

Hochleistungs-yagis für das 2-m-Band in 28-Ω-Technik

MARTIN STEYER – DK7ZB

Die gewohnte 50-Ω-Technik führt dazu, daß der Reflektor relativ weit vom Strahlerelement entfernt werden muß; nicht optimal bezüglich der Rückwärtsdämpfung. Mit 28 Ω am Speisepunkt ist eine unkomplizierte Speisung möglich, bei der sich ein gutes Vor/Rück-Verhältnis bei geringer Ausbildung von Nebenkeulen erreichen läßt.

Dieser Beitrag belegte im Teil Amateurfunk des FA-Konstruktionswettbewerbs 1996 den 1. Platz.

Versucht man, dem Effekt zu entgehen, daß in 50-Ω-Technik der Reflektor relativ weit vom Strahlerelement entfernt werden muß, bietet sich eine niedrigere Impedanz, hier 28 Ω, an. Die Anpassung erfolgt über zwei parallelgeschaltete 75-Ω-Kabel, die als Viertelwellen-Transformationsglieder (Bild 1) und gleichzeitig als Mantelwellensperre nach dem Tonna-Prinzip [2] wirken. Eine vergleichbare Anordnung [1] für einen Strahlungswiderstand von 18 Ω hat sich bereits in verschiedenen Antennen hervorragend bewährt.

eine elektrisch $\lambda/4$ lange Anpaßleitung mit dem Wellenwiderstand Z_T verwenden. Tabelle 1 macht deutlich, wie man mit handelsüblichen Koaxialkabeln verschiedene Anpaßfälle lösen kann, u.a. auch beim Zusammenschalten von Antennen. Die Fälle 1 bis 3 sind für gestreckte Dipole verwendbar, die Fälle 4 und 5 für Faltdipole.

75-Ω-Kabel ist leicht beschaffbar, und bei 28 Ω sind die Verluste noch minimal, während sie bei weiter sinkendem Strahlungswiderstand bei ungeschicktem Aufbau bereits wirksam werden könnten.

lenstück (Bild 2) eines 75-Ω-Kabels, wiederum als Mantelwellensperre geschaltet. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil dieser Anpassungsvarianten besteht auch darin, daß praktisch keine Leistungsbeschränkung besteht. Bei entsprechendem Koaxialkabel liegt die maximal übertragbare Leistung weit jenseits der für Amateure in Frage kommenden Grenze.

Die angegebenen Antennentypen reichen von 5 Elementen mit einer Tragerohrlänge von 2 m bis zu 14 Elementen bei 10 m Antennenlänge. Damit wird das ganze interessierende Spektrum abgedeckt. Die entsprechenden Tragerohrlängen habe ich mit 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 8 m und 10 m festgelegt.

■ Nicht zuviel und nicht zuwenig

Auffällig ist die gegenüber anderen Baubeschreibungen (bezogen auf die Antennenlänge) geringe Elementzahl. Dabei handelt es sich um die absolut minimale, ohne Verschlechterung der Strahlungseigenschaften nicht mehr unterschreitbare Anzahl. Andererseits tragen mehr Elemente bei langen Yagis zu keiner Verbesserung der Antenneneigenschaften bei. Eine Ausnahme bilden die Yagis nach dem DL6WU-Design [7], [8], die ab einer Länge von etwa $2,5 \lambda$ „vorn“ nach jedem beliebigen Element abgeschnitten werden können und daher mit einer engeren Direktorstaffelung beginnen. Dies ist hier keinesfalls möglich, weil sich sonst alle Antennendaten völlig ändern!

