

Effective Noise Temperatures of 4-Yagi-Arrays for 432 MHz EME

Rainer Bertelsmeier

DJ9BV

Gluecksburger Str. 20
2 Hamburg 50

Copyright © 1987 by R. Bertelsmeier

1. Antenna-Simulation

After having created own software for simulation of single and stacked yagi antennas, which was based on the simple Lawson model [8], by a lucky accident professional software (NEC-II from LLL [6]) was made available. This software has been designed for simulation of complex antenna structures. When simulating yagi structure NEC-II calculates the radiation pattern, power or directive gain, efficiency dependent on the conductivity of the material, input impedance of the feed structures and if needed the interaction of the antenna structure with an imperfect conducting ground plane.

The applied method of moments for the numerical solution of the integral equations seems to achieve the following accuracy of the simulated radiation pattern:

Gain: $\pm 0,2\text{dB}$

Sidelobes:

$\pm 0,5\text{db}$ up to -20 dB .

$\pm 1,0\text{db}$ from -20 to -25 dB .

$\pm 2,0\text{db}$ from -25 to -30 dB .

Undetermined accuray $< -30\text{ dB}$.

By these characteristic numbers it seems to be an adequate tool for simulating yagi antennas. The validation of the software was done by comparing the simulated pattern with measurement data supplied by G. Hoch, DL6WU, who has done quite a lot of measurements and experimentation with yagi antennas during the past 20 years.

The NEC-II software originally had been written in FORTRAN-IV for a CDC 7600 computer. It has been adapted to FORTRAN77 on a SUN 3/160 workstation running under the UNIX operating system. An interface to a plot utility has been added. The floating point performance of this workstation is comparable to a VAX-780 computer. The modified version of NEC-II allows structures with up to 1000 segments, which is sufficient for roughly 100 yagi elements. Memory requirements amount to 8 MBytes of memory for nonsymmetrical interaction matrices. CPU-time for a full simulation (1000 segments) is about 150 minutes. A single yagi with 30 elements can be simulated in 12 minutes. Because of the heavy demand on speed and memory of the used computer the main application of NEC-II is the verification of a given yagi design rather than optimisation.

2. Noise temperature of antenna systems

The effective noise temperature of antennas which "see" different radiation sources with their pattern is a very important property, because it limits the achievable system temperature of the complete receiving system. This property can be measured by indirect methods only. Noise temperature is dependent on the radiation pickup of the main lobe in comparison to the pickup by

the sidelobes. For finite conductivity of the elements the resulting skin losses will result in additional thermal noise.

Application of simulation software not only allows the calculation of the total noise temperature caused by the different effects but also the relative judgement of these effects. For the case of yagi arrays even the interaction of the antennas will be covered.

The derived measure of G/T-ratio is a very suitable quality feature to compare different yagi constructions and different stacking schemes for their value for EME-applications. Especially the latter criterion has been subject of many, but mostly wrong, speculations of amateurs in the EME-community.

3. Definition of antenna noise temperature

The definition of the "internal" noise temperature is ([1]):

$$T_A = \frac{\iint T(\theta, \phi) P(\theta, \phi) d\Omega}{\iint P(\theta, \phi) d\Omega} \tag{1}$$

T_A : "internal" noise temperature (the total amount of radiation received by the complete pattern of the antenna).

$T(\theta, \phi)$: Temperature of radiation from the given angle

$P(\theta, \phi)$: Power pattern

The internal losses (skin) add to the effective noise temperature:

$$T_A = \frac{(T_A + (L-1)T_0)}{L} \tag{2}$$

T_A : Noise temperature of the antenna at input connector

L : Loss of antenna ($L \geq 1$)

T_0 : Reference temperature (290 K)

4. Assumptions

The assumed elevation angle of the simulated yagi arrays is 30 degrees. That's a typical elevation angle for EME. For this angle the first stacking sidelobe lies in the forward zone. Diagrams are assumed to be symmetrical. All values for $P(\theta, \phi)$ will be calculated by a NEC-II simulation. The step size for the integration is 3 degrees in ϕ and θ planes respectively. The definition of the coordinate system is given by Figure 1.

The integration is separately calculated for three different regions (Figure 2):

Forward: (θ : 60..90 degrees; ϕ : 0..90 degrees).

$$A_v = \int_{\phi=0}^{90} \int_{\theta=60}^{90} P(\theta, \phi) d\Omega$$

Sidelobe: (θ : 0..60 degrees; ϕ : 0..180 degrees).

$$A_2 = \int_{\phi=0}^{180} \int_{\theta=0}^{60} P(\theta, \phi) d\Omega$$

Backward: (θ : 60..90 degrees; ϕ : 90..180 degrees).

$$A_r = \int_{\phi=90}^{180} \int_{\theta=60}^{90} P(\theta, \phi) d\Omega$$

DJ9BV : Effective Noise Temperatures of 4-Yagi-Arrays for 432 MHz EME

The total surface integral sums up to:

$$A = A_v + A_z + A_r$$

The temperature function $T(\theta, \phi)$ will be assumed as two constant values:

Sky: $T_{sky} = 15 \text{ K}$

Earth: $T_{earth} = 290 \text{ K}$

The value of 290 K is valid for dry, non-reflective earth. For reflective earth the temperature yields $T_{earth} = 200 \text{ K}$ and for sea water even a value of 150 K can be possible.

