

High Gain Yagis for 432 MHz

Rainer Bertelsmeier, DJ9BV
Glücksburger Str. 20, D-2000 Hamburg 50

Abstract: Because of the increasing number of requests for construction details of the 432 MHz yagi series the description of two different types of high gain yagis for 432 is published. The first type is an original DL6WU design but slightly computer optimized for a small increase of gain while preserving the well known features of DL6WU-yagis. This is the so called BV-series of yagis ranges from 7.3λ to 13λ (5.3 m to 9.2 m) electrical length. A second type is the OPT70 series, which originated from computer simulation experiments in 1987. This OPT70 series has even more gain but has somewhat sensitive properties. It ranges also from 7.3λ to 13λ electrical length. Common features of both designs are excellent sidelobe performance and low internal skin losses which result in superior low noise behaviour and high G/T-ratio especially important for EME on 432. These features may not be found in commercial yagis.

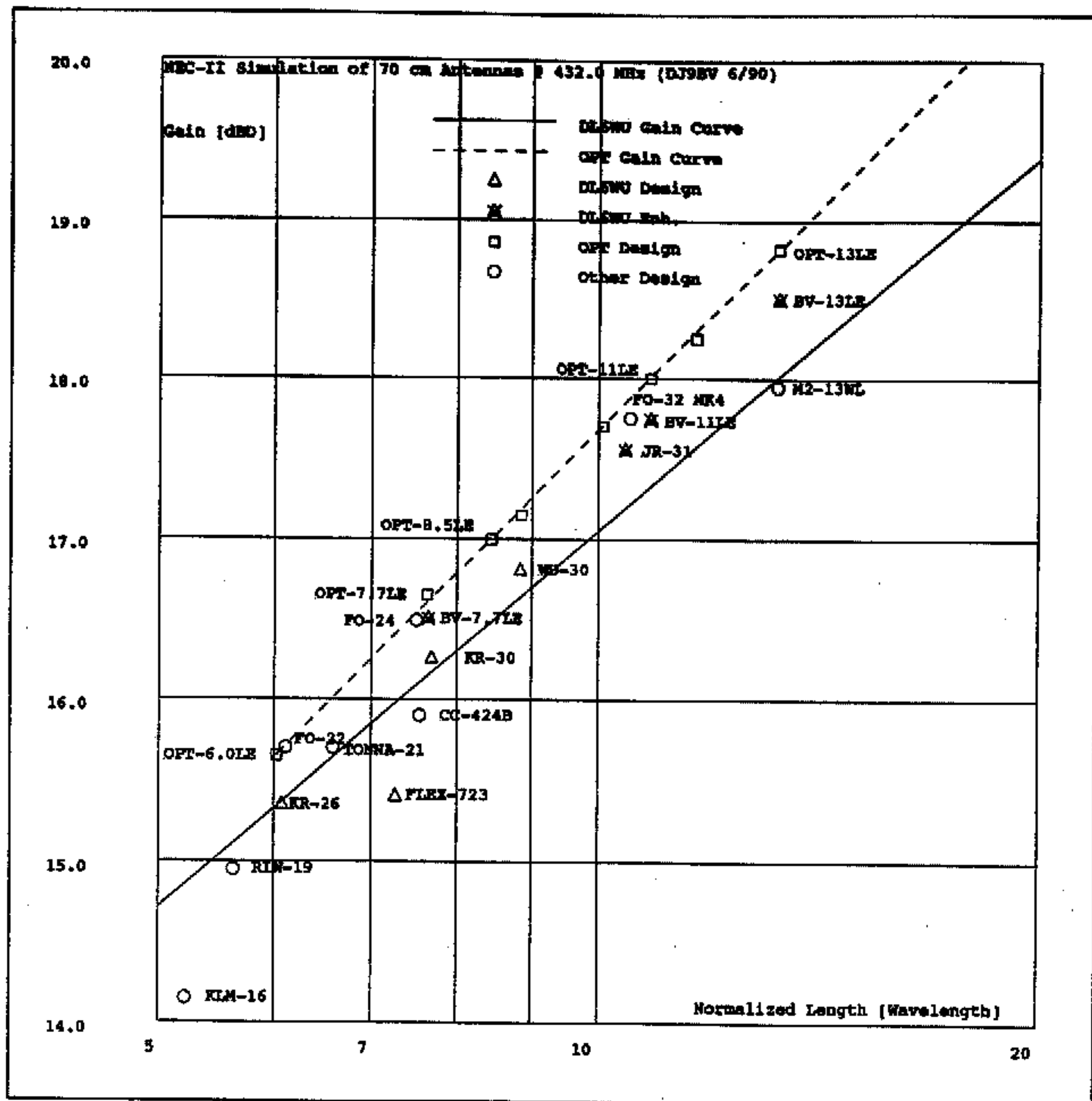
Kurzfassung: Wegen der zahlreichen Anfragen für Details über 432 MHz Yagis folgt hier die Beschreibung von zwei verschiedenen Typen von Yagis. Die erste Art wird BV-Serie genannt und ist ein originales DL6WU-Design mit den bekannten Vorzügen. Es ist nur leicht mit Hilfe von Rechnersimulation überarbeitet. Als Baukastensystem eignet es sich, Yagis von 5 m - 9 m (7.3λ - 13λ) Länge und 16,3dBD - 18,4dBD Gewinn zu bauen. Die zweite Art, die beschrieben wird, ist eine Weiterentwicklung, die mit Hilfe von CAD-Programmen zur Antennenkonstruktion im Laufe des Jahres 1987 entstanden ist. Diese OPT70-Serie ist ebenfalls ein Baukastensystem (5 m - 9 m Boomlänge), hat noch mehr Antennengewinn, ist aber etwas empfindlicher und schwieriger anzupassen als die BV-Serie. Beide Typen sind speziell für hohes G/T-Verhältnis gezüchtet, das durch niedrige innere Verluste und geringe Nebenzüpfel im Diagramm einerseits und hohen Gewinn andererseits entsteht. Dieses macht sie besonders geeignet für EME-Betrieb.

1. Description of BV-Series

1.1 Design

To achieve excellent performance these antennas have been designed according to the design procedure of DL6WU ([7],[8],[9]), which has been described some ten years ago. Additionally modern computer technology has been used to tweak these designs for even better performance, without losing the inherent properties of the DL6WU-Design, which are:

- 50 impedance at feedpoint: Broad VSWR bandwidth and low loss match with folded dipole
- Modular design allows construction of yagis with any length between 2λ and more than 30λ with monotonic increase of gain at a rate of 2.35 dB for each doubling in boom size.
- Very low internal losses because of high input impedance (50Ω).
- Good pattern and stacking behaviour implies low antenna temperature for EME.
- Conservative tuning gives gain peak 1 percent higher than design frequency. Excellent bad weather performance is the consequence.