Zugrundegelegt wird ein doppelt logarithmisches Profil, d.h., eine zunehmende Verkürzung der Direktoren bei sich vergrößernden Elementabständen. Dabei beobachten wir eine interessante Erscheinung: Bei Elementverkürzung nach dem DL6WU-Schema ergibt nicht jede Antennenlänge auch gleichzeitig eine gute Rückdämpfung. Dieser Effekt läßt sich durch eine teilweise Verlängerung der äußeren Direktoren kompensieren. So ist es möglich, für jede beliebige Antennenlänge ein F/R über 30 dB zu

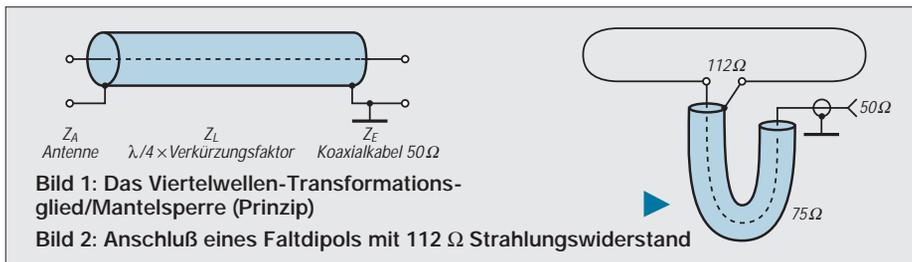


Bild 1: Das Viertelwellen-Transformationsglied/Mantelsperre (Prinzip)

Bild 2: Anschluß eines Faltdipols mit 112 Ω Strahlungswiderstand

■ Eine einfache Transformation

Zur Erläuterung sei das Schema noch einmal vorgestellt: Um die Antennenimpedanz Z_A auf den Wellenwiderstand des Kabels Z_E (normalerweise 50 Ω) zu transformieren, muß man nach

$$Z_T = \sqrt{Z_A \cdot Z_E}$$

Wie eine Analyse mit dem in [3] vorgestellten Programm YAGI zeigt, ist eine 50-Ω-Anpassung zudem nur mit mehr Elementen möglich.

Alternative ist ein Faltdipol, der den vierfachen Strahlungswiderstand von 112 Ω aufweist. Auch damit gelingt eine einfache Anpassung mit einem einzelnen Viertelwel-

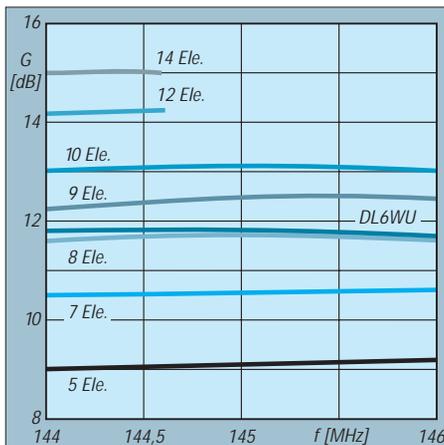


Bild 3: Verlauf des Gewinns der beschriebenen Antennen und einer 10-Element-DL6WU über das 2-m-Band

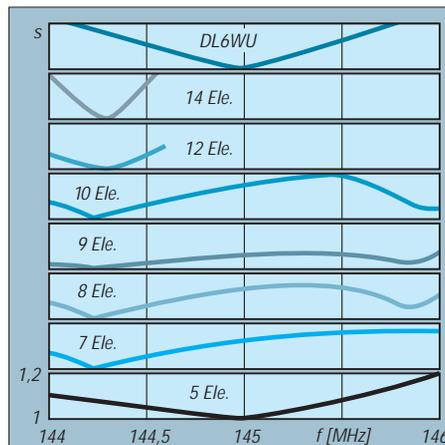


Bild 4: Verlauf des Vor/Rück-Verhältnisses (F/R) der beschriebenen Antennen und einer 10-Element-DL6WU über das 2-m-Band

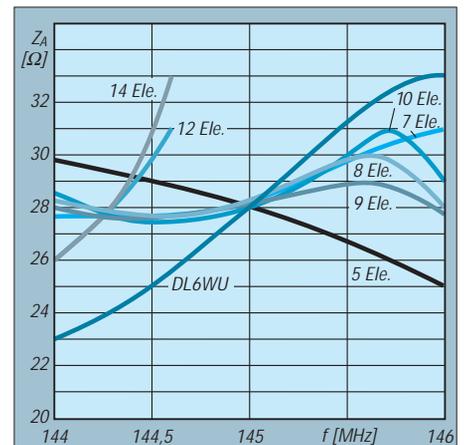


Bild 5: Verlauf des Stehwellenverhältnisses der beschriebenen Antennen und einer 10-Element-DL6WU über das 2-m-Band

erzielen. Zum Verständnis: F/B (Front to Back) bezieht sich nur auf die Rückwärtsstrahlung bei genau 180°, bei F/R (Front to Rear) wird der gesamte Bereich zwischen 90 und 270° berücksichtigt. Das ist sinnvoll, um auch Nebenkeulen mit zu erfassen.

