

Bachelorarbeit

Entwicklung einer zirkular polarisierten Sendeantenne (53,5 MHz) mit Strahlungsmaxima bei Zenitwinkeln von etwa 15° - 60° und des erforderlichen Speisesystems

eingereicht von: eingereicht am: Betreuer: Toralf Renkwitz 13.04.2006 Dr. W. Singer (IAP Kühlungsborn) Prof. T. Weber (Uni Rostock) PD Dr. A. Ahrens (Uni Rostock)



Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit für Herrn

cand. ing. Toralf Renkwitz

Entwicklung einer zirkular polarisierten Sendeantenne (53,5 MHz) mit Strahlungsmaxima bei Zenitwinkeln von etwa 15° - 60° und des erforderlichen Speisesystems

Meteorbeobachtungen werden zurzeit mit VHF-Radars (Betriebsfrequenz 53,5 MHz) in Kühlungsborn und Andenes (Norwegen) durchgeführt. Eine gekreuzte 3-Element Yagi-Antenne (zirkulare Polarisation) dient als Sendeantenne mit ungerichtetem Strahlungsdiagramm. Meteore können so aus allen Richtungen erfasst werden. Die Ortung der Meteorechos erfolgt mit einem 5-Kanal Interferometer (Bestimmung von Entfernung, Azimut und Erhebungswinkel). Die Datenausbeute der Meteorbeobachtungen im Höhenbereich 80 km - 100 km ist für zeitlich besser aufgelöste Windmessungen (bisher 1 Stunde) zu erhöhen. Dies kann nur durch Erhöhung der abgestrahlten Leistung in Kombination mit einer Sendeantenne mit einem gerichteten Strahlungsdiagramm erreicht werden. Die Anordnung sollte Strahlungsmaxima in entgegen gesetzten Richtungen bei Zenitwinkeln zwischen etwa 15° und 60° besitzen. Der Radarsender besteht aus 6 unabhängigen Sendemodulen (je 12 kW PEP) von denen zurzeit nur vier für Meteorbeobachtungen genutzt werden. Die geräteseitigen Voraussetzungen zur Nutzung aller 6 Sendemodule im Meteormode sind geschaffen; 3-dB Leistungsteiler zur möglichen Aufspaltung der Senderausgänge (Speisung von mindestens 12 Einzelstrahlern) sind vorhanden. Low-loss Speisekabel (LMR600) ist ebenfalls verfügbar.

Vorarbeiten zeigten, dass ein entsprechendes Strahlungsdiagramm mit einer kreuzförmigen Anordnung von 12 gekreuzten Yagi-Antennen erreicht werden kann. Es sind folgende Punkte in der Arbeit zu behandeln:

- Vergleich der Strahlungsdiagramme der am IAP bisher eingesetzten Standard-Yagi-Antenne und einer Neuentwicklung mit höherem Gewinn,
- Detailbeschreibung der neuen Yagi-Antenne für die Fertigung,
- Entwicklung des Speisesystems zur Erzeugung zirkularer Polarisation (in der Erprobungsphase muss ein Wechsel zwischen rechts- und links-zirkularer Polarisation möglich sein)
- Entwicklung und Erprobung einer phasenstabilen, witterungsun
empfindlichen Anpassung des symmetrischen Dipols an das unsymmetrische Speisekabel (50
 Ω) und
- Anordnung der neuen Sendeantenne und des vorhandenen Interferometers für den Empfang auf dem Antennenfeld des IAP.

Betreuer:

Dr. W. Singer (IAP Kühlungsborn) Prof. T. Weber (Uni Rostock) PD Dr. A. Ahrens (Uni Rostock)

 Tag der Ausgabe:
 17.02.2006

 Tag der Abgabe:
 17.04.2006

Inhaltsverzeichnis

	Inha	altsverzeichnis	i
1	Kur	rzfassung	1
2	\mathbf{Ein}	führung	2
3	Yag	i-Antennen	4
	$\begin{array}{c} 3.1\\ 3.2 \end{array}$	Definition und geschichtliche Betrachtung	$\frac{4}{5}$
4	Ant	ennenanalyse	6
	4.1	3-element Kreuz-Yagi-Antenne IAP	7
		4.1.1 Antennengeometrie	7
		4.1.2 Strahlungsdiagramm	8
		4.1.3 Impedanz	10
	4.2	Standard 4-element Yagi-Antenne IAP	12
		4.2.1 Antennengeometrie	12
		4.2.2 Strahlungsdiagramm	13
		4.2.3 Impedanz	15
	4.3	Optimierte 4-element Yagi-Antenne	17
		4.3.1 Optimierte 4-element Yagi-Antenne im freien Raum	18
		4.3.2 Optimierte 4-element Yagi-Antenne über realem Boden	23
	4.4	Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen	27
		4.4.1 Anforderungen an die Antennengruppe	27
		4.4.2 Antennengeometrie	28
		4.4.3 Speisung der 12x 4-element Yagi-Gruppe	30
		4.4.4 Strahlungsdiagramme der 12x 4-element Yagi-Antennengruppe	39
	4.5	Vergleich 12x 4-element Yagi-Antennengruppe mit bisher genutzter	
		3-element Kreuz-Yagi-Antenne	47
5	\mathbf{Spe}	isung der optimierten Yagi-Antennen	48
	5.1	Speisung der Einzelantenne	48
	5.2	Speisung der Antennengruppe	49
	5.3	Länge der Phasenleitungen	52
6	Pra	ktische Ausführung der Antennen	53
	6.1	Tragrohr	53
	6.2	Elemente	53
	6.3	Faltdipol	54
	6.4	Dipolanschlusskasten	54
	6.5	Elementhalter	55

7	Anordung der Antennengruppe auf dem IAP-Antennenfeld7.1Anordnung der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne7.2Anordnung der Meteorradar-Sendeantennen	56 56 62
8	Erweiterungsmöglichkeiten8.124 optimierte 4-element Yagi-Antennen8.212 optimierte 4-element Kreuz-Yagi-Antennen	64 64 66
9	NEC9.1NecWinPro9.2Minder- und Übersegmentierung9.3Zeitaufwand	69 69 69 72
10	Zusammenfassung	73
	Begriffe und Abkürzungen	Ι
	Abbildungsverzeichnis	II
	Anhang	\mathbf{V}
	Erklärung	VII

1 Kurzfassung

Das Institut für Atmosphärenphysik mit Sitz in Kühlungsborn führt unter anderem seit 1999 Radaruntersuchungen - Meteorradar-Untersuchungen - von in der Erdatmosphäre verglühenden Meteoroiden durch. Die in die Erdatmosphäre eintretenden Meteoroide verglühen in einer Höhe zwischen 80 und 110 km. Auf der Bahn durch die Atmosphäre bilden die verglühenden Meteoroide eine Ionisationsspur, die die Fähigkeit zur Reflektion von elektromagnetischen Wellen aufweist.

Die erzeugten Radarsignale werden unter der Bedingung des senkrechten Auftreffens des Radarsignals auf die Ionisationsspur zurück reflektiert. Die Eigenschaften der zu empfangenen Radarechos geben Aufschluss über Eigenschaften der Erdatmosphäre in einer Höhe von etwa 95 km. So können daraus unter anderem der Horizontalwind und letztendlich die Temperatur in den Höhen um 90 km abgeleitet werden. Diese Meteorradar-Untersuchungen können für sporadische Meteoroide oder Meteorströme genutzt werden, wobei dabei die Entfernung, die Geschwindigkeit und die Richtung, aus der die Meteoroide in die Atmosphäre eintreten, bestimmt werden können.

Als Sendeantenne wurden bislang einzelne zirkular polarisierte gekreuzte Yagi-Antennen verwendet, die aufgrund ihres Aufbaus in Hauptstrahlrichtung eine annähernd gleiche Richtcharakteristik besitzen, d.h. die Eigenschaften in dem für die Meteorradar-Untersuchungen interessanten Strahlungsbereich sind nahezu unverändert. Durch diese Richtcharakteristik werden allerdings auch große Anteile der Sendeleistung in Richtungen mit geringer Nutzungsmöglichkeit der Meteorechos abgestrahlt. Dies betrifft vor allem die zenit- und horizontnahen Richtungen.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass es möglich ist, die Strahlungsleistung in dem für die Meteorradar-Untersuchungen interessanten Strahlungsbereich zu erhöhen und gleichzeitig in nicht relevante Richtungen zu verringen. Somit ist es von Interesse eine sendeseitige Antennenanordnung mit speziellem Richtdiagramm für das Meteorradar zu entwickeln. Die für diese Aufgabenstellung notwendige, neu entwickelte Grundantenne wird beschrieben. Diese Erweiterung des vorhandenen Meteorradars ist nötig, um die Datenausbeute der Meteorbeobachtungen und damit die zeitliche Auflösung der Windmessungen zu verbessern.

2 Einführung

Meteorradar-Experimente

In die Erdatmosphäre eindringende Meteoroide können durch Radarortung, der vom verglühenden Meteoroid in Höhen zwischen 80 und 110 km erzeugten Ionisationsspur, beobachtet werden. Das reflektierte Radarsignal erfährt dabei eine Dopplerverschiebung, da die Meteorspur vom Hintergrundwind mitgeführt wird. Aus den Beobachtungsgrößen des Meteorechos - Entfernung, Azimut und Elevation, Dopplergeschwindigkeit und Lebensdauer - können verschiedene atmosphärische und astronomische Parameter abgeleitet werden. Die Parameter beinhalten das Höhenprofil des Horizontalwindes, die Höhenverteilung der Meteore, das Höhenprofil des ambipolaren Diffusionskoeffizienten sowie die daraus abgeleitete Temperatur im Maximum der Meteorschicht um etwa 90km. Für Meteorströme können weiterhin der Radiant der einfallenden Meteoroide und ihre Eintrittsgeschwindigkeit bestimmt werden. Im November 1999 wurde an der Außenstation Juliusruh des IAP ein all-**SKy** interferometer-**MET**eor-Radar (SKiYMET) auf der Frequenz 32,55 MHz in Betrieb genommen. Das Radar verwendet für den Empfang ein 5-Antennen Interferometer mit zirkular polarisierten Antennen, die eine nahezu gleichmäßige azimutale Empfindlichkeit für Meteorechos garantieren. [IAP99]

Die Mehrzahl der in die Erdatmosphäre einfallenden Meteoroide verglüht in Höhen zwischen etwa 75km und 120km und erzeugt dabei eine etwa 15km lange Ionisationsspur. Radarbeobachtungen der vom Wind mitgeführten Ionisationsspur ermöglichen die Bestimmung des Neutralgaswindes aus der gemessenen Dopplerverschiebung und die Bestimmung der Neutralgastemperatur aus der Abklingzeit des Meteorechos. [Sin05]

Als Sendeantenne wurden bislang einzelne zirkular polarisierte Yagi-Antennen genutzt, wobei große Anteile der Strahlungsleistung außerhalb des Haupterfassungsbereiches lagen. Die bisherigen Sendeantennen hatten ihr jeweiliges Strahlungsmaximum im Zenit und nicht in den für die Meteorradar-Untersuchungen wichtigen Richtungen.

In der gegebenen Aufgabenstellung ist dazu ein Maximum der Strahlungsleistung mit einem Zenitwinkel zwischen 15° und 60° gefordert. Durch diese gewünschte Hauptstrahlrichtung und Erhöhung der Strahlungsleistung ist ein Antennenmehraufwand nötig.

Das empfangsseitig genutzte 5-Kanal Interferometer, bestehend aus 5 2-element Kreuz-Yagi-Antennen auf dem Antennenfeld des IAP, wird in der Struktur nicht verändert. Es wäre allerdings eine räumliche Verlegung des Antennensystems sinnvoll. Dies wird im Kapitel 7 behandelt.



Abbildung 2.1 zeigt ein Beispiel für eine typische Verteilung von Meteorreflektionen vom 11. April 2006, wie sie am IAP mit dem 53,5 MHz Meteorradar aufgenommen wurde.

Abb. 2.1: Darstellung empfangener Meteorreflektionen über die Zenitwinkel vom 11. April 2006

Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl in Richtung Zenit (bis etwa Zenitwinkel $\theta = 20^{\circ}$) als auch in Horizontnähe ($\theta > 70^{\circ}$) die Reflektionsanzahl gering ist. Ab einem Zenitwinkel von $\theta = 75^{\circ}$ nimmt die Häufigkeit der Meteorreflektionen stark ab. Daraus ist zu erkennen, dass es zweckmäßiger ist, die Strahlungseigenschaft der Sendeantenne auf die Richtungen zu beschränken, bei denen eine größere Häufigkeit an Meteorreflektionen anzunehmen ist. Somit ist es Ziel dieser Arbeit einen sendeseitigen Antennenaufbau zu erstellen, bei dem speziell die Richtungen mit größere Meteorreflektionshäufigkeit bevorzugt und Richtungen mit geringer Meteorreflektionshäufigkeit zu dämpfen sind.

3 Yagi-Antennen

3.1 Definition und geschichtliche Betrachtung

Als Yagi-Antennen werden Antennen bezeichnet, die auf dem Prinzip der von Hidetsugu Yagi und Shintaro Uda ab etwa 1924 an der Universität Tohoku in Sendai, Japan, entwickelten Richtantennen beruhen.

Dabei wirkt ein gespeistes Element (Dipol) zusammen mit strahlungsgekoppelten parasitären Elementen (Reflektoren, Direktoren). Bei solcher Konstruktion handelt es sich um Längsstrahler, da die Hauptstrahlrichtung entlang der Längsachse der Antenne liegt. Kennzeichnend für derartige Antennen ist eine Bündelung der Strahlung mit möglichst hohem Gewinn und hoher Rückdämpfung.

Veröffentlicht wurde diese Entwicklung ab 1926.

Ehrenspeck und Poehler führten 1958 Untersuchungen an homogenen Yagi-Antennen durch, wobei sie feststellten, dass bei gleichen Längen und Abständen der Direktoren zueinander eine Gewinngrenze der Antenne ab einer Antennenlänge von etwa 3λ auftrat (siehe [Ehr59]). Dadurch wurde vor allem für lange Antennen nicht der Optimalgewinn erreicht, zudem waren diese Antennenstrukturen durch eine eingeschnürte Hauptkeule und einer Vielzahl von schwach unterdrückten Nebenzipfeln geprägt.

Im Jahr 1976 stellte u.a. Günther Hoch durch Versuche fest, dass bei verschieden gestaffelten Längen und Abständen der Direktoren eine wesentliche Verbesserung zu erreichen ist und beschrieb dies in [Hoc77] und [Hoc78]. Gleichzeitig konnte damit der Gewinn bei gleicher Antennenlänge um etwa 1 dB verbessert werden.

Diese Yagi-Antennenvarianten wurden nahezu ausschließlich mit Dipolimpedanzen von $Z = 50\Omega$ für gestreckte Dipole bzw. $Z = 200\Omega$ für Faltdipole entwickelt.

Olaf Oberrender entwickelte zur etwa gleichen Zeit experimentell eine inhomogene Yagi-Antenne mit einer Impedanz des Faltdipols von $Z = 75\Omega$. [Obe82]

Gegen 1990 begann z.B. Rainer Bertelsmeier mit der computergestützten Optimierung von Yagi-Antennen nach Günther Hoch. Es gelang den Gewinn und vor allem das Strahlungsdiagramm zu optimieren. [Ber90]

Um 1994 begann Martin Steyer mit der computergestützten Optimierung von Yagi-Antennen mit niederohmiger Impedanz. [Ste97]

3.2 Optimierung von Yagi-Antennen

Ein gestreckter Dipol im freien Raum besitzt eine Impedanz von $Z = (50 - 75)\Omega$, ein Faltdipol eine Impedanz von $Z = (200 - 300)\Omega$.

Werden zu dem Dipol parasitäre Elemente (Reflektoren oder Direktoren) hinzugefügt, werden diese strahlungsgekoppelt. Aufgrund von Phasenverschiebung in den parasitären Elementen wird eine Richtwirkung erzielt. Durch diese Änderung der Antennenstruktur verändert sich folglich auch die Impedanz des Dipols. Dabei ist die Reaktanzänderung des Dipols durch Längenänderung zu korrigieren.

Bei der Optimierung von Yagi-Antennen wird die Antennenstruktur, gemeint sind dabei Elementlängen und deren Positionen, bezüglich des Dipols verändert.

Durch diese Veränderungen entstehen unterschiedliche Strahlungseigenschaften der Antennenstruktur. Eine Optimierung erfolgt dabei zumeist dem Zweck der Verbesserung des Gewinns, der Rückdämpfung und der Reduktion der Nebenzipfel.

Wird diese Optimierung konsequent durchgeführt, ergibt sich am Dipol eine wesentlich niedrigere Impedanz und eine geringere Bandbreite. Um eine unkritische Antenne zu erreichen, ist aus den Optimierungsforderungen ein Kompromiss zu finden. Dieser Kompromiss aus Gewinn, Bandbreite und mechanischer Realisierbarkeit (Toleranzen in der Fertigung) wird für VHF-Antennen u.a. von Martin Steyer [Ste97] für einen gestreckten Dipol mit einer Impedanz $Z = (20 - 30)\Omega$ angegeben, dies entspricht einer Impedanz für einen Faltdipol von $Z = (80 - 120)\Omega$, und stellt eine günstige Balance der Antennenparameter dar. Gleichzeitig ist bei der Optimierung von Yagi-Antennen darauf zu achten, dass der in den parasitären Elementen fließende Strom in Strahlungsrichtung möglichst kontinuierlich abnimmt und keine Sprünge aufweist. Dies ist insbesondere bei langen Yagi-Antennen (größer 2 Wellenlängen) zu beachten.

Desweiteren ist es bei Yagi-Antennen auffällig, dass der Verlauf des Stehwellenverhältnisses oberhalb der Resonanzfrequenz stärker ansteigt als unterhalb. Dies kann bei stark optimierten Yagi-Antennen zu Problemen führen, wenn sich die Resonanzfrequenz bei Witterungseinflüssen wie Schnee- und Eisbesatz, oder sogar bei Regen verringert, dass auf der Nutzfrequenz bereits ein beträchtlicher Rücklauf entsteht.

4 Antennenanalyse

In dem Kapitel Antennenanalyse werden verschiedene für die Meteorradar-Untersuchungen relevanten Yagi-Antennen hinsichtlich ihrer Strahlungseigenschaften und Impedanzverläufe untersucht.

Die Grundlage für diese Eigenschaften ist in der Antennenstruktur, die Speisung der einzelnen Antennen bei Antennengruppen, die Wirkung des Erdbodens und andere in der Nähe angeordnete Antennenstrukturen gelegt.

In der Abbildung 4.1 sind die bei WinNecPro verwendeten Koordinaten dargestellt. Diese Koordinaten werden bei allen folgenden Betrachtungen verwendet. Dabei bilden x- und y-Achse beim Übergang zur Betrachtung realen Bodens die Oberfläche des Erdbodens und die z-Achse die Höhenorientierung in Richtung Zenit. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass ϕ entgegen der geographischen Orientierung läuft.



Abb. 4.1: NEC Koordinaten

Grundlegende Strahlungseigenschaften eines Dipols und von Yagi-Antennenstrukturen wurden unter anderem von Meinke, Gundlach [Mei04], Kark [Kar04], Johnson [Joh93] und Rothammel [Rot95] dargestellt.

Für diese Arbeit sind vor allem die Eigenschaften der Yagi-Antennenstrukturen von Interesse, da die geforderten Strahlungseigenschaften für die gegebenen Möglichkeiten vornehmlich mit diesen Antennenstrukturen zu lösen sind.

Nachfolgend werden die derzeit verwendete 3-element Kreuz-Yagi-Antenne, die Standard 4-element Yagi-Antenne, eine neu entwickelte optimierte 4-element Yagi-Antenne und eine Gruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen behandelt.

Die Strahlungseigenschaften und der Impedanzverlauf für die Standard 4-element Yagi-Antenne des IAP wurden von J. Rubach bereits untersucht. [Rub97]

Diese Standard 4-element Yagi-Antenne des IAP dient neben der bisher für das IAP 53,5 MHz Meteorradar verwendeten 3-element Yagi-Antenne als Vergleich zu der mit dieser Arbeit entworfenen optimierte 4-element Yagi-Antenne.

4.1 3-element Kreuz-Yagi-Antenne IAP

Seit 2001 wird als Sendeantenne für das Meteorradar am IAP in Kühlungsborn eine 3-element Kreuz-Yagi-Antenne verwendet.

Diese 3-element Kreuz-Yagi-Antenne besteht aus 2 linearen Yagi-Antennen, die um 90° zueinander versetzt aufgebaut sind. Die Kreuz-Yagi-Antenne hat eine Impedanz von etwa $Z = 200\Omega$ bei der Nutzfrequenz 53,5 MHz und strahlt mit einem Öffnungswinkel von 100°. Die Bündelung mit Strahlungsmaxima in Richtung Zenit ist relativ gering, da zur Zeit des Aufbaus ein möglichst großer Bereich des Himmels gleichmäßig bestrahlt werden sollte. Durch einen Phasenversatz von 90° zwischen den beiden Speisekabeln der Dipole wird eine zirkulare Polarisation erzeugt. Abhängig von der Phasenlage beider Dipole zueinander

zirkulare Polarisation erzeugt. Abhängig von der Phasenlage beider Dipole zueinander $(+90^{\circ} \text{ oder } -90^{\circ})$ entsteht eine links- oder rechtsdrehende zirkulare Polarisation.

Modell	Name	meteortx3el
	Beschreibung	3-element Kreuz-Yagi-Antenne
	Boden	
	- Relative Dielektrizitätszahl ϵ	13,0
	- Leitfähigkeit σ	0,004 S/m
Analyse	Maximaler Gewinn, G	6,99 dBi
	Öffnungswinkel,Halbwertsbreite (-3 dB)	100°
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	-
	Nebenzipfeldämpfung	-

4.1.1 Antennengeometrie

Die Abmaße der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne sind in folgender Tabelle dargestellt. Zusätzlich ist die Antenne in der Abbildung 4.2 dargestellt.

Elementlänge	Länge Reflektor	3,200 m
	Länge Faltdipol	$2,674 { m m}$
	Länge 1. Direktor	$2,430 \mathrm{~m}$
	Länge 2. Direktor	$2,400 { m m}$
Position zu Faltdipol	Reflektor	-0,980 m
	Faltdipol	0,000 m
	1. Direktor	$0,285~\mathrm{m}$
	2. Direktor	1,090 m

Die in Abbildung 4.2 angedeuteten Punkte bei y=0 und jeweils in z-Richtung 0,1 m oberhalb der in y-Richtung deutlich sichtbaren Antennenelemente symbolisieren die um 90° gedrehten Antennenelemente, die sich in x-Richtung ausbreiten. Das Tragrohr der Antennenelemente verläuft entlang der z-Achse und wurde in der Abbildung zur besseren Sichtbarkeit der um 90° versetzten Antennenebene nicht dargestellt.



Abb. 4.2: Antennengeometrie, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP

4.1.2 Strahlungsdiagramm



Abb. 4.3: Strahlungsdiagramm, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP

In Abbildung 4.3 ist das Strahlungsdiagramm als Draufsicht in Längsrichtung der