With two constant values for $T(\theta, \phi)$ the integral value can easily be factored:

$$T_A = \frac{A_v T_{sky}}{A} + \frac{A_z T_{sky}}{2A} + \frac{A_z T_{earth}}{2A} + \frac{A_r T_{earth}}{A}$$

So we arrive at:

$$T_A = T_v + T_z + T_r \tag{3}$$

with

"Forward temperature": $T_v = \frac{A_v T_{sky}}{A}$

"Sidelobe temperature": $T_z = \frac{A_z \cdot (T_{sky} + T_{earth})}{2A}$

"Backward temperature": $T_r = \frac{A_r T_{earth}}{A}$

5. Simulation data

Table 1:

| Effective Noise Temperature of 432 MHz 4-Yagi-Arrays [H-Configuration] @ 30 deg. Elevation (Calculated by DJ9BV) | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|---------------|---------------|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|-------|
| Type | Stacking | | Length [λ] | Gain [dBi] | | Loss [K] | T_z [K] | T_r [K] | T_v [K] | T_A [K] | $\frac{G}{T_A}$ [dB] | Rem. |
| | E [m] | H [m] | | single | array | | | | | | | |
| KLM-16 | 1.64 | 1.58 | 5.2 | 16.3 | 22.4 | 1.5 | 22.7 | 14.9 | 12.0 | 50.9 | 5.3 | *,9 |
| K2RIW-19 | 1.47 | 1.43 | 5.6 | 17.1 | 22.95 | 2.7 | 8.4 | 5.0 | 13.9 | 29.7 | 8.2 | * |
| K1FO-22 | 1.63 | 1.57 | 6.1 | 17.9 | 23.8 | 4.7 | 4.6 | 2.7 | 14.4 | 25.8 | 9.7 | 1 |
| DL9KR-19 | 1.75 | 1.75 | 6.5 | 17.7 | 23.8 | 2.8 | 10.5 | 3.2 | 13.8 | 30.0 | 9.0 | 9,# |
| Tonna-21 | 1.48 | 1.32 | 6.7 | 17.9 | 23.25 | 4.9 | 8.2 | 6.7 | 13.5 | 32.7 | 8.1 | 3,4 |
| Tonna-21 | 1.7 | 1.62 | 6.7 | 17.5 | 23.45 | 5.6 | 12.7 | 13.4 | 13.1 | 43.9 | 7.0 | 2,* |
| Tonna-21 | 1.7 | 1.62 | 6.7 | 17.9 | 23.85 | 4.9 | 8.1 | 6.3 | 13.9 | 32.6 | 8.7 | 3,* |
| Tonna-21 | 1.7 | 1.62 | 6.7 | 17.85 | 23.8 | 4.9 | 10.3 | 3.9 | 13.8 | 32.3 | 8.7 | 3,5,# |
| Cush-424B | 1.57 | 1.27 | 7.6 | 18.05 | 22.9 | 3.9 | 21.0 | 6.2 | 12.6 | 43.1 | 6.5 | 4 |
| Cush-424B | 1.68 | 1.52 | 7.6 | 18.05 | 23.3 | 3.9 | 23.0 | 6.0 | 12.4 | 44.7 | 6.8 | 8 |
| Cush-424B | 1.98 | 1.92 | 7.6 | 18.05 | 24.1 | 3.9 | 19.2 | 5.5 | 12.8 | 40.8 | 8.0 | *,9 |
| OPT70-27 | 1.8 | 1.76 | 7.6 | 18.7 | 24.65 | 4.7 | 3.4 | 2.4 | 14.5 | 24.6 | 10.7 | *,# |
| DL9KR-22 | 1.75 | 1.75 | 7.7 | 18.4 | 24.3 | 2.9 | 9.3 | 1.8 | 14.0 | 27.6 | 9.9 | 7,# |
| DJ9BV-29 | 1.8 | 1.74 | 8.5 | 18.6 | 24.45 | 2.6 | 6.1 | 2.2 | 14.3 | 25.0 | 10.5 | *,# |
| DL6WU-30 | 1.90 | 1.85 | 8.8 | 19.0 | 24.85 | 2.7 | 6.2 | 1.7 | 14.3 | 24.7 | 10.9 | 6,# |
| K1FO-32 | 2.0 | 1.95 | 10.5 | 19.7 | 25.55 | 8.5 | 3.2 | 5.0 | 14.4 | 30.2 | 10.8 | * |
| OPT70-32 | 2.0 | 2.0 | 10.9 | 20.1 | 25.9 | 4.7 | 5.0 | 2.8 | 14.4 | 26.5 | 11.7 | * |

DJ9BV : Effective Noise Temperatures of 4-Yagi-Arrays for 432 MHz EME

Remarks:

- * Optimal stacking according to DL6WU [3]: $D_{opt} = \frac{\lambda}{2 \sin(\phi/2)}$
 ϕ : 3 dB angle in stacking plane.
- # Antenna has multiple reflector (4-er or 8-er)
 1. Stacking like K1FO (identical with optimal distance)
 2. Tonna-21 with unbalanced feed (Recommended by manufacturer!)
 3. Tonna-21 with balanced feed (1:1 Balun)!
 4. Stacking for maximum G/T-ratio according to K1FO [6]
 5. Modification by DK1PZ (4-er reflector) and optimal stacking
 6. Stacking like DL6WU
 7. Stacking like DL9KR
 8. Stacking recommended by Cush-Craft
 9. Stacking Gain > 6 dB indicates possibly suboptimal antenna

6. Evaluation of simulation data

If we look at the values of table 1 we come up with the following conclusions:

1. It seems that the main influence of earth noise pickup does not arise from the backlobe (T_r) but from the sidelobe region (T_z). May be that multiple reflectors are not worth the increased effort because a lower T_r is balanced by according higher values for T_z . A very suggestive example is the modification of the Tonna-21 antenna by a multiple reflector, which was proposed by some amateurs. The improvement, which is observable, is caused by the balun installed at the same time and **not** by the multiple reflector. From this example one can easily conclude an important rule: Never do two modifications at the same time or you will loose the causality!
 In the above case a balun gives 0.4 dB more gain and 10 K less noise temperature but the effect of the multiple reflector is vanishing small.
 To those who might think the Tonna-21 gain figures too high a second comment: The measured figure of ca. 15.2 dBD or 17.35 dBi is plausible. The slight discrepancy of 17.5 - 17.35 = 0.15 dB is probably caused by the construction technique of conductive boom-element mount and the out of band gain maximum at 429 MHz. The Tonna-21 is on the steep falling side of the gain-curve if it is used at 432 MHz above its design frequency. Already slight corrosion or even wet elements will cause a significant further drop in gain.
2. All yagi antennas, which have been designed according to DL6WU ([2],[3],[4]) exhibit very low values for skin losses. Computer based optimisation leads to higher losses. An example is the K1FO-32 with 8.5 K loss temperature.
3. Short yagi antennas have an apparantly higher value for T_A caused by higher side lobe level of these antennas. An exception is the K1FO-22 antenna, which promises low side lobe level.
4. Computer based designs (K1FO-** or DJ9BV-OPT70-**) show up with higher values for the calculated gain. The difference with DL6WU-Yagis is less than 0.6 dB with long antennas and less than 0.3 dB with shorter ones. I think that's an additional proof of the high standard set by Guenter Hoch, DL6WU, by his yagi design procedure.
5. Proposals about so called optimum G/T-stacking of yagis seem to be pure speculation. The simple formula for the optimum stacking distance based on the 3 dB angles of the single antenna published by G. Hoch, DL6WU, provides best results in any case!
 Some examples (Figures 3-6) may serve as an illustration. In the example of the Cush-Craft 424B antenna (Figures 3,4), which has a very poor pattern with strong sidelobes, the table shows the recommended closer stacking (Figure 4) to be worse than the wider