Alle Antennen haben sehr niedrige Strahlungsanteile in den Nebenzipfeln. Daß bei einigen am Ende der Direktorkette nach kürzeren Direktoren wieder längere zu finden sind, ist so erklärbar. Die Angaben in der Längentabelle (Tabelle 4) enthalten also keine Druckfehler! Relativ schnell kommt dabei der maximal mögliche Direktorabstand von $0,4 \lambda$ zum Tragen, wobei am Ende wieder geringere Abstände zur Verbesserung der Rückwärtsunterdrückung gewählt wurden. Insgesamt gelten die schon in [3] vorgestellten Konstruktionsmerkmale.

■ Leistungsdaten

Die beschriebenen Langyagis entstanden durch Weiterentwicklung der in [3] beschriebenen 7-Element-Yagi und wurden auf hohen Gewinn, hohe Rückdämpfung und ausreichende Bandbreite hin konzipiert, um eine große Nachbausicherheit und Einsatzmöglichkeit im gesamten 2-m-Band (SWR unter 1,3 im Bereich 144 bis 146 MHz) zu erreichen. Vom theoretisch erreichbaren Gewinn, der nur bei weit geringerer Bandbreite und schlechterer Rückdämpfung machbar wäre, sind die Antennen weniger als 0,2 dB entfernt. Eine Ausnahme bilden die beiden längsten Antennen, die nur bei Beschränkung auf das untere Megahertz und damit u.a. den CW/SSB-Abschnitt des Bandes auf ihre hohen Gewinne kommen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften. Wer sich für Daten dieser und weiterer Antennen bezüglich Abmessungen, Gewinn, Rückdämpfung, Anpassungsverlauf und die Strahlungsdiagramme interessiert, kann von mir gegen

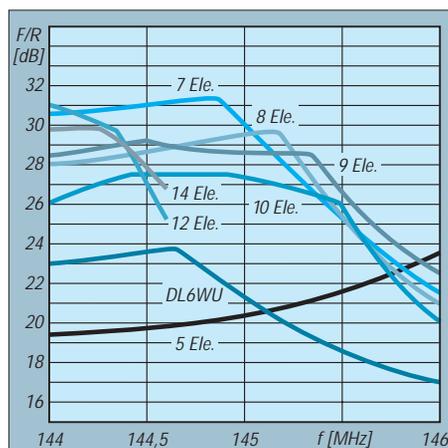
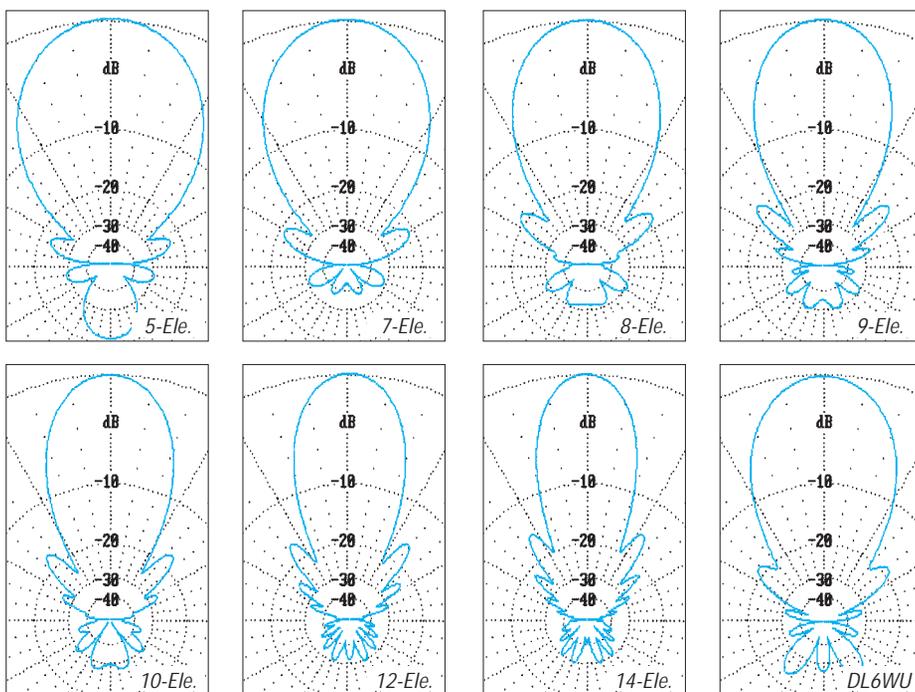