Bild/Figure 1: Gain versus Boomlength of 432 MHz Yagis

- Broadband gain characteristic 'forgives' construction tolerances and even partial broken elements with only a small sacrifice in gain.

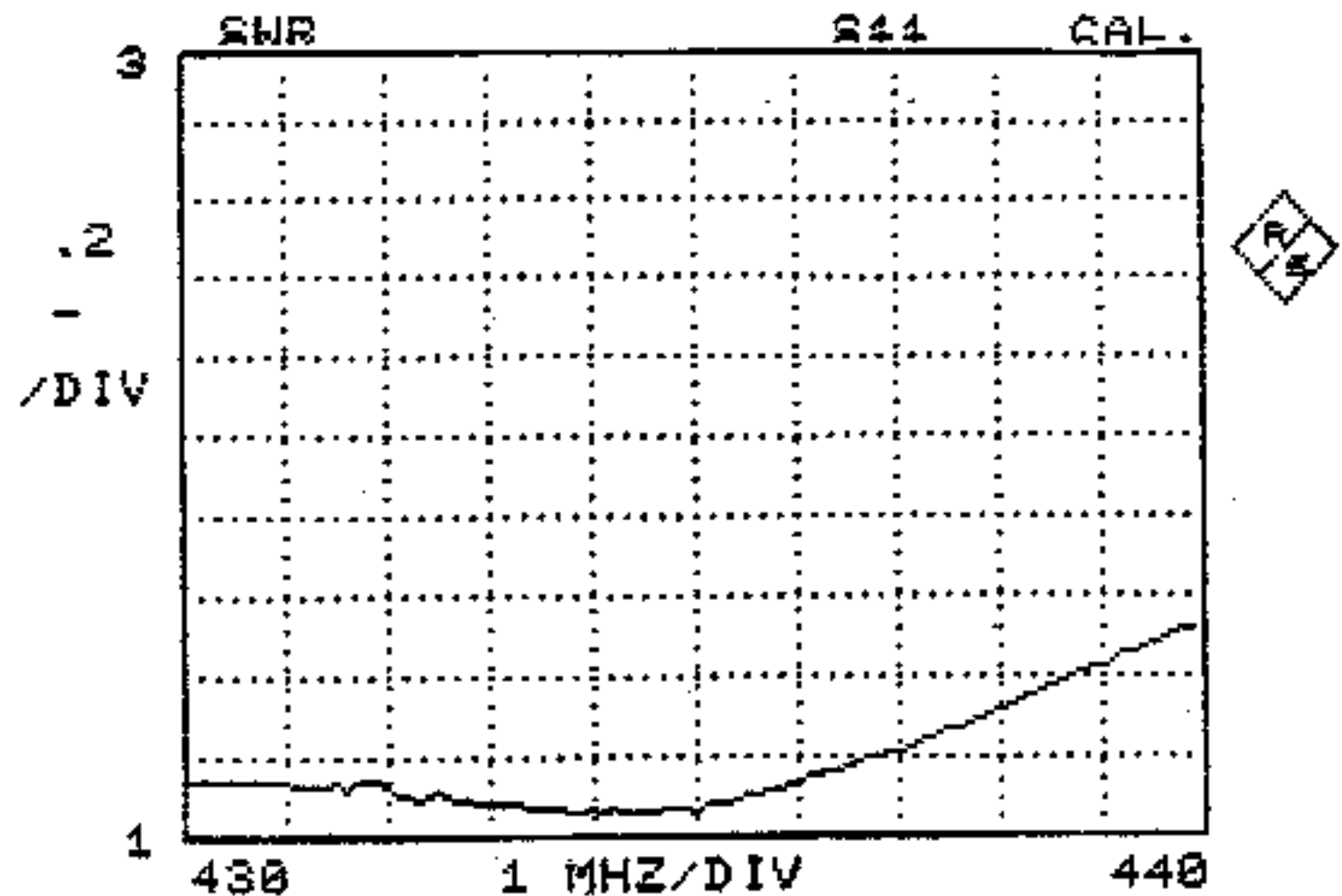
The NEC-II simulation software ([6]) has been used to fine tune the dimensions for even higher gain and lower sidelobes, especially for the back lobe level. The results justify this approach. Gain is better than any commercial antenna on the market (see Figure 1) and patterns are superior (See Figure 3). So the home builder can take advantage of this design and will be able to construct one of the finest antenna systems possible.

1.1. Design

Um hohen Gewinn, einfachen Aufbau und einfache Speisung mit breitbandig niedrigen VSWR zu erreichen, wurde beim Design der vorliegenden Antennen auf das Entwurfsprinzip von DL6WU ([7], [8],

[9]) zurückgegriffen. Die Grafik in Bild 1 zeigt, daß weder kommerzielle noch Selbstbau-Antennen den Gewinn dieser Antennen bei gleicher Boomlänge übertreffen. Diese ausgezeichneten Eigenschaften wurden durch "Bearbeitung" der aus dem DL6WU-Entwurfsprinzip resultierenden Antennenabmessungen mit Hilfe eines Antennen-Simulationsprogramms ([6]) erreicht. Damit konnten sowohl das Diagramm - z.B. das F/B-Verhältnis - und der Gewinn geringfügig gegenüber dem Original verbessert werden. Die günstigen Eigenschaften des DL6WU-Designs konnten dabei erhalten werden. Diese sind:

- 50Ω Eingangsimpedanz bewirken niedrige Verluste und gute Anpassung
- Baukastensystem erlaubt die Konstruktion von Yagis von 2λ bis mehr als 20λ Boomlänge mit monotonem Anstieg des Gewinns mit ca. 2,35 dB für jede Verdopplung der Boomlänge.
- Geringe Nebenzipfel und niedrige gegenseitige Beeinflussung beim Stocken erzeugt eine niedrige effektive Rauschtemperatur von Antennengruppen für EME.
- Gewinnmaximum ist ca. 1 % über der Betriebsfrequenz. Zusammen mit der großen Gewinnbandbreite ergibt sich gutes Schlechtwetterverhalten und Gutmütigkeit gegen Toleranzen in den Abmessungen.



Bild/Figure 2: VSWR @ Frequency for BV70-8.5L

1.2 Performance Data

The VSWR characteristic is very broadband (Figure 2). It should have values below 1.2 on 432. Gain versus Frequency can be seen from Table 1. Gain peak is at 437 MHz. An example for the extremely good sidelobe suppression over the full backward solid angle can be seen from Figure 3, which displays the horizontal pattern of a BV70-10L. This model achieves a gain of 17.3 dBD with a boomlength of 7 m.

1.2 Elektrische Daten

Das Anpaßverhalten ist sehr breitbandig (Bild 2). In jedem Fall muß das VSWR bei 432 MHz unter 1,2 sein, wenn der Dipol korrekt arbeitet. Das Gewinnmaximum liegt bei 437 MHz. Ein beispielhaftes Diagramm zeigt Bild 3 für eine BV70-10L, die mit 7 m Länge einen Gewinn von 17,3 dBD erreicht.