DJ9BV : Effective Noise Temperatures of 4-Yagi-Arrays for 432 MHz EME

stacking based on DL6WU's equation. This type of a high side lobe level antenna has to be stacked **wider** (Figure 4a shows wide DL6WU-stacking superior) and **not** closer to achieve best performance. That's also plausible, because any overlap of the antenna pattern should be avoided. DL6WU's stacking equation automatically compensates for bad, high sidelobe patterns, because a high sidelobe level implies a smaller main lobe for a given gain, which in turn leads to wider stacking.

Clean pattern antennas like the DL6WU-type yagi DL9KR-22 (Figures 5,6) have a low sidelobe level and therefore a wider main lobe for the same gain. This kind of antenna can be stacked closer to achieve maximum gain and best G/T performance.

6. One should not overemphasize the importance of the calculated G/T_A -ratio. In practical systems one has to add the noise temperature of the receiving system including all baluns and cables (50 - 70 K) to get the overall system temperature. Because of the low value of noise temperature of well designed yagis (ca. 25 - 30 K) the difference in the G/T_{sys} -ratio will be less dramatic.

7. Remarks on the validity of simulations

All numbers are generated by model calculations and their validity is just as good as the validity of the underlying model. Any proof of accuracy can and should be made by experiments, i.e. measurements!

To combat possibly wrong beliefs about the value of computer simulations some words about the relevance of simulations:

The accuracy of a simulation is dependent on the simplifications made in the simulation model in comparison to exact theory. The used computer is irrelevant! For the concret case of NEC-II simulation the required current distributions on the elements are computed by the method of moments, which is a first order approximation of the governing Pocklington-type integral equations. The accuracy of the calculated current distributions is about 1 %. The convergence properties of the method of moments is proportional to the granularity of the model structure, i.e. proportional to the number of segments used to model one element of the real antenna structure. Of course the granularity has a practical lower bound, because the CPU-time is proportional to the third power of the number of segments and the memory size to the second power respectively.

The resulting electrical field strength is calculated from the current distribution by an approximation based on the simplified "thin wire" model for the segments. This simplification has neglectable effects on the accuracy of the main lobe, but significant effects on the accuracy of the sidelobe calculation. Sidelobes, which are lower than -30 dB under the main lobe, can simply be viewed as artefacts. On the contrary the accuracy of NEC-II is two magnitudes better than the accuracy of simple simulations based on the Lawson model [8] for example.

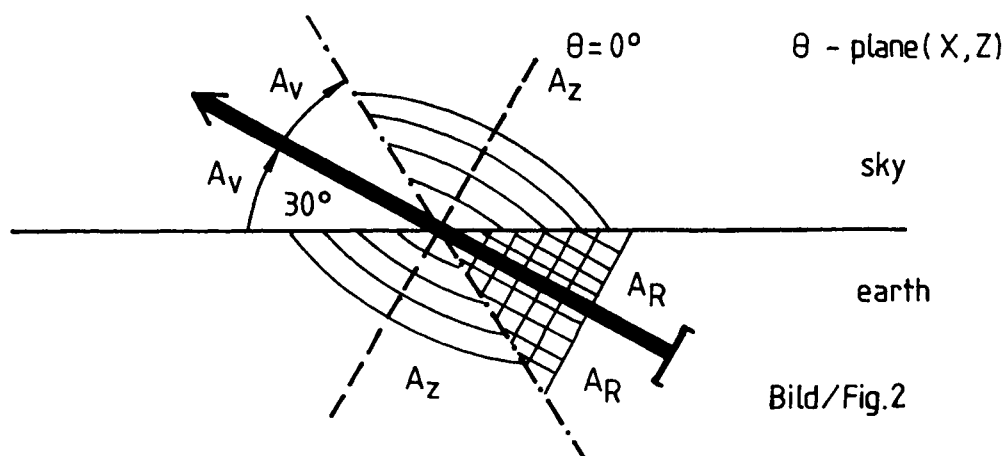
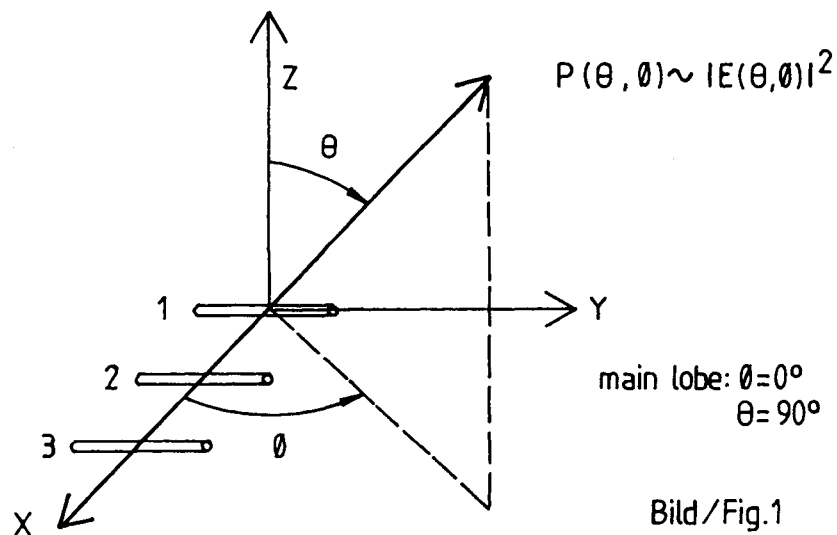
Programs which have been derived from NEC-II like MININEC are probably worse in calculating accurate sidelobes because they use a very simple pulse function approximation to model the current distribution on the segments. Therefore a larger number of segments per real antenna element is required for comparable accuracy, but will be limited by the convergence properties of the algorithm. On the other side too short segments are not possible because of the "thin wire" model used for the pattern calculation. In this case NEC-II offers the option of an "extended thin wire" model which is able to cope with short, electrically "thick" segments. More important for the application of calculation of effective noise temperatures MININEC cannot calculate the internal losses of an antenna structure.

Last but not least: The qualified adaption of NEC-II to the case of yagi simulation was only possible by help of Guenter Hoch, DL6WU. He gave very kind support by providing all the measurement data and many helpful discussions. Thanks also to K1FO, DJ6MB and DL1LB, who supplied the mechanical data of some yagi antennas.

DJ9BV : Effective Noise Temperatures of 4-Yagi-Arrays for 432 MHz EME

8. References

- [1] E.C. Jordan, "Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computer, and Communications", Howard Sams, Indianapolis 1986, pp. 32-7
- [2] G. Hoch, "Wirkungsweise und optimale Dimensionierung von Yagi-Antennen", UKW-Berichte 17(1977), Heft 1, S.27-36
- [3] G. Hoch, "Mehr Gewinn mit Yagi-Antennen", UKW-Berichte 18(1978), Heft 1, S.2-9
- [4] G. Hoch, "Extrem lange Yagi-Antennen", UKW-Berichte 22(1982), Heft 1, S.3-11
- [5] S. Powlisken, "Stacking Yagis is a science", HAM RADIO 5(1985), pp.18-35
- [6] G.J. Burke, A.J. Pogio, "Numerical Electrodynamics Code (NEC) - Method of Moments", NOSC TD 116, Vol. 1, 1981, San Diego, USA
- [7] A.J. Julian, J.C. Logan, J.W. Rockway, "MININEC: A Mini-Numerical Electrodynamics Code", NOSC TD 516, 1982, San Diego, USA, pp.21-31
- [8] J.L. Lawson, "Design of Yagi Antennas", HAM RADIO 1(1980), pp.20



1. Antennen-Simulation

Nach der Entwicklung von eigener Simulations-Software zur Simulation von Yagi's (YAGI) und Yagi-Gruppen (STOCK) wurden durch glückliche Umstände professionelle Programme (/6/:NEC-II von LLL) zur Simulation von komplexen Antennengebilden verfügbar. Diese Software gestattet u.a. auch die Modellierung von Yagi-Antennen. Berechnet werden können das Richtdiagramm, der Gewinn, die Eingangsimpedanz, der Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Leitfähigkeit des Materials, Erregerstrukturen mit symmetrischen Leitungen und die Beeinflussung durch Boden mit endlicher Leitfähigkeit.

Die verwendete Methode der Momente zur Lösung der Integralgleichungen scheint bei geeigneter Wahl der Modellstruktur folgende Genauigkeiten für das Diagramm zu erlauben:

Gewinn:

$\pm 0,2 \text{ dB}$

Nebenzipfel:

$\pm 0,5 \text{ dB}$ bis -20 dB .

$\pm 1,0 \text{ dB}$ von -20 bis -25 dB .

$\pm 2,0 \text{ dB}$ von -25 bis -30 dB .

Undefiniert $< -30 \text{ dB}$.

Damit ist ein brauchbares Werkzeug zur Evaluation von Yagi-Antennen gegeben. Die Verifikation des Programms erfolgte durch Vergleich mit Meßdaten von Günter Hoch, DL6WU, der wohl die umfangreichste Sammlung von Diagrammen und Meßdaten von Amateur-Yagi-Antennen erarbeitet hat.

Die Software, die für einen Großrechner vom Typ CDC7600 entwickelt worden ist, wurde auf eine SUN-3/160 Workstation (Leistung wie eine VAX-780) angepaßt. Sie erlaubt Modellstrukturen mit bis zu 1000 Segmenten, so daß auch komplexe Gebilde simuliert werden können. Der Speicherbedarf ist 8,1 MByte. Die CPU-Zeit für eine Simulation mit 1000 Segmenten (geeignet für vier 33-Element Yagi's) beträgt ca. 150 Minuten.

2. Rauschtemperatur von Antennen

Die Rauschtemperatur von Antennen ist eine für EME-Anwendungen besonders interessante Größe und kann normalerweise nur summarisch auf indirekte Weise gemessen werden. Die Rauschtemperatur wird bestimmt von der Rauschleistung, die über die Hauptkeule erfaßt wird, der über die Nebenzipfel aufgenommenen Streustrahlung und dem thermischen Rauschen der inneren Skin-Verluste. Daher ist die Anwendung von Simulationsprogrammen zur Bestimmung der effektiven Rauschtemperatur besonders geeignet, da sie nicht nur die Skin-Verluste berechnen sondern auch über Diagrammintegration die gesamte aufgenommene Strahlungsleistung ermitteln können. Für den Fall von Yagi-Gruppen wird auch die gegenseitige Beeinflussung der Einzelantennen berücksichtigt.

Das ermittelte Maß für die Güte (G/T-Verhältnis) erlaubt einen direkten Qualitätsvergleich zwischen verschiedenen Yagi-Konstruktionen und Stockungsabständen. Gerade diese Kriterien waren in der Vergangenheit unter Amateuren Anlaß zu mannigfachen Spekulationen.

3. Definition der Rauschtemperatur von Antennen

Für jede Antenne ist die innere Rauschtemperatur definiert (/1/):

$$T_A^i = \frac{\iint T(\theta, \phi) P(\theta, \phi) d\Omega}{\iint P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (1)$$

T_A^i : Innere Rauschtemperatur der Antenne (Entspricht der Gesamtrauschleistung aller über das Richtdiagramm empfangenen Rauschleistungen).

$T(\theta, \phi)$: Rauschtemperatur des umgebenden Raums im Raumwinkel

DJ9BV : Effektive Rauschtemperatur von 432MHz-EME Yagi-Gruppen

$P(\theta, \phi)$: Leistungs-Diagramm

Berücksichtigt man den Wirkungsgrad (Innere Verluste) der Antenne, folgt:

$$T_A = \frac{(T_A^* + (L-1)T_0)}{L} \quad (2)$$

T_A : Rauschtemperatur der Antenne an der Anschlußbuchse

L : Verlust der Antenne ($L \geq 1$)

T_0 : Bezugstemperatur (290 K)

4. Voraussetzungen

Im Folgenden wird eine Elevation der Antenne von 30 Grad vorausgesetzt. Das ist ein für EME-Anwendungen typischer Elevationswinkel. Bei diesem Winkel liegt der erste Stockungs-Nebenzipfel noch in der Vorwärts-Zone. Weiterhin wird angenommen, daß das Diagramm symmetrisch ist. Alle Werte für $G(\theta, \phi)$ sind durch eine NEC-II Simulation berechnet. Die Schrittweite bei der Integration beträgt jeweils 3 Grad in ϕ und θ . Für das Oberflächenintegral werden für eine Viertelkugel 1952 Stützwerte benutzt. Die Definition des Koordinatensystems zeigt Bild 1.

Die Integration wird getrennt für 3 Zonen ausgeführt (Bild 2):

Vorwärts-Zone (θ : 60..90 Grad; ϕ : 0..90 Grad).

$$A_v = \int_{\phi=0}^{90} \int_{\theta=60}^{90} P(\theta, \phi) d\Omega$$

Zipfel-Zone (θ : 0..60 Grad; ϕ : 0..180 Grad).

$$A_z = \int_{\phi=0}^{180} \int_{\theta=0}^{60} P(\theta, \phi) d\Omega$$

Rückwärts-Zone (θ : 60..90 Grad; ϕ : 90..180 Grad).

$$A_r = \int_{\phi=90}^{180} \int_{\theta=60}^{90} P(\theta, \phi) d\Omega$$

Das Gesamtintegral ist dann:

$$A = A_v + A_z + A_r$$

Die Funktion $T(\theta, \phi)$ wird auf zwei Konstanten zurückgeführt:

Himmel:

$$T_{sky} = 15 \text{ K}$$

Erde:

$$T_{earth} = 290 \text{ K}$$

Der Wert von 290 K gilt für trockenen Erdboden, der nicht reflektiert. Für reflektierenden Boden (feuchter Erdboden) ist $T_{earth} = 200 \text{ K}$ und für Meerwasser gilt ein Wert von ca. 150 K.

Mit der Zweiteilung von $T(\theta, \phi)$ in zwei Sphären läßt sich das Integral für T_A^* , wie leicht aus Bild 2 zu ersehen, einfach faktorisieren:

$$T_A^* = \frac{A_v T_{sky}}{A} + \frac{A_z T_{sky}}{2A} + \frac{A_z T_{earth}}{2A} + \frac{A_r T_{earth}}{A}$$

Daß kann zusammengefaßt werden zu:

$$T_A^* = T_v + T_z + T_r \quad (3)$$

DJ9BV : Effektive Rauschtemperatur von 432MHz-EME Yagi-Gruppen

mit

$$\text{"Vorwärts-Temperatur": } T_v = \frac{A_v T_{sky}}{A}$$

$$\text{"Zipfel-Temperatur": } T_z = \frac{A_z \cdot (T_{sky} + T_{earth})}{2A}$$

$$\text{"Rückwärts-Temperatur": } T_r = \frac{A_r T_{earth}}{A}$$

5. Simulationsdaten

Siehe Table 1.

Bemerkungen (Remarks):

- * Optimale Stockung nach DL6WU /3/: $D_{opt} = \frac{\lambda}{2 \sin(\phi/2)}$
 ϕ : 3 dB Öffnungswinkel in der Stockungsebene.
- # Antenne hat Vielfach-Reflektor (4-er or 8-er)
 1. Gestockt wie bei K1FO (Entspricht optimaler Stockung nach *)
 2. Tonna-21 mit unsymmetrischer Speisung (Vom Hersteller empfohlen!)
 3. Tonna-21 mit symmetrischer Speisung (1:1 Balun)!
 4. Stockung für maximales G/T-Verhältnis nach K1FO /6/
 5. Modifikation nach DK1PZ (4-er Reflektor) und optimale Stockung
 6. Gestockt wie bei DL6WU
 7. Gestockt wie bei DL9KR
 8. Stockung empfohlen von Cush-Craft
 9. Stockungsgewinn > 6 dB impliziert möglicherweise suboptimale Antenne

6. Bewertung der Simulationsdaten

Vergleicht man die Werte in der Tabelle 1, ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

1. Der Hauptanteil der Streustrahlung kommt durch die Zipfelzone und nicht von der Rückwärtszone. Deswegen scheinen Mehrfachreflektoren i.A. nicht viel zu bringen, da der Gewinn in der Rückwärtszone durch einen höheren Anteil der Zipfelzone erkaufte wird. Z.B. ist die beobachtete Verbesserung von Tonna-21 Gruppen nicht auf die installierten 4-fach Reflektoren zurückzuführen (Der Gewinn fällt sogar!), sondern auf die gleichzeitig implementierte symmetrische Speisung, die 0,4 dB mehr Gewinn und 10 K weniger Antennentemperatur erbringt.

Deswegen als Anmerkung die goldene Experimentierregel: Niemals zwei Änderungen gleichzeitig durchführen, wenn man Ursache und Wirkung kennen will!

Zum Gewinn der Tonna-21: Der gesicherte Mittelwert aller Messungen liegt bei 15.2 dBi oder 17.35 dBi. Damit ergibt sich zur Simulation von 17.5 dBi eine Diskrepanz von 0.15 dB. Wenn man das nicht vernachlässigen will, kann man zwei Eigenschaften dieser Antenne zur Erklärung heranziehen. Zum einen liegt das Gewinn-Maximum dieser Antenne unterhalb des Bandes bei 429 MHz. Bei einer Betriebsfrequenz von 432 MHz liegt der Gewinn schon auf dem steil abfallenden Ast der Gewinnkurve oberhalb der Designfrequenz. Dieser steile Abfall ist typisch für Hochgewinn-Yagis. Jede Störung der strukturellen Eigenschaften z.B. eine Verdickung der Elemente durch Wasser oder Eis oder eine Verlängerung durch schlechten Kontakt zwischen Element und Boom wegen Korrosion führt bei solch problematischen Konstruktionen unmittelbar zu drastischen Gewinnverlusten, wie auch Messungen an alten Antennen in Annaboda (1980) gezeigt haben.

2. Alle Yagi's, die nach DL6WU (/2/,/3/,/4/) gebaut wurden, haben niedrige Verluste. Rechnergestützte Optimierungen haben z.T. erheblich höhere Verluste. Ein besonders

DJ9BV : Effektive Rauschtemperatur von 432MHz-EME Yagi-Gruppen

eklatantes Beispiel ist die K1FO-32.

3. Kurze Antennen haben eine erhöhte Rauschtemperatur durch Nebenzipfel. Beispiele sind die Tonna-21, K2RIW-19 und die DL9KR-19. Eine Ausnahme bildet lediglich die K1FO-22.
4. Recheroptimierte Designs (K1FO-** oder DJ9BV-OPT70**) bringen - jedenfalls in der Simulation - maximal 0,6 dB mehr Gewinn bei langen Antennen (10λ) bzw. rund 0,3 dB mehr bei kurzen Antennen (6λ) gegenüber gleich langen DL6WU-Antennen. Das bestätigt die hohe Qualität des DL6WU-Designs.
5. Sogenannte G/T-optimale Stockungsabstände (/5/) scheinen nicht das gewünschte Ergebnis zu bringen. Stockungsabstände nach der von DL6WU angegebenen Formel (/2/) bringen optimale Ergebnisse für den Gewinn und das G/T-Verhältnis. Selbst bei einer Antenne mit sehr schlechtem Diagramm (Cush-Craft 424B, Bild 3 und 4) ist die vom Hersteller empfohlene Stockung (Bild 4) wesentlich schlechter als die nach DL6WU berechnete (Bild 4a). Man scheint bei schlechten Diagrammen (viele Nebenzipfel) weiter stocken zu müssen und nicht näher, wie in /5/ empfohlen. Das erscheint auch plausibel, da viel Energie in Nebenzipfel abgestrahlt wird und die Hauptkeule vergleichsweise zu eng ist. Damit wird die Überlappung der Diagramme größer. Da in die Gleichung für den Stockungsabstand nur der Öffnungswinkel der Hauptkeule eingeht, ergeben schlechte, nebenzipfelreiche Diagramme bei verengter Hauptkeule automatisch den erforderlichen größeren Abstand.
 Als Vergleich dazu zeigt eine "saubere", nach DL6WU konstruierte, Antenne, die DL9KR-22 (Bild 5 und 6), bei höherem Gewinn weniger Nebenzipfel sowie größere Öffnungswinkel und kann daher dichter gestockt werden.
6. Im Entscheidungsprozess zwischen gewinnoptimalen oder G/T-optimale Antennen sollte man die Rauschtemperatur des Empfangssystems (RX + Kabel) mit ca. 50 bis 70 Grad Kelvin in Rechnung stellen. Die Systemtemperatur wird damit 75 bis 115 Grad Kelvin.

7. Bemerkungen zur Relevanz von Simulationen

Alle Zahlen kommen aus Modellrechnungen und sind nur so gut wie die zugrunde liegenden Modelle. Die Bestätigung kann nur über die Praxis, d.h. durch Messungen erfolgen!

Um Anfällen von falscher Computer-Gläubigkeit entgegenzuwirken folgen ein paar Bemerkungen zur Relevanz von Simulationen. Entscheidend für die Genauigkeit sind die Einschränkungen des Simulationsmodells gegenüber der exakten Theorie, und nicht etwa der verwendete Computer. Im konkreten Fall der benutzten NEC-II Simulation werden die gesuchten Stromverteilungen auf den Elementen über Näherungslösungen der entsprechenden Integralgleichungen errechnet. Der Fehler der errechneten Stromverteilung liegt bei geeigneter Abbildung der Antennenstruktur in die Modellstruktur der Simulation bei etwa 1 %. Die Konvergenzeigenschaften der Simulation sind proportional zur Granularität, d.h. der Zahl der Modellsegmente pro Längenelement in der realen Antenne. Der Rechenzeitbedarf wächst mit der dritten Potenz, während der Speicherbedarf mit der zweiten Potenz bezogen auf die Zahl der Modellsegmente wächst. Das resultierende Feld wird aus den Stromverteilungen ebenfalls mit einer Näherungsrechnung mit einem vereinfachten "Thin-Wire"-Modell für die stromführenden Elemente errechnet. Diese Näherungen wirken sich weniger bei der Berechnung des Gewinns als bei kleinen Effekten, nämlich der Berechnung der Nebenzipfel aus. Nebenzipfel, die mehr als 30 dB unter der Hauptkeule liegen, sind reine Artefakte, die aus der Näherungsrechnung kommen. Die Qualität von NEC-II ist allerdings um 2 Größenordnungen besser als die von Primitiv-Simulationen (z.B. die Programme YAGI und STOCK), die auf der Lawson-Methode beruhen.

Die von NEC-II abgeleiteten einfachen Programme (z.B. MININEC), die als BASIC-Programme für Kleinrechner vorliegen, sind wahrscheinlich weniger brauchbar, um Nebenzipfel korrekt zu rechnen. Die Stromverteilung wird durch Überlagerung von Rechteck-Funktionen angenähert. Daher ist höhere Anzahl von Modell-Segmenten (10-18) pro Antennen-Element erforderlich, um die gesuchte Stromverteilung anzunähern (/7/). Werden die Modell-Segmente allerdings zu kurz, ist die "Thin-Wire" Näherung für die Berechnung des Feldes nicht mehr anwendbar. NEC-

DJ9BV : Effektive Rauschtemperatur von 432MHz-EME Yagi-Gruppen

II hat für diesen Fall die "Extended-Thin-Wire" Option, so daß auch "dicke" Elemente gerechnet werden können. Die Konvergenzeigenschaften MININEC sind folglich nicht so "gutmütig" wie die von NEC-II und bedürfen für jedes Modell einer realen Antenne der Überprüfung durch Veränderung der Granularität. Weiterhin können keine Skin-Verluste gerechnet werden.

"Last but not least": Die qualifizierte Inbetriebnahme von NEC-II und die Verifikation für den Anwendungsfall der Yagi-Antennen war nur möglich durch die Unterstützung von Günter Hoch, DL6WU, dem ich für die vielen Diskussionen, Materialien und Anregungen danke. Weiterhin danke ich DL1LB, K1FO und DJ6MB für die Überlassung von mechanischen Daten für Yagi-Antennen.

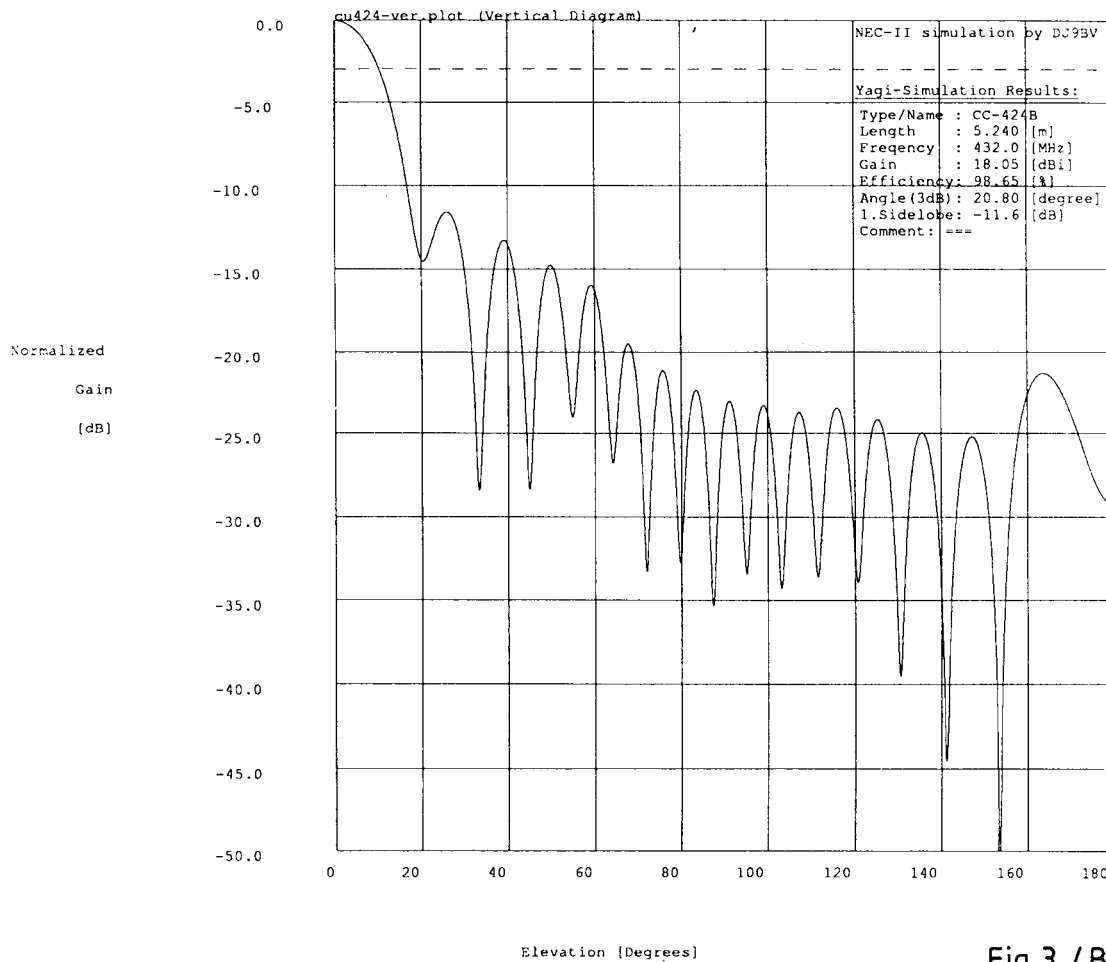


Fig.3 / Bild 3

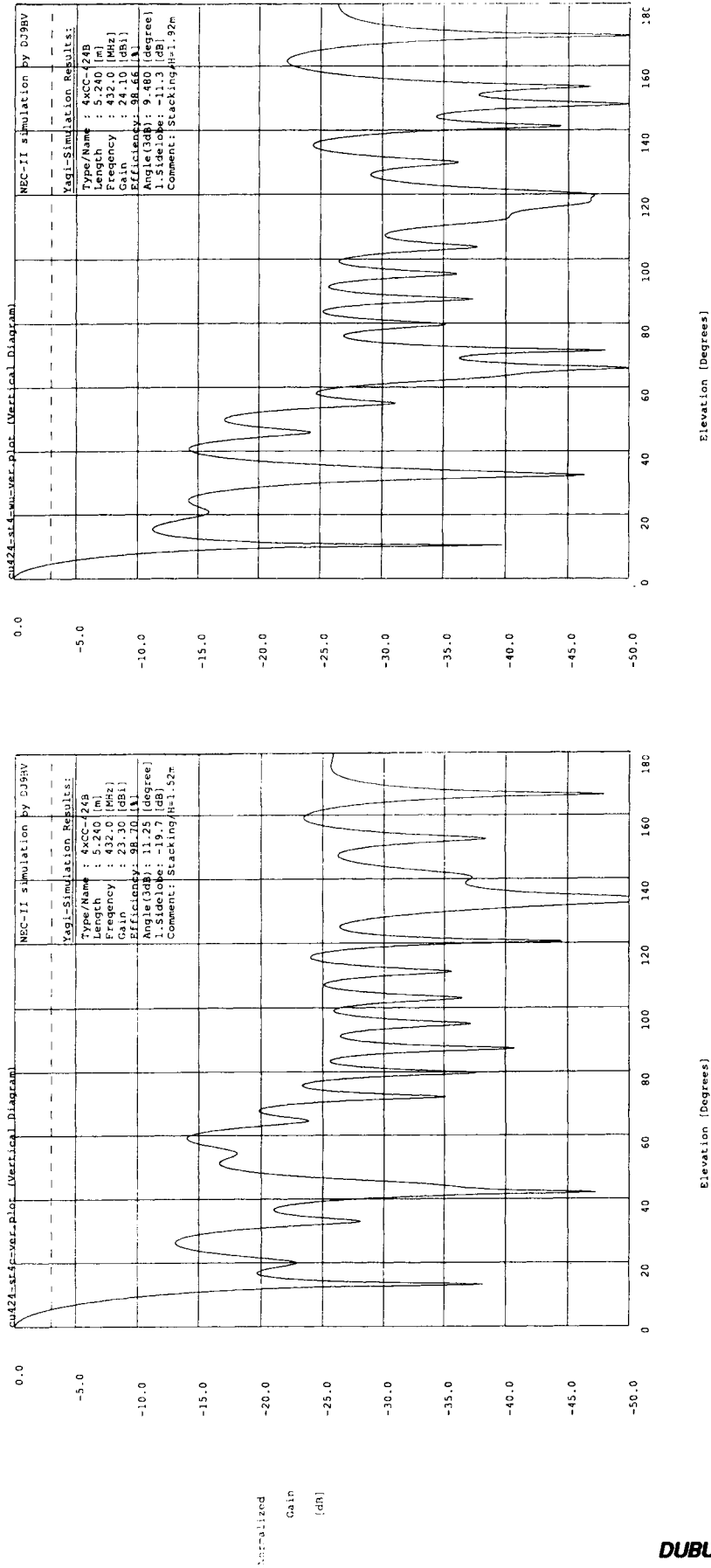


Fig.4 / Bild4 Fig.4a / Bild 4a

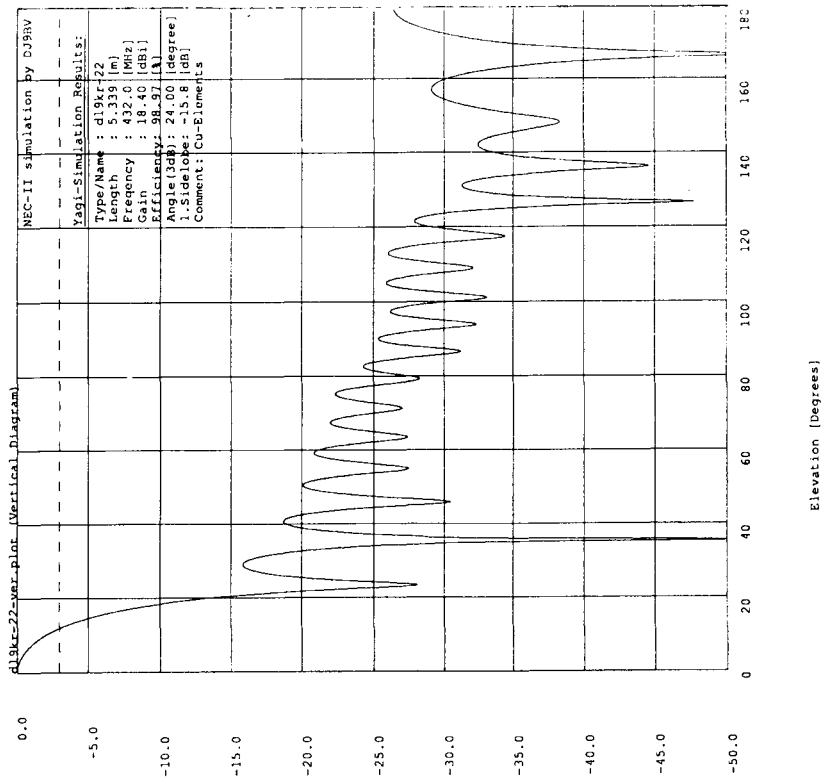
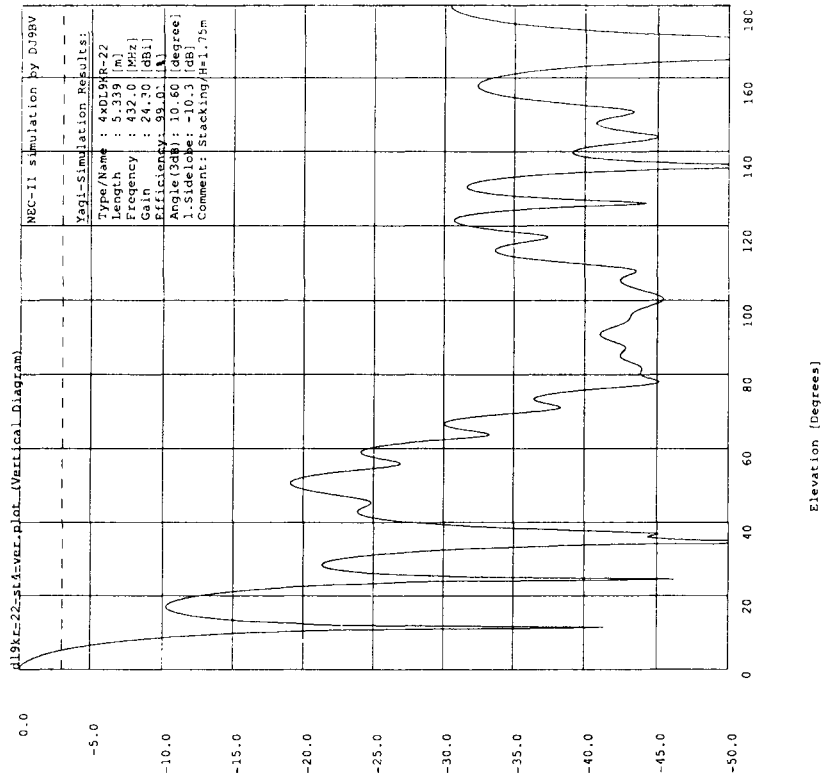


Fig.5 / Bild 5 Fig.6 / Bild 6