Bild 6: Anpassungsverlauf der 28-Ω-Yagis und einer 10-Element-DL6WU (50 Ω auf 28 Ω umgerechnet) über das 2-m-Band



Bilder 7 bis 14: Horizontale Strahlungsdiagramme der beschriebenen Antennen und einer 10-Element-DL6WU bei 144,3 MHz (5-Element-Antenne bei 145,0 MHz)

Übersendung einer formatierten Leerdiskette (MS-DOS, 3,5") und Rückporto diese und weitere Files mit allen Einzelheiten erhalten. Zum Betrachten bzw. Bearbeiten ist das Programm YA [4] von K6STI erforderlich, das dem ARRL Antenna Book [5] beiliegt. YA kann ich aus lizenzrechtlichen Gründen nicht mit überspielen.

Bei der teilweise extrem hohen Rückdämpfung, die sich bei geringer Gewinneinbuße ggf. noch bis auf mehr als 40 dB steigern läßt, erübrigen sich Konstruktionen wie Tandem- oder Mehrfachreflektoren, die lediglich die Mechanik komplizieren und die Windlast steigern. Die Nebenzipfelunterdrückung kommt auch Sonderanwendungen wie EME zugute.

Die kürzeren Yagis habe ich mit etwas höherer Bandbreite konzipiert, um einen Einsatz über das gesamte 2-m-Band sicherzustellen. Die langen Versionen werden wohl nur im unteren Bandabschnitt für CW/SSB in Frage kommen, was etwa 0,2 bis 0,3 dB mehr Gewinn bei eingeschränkter Bandbreite ergibt.

Höhere Gewinnangaben für kommerzielle Antennen vergleichbarer Länge dürfen Sie getrost ins Reich der Fabel verweisen. Rechnen Sie solche Antennen einfach einmal mit dem Computer durch.

Die Bilder 3 bis 6 demonstrieren den Gewinn in dBd, F/R, Stehwellenverhältnis und Anpassungsverlauf aller vorgestellten Yagis. Interessant sind auch die geplotteten Horizontaldiagramme (Bilder 7 bis 14). Daß bei der gewählten Flächenintegration der gesamten Rück- und Nebenzipfel ein Abfall des Vor/Rück-Verhältnisses zum Bandende hin eintritt, ist schon auf ein verstärk-

tes Auftreten von Nebenkeulen zurückzuführen. Im gesamten 2-m-Band sind die Strahlungsdiagramme aber besser als bei verschiedenen analysierten im Handel befindlichen Yagis. Falls eine Stockung gewünscht wird, kann man Tabelle 3 die aus den Öffnungswinkeln berechneten horizontalen und vertikalen Abstände entnehmen.