Table 1: Gain @ F for BV70-7.7L

	430	432	434	436	438	440
Gain [dBD]	16.2	16.4	16.6	16.6	16.6	16.5
F/B [dBD]	27.5	28.3	28.3	26.6	24.3	22.3

1.3. Construction

The construction of antenna is straightforward. Elements are mounted in an isolated fashion via nylon rivets through the boom.

Just follow the details given for the 144 MHz yagis in ([5]). Lengths and positions can be seen in Table 3. Dipole construction can be patterned after the description in [10]. Dimensions of dipole can be seen from Figure 5, those of the 4-er reflector in Figure 6.

Bild/Figure 3: Horizontal Pattern of BV70-10L

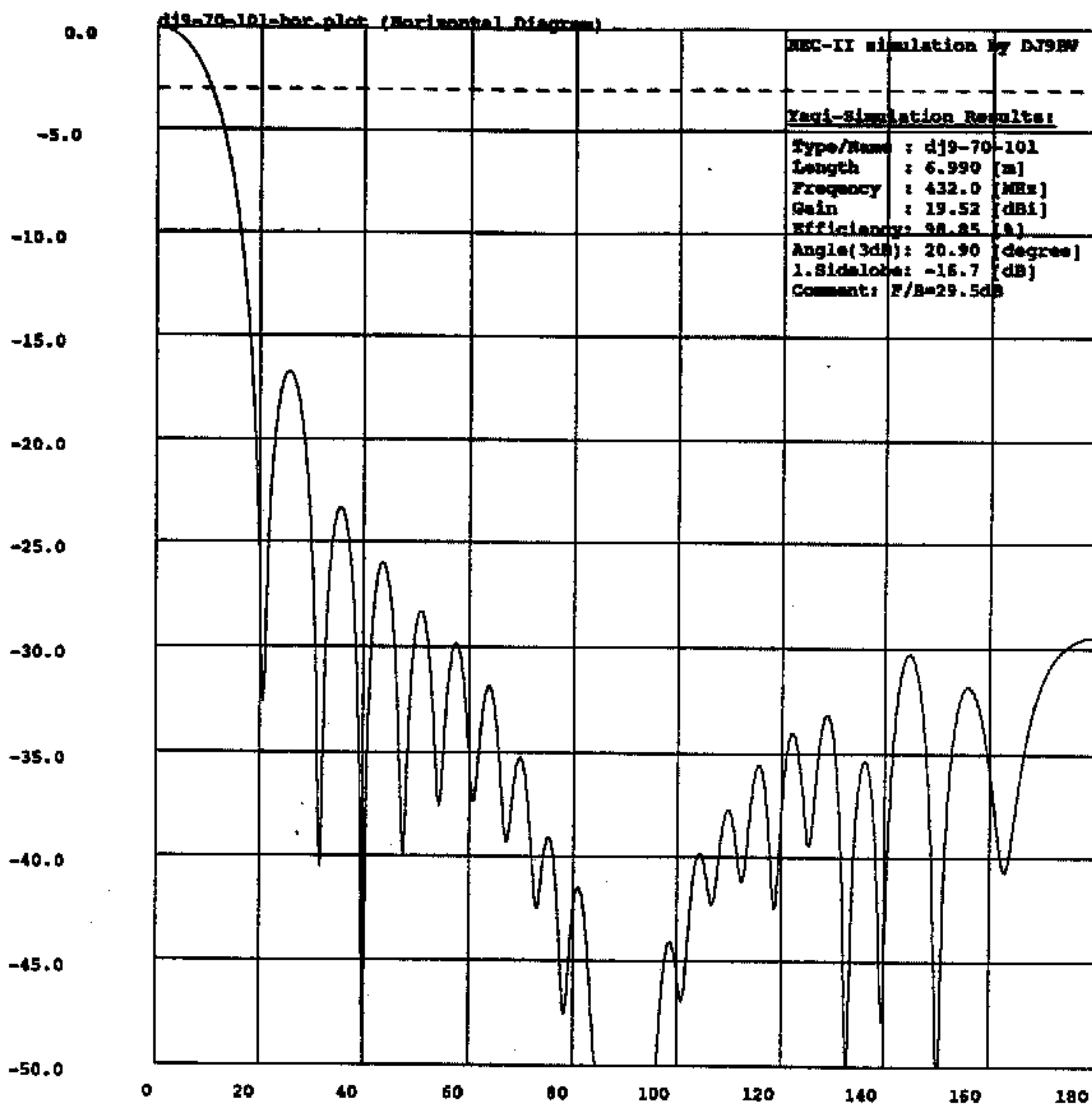
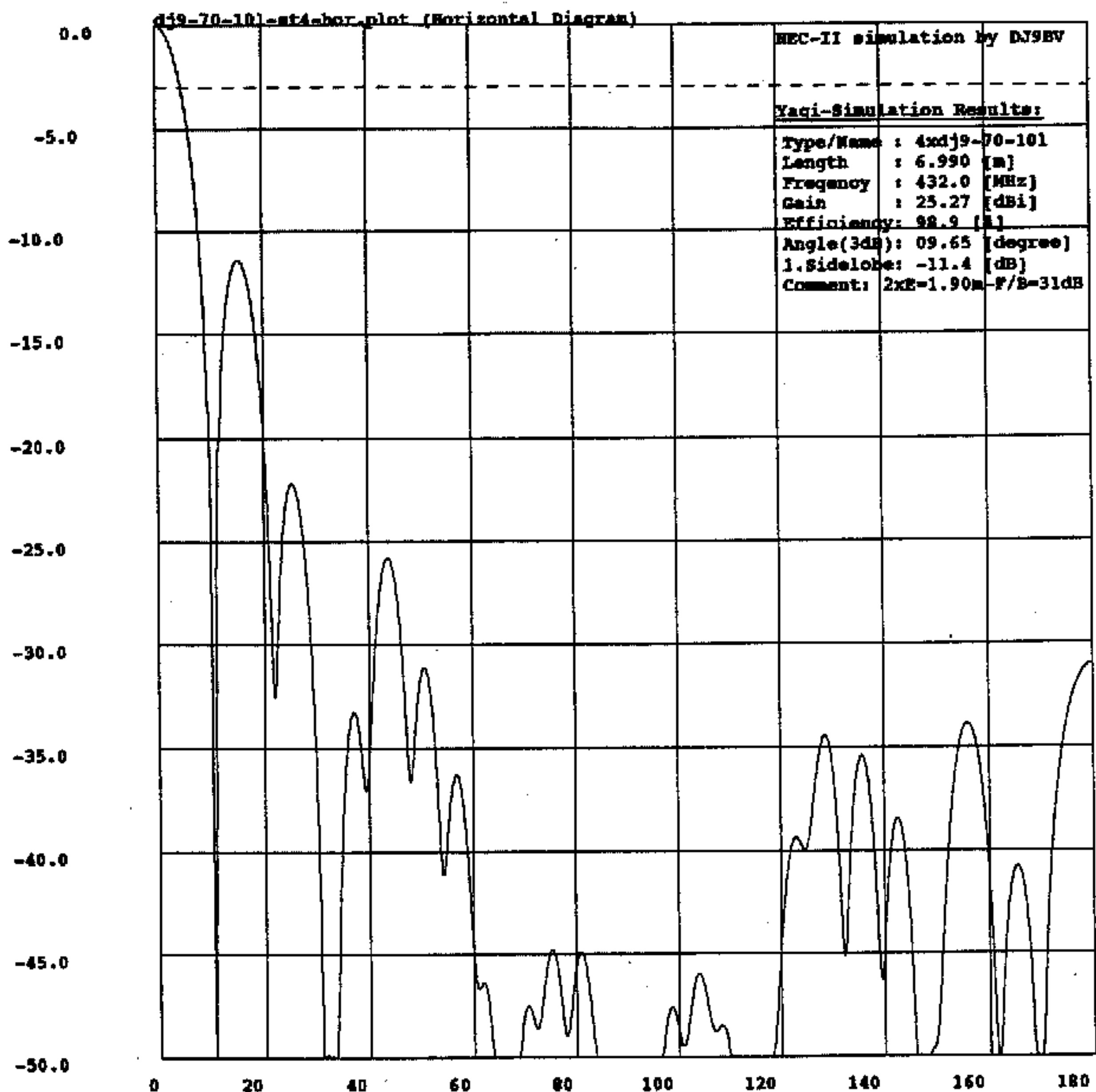


