflexionen) mit einer Leistung von  $50$  bis  $100 \text{ W HF}$ . In einer Entfernung von  $50$  bis  $100 \text{ m}$  wird die zu vermessende Yagi als Empfangsantenne betrieben.

Um Fehler durch Nichtlinearitäten in Empfängern zu vermeiden, messe ich mit einem selbstgebaute Meßkopf (Bild 11) die Empfangsspannung direkt passiv mit einem hochohmigen Digitalvoltmeter. Liegt eine kleine Senke zwischen den Meßorten, lassen sich Bodenreflexionen weiter reduzieren, aber auch über ebenen Flächen dürfte die Genauigkeit ausreichend sein. R ist dabei ein induktionsarmer Metallschichtwiderstand ( $50 \Omega$ ), D ist eine Schottkydiode.

Der naheliegende Gedanke, einen Dipol als Vergleichsantenne zu verwenden, führt durch die von ihm ebenfalls aufgenommenen Reflexionen zu falschen Messungen. Wenn eine Vergleichsantenne mit bekanntem Gewinn zur Verfügung stünde, könnte man sogar absolute Ergebnisse erwarten. Ausreichend genau lassen sich so SWR, Strahlungsdiagramm und eingeschränkt auch der Frequenzgang bestimmen. Da sich die Angaben von „YO“ [12] hier als voll zutreffend erwiesen, besteht eigentlich kein Anlaß, an den propagierten Gewinnangaben zu zweifeln, zumal sie gegenüber anderen Quellen eher zurückhaltend sind.

### Literatur und Bezugsquellen

- [10] Edwards, L., VE7BQH: A G/T Study of Two Meter Yagi Antennas, DUBUS (1996), H. 1, S. 6
- [11] Stenberg, G., SM2IEV: Programm Yagi-Analysis 3.54
- [12] Beezley, B., K6STI: Programm Yagi-Optimizer, Version 6.53
- [13] Fa. Konni-Antennen GmbH, Michelriether Str. 8, 97839 Esselbach
- [14] Fa. Titanex Antennentechnik, Burgstall, 94339 Leiblfing