Tabelle 1: Viertelwellentransformationsglieder mit Koaxialkabeln für verschiedene Impedanzfälle (Z_E für Speisekabel 50 Ω)

Fall	Z_A (Ant.)	Z_L ($\lambda/4$ -Ltg.)	Ausführung
1	12,5 Ω	25 Ω	2 × 50 Ω parallel
2	18 Ω	30 Ω	2 × 60 Ω parallel
3	28 Ω	37,5 Ω	2 × 75 Ω parallel
4	72 Ω	60 Ω	einf. Koaxialkabel
5	112 Ω	75 Ω	einf. Koaxialkabel

Tabelle 2: Kurzdaten der Langyagis für 144,3 MHz

Typ	El.-Anz.	Länge [m]	l/λ	Gew. [dBd]	F/R [dB]	Par.-El. ¹⁾
5-2-2820	5	2,0	0,96	9,0	20	10 × 1
7-2-2830	7	3,0	1,44	10,6	31	10 × 1
8-2-2840	8	4,0	1,92	11,6	29	8 × 1
9-2-2850	9	5,0	2,40	12,3	29	8 × 1
10-22860	10	6,0	2,88	13,0	27	6 × 1
12-22880	12	8,0	3,84	14,2	30	6 × 1
14-22810	14	9,9	4,73	15,0	30	6 × 1

¹⁾ mm × mm

Tabelle 3: Stockungsabstände für vertikale und horizontale Zusammenschaltung²⁾ [m]

Elem.	5	7	8	9	10	12	14
vertikal	3,00	3,10	3,45	3,65	4,10	4,90	5,10
horiz.	2,80	3,10	3,75	4,05	4,25	5,10	5,60

²⁾ berechnet aus den horizontalen und vertikalen Öffnungswinkeln



Bild 15: Befestigung der Elemente zu Meßzwecken mit Kunststoffklammern auf 25-mm-Aluminiumrohr



Bild 16: Befestigung der Elemente im Tragerohr 20 mm x 20 mm

■ Aufbau und Mechanik

Die Versuchsversionen habe ich mit 25-mm-Rundrohr als Träger aufgebaut; die Elemente wurden mit PVC-Klammern (Wandhalterung) für Installationsrohre isoliert aufgeklemmt, was ein leichtes Verschieben bzw. Umrüsten des Booms erlaubte. Bild 15 zeigt diese Technik, die sich auch gut für Portabelantennen eignet. Für Dauermontage dürften solche Halter aber leider nicht UV-fest genug sein. Bei isolierter Befestigung sind von den Längenangaben (Tabelle 3) der Reflektoren und Direktoren jeweils 5 mm zu subtrahieren, s.u.

Die fotografierte Yagi ist mit Vierkant-Aluminiumrohr 20 mm x 20 mm x 2 mm aufgebaut; die Parasitärelemente bestehen bei der 5- und 7-Element-Yagi aus Aluminiumrohr 10 mm x 1 mm und bei den 8- und 9-Element-Typen aus Rohr 8 mm x 1 mm. Nur die 10-, 12- und 14-Element-Langyagis werden mit Rohren 6 mm x 1 mm konstru-

iert. Das ergibt eine robuste Mechanik und größere Toleranzen gegenüber geringeren Durchmessern. Bei den vergleichsweise wenigen Elementen fallen die etwas größeren Dimensionen gegenüber den sonst gebräuchlichen 4-mm-Elementen aus Vollaluminium kaum ins Gewicht. Dringend abzuraten ist wegen ihrer Verluste [6] durch den Skin-Effekt und schlechter Leitfähigkeit von Elementen aus Stahl. Nach den Berechnungsunterlagen von Brain Beezley, K6STI, ergeben sich bei der 7-Element-Yagi beim Übergang vom 10-mm-Aluminiumrohr auf 2-mm-Edelstahlelemente theoretisch immerhin 0,85 dB Mindergewinn!

Da die handelsübliche Standardlänge der Boomrohre 6 m beträgt, bietet es sich an, die 7-Element-Antenne als Zweier- oder Vierergruppe oder die 10-Element-Yagi zu bauen. Bei den längeren Typen muß man einen Unterzug vorsehen, der den Aufbau kompliziert. Bei Portabeleinsätzen oder Standorten ohne extreme Windbelastung kann bei den 9- und 10-Element-Typen ein über dem Tragrohr verspanntes Stahlseil die Stabilität verbessern.

Werden bei den langen Antennen zur Verbesserung der mechanischen Stabilität Vierkantrohre 25 mm x 25 mm x 2 mm gewählt, so sind allen Elementen jeweils 2 mm zuzurechnen (Ausnahme Strahler).