Table 2: BV70-Series Electrical Data @ 432 MHz

Ant.-Type	Gain [dBD]	F/B [dB]	1. Sidel. [dB]	E-Apert. [°]	H-Apert. [°]	Stack. in E [m]	Stack. in H [m]
BV70-7.3L	16.2	24.9	-17.3	23.5	24.5	1.70	1.64
BV70-7.7L	16.4	28.3	-17.2	23.0	24.0	1.74	1.67
BV70-8.5L	16.7	23.8	-16.9	22.3	23.0	1.80	1.74
BV70-10L	17.4	29.5	-16.7	20.9	21.5	1.90	1.86
BV70-11L	17.6	24.7	-16.6	20.2	20.8	1.98	1.93
BV70-13L	18.5	27.1	-16.6	18.7	19.1	2.14	2.09

Remarks: Skin efficiency is typically 99 %, which is equivalent to 3 K noise temperature. Baluns may introduce up to 0.1 dB additional loss. All values are from NEC-II simulation.



Bild/Figure 4: Horizontal Pattern of 4 x BV70-10L

1.3 Konstruktion

Die Konstruktion der Yagis wird wie in dem Artikel über 144 MHz Yagis ([5]) beschrieben vorgenommen. Die Elementlängen und -abstände sind in Tabelle 3 angegeben. Die Dipolkonstruktion wird wie in [10] gezeigt ausgeführt (Abmessungen Bild 5). Der Aufbau des Reflektors kann in Bild 6 ersehen werden.

1.4 Stacking

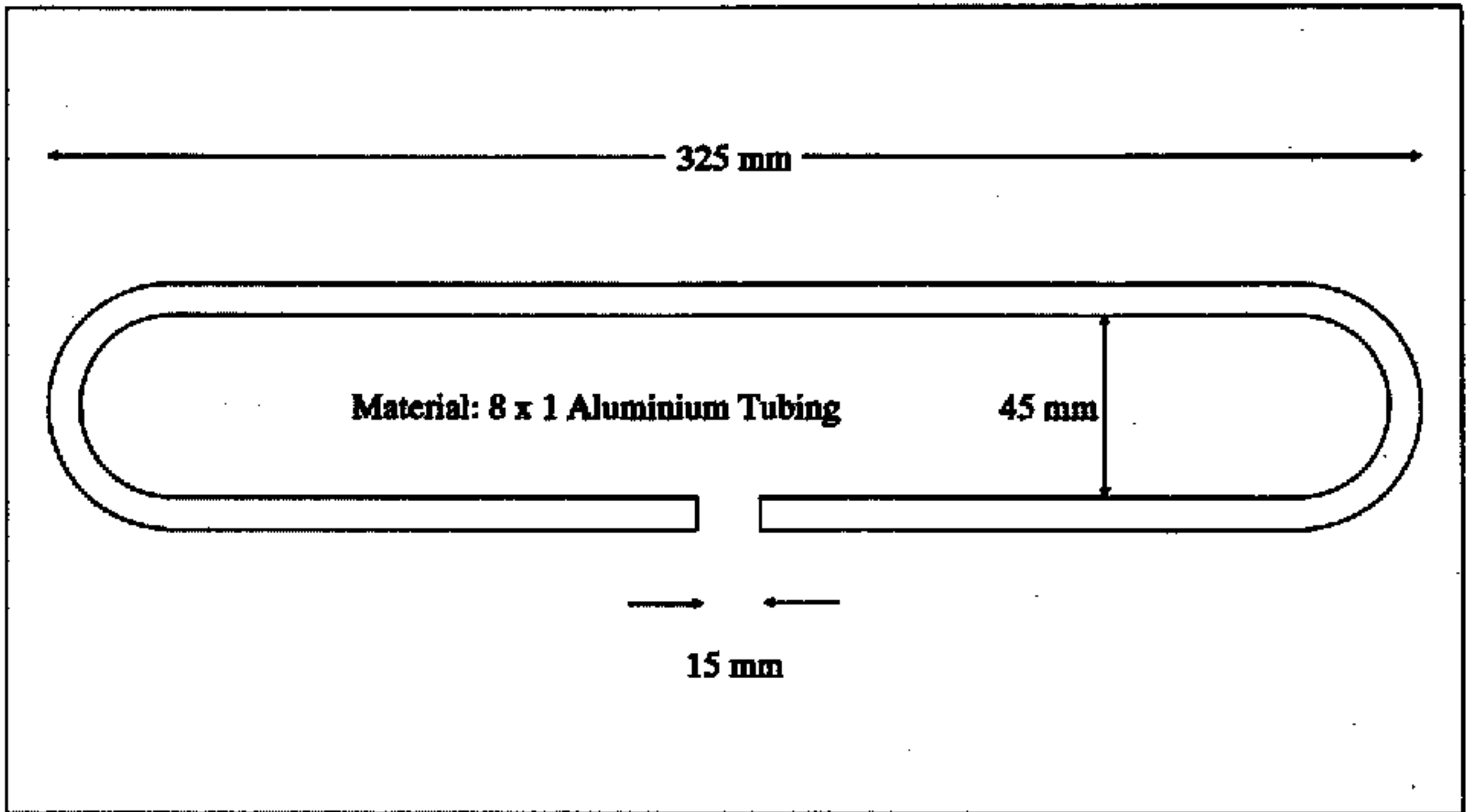
The stacking distances shown in the table 'electrical data' are for optimum gain. Stacking gain is about + 2.9 dB for a pair and stacking sidelobes are down - 11.5 dB. This can be seen in Figure 4, which shows the pattern for 4 times DJ9-2-4.0 with a stacking gain of 5.9 dB, stacking sidelobes of - 11.5 dB and a

Table 3: Mechanical Dimensions BV70 for 20 mm Boom

Element	Length [mm]	Distance [mm]	Position [mm]	Remark
Reflector	340 400	0	0	4-er Reflector
Driven Element	325	130	130	Folded Dipole
Dir. 1	312	55	185	
Dir. 2	306	125	310	
Dir. 3	302	150	460	
Dir. 4	299	175	635	
Dir. 5	297	195	830	
Dir. 6	294	210	1040	
Dir. 7	291	220	1260	
Dir. 8	287	230	1490	
Dir. 9	287	240	1730	
Dir. 10	287	250	1980	
Dir. 11	283	260	2240	
Dir. 12	283	270	2510	
Dir. 13	283	280	2790	
Dir. 14	280	280	3070	
Dir. 15	280	280	3350	
Dir. 16	280	280	3630	
Dir. 17	277	280	3910	
Dir. 18	277	280	4190	
Dir. 19	277	280	4470	
Dir. 20	275	280	4750	
Dir. 21	275	280	5030	BV70-7.3L
Dir. 22	275	280	5310	BV70-7.7L
Dir. 23	272	280	5590	
Dir. 24	272	280	5870	BV70-8.5L
Dir. 25	272	280	6150	
Dir. 26	269	280	6430	
Dir. 27	269	280	6710	
Dir. 28	269	280	6990	BV70-10L
Dir. 29	269	280	7270	
Dir. 30	267	280	7550	BV70-11L
Dir. 31	267	280	7830	
Dir. 32	267	280	8110	
Dir. 33	267	280	8390	
Dir. 34	267	280	8670	
Dir. 35	267	280	8950	
Dir. 36	265	280	9230	BV70-13L

Remarks:

- Boom correction of 5 mm for insulated mounting of elements through a 20 mm boom is included. For larger booms add +1 mm for 25 mm boom and + 2mm for 30 mm boom diameter.
- For thicker elements, i.e. for 3/16" = 4.8 mm or 5 mm diameter, subtract 2mm from all element lengths.

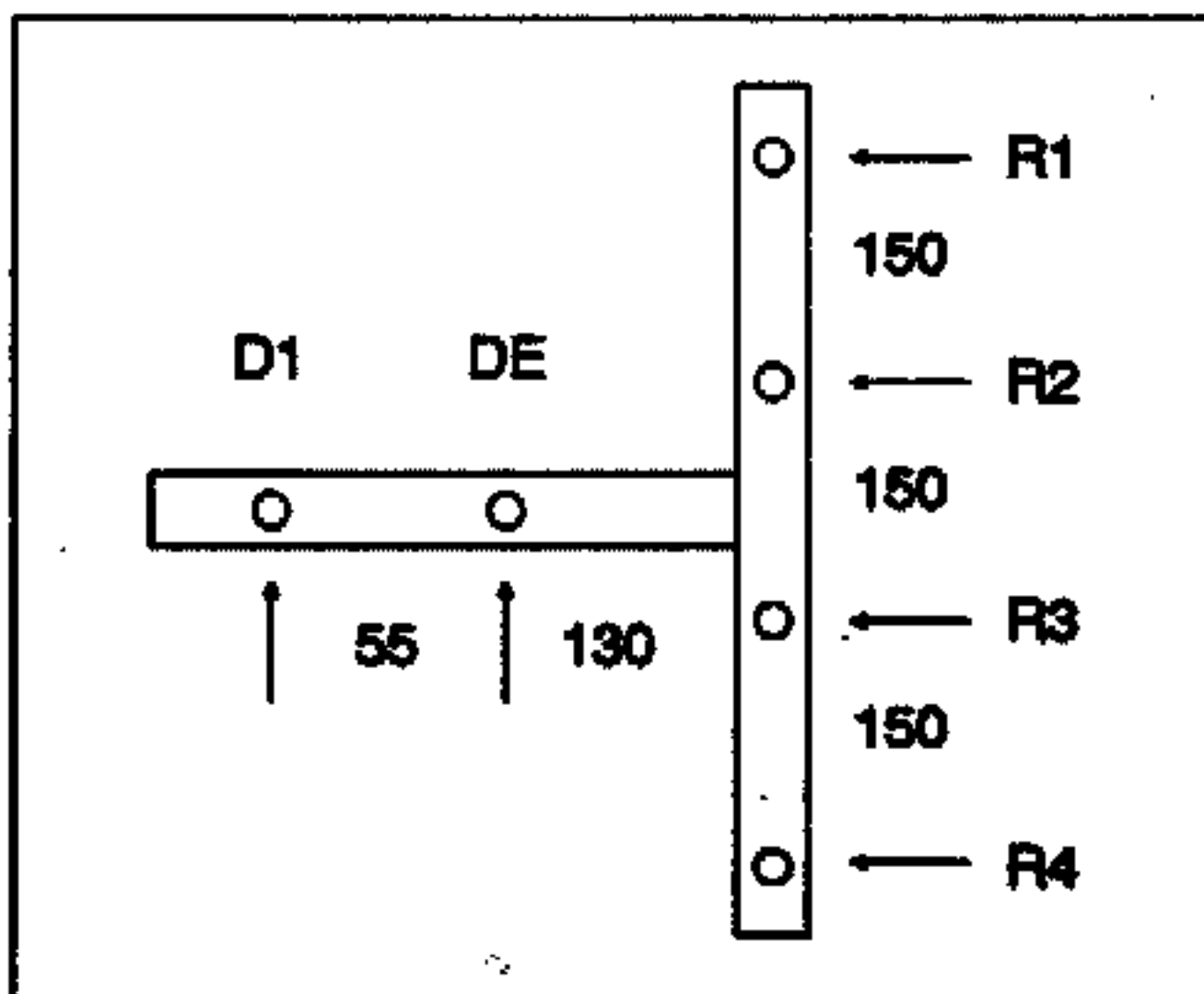


Bild/Figure 5: Dimensions of folded dipole for BV70

total gain of 20 dBD. The range of valid stacking distances is between 80 and 105 percent of those values. Stacking 80 % of D_{opt} let stacking gain drop to 2.5 dB with about -20 dB stacking sidelobes. On the other hand overstacking with 105 % of D_{opt} provides some 0,05 to 0,1 dB more gain with -10 dB stacking sidelobe.

1.4 Stockung

In der Tabelle 2 "Electrical Data" sind für alle Antennen die optimalen Stockungsabstände angegeben. Diese Abstände ergeben für beliebige Gruppen (2,3,4 usw.) den maximalen Gewinn. Dabei sind die



Bild/Figure 6: Reflector-Arrangement for BV-Series

Stockungszipfel ca. -11,5 dB unterdrückt und der Stockungsgewinn beträgt ca. 2,8 dB pro Verdopplung. Das kann man sehr schön in Bild 4 erkennen, welches das Diagramm für eine 4-er Gruppe von BV-70- 10λ zeigt. Der Stockungsgewinn beträgt 5,75 dB und der Gesamtgewinn 23,1 dBD. Der zulässige Bereich für den Stockungsabstand beträgt zwischen 80 und 105 % des in der Tabelle angegebenen Abstandes. Bei dem angegebenen Abstand D_{opt} ist der Stockungsgewinn ca. 2.8 dB pro Verdopplung bei ca. 11,5 dB unterdrücktem 1. Stockungszipfel. Geht man auf 80 % von D_{opt} , so sinkt der Gewinn auf 2,5 dB bei ca. -20 dB Zipfel. Bei 105 % kann der Gewinn noch um ca. 0,05 dB steigen bei -10 dB Nebenzipfel.

2. Description of OPT70-Series

2.1 Design

Trying to optimize further by dropping the DL6WU constraint of 50 Ω feed impedance resulted in the OPT70-series of yagis. This process took place during the year 1987 (see results in [1]) and has been performed in a two step approach. First a fast, but not so accurate antenna simulation program was used to find the direction of meaningful change. This program has been programmed by the author and uses the simple matrix inversion and element current model of W2PV ([11]). First trials with an automatic steepest gradient search turned out to be rather useless and misleading. At last a careful optimisation by 'hand' by calculating the partial derivatives of the goal function in respect to element lengths and changing dimensions by obeying electrically 'senseful' constraints turned out as the key to success. The crude W2PV program gave only rough results about gain and - even more important - did not cover the influence of skin losses on the gain versus frequency characteristic. Therefore all candidates for improvements had to be verified on the NEC-II mainframe simulation program. The overall effort took some hundred of hours CPU-time on a fast SUN 3/160-Workstation.

The OPT70-series gives considerably more gain and also more gain increase for increasing boomsize than the WU-design, but shows somewhat higher internal losses. Input impedance is about 33 Ω . Gain increase for doubling the boom size is 2.75dB, which is a significant increase compared to DL6WU's design. It should be mentioned that the theoretical limit is 3 dB per doubling.

The OPT-design has the following characteristics:

- Ca. 33 Ω impedance at feedpoint of yagi.
- Modular design allows construction of yagis with any length between 6 λ and 13 λ with monotonic increase of gain at a rate of 2.75 dB for each doubling in boom size.
- Low internal losses because of high impedance (Typically 5 K for 4 mm elements made from aluminium).
- Good pattern and stacking behaviour gives best G/T (See Figure 9) currently available for a given size.

As a help for a construction decision it should be made clear that the BV-series gives very good performance in gain and G/T together with insensitivity against construction tolerances and bad weather. Also a simple folded dipole suffices as driven element. In contrary OPT70-series while giving even better performance (some tenth's of dB) is more critical because being highly optimized. Tuning is such that gain peak occurs at 433 MHz compared to 437 MHz for the BV-series.

2.1 Design

Um die BV-Serie, die als DL6WU-Design konzipiert wurde, noch weiter zu verbessern, wurde die Bedingung einer Eingangsimpedanz von 50 Ω aufgegeben. Die Entwicklung der OPT70-Serie wurde während des Jahres 1987 (siehe Ergebnisse in [1]) durchgeführt. Ein zweistufiges Verfahren der Optimierung bestand darin, zuerst mit einem schnellen, aber ungenauen Simulationsprogramm nach W2PV ([11]) herauszufinden, in welche Richtung die Dimensionen der Antenne verändert werden mussten. Damit wurden Kandidaten für einen zweiten Schritt, die Design-Verifikation, generiert. Diese Design-Verifikation wurde mit dem NEC-II Simulationsprogramm auf einer schnellen SUN 3/160 Workstation durchgeführt. Das erste Verfahren nach W2PV wurde vom Verfasser programmiert und mit einem 'Steepest Gradient' Verfahren zum Auffinden des Maximum einer Zielfunktion kombiniert. Das erwies sich als

völlig untauglich und irreführend, da zahllose Nebenmaxima die automatische Suche sofort in die Irre führten. Stattdessen wurde nach Berechnung der partiellen Ableitungen der Zielfunktion die Optimierung per Hand durchgeführt und die Änderungen an der Geometrie unter Beachtung von Hintergrundwissen über die Funktionsweise von Yagis durchgeführt. Das stellte sich in der Tat als Schlüssel zum Erfolg heraus. Die aus der ersten Stufe gewonnenen Kandidaten für erfolgversprechende Geometrien mussten noch durch NEC-II Simulation verifiziert werden, da hier die Genauigkeit erheblich besser war und - besonders wichtig - auch die SKIN-Verluste gerechnet werden können, die eine Yagi in der Nähe des Optimums schnell 'umkippen' lassen können. Insgesamt mussten einige hundert Stunden CPU-Zeit und ein bißchen

Nachdenken aufgewendet werden.

Die OPT70-Serie hat mehr Gewinn und auch einen größeren Gewinnanstieg per Längenverdopplung des Booms als die BV-Serie. Dieser Gewinnanstieg ist 2,75 dB pro Verdopplung der Boomlänge

Table 4: Gain @ F for OPT70-7.7L

	431	432	433	435	436
Gain [dBD]	16.6	16.65	16.65	16.6	16.6
F/B [dBD]	26.0	25.8	24.4	23.6	22.8

(Siehe Bild 1), was einen schönen Zuwachs gegenüber den üblichen 2,35 dB bedeutet. Das wird erkaufte durch eine kleinere Eingangsimpedanz und durch etwas höhere innere Verluste. Die Diagramme sind von vergleichbarer Güte. Insgesamt kann man die Eigenschaften wie folgt charakterisieren:

- Eingangsimpedanz niedrig 33Ω
- Modulares Design erlaubt Wahl der Baulänge zwischen 5m und 9m mit monotonem Gewinnanstieg mit 2,75 dB pro Oktave
- Interne Verluste sind ca. 5K bei Alu-Elementen mit 4 mm Durchmesser
- Gutes, nebenzipfelarmes Diagramm und geringe gegenseitige Beeinflussung ergeben das beste G/T-Verhältnis von Yagi-Gruppen, das dem Verfasser zur Zeit bekannt ist.

Als Hilfe zur Entscheidung sollte klar sein, daß bereits die BV-Serie nach DL6WU hervorragende Antennen darstellen, wie man leicht in den Bildern 1 und 9 erkennen kann. Ihre Vorteile sind Speisung mit einem einfachen Faltdipol, Unempfindlichkeit gegen Nässe und mechanische Toleranzen. Diese Vorteile hat die OPT-Serie nicht. Sie ist schwierig zu speisen, empfindlicher gegen Nässe und Toleranzen, da das Gewinnmaximum schon bei 433 MHz liegt.

Table 5: OPT70-Series Electrical Data @ 432 MHz

Ant.-Type	Gain [dBD]	F/B [dB]	1. Side. [dB]	E-Apert. [°]	H-Apert. [°]	Stack.-Dist. in E [m]	Stack.-Dist. in H [m]
OPT70-7.7L	16.65	25.3	-16.8	22.2	22.4	1.80	1.75
OPT70-8.5L	17.0	28.0	-16.4	21.2	21.8	1.90	1.84
OPT70-11L	18.0	25.9	-16.0	28.9	19.3	2.11	2.07
OPT70-13L	18.75	23.8	-15.2	17.3	17.6	2.31	2.27

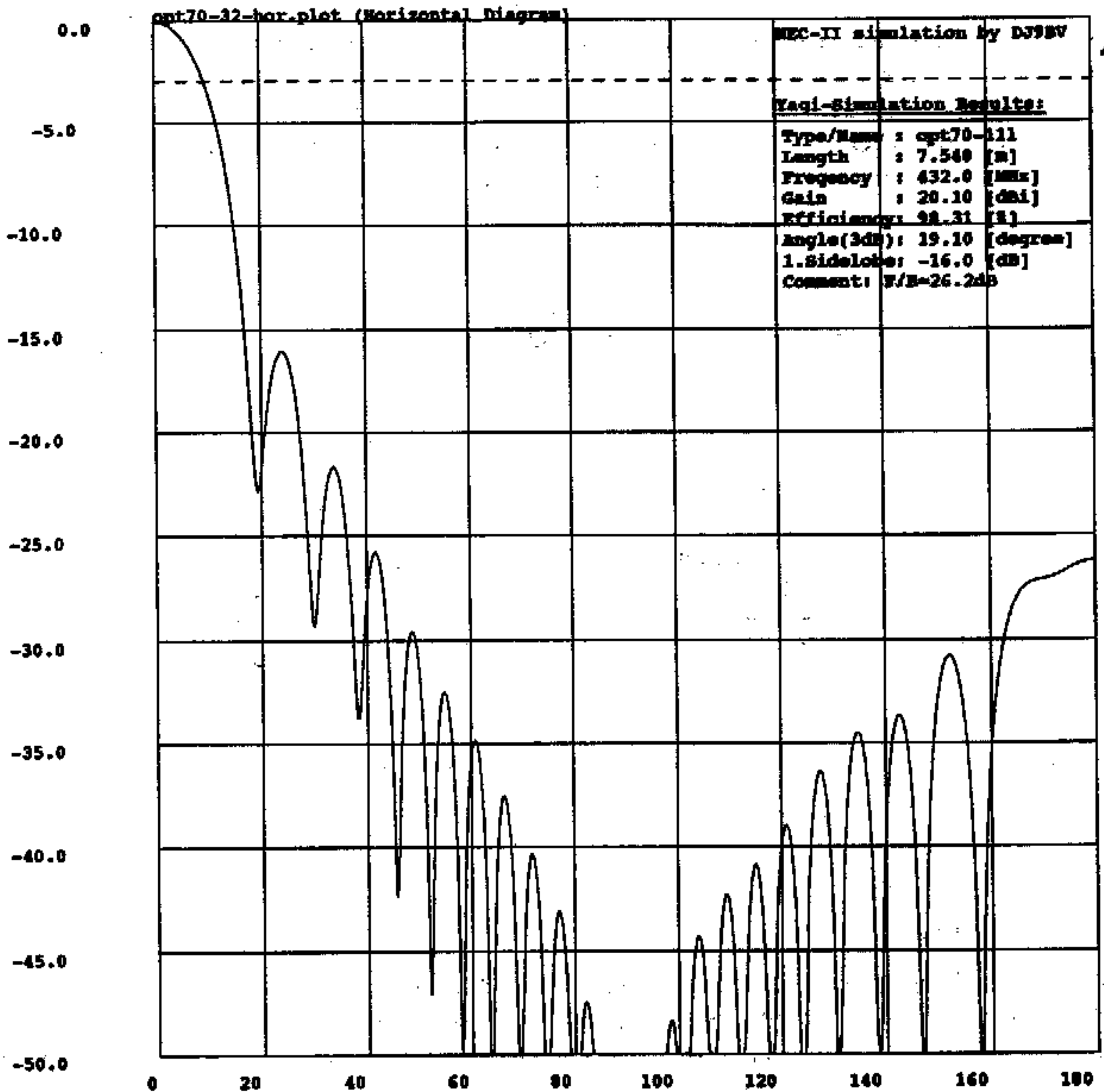
Remark: Skin efficiency is typically 98.3 %, which is equivalent to 5 K noise temperature. Additional balun may introduce up to 0.1 dB loss. All values are from NEC-II simulation.

Table 6: Mechanical Dimensions OPT70 for 20 mm Boom

Element	Length [mm]	Distance [mm]	Position [mm]	Remark
Reflector	348	0	0	Single Reflector
Driven Element	325	139	139	Special Dipole
Dir. 1	319	57	196	
Dir. 2	312	115	311	
Dir. 3	307	149	460	
Dir. 4	302	174	634	
Dir. 5	298	193	827	
Dir. 6	296	208	1035	
Dir. 7	294	221	1256	
Dir. 8	292	232	1488	
Dir. 9	290	242	1730	
Dir. 10	288	251	1981	
Dir. 11	287	259	2240	
Dir. 12	286	267	2507	
Dir. 13	285	273	2780	
Dir. 14	284	280	3060	
Dir. 15	283	280	3340	
Dir. 16	282	280	3620	
Dir. 17	281	280	3900	
Dir. 18	280	280	4180	
Dir. 19	279	280	4460	
Dir. 20	278	280	4740	
Dir. 21	278	280	5020	
Dir. 22	278	280	5300	OPT70-7.7L
Dir. 23	277	280	5580	
Dir. 24	277	280	5860	OPT70-8.5L
Dir. 25	277	280	6140	
Dir. 26	277	280	6420	
Dir. 27	276	280	6700	
Dir. 28	276	280	6980	
Dir. 29	276	280	7260	
Dir. 30	276	280	7540	OPT70-11L
Dir. 31	276	280	7820	
Dir. 32	275	280	8100	
Dir. 33	275	280	8380	
Dir. 34	275	280	8660	
Dir. 35	275	280	8940	
Dir. 36	275	280	9220	OPT70-13L

Remarks:

- Boom correction of 5 mm for insulated mounting of elements through a 20 mm boom is included. For larger boom add +1 mm for 25 mm boom and + 2mm for 30 mm boom diameter.
- For thicker elements, i.e. for 3/16" = 4.8 mm or 5 mm diameter, subtract 2mm from all element lengths.



Bild/Figure 7: Horizontal Pattern of OPT70-11L

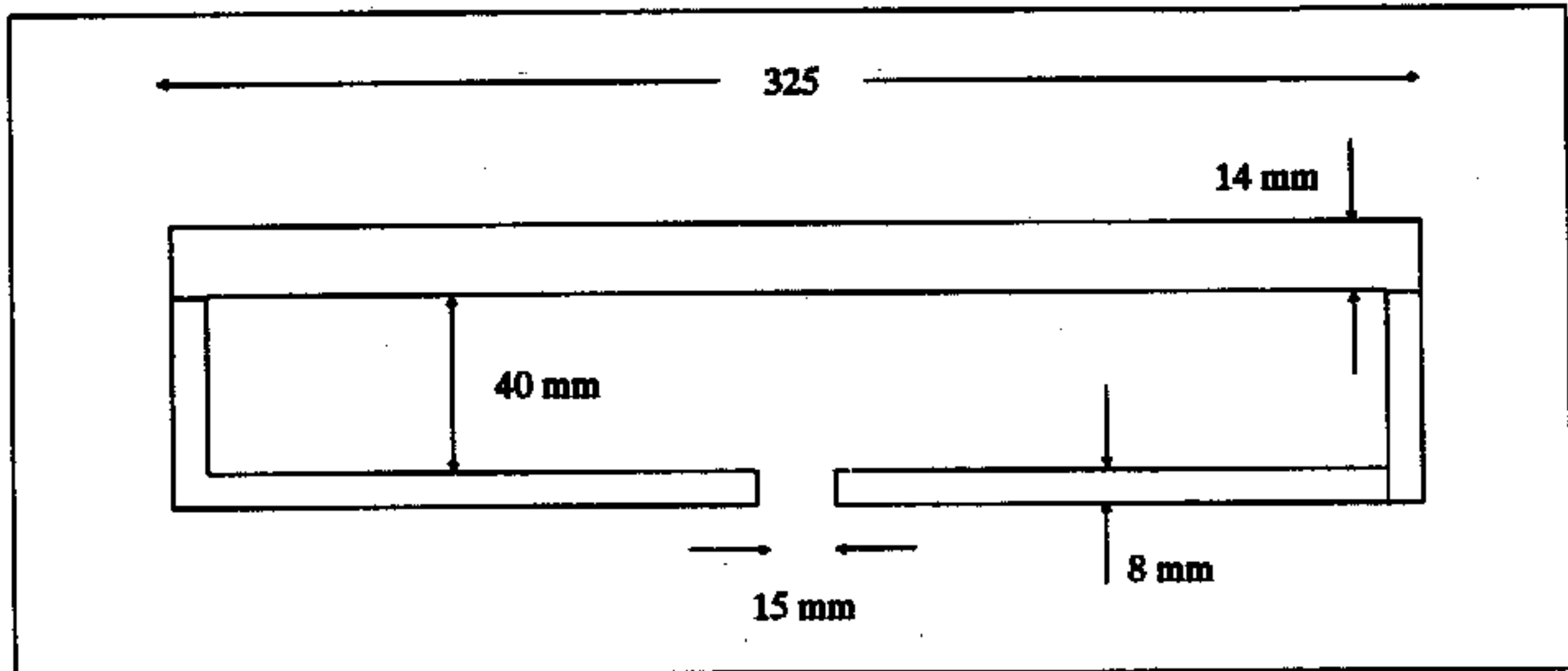
2.2 Performance Data

Table 5 shows gain versus frequency characteristic. Gain peak is at 433 MHz. Figure 7 shows pattern of OPT70-11L, which is mounted as a 4-yagi array at the authors location. Figure 9 shows G/T-performance, which is not so much higher as for the BV-Series in spite of the higher gain. This is because of partial cancellation of the gain increase with simultaneous increase in internal losses.

2.3 Elektrische Daten

Tabell 5 zeigt den Frequenzgang mit dem Gewinnmaximum bei 433 MHz. Bild 7 zeigt das Diagramm der OP70-11L, die als 4-er Gruppe beim Verfasser installiert ist. Bild 9 zeigt das G/T-Verhältnis für 4-er

Gruppen von Yagis. Dieses ist für die OPT nicht wesentlich höher als für die BV, da sich der Gewinnanstieg teilweise durch die höheren inneren Verluste kompensiert. Dieses Diagramm, das für den EME-er die wichtigste Information darstellen sollte, weil es seine erreichbare Empfangsleistung aufzeigt, ist in ([4]) eingehend erklärt. Es zeigt, daß Gewinnoptimierung allein nicht zu einer Verbesserung führt. Weiterhin schneiden kommerzielle Designs nicht besonders gut ab. Hohe innere Verluste, bedingt z.B. durch kritisches Design (TONNA21, CC424B) oder durch verlustreiche Materialien für die Elemente (z.B. Stahl), erniedrigen drastisch das G/T-Verhältnis, was direkt den Unterschied in der Empfangsleistung in dB ausdrückt.



Bild/Figure 8: Transforming Folded Dipole for OPT70

2.3 Construction

Construction is as in chapter 1.3. Only a special folded dipole has to be constructed (Figure 8). VSWR should be below 1.3 on 432MHz. Even lower VSWR can be achieved with a T-Match dipole¹, but may be more sensitive for corrosion. Reflector is a simple single reflector and mounted like a director. Deviations from the element length given should be smaller than +/- 1mm.

2.3 Konstruktion

Die Konstruktion ist, wie in Kap. 1.3 beschrieben. Als Dipol dient ein spezieller, transformierender Faltdipol nach Bild 8. Das VSWR muß kleiner als 1,3 auf 432MHz sein. Für noch bessere Anpassung

¹ *In contrary to a common belief of amateurs, the special form or construction of the feeder in a long yagi is not relevant for gain and pattern of this yagi. The feed structure - wether some simple dipole or anything more complex - has the only purpose to match the input impedance of the yagi defined by the director string to the impedance of the feeder. Whatever structure one can imagine is appropriate, when it achieves this target - indication is reasonable VSWR - . There are no secrets with driven elements, as commercial suggestions as for example 'Quad Feeders' with advertised super-gain did promise some time ago. Personally I prefer the mechanically simple form of a folded dipole.*