

Messung horizontaler Abstrahldiagramme von steppIR Yagi Antennen

Georg Efremidis, DJ3AA, Helmut Hengstenberg, DL9CI, und Rolf Schick, DL3AO

Einleitung.

Horizontale Abstrahldiagramme von Dreielement steppIR Yagi-Antennen der Stationen DJ3AA (Abb.1) und DL9CI (Abb.2) wurden am Empfangsort von DL3AO (Abb. 3) aufgenommen. Die Wegstrecken zwischen Sende- und Empfangsort betragen 10,4 km bzw. 6,2 km. Abb.4-5 zeigen Geländeschnitte zwischen den Stationen. Die Profile sind gut geeignet für die Erfassung von niederen Elevationswinkeln. Alle drei Stationen befinden sich auf der nahe Stuttgart gelegenen Filderhochebene. Seitenreflexionen durch Bergflanken können weitgehend ausgeschlossen werden. Messreihen in den drei Antennenmoden „normal mode“, „reverse mode“ und „bidirectional mode“ wurden auf den Bändern von 14 MHz bis 28 MHz durchgeführt. Der folgende Bericht beschreibt als Fallstudie die Antenneneinstellung „normal mode = vorwärts“ für das 18 MHz Band.



Abb.1: SteppIR Yagi von DJ3AA



Abb.2: Stepp IR Yagi von DL9CI

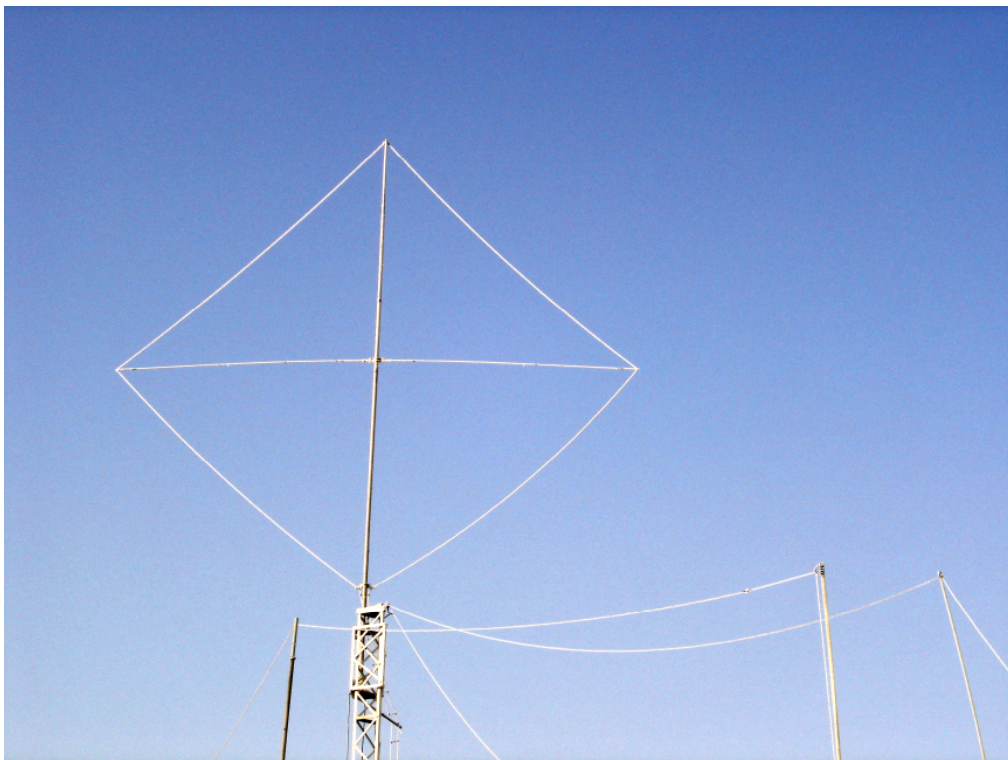


Abb.3: Quadschleife zum Empfang bei DL3AO

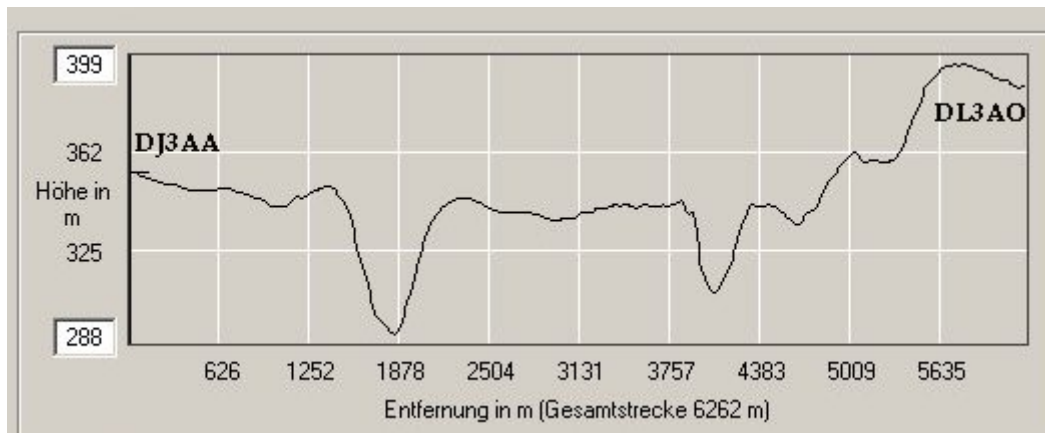


Abb. 4: Geländeschnitt DJ3AA – DL3AO, Azimutwinkel zu DL3AO 187 Grad

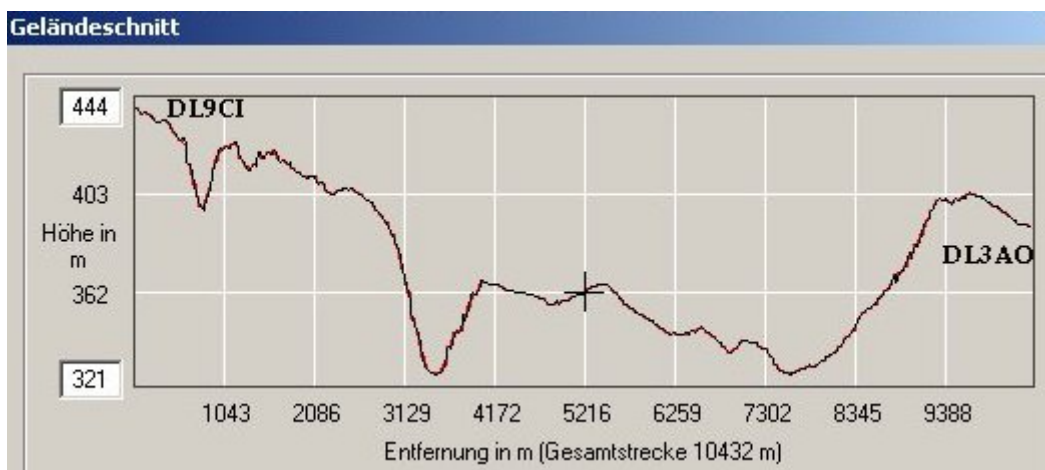


Abb.5: Geländeschnitt DL9CI – DL3AO, Azimutwinkel zu DL3AO 146 Grad

Messverfahren.

Die von den Sendern DJ3AA und DL9CI bei DL3AO an einer horizontal polarisierten Quadschleife erzeugte Antennenspannung wurde mit einem Kenwood Transceiver TS850 gemessen. An der Rückseite dieses Gerätes befindet sich eine 13-polige (DIN) Anschlussbuchse (ACC2). Zwischen Pin 6 und Pin 8 (Ground, Masse) dieser Buchse kann die S-Meterspannung, bzw. die AVC Spannung, abgenommen werden. Mit Hilfe eines Rauschgenerators (Fa. Hirschmann, UPR60) und einer Dämpfungsuhr der Fa. Wandel und Goltermann (Abb. 6) wurde der Verlauf dieser Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung an der Antennenbuchse gemessen. (Abb.7).

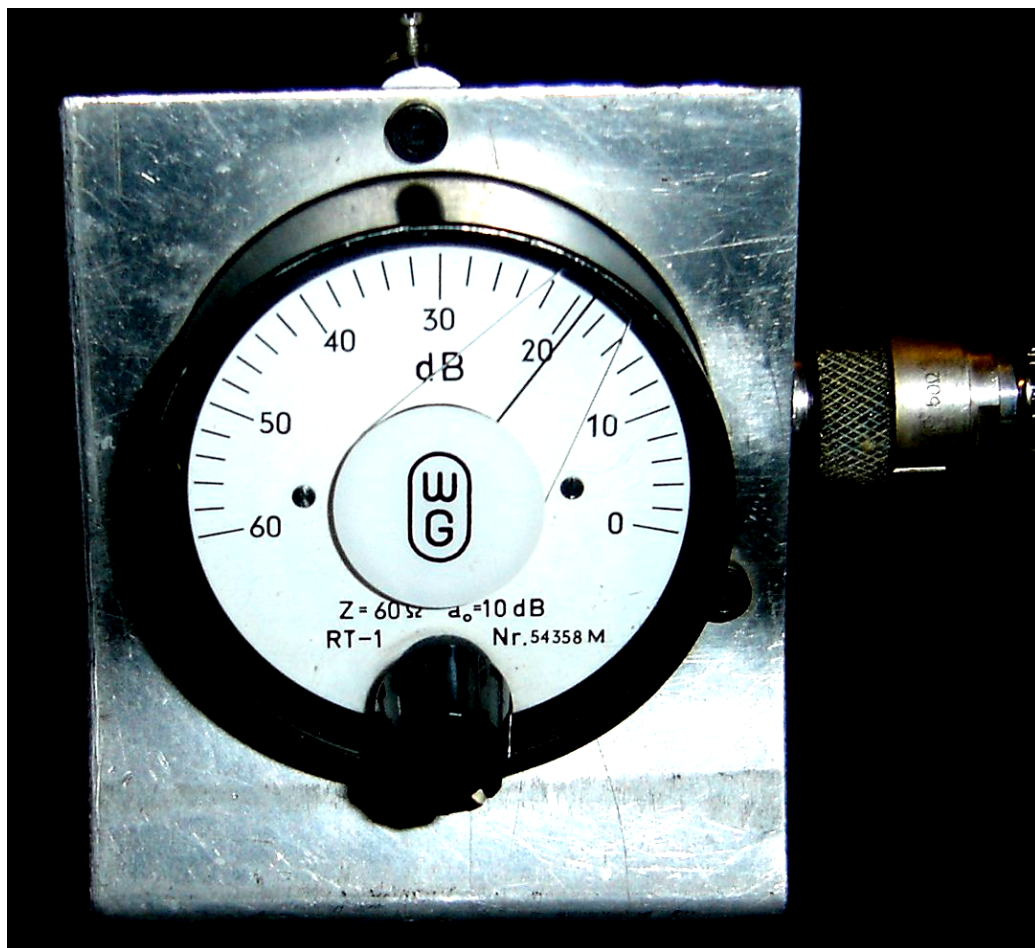


Abb.6: Dämpfungsuhr der Fa. Wandel und Goltermann.
Ablesegenauigkeit 1 dB, Messumfang 60 dB

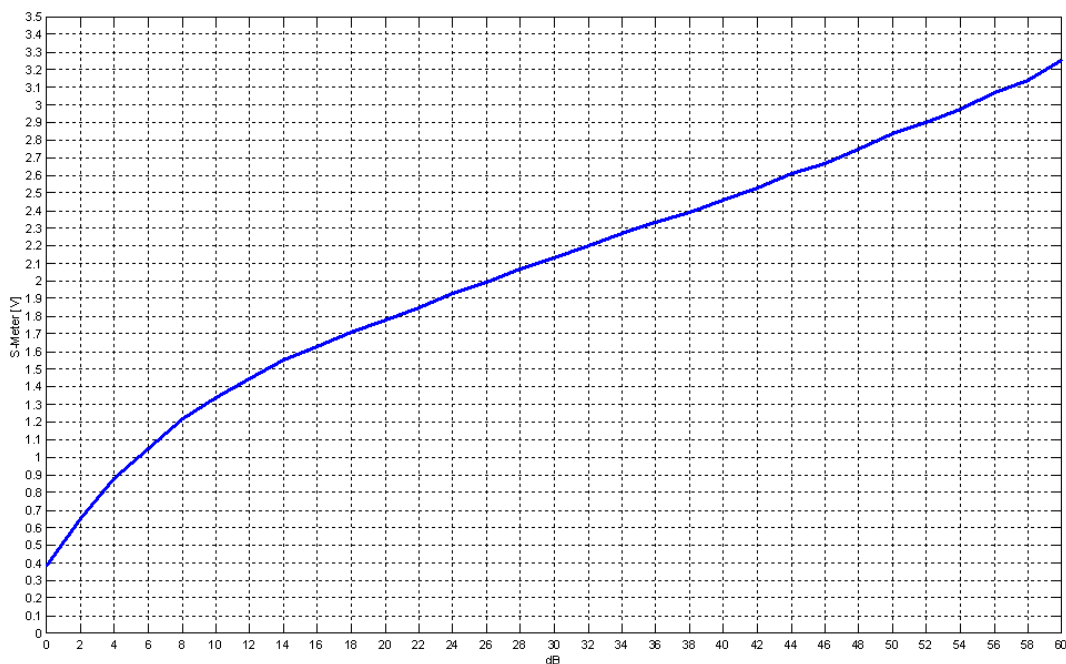


Abb. 7: Verlauf der S-Meterspannung [V] gegenüber der relativen Eingangsspannung [dB] des Rauschgenerators an der Antennenbuchse TS850

Bei Vollausschlag am S-Meter (S9+60 dB) beträgt die Ausgangsspannung etwa 5 V. In Abb. 7 entsprechen Null dB etwa 1 Mikrovolt Eingangsspannung. Für die von uns vorgenommenen Messungen sind nur die Spannungsunterschiede von Bedeutung. Die Sendeleistungen für die Messungen betrugen zwischen 50 W und 100 W. Bei den vorliegenden Streckendämpfungen lagen die Empfangssignale für sämtliche Azimutwinkel der Sendeantennen im oberen Bereich der Kurve von Abb. 7, bei einem Signal-Störverhältnis von immer >20 dB. Die S-Meterspannung wurde mit einem Digitalvoltmeter gemessen und Abb. 7 folgend auf dB – Werte umgerechnet.

Die Abstrahlung der Antennen erfolgte in Rotorschritten von 10 Grad im Winkelbereich 0 – 360 Grad. Null Grad ist bei beiden Stationen nach Norden ausgerichtet. Ein Wattmeter in der Antennenleitung überwachte die Einhaltung der Ausgangsleistung.

Messergebnisse.

Abb. 8a,b und Abb. 9a,b zeigen gemessene Abstrahldiagramme für die Antennen bei DJ3AA und DL9CI. Die Messungen basieren auf Längeneinstellungen der Antennenelemente, welche den von steppIR nach Kalibration angegebenen Werten für 18 MHz in der Stellung „normal mode“ entsprechen (default-Werte, Tab. 1)

SteppIR 18 MHz normal	Direktor	Strahler	Reflektor
Elementlängen (inch)	287.2	302.2	318.4
Elementlängen (Meter)	7.29	7.67	8.04

Tab. 1: steppIR default Elementlängen für 18 MHz, Stellung „normal mode“.

Die Skalenwerte in den Ordinaten sind in Dezibel [dB], bzw. in relativen Leistungswerten [W] angegeben. Die logarithmischen dB Skalen eignen sich für die Bestimmung der Vor-Rückwertsverhältnisse, die Leistungsskalen für die (minus) 3 dB Öffnungswinkel der Antennen. Die Diagramme mit den dB-Werten zeigen ungeglättete, die Messwerte verbindende Polygonzüge. In den Diagrammen mit den Leistungsskalen stellen die Kurven Polynome dar, welche an die durch Punkte dargestellten Messwerte angepasst wurden. Die Werte für das SWR lagen bei sämtlichen Messungen unter 1.2.

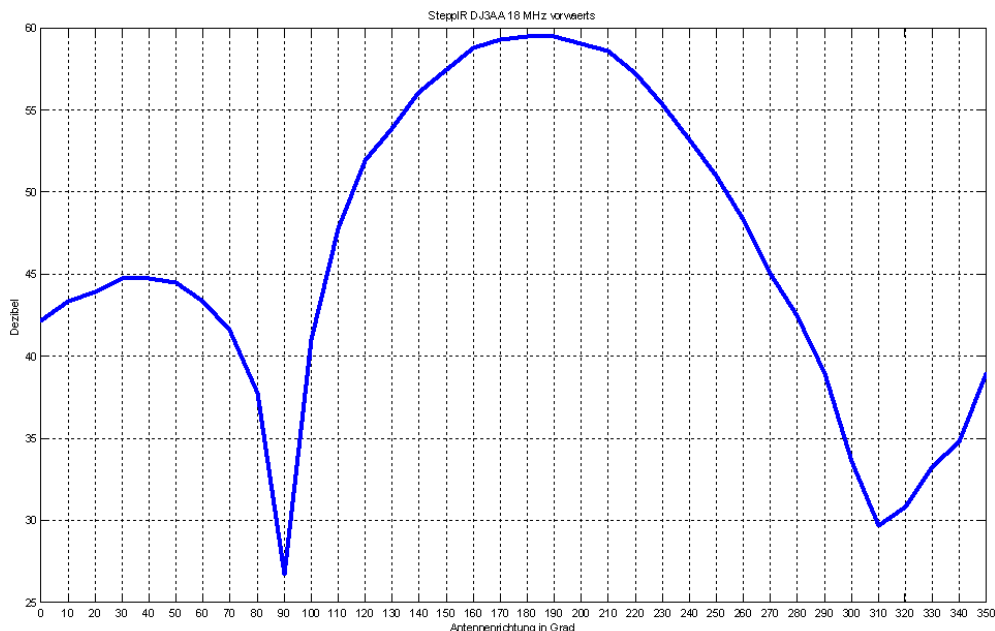


Abb. 8a: Abstrahldiagramm 18.1 MHz, normal mode, dB-Skala, DJ3AA

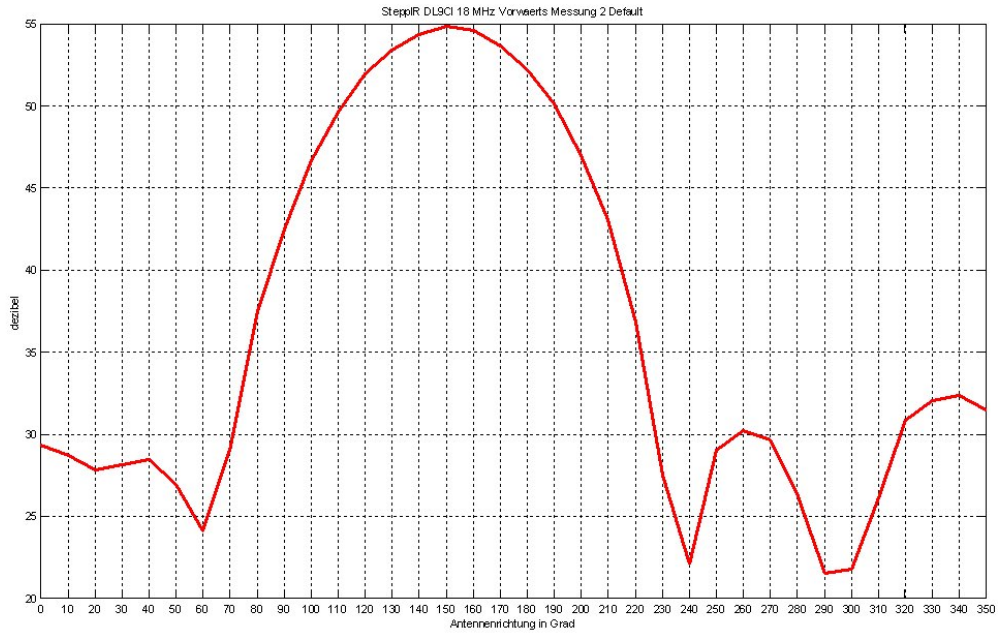


Abb. 8b: Abstrahldiagramm 18.1 MHz, normal mode, dB-Skala, DL9CI

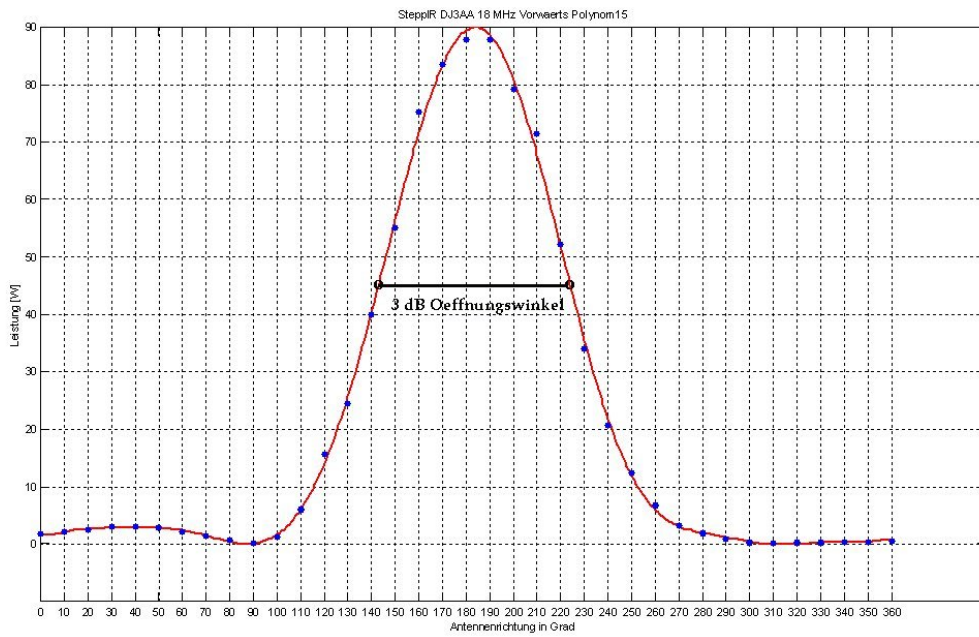


Abb. 9a: Abstrahldiagramm 18.1 MHz, normal mode, Leistungsskala, DJ3AA

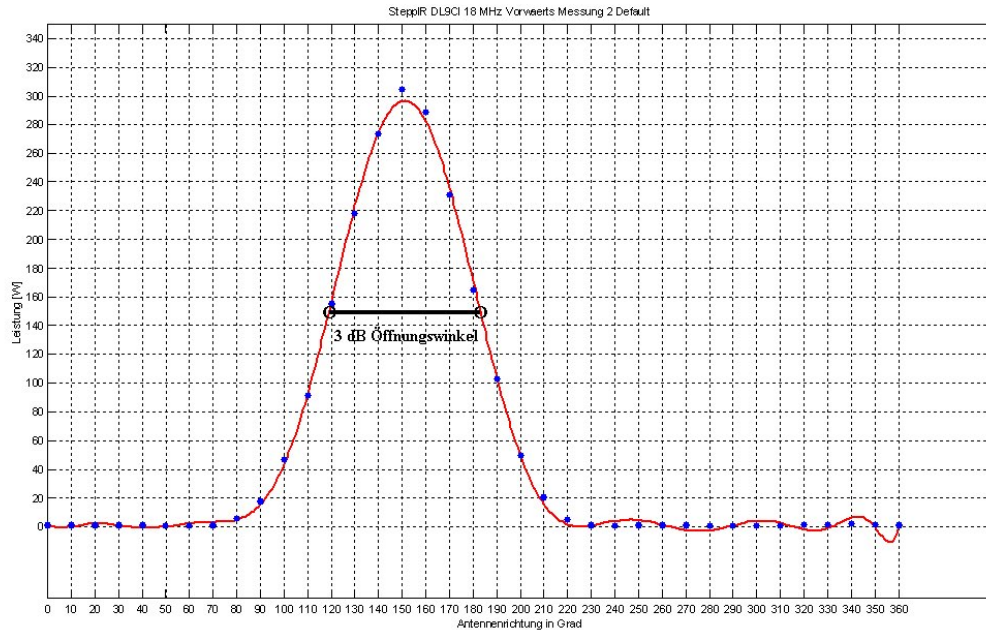


Abb. 9b: Abstrahlungsdiagramm 18.1 MHz, normal mode, Leistungsskala, DL9CI

Betrachtung der Messergebnisse

Für die Abstrahlung der Antenne spezifiziert die Fa.steppIR vier Größen:

- (1) Stehwellenverhältnis (SWR) bezogen auf 50 Ohm
- (2) Vor-Rückwärtsverhältnisse als Front- to- Back Ratio (F/B), entsprechend dem Leistungsunterschied in den Maxima Vorwärtsstrahlung und Strahlung 180 Grad versetzt.
- (3) Front- to- Rear Ratio (F/R), entsprechend Maximum Vorwärtsstrahlung gegen Strahlung in der 180 Grad überstreichenden Rückwärtsebene (worst case)
- (4) Die Verstärkung in dBd für den Freiraum

SteppIR gibt für den in den Abb. 8 und Abb. 9 betrachteten Fall ein SWR von 1.1 oder besser an. Berechnet man mit Hilfe des Antennen-Simulationsprogramms EZNEC aus den Elementlängen (Tab. 1) und den Elementabständen für die „normal mode“ das SWR in Abhängigkeit der Frequenz, so erhält man Abb. 10.

Die SWR Kurve in Abb. 10 bezieht sich auf einen, von steppIR für alle Bänder und Moden angenommenen, realen Speisewiderstand von 22 Ohm. Ein im Speisepunkt der Antenne angebrachter Balun-Unun Koppler transformiert den symmetrischen Eingangswiderstand von 22 Ohm auf einen unsymmetrischen 50 Ohm Eingang zum Anschluss des Koaxkabels.

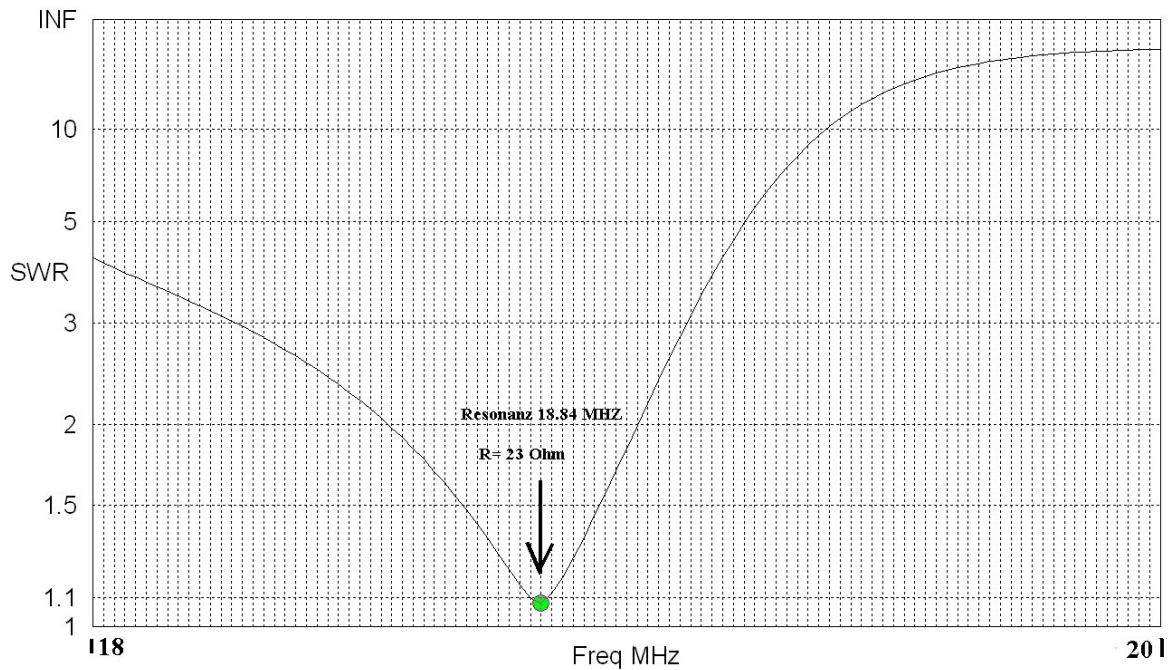


Abb. 10: Mit EZNEC berechneter SWR Verlauf , 18 MHz „normal mode“, default Längen, bezogen auf 22 Ohm Eingangswiderstand.

Die über Rechnung ermittelte Resonanz bei 18.84 Mhz liegt wesentlich höher als die bei den Messungen gefundene Resonanz bei 18.1 MHz (Minimum in SWR). Offenbar zieht die dielektrische Belastung der Elemente durch die Fiberglasrohre zusammen mit den Endkapazitäten die tatsächliche Resonanzfrequenz auf einen deutlich tieferen Wert. Der Verkürzungsfaktor beträgt $18.1/18.84 = 0.96$. Für die Computermodellierung muss somit eine Elementverlängerung der im Display des steppIR Steuergerätes angegebenen Elementlängen um den Faktor 1.041 angenommen werden. Einfacher ist es jedoch, man setzt in den Berechnungen die Resonanzfrequenz ein welche sich aus der SWR Kurve (Abb. 10) ergibt .

Eine EZNEC-Berechnung mit der Eingabefrequenz von 18.84 MHz und eine zur Rechnung gehörende Messkurve zeigt Abb. 11. Die Übereinstimmung zwischen Computer-Berechnung und Messung ist erstaunlich gut. SteppIR gibt für 18 MHz normal mode für das F/B ratio 44 dB , für das F/R Ratio 25 dB an. Abb. 11 zeigt für die Messkurve ein F/B Ratio und F/R Ratio von jeweils 25 dB.

Es stellt sich die Frage, ob sich durch ändern der Elementlängen die Werte verbessern lassen. Die anschließenden detaillierten Versuche ergaben, dass bei Beibehaltung der Längen von Strahler und Direktor und mit einer Verkürzung des Reflektors um 4 inch bei der Antenne von DL9CI optimale F/B und F/R Ratio zu erreichen sind (Abb. 12). Das F/B Ratio liegt jetzt bei 35 dB, das F/R Ratio bei knapp 30 dB.

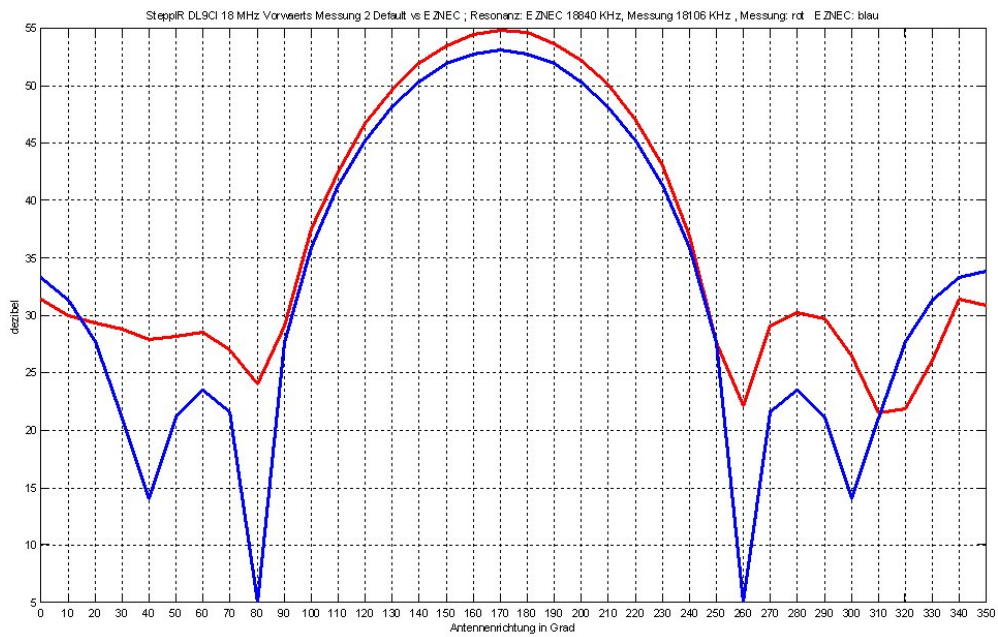


Abb. 11: Rechenkurve EZNEC (blau) gegenüber Messkurve (rot). DL9CI, 18 MHz, normal mode. Maximum im Winkelbereich zentriert auf 180 Grad. Kurven zur Verdeutlichung nicht exakt auf Maximum normiert. Antennen Dimensionen default nach steppIR.

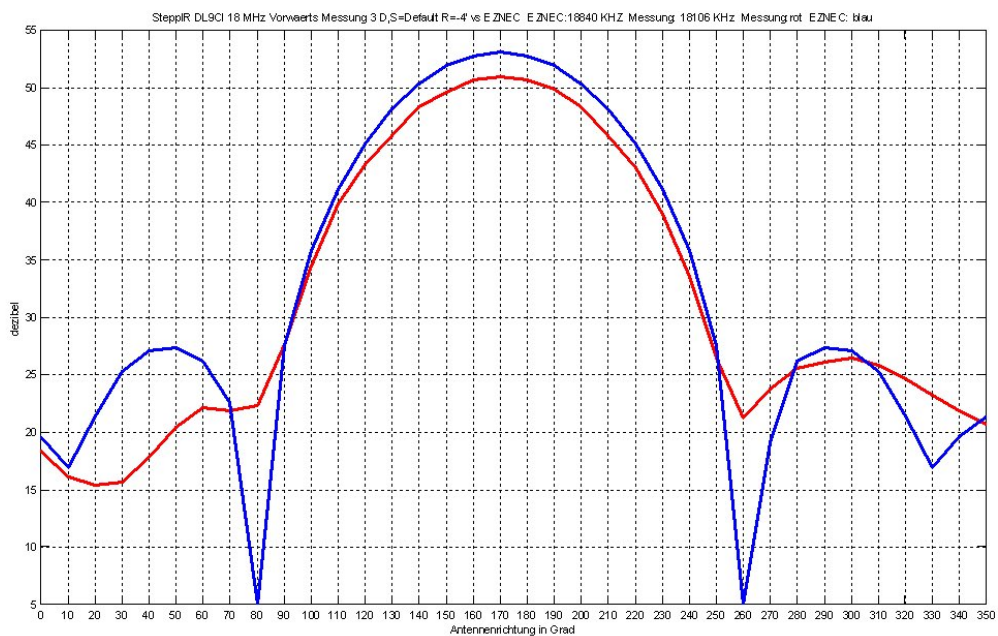


Abb. 12: Rechenkurve EZNEC (blau) gegenüber Messkurve (rot), für optimierte Elementlängen. DL9CI, 18 MHz, normal mode. Maximum im Winkelbereich zentriert auf 180 Grad. Kurven zur Verdeutlichung nicht exakt auf Maximum normiert

Bei der Antenne von DJ3AA beträgt für die default-Längen das F/B Ratio zwischen 15 und 20 dB (exaktes Minimum im Anschlag Rotor), das F/R Ratio beträgt knapp 15 dB. Durch Verändern der Elementlängen auf die Werte von Direktor = 291.3 inch, Strahler = 302.2 inch und Reflektor = 314.4 inch konnten die Werte deutlich verbessert werden. Das F/B Ratio erhöhte sich auf ca. 30 dB, das F/R Ratio auf ca. 25 dB (Abb. 13).

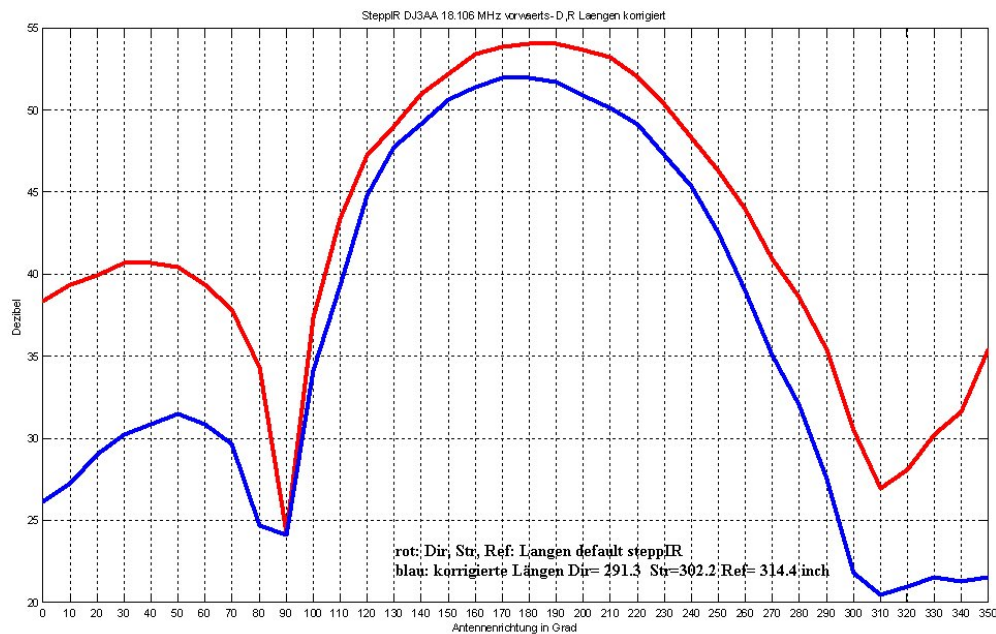


Abb. 13: Messkurven DJ3AA, 18 MHz, normal mode.
Elementlängen stepp IR default: rote Kurve. Optimierte Elementlängen: blaue Kurve

Die Unsymmetrie in den Seitenmaxima (side lobes) auf der Rückseite der Antenne ist zumindest qualitativ erklärbar.

Bei der Interpretation der Rückseite in den Abstrahldiagrammen ist zu bedenken, dass 20 dB Abnahme bei 100 W Antennenleistung einen Wert von 1 W, 30 dB einen Wert von 100 mW ergeben. Die auf die Vorwärtskeule konzentrierte Leistung kann im Nahfeld der Antenne zur Anregung von Sekundärstrahlern führen, deren nicht gerichtete Abstrahlung die schwachen von der Rückseite der Antenne abgegebene Leistung überdecken können. Energetisch hat die Unterdrückung der Rückwärtsstrahlung bei einem 3-El. Yagi wenig Einfluss auf die Energie in der Vorwärtskeule (Abb. 14).

Ebenfalls kann eine geringe Unsymmetrie (bedingt z.B. durch Mantelwellen auf dem Speisekabel) in der Stromverteilung auf den Dipolzweigen des Strahlers in der Rückwärtsstrahlung der Antenne deutliche Überhöhungen erzeugen. Dies wirkt sich besonders bei einer hohen Unterdrückung der rückwärts gerichteten Strahlung aus. Die Hauptkeule im Antennendiagramm wird durch die kleinen Leistungsüberlagerungen dagegen wenig beeinflusst.

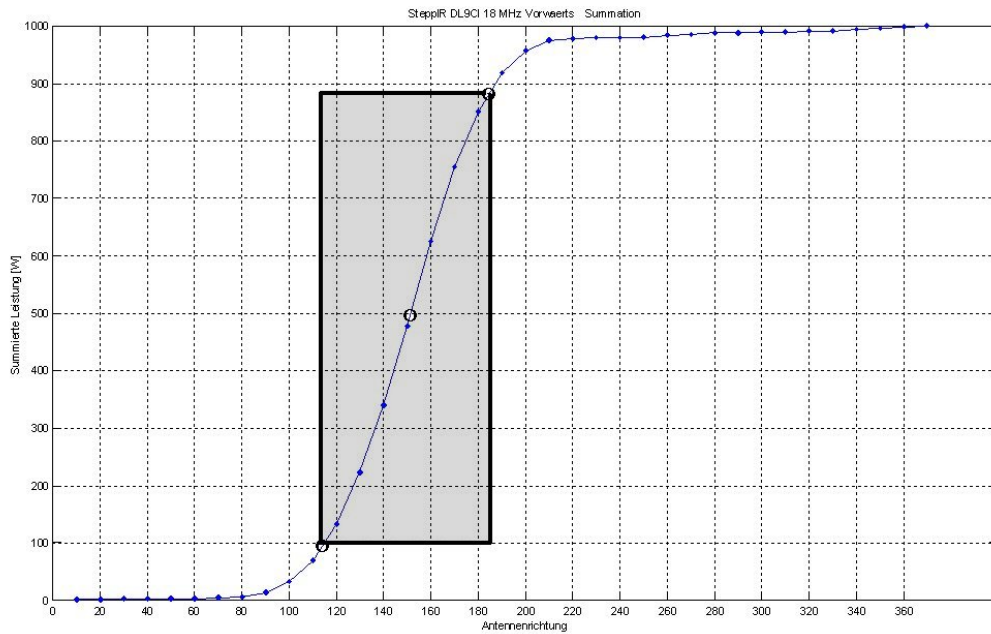


Abb. 14: Summation der abgestrahlten Leistung (DL9CI, 18 MHz, normal mode) über den Azimutwinkel 0-360 Grad. Der grau schraffierte Bereich schließt den 3 dB Öffnungswinkel ein (150 ± 34 Grad) ein, in welchem 80 % der Gesamtleistung abgestrahlt werden.

Einen mit EZNEC berechneten Einfluss einer mit 1% angenommenen Unsymmetrie im Speisestrom des Strahlers ist in Abb. 15 dargestellt. Das Ergebnis ist in qualitativer Übereinstimmung mit dem Kurvenverlauf in Abb. 13. Die Unsymmetrie wirkt sich auf die Hauptkeule nahezu nicht aus.

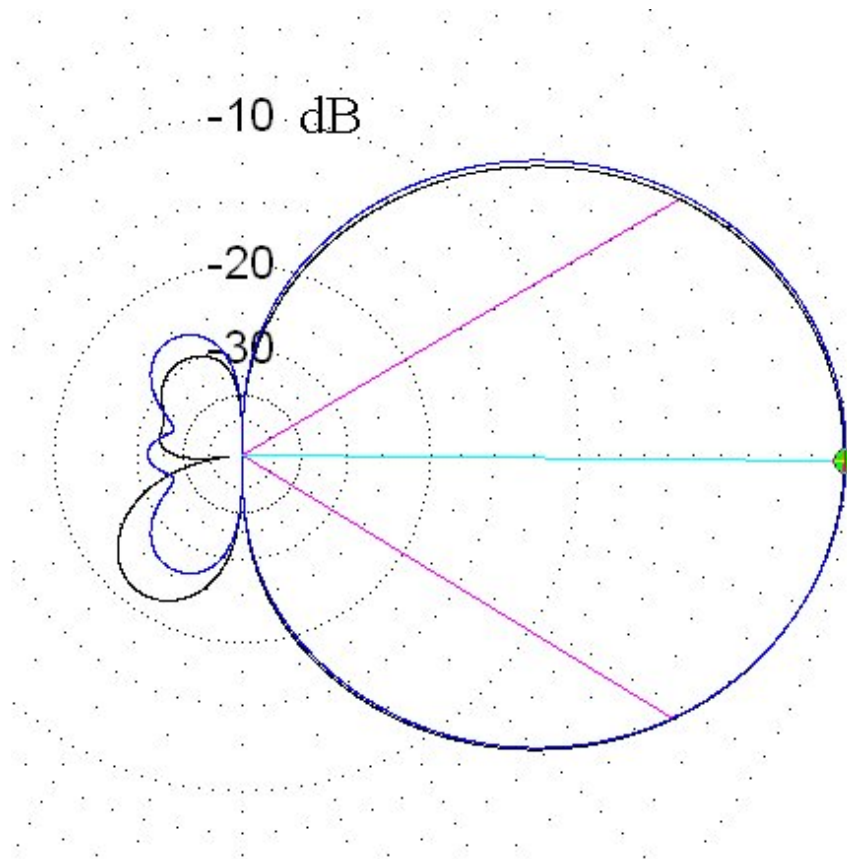


Abb. 15: EZNEC- Abstrahlprogramm für die korrigierten Elementlängen entsprechen Abb. 13 . Symmetrischer Stromverteilung im Strahler: blaue Kurve, Unsymmetrie im Speisestrom von 1%: schwarze Kurve. Die Unsymmetrie beeinflusst den 3 dB Öffnungswinkel von 63 Grad nahezu nicht, Gewinn der Vorwärtsstrahlung 6 dBd.

Gewinnabschätzung

Unter den vorhandenen experimentellen Möglichkeiten war eine Abschätzung des Antennengewinns nur über die Richtwirkung der Antenne möglich. Beide Größen sind eng miteinander verbunden. Meist wird die Richtwirkung über den Öffnungswinkel bei der halben Leistung der Hauptkeule(half power bandwidth) im Antennendiagramm angegeben. Aus der Größe dieses (minus) 3 dB Öffnungswinkel lässt sich der Gewinn abschätzen. Das ARRL Antennabook (19th ed., S. 8-3) gibt folgende Näherungsformel für Gewinn und Öffnungswinkel:

$$G = 10 \lg(41253 / \Theta_h * \Theta_v)$$

G= Gewinn in dB in Hauptabstrahlrichtung

Θ_h = horizontaler 3 dB Öffnungswinkel in Grad

Θ_v =vertikaler 3 dB Öffnungswinkel in Grad

Die Formel setzt Antennen mit kleinem Öffnungswinkel und geringer Abstrahlung aus Nebenkeulen voraus. Abb. 16 zeigt eine graphische Darstellung für diese Beziehung unter Korrektur der außerhalb der Hauptkeule (main lobe) abgestrahlten Energie (Abb. 14). Für den vertikalen 3 dB Öffnungswinkel werden 110 Grad eingesetzt. Dieser Wert folgt aus EZNEC Rechnungen unter Verwendung der ermittelten Antennenparameter.

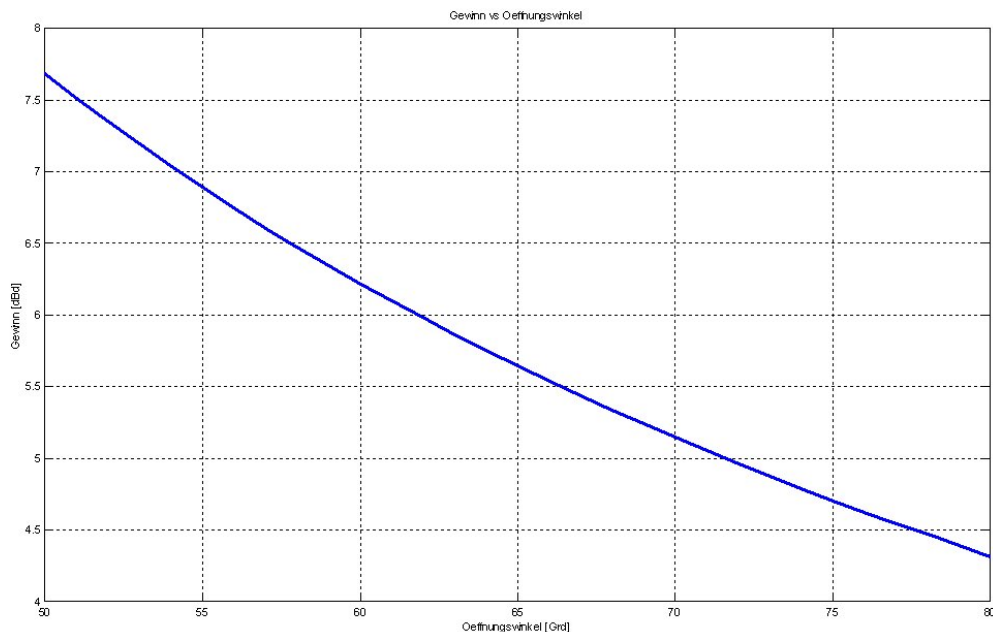


Abb. 16: Antennengewinn [dBd] gegenüber dem 3 dB Öffnungswinkel

Abb. 17 zeigt die gemessene Hauptkeule der (Längen-) optimierten Antenne von DL9CI, zusammen mit dem aus diesen Antennendimensionen berechneten Daten von EZNEC. Die Übereinstimmung ist überzeugend. Der Öffnungswinkel liegt bei 63 Grad, woraus über Abb. 16 ein Gewinn von 6 dBd erzielt wird. Der Vergleich von Abb. 9b und Abb. 15 zeigt, dass mit der Optimierung auf ein günstiges F/B Ratio der Öffnungswinkel nahezu konstant bleibt. Dies wird besonders in Abb. 13 und Abb. 18 für die Antenne von DJ3AA deutlich. Aus Gründen der Energiebilanz ist der Umstand verständlich.

Die Fa. steppIR gibt für 18 MHz, normal mode, einen Freiraumgewinn von 6.2 dBd (berechnet) und 5.5 dBd (gemessen) an. SteppIR macht allerdings keine näheren Angaben wie die Messungen erfolgt sind. Da die Bestimmung des Gewinns über den Öffnungswinkel elektrische Verluste im Antennensystem nicht einschließt sind die Angaben von steppIR mit den Messungen der Antenne von DL9CI durchaus verträglich.

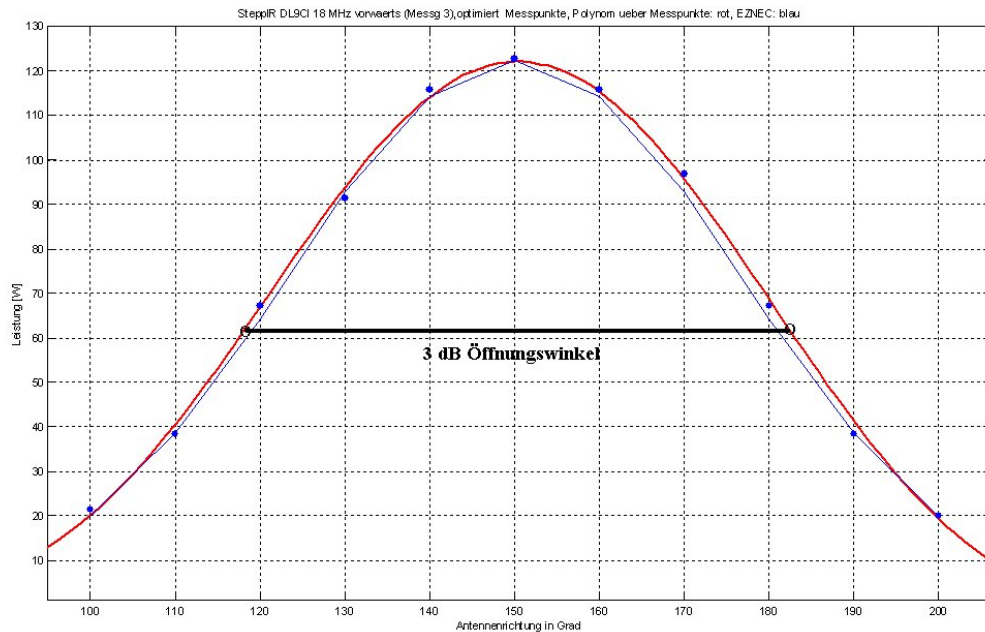


Abb. 17: Vergleich gemessene Hauptkeule für die optimierte Antenne DL9CI (blaue Messpunkte mit angepasstem Polynom, rot) mit EZNEC Berechnung entsprechend den optimierten Elementlängen (blau). Die Übereinstimmung ist beachtenswert. Der Öffnungswinkel beträgt 63 Grad.

Ungeklärt ist die Ursache des großen Öffnungswinkels von 80 Grad bei der Antenne von DJ3AA (Abb. 13 und Abb. 18). Der hohe Wert ist vor allem deshalb unverständlich, weil die Rückwärtsunterdrückung gut und vergleichbar mit der Antenne von DL9CI ist. Die Folge ist ein Rückgang des Gewinns auf ca. 4.5 dBd. Die signifikante Abweichung beim steppiR von DJ3AA in den Öffnungswinkeln ist nicht auf 18 MHz beschränkt. Abb. 19 zeigt dies im Vergleich der Antennen DJ3AA und DL9CI. Im Bild erkennt man im Rückwärtsbereich eine Amplitudenüberhöhung zwischen den Winkeln 0-50 Grad. Wie im Text schon erwähnt, liegt die Ursache vermutlich in einer Asymmetrie der Stromverteilung auf den Strahlerelementen. Ein Zusammenhang mit dem ungeklärt großen Öffnungswinkel ist aber schon aus Energiegründen auszuschließen.

Abb. 19 enthält zusätzlich ein bei DL3AO aufgenommenes Abstrahldiagramm des 4 el KLM Yagi von DJ3VW. (Distanz DJ3VW-DL3AO 2.28 km, hindernisfreie Strecke)

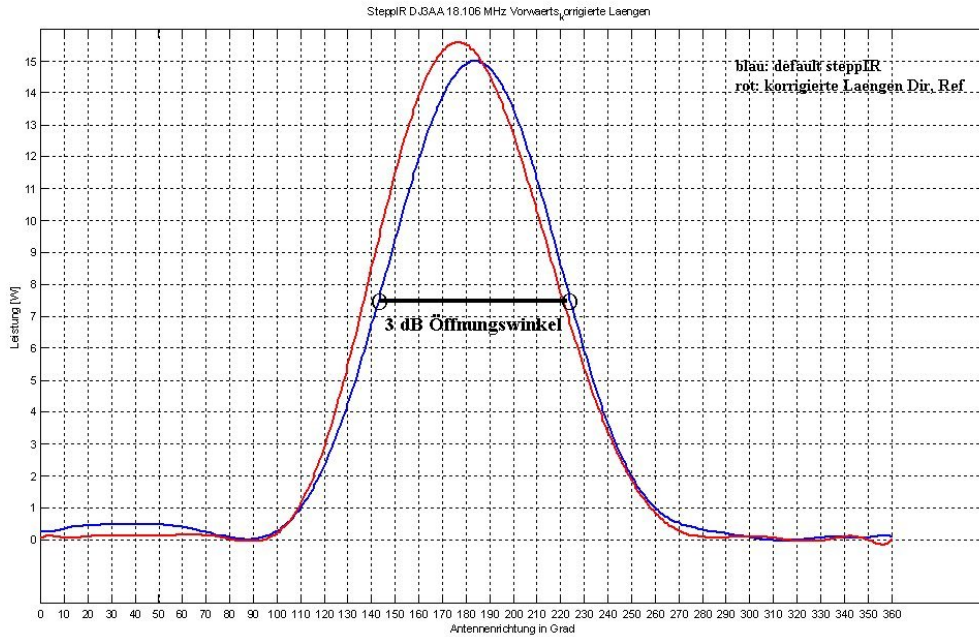


Abb. 18: Öffnungswinkel von 80 Grad, Antenne DJ3AA, default Längen (blau), optimierte Längen (rot). Die Optimierung des F/B und F/R Ratio wirkte sich nicht auf den Öffnungswinkel aus. (Der Versatz im Winkelbereich ist vermutlich durch einen starken Sturm zwischen den Messungen bedingt!)

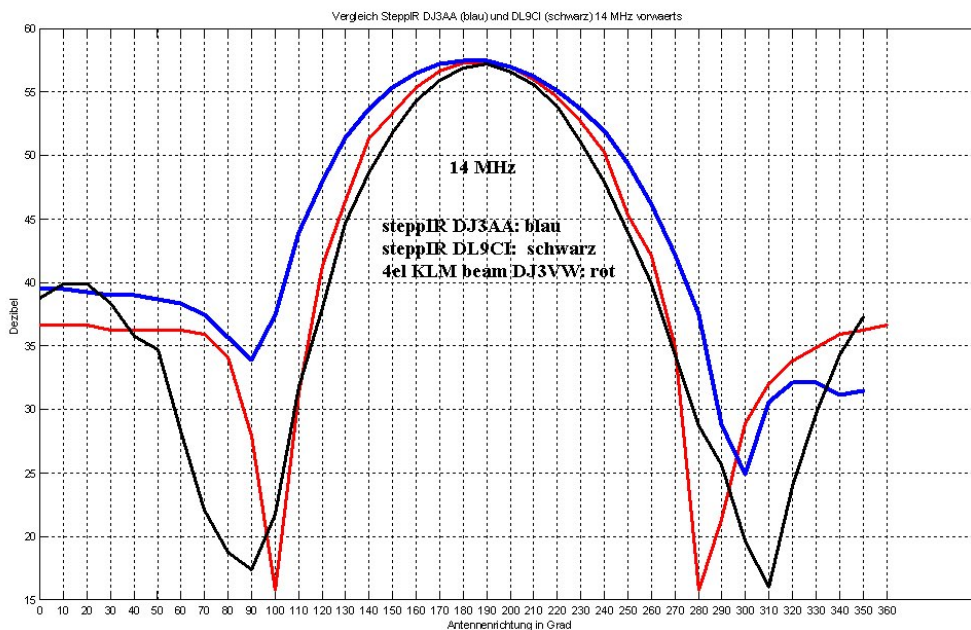


Abb. 19: Vergleich der gemessenen Antennenabstrahlung DJ3AA und DL9CI, 14 MHz, steppIR, normal mode, zusammen mit der Abstrahlung eines 4 el KLM Yagis von DJ3VW. Ungeklärt ist der große Öffnungswinkel bei der Antenne von DJ3AA

Dank.

Wolfgang Hummel, DJ3VW, hat den Rauschgenerator und die Dämpfungsuhr zur Verfügung gestellt.