Die Parasitärelemente steckt man durch den durchbohrten Boom und befestigt sie mit selbstschneidenden Schrauben aus Edelstahl. Diese korrosionsfeste und elektrisch saubere Lösung (Bild 16) hat sich seit Jahren gut bewährt und läßt sich in kurzer Zeit in die Praxis umsetzen. Sämtliche Elementhalterungen, die den Selbstbauern meist Kopfzerbrechen bereiten, entfallen damit. Die jeweiligen Abstände stehen in Tabelle 5.

Die Strahlerelemente werden als gestreckte Dipole mit Isolierung in der Mitte aufgebaut und dazu die Elementhälften aus Aluminiumrohr 12 mm x 1 mm durch ein 10 mm dickes Rundstück aus Isoliermaterial verbunden und so gehalten. Das Material ist unkritisch, Hart-PVC oder andere



Bild 17: Die Anschlußdose mit gestrecktem Dipol als Strahlerelement

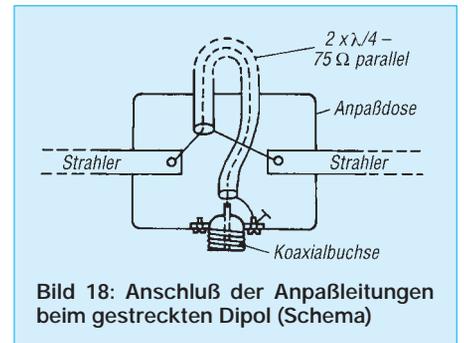


Bild 18: Anschluß der Anpaßleitungen beim gestreckten Dipol (Schema)

Kunststoffe eignen sich bei dem geringen Fußpunktwiderstand (niedrige Spannung) durchaus. Ich selbst benutze 10-mm-Glasfaserstäbe.

Eine Feuchtraum-Elektrodose trägt die Koaxialbuchse, am besten eignet sich die N-Norm, aber auch SO-239-Buchsen mit Teflon-Dielektrikum sind verwendbar. Bild 17 macht deutlich, wie die Dose von innen aussieht. Die parallelgeschalteten 75-Ω-Kabel von je 345 mm Länge (Dielektrikum Voll-Polyethylen; das Maß bezieht sich auf die Länge der Abschirmung!) werden zu einer Schleife gebogen und entsprechend Bild 18

Tabelle 4: Elementlängen [mm]

El.	5-2- 2820	7-2- 2830	8-2- 2840	9-2- 2850	10- 22860	12- 22880	14- 22810
R	1026	1033	1035	1038	1023	1024	1022
S	955	992	997	976	988	972	958
D 1	914	955	957	945	944	960	961
D 2	920	919	928	923	933	934	935
D 3	886	895	909	905	915	918	919
D 4	-	905	898	891	902	903	906
D 5	-	869	900	882	893	894	896
D 6	-	-	893	896	891	889	888
D 7	-	-	-	886	898	883	884
D 8	-	-	-	-	898	883	881
D 9	-	-	-	-	-	893	881
D10	-	-	-	-	-	888	882
D11	-	-	-	-	-	866	888
D12	-	-	-	-	-	-	887

Tabelle 5: Elementabstände [mm]

El.	5-2- 2820	7-2- 2830	8-2- 2840	9-2- 2850	10- 22860	12- 22880	14- 22810
R - S	410	325	350	315	430	405	410
S - D 1	415	175	210	290	280	275	265
D 1 - D 2	655	460	530	575	560	595	530
D 2 - D 3	500	675	660	695	685	695	715
D 3 - D 4	888	765	790	795	800	830	820
D 4 - D 5	-	590	820	835	850	885	880
D 5 - D 6	-	-	620	860	865	885	910
D 6 - D 7	-	-	-	615	850	915	925
D 7 - D 8	-	-	-	-	660	900	925
D 9 - D10	-	-	-	-	-	890	920
D10 - D11	-	-	-	-	-	705	905
D11 - D12	-	-	-	-	-	-	895
D12 - D13	-	-	-	-	-	-	730

angeschlossen. Wichtig ist eine gute Masseverbindung der Koaxialbuchse zum Boom, gut eignet sich dazu ein Aluminiumwinkel. Die Durchführungen dichtet man gegen Eindringen von Wasser mit Silikon ab, noch besser wirkt das Ausgießen der gesamten Dose mit Kunstharz.

Bei einem Faltdipol als Strahler dient als Material Aluminiumrohr 6 mm × 1,5 mm, dessen Biegungen mit einem Radius von 40 mm um ein Rohr erfolgen. Der Abstand zwischen den äußeren Enden des fertigen Faltdipols beträgt 15 mm weniger als beim gestreckten Dipol nach Tabelle 4. Die Anpaßleitung besteht nur aus einem 75-Ω-Stück Koaxialkabel. Erdung und Anschluß an der Buchse erfolgen analog zum gestreckten Dipol (Bild 18). Bild 20 zeigt die 8-Element-Yagi mit gestrecktem Dipol.

■ Inbetriebnahme

Hat man die angegebenen Maße eingehalten, stimmen die Resonanzbedingungen in jedem Fall; eine Veränderung der Elementlängen darf unter keinen Umständen erfolgen, auch wenn eventuell kein SWR-Minimum von 1,0 zustandekommt. Die Ursache kann (richtige Anpaßleitung vorausgesetzt) nur in einem abweichenden Fußpunkt-widerstand liegen, der bei verändertem mechanischen Aufbau durchaus auftreten kann. Hier hilft ein Abgleich durch Verschieben der Anschlußdose und damit der Lage des Strahlers um ±15 mm zwischen Reflektor und Direktor 1. Die Strahlerimpedanz läßt sich dadurch um einige Ohm korrigieren. Der Gewinn ändert sich dabei um weniger als ±0,1 dB, die Rückdämpfung bleibt innerhalb ±2 dB im angegebenen Bereich.

Wenn das SWR-Minimum danach zwar eindeutig im 2-m-Band liegt, der Wert 1,0 jedoch nicht einstellbar ist, bleibt als letzte Möglichkeit, mit einer Längenänderung des Strahlers zu experimentieren. Die Längenangaben für den Strahler gelten vom äußeren Elementende zum äußeren Elementende! Die beiden Hälften werden in der Mitte auf 15 bis 20 mm zur Einspeisung unterbrochen.

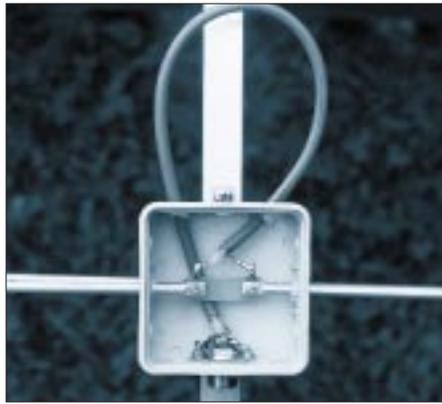


Bild 19: Die Anschlußdose beim Faltdipol

■ Befestigungseinflüsse

Sollen die Antennenelemente für andere Tragerrohrkonstruktionen umgerechnet werden, muß man (s.o.) von den Längen der Parasitärelemente jeweils 5 mm subtrahieren; damit erhält man die theoretischen Längen für isolierte Montage. Kopfzerbrechen hat mir die Fragestellung bereitet, welche der verschiedenen Umrechnungsformeln für eine Montage auf einem oder durch ein metallisches Tragerrohr nun der Realität am nächsten kommt. Nach verschiedenen Meßreihen hat sich bei mir eine Angabe von G3SEK bestätigt (nach Unterlagen von DL6WU, angegeben in der Dokumentation zu [4]), die für eine Montage *d u r c h* das Tragerrohr gilt:

$$C = (12,5975 - 114,5 b) b^2.$$

Dabei ist C der Korrekturwert, bezogen auf die Wellenlänge λ für die Hälfte (!) eines Elements, b ist der Durchmesser des Tragerrohres (ebenfalls als Faktor, auf die Wellenlänge bezogen) für quadratisches oder rundes Tragerrohrprofil. Die erhaltenen Werte sollten eher etwas nach oben gerundet werden.

Beispiel: Ein Tragerrohr von 20 mm Durchmesser entspricht bei 2 m Wellenlänge einem Faktor b von 0,01. Eingesetzt in obige Formel ergeben sich je Elementhälfte 2,4 mm, gerundet auf das ganze Element 5 mm, die dem theoretischen Rechenwert für isolierte Montage zuzuschlagen sind.



Bild 20: Die 8-Element-Yagi mit gestrecktem Dipol

Fotos: DK7ZB

■ Erfahrungswerte

Interessant war ein Vergleich beim Portabeleinsatz auf erhöhten Standorten zwischen der gestockten 2 × 7-Element-Gruppe und der 10-Element-Antenne. Beide benötigen für die Konstruktion insgesamt 6 m Tragerrohr, und der Gewinn ist bei beiden Alternativen mit 13 dBd identisch.

Leichter auf- und abbauen läßt sich die Gruppe, die zudem geringere Anforderungen an den Mast stellt. Man beachte auch, daß die effektiv wirksame Antennenhöhe bei der Gruppe in der Mitte zwischen beiden Ebenen liegt. In der Praxis erweist sich der geringere vertikale und größere horizontale Öffnungswinkel der gestockten Yagis als zweckmäßiger. Deshalb würde ich extrem lange Antennen eigentlich nur dann empfehlen, wenn auch sie ihrerseits wiederum zu Gruppen zusammengeschaltet werden. Mein Traum sind ein einsames Grundstück auf einem Berg, ein Gittermast und 4 × 14-Elemente als Gruppe mit über 20 dBd Gewinn ...

■ Vergleich mit der DL6WU-Yagi

Bei den Kurven wurden auch die Daten der 10-Element-DL6WU-Antenne hinzugefügt (die Speiseimpedanz in diesem Fall von 50 Ω auf 28 Ω umnormiert) und als Bild 14 auch ihr Richtdiagramm ergänzt. Interessant ist, daß gerade bei 145 MHz die Impedanz genau 50 Ω beträgt. Das zeigt, daß das Programm absolut exakt rechnet!

Im Vergleich mit der 8-Element-DK7ZB fällt auf, daß bei 0,5 m kürzerem Tragerrohr genau 0,17 dB Mindergewinn auftritt, aber ein wesentlich besseres Strahlungsdiagramm vorhanden ist. Rückdämpfung, und Nebenzipfelunterdrückung, auch Anpassungsverlauf und SWR sind besser. Eine genau 4,5 m lange DK7ZB-Yagi mit 9 Elementen hat bei entsprechend besseren Diagrammen exakt 12 dBd. Übrigens: Für eine ausschließlich experimentell entwickelte Antenne ist die DL6WU seit 20 Jahren die absolute Extraklasse!

Literatur

- [1] Steyer, M., DK7ZB: Einfache Speisung von Monoband-Yagis, FUNKAMATEUR 44 (1995), H. 4, S. 406
- [2] Rothammel, K., Y21BK: Antennenbuch, Verlag Frank-Kosmos 1996, Abschnitt 7.5.4.3.
- [3] Steyer, M., DK7ZB: Computeroptimierte Yagi-Antennen für das 2-m-Band, FUNKAMATEUR 45 (1996) H. 2, S. 185
- [4] PC-Programm „YA“ von Brian Beezley, K6STI, Beilage zu [5]
- [5] ARRL-Antenna-Handbook 1995, The American Radio Relay League, Newington, 1994
- [6] White, I., G3SEK: The VHF/UHF-DX-Book, DIR Publishing Ltd., 1992
- [7] Hoch, G., DL6WU: Wirkungsweise und optimale Dimensionierung von Yagi-Antennen, UKW-Berichte 17 (1977), H. 1
- [8] Hoch, G., DL6WU: Mehr Gewinn mit Yagi-Antennen, UKW-Berichte 18 (1978), H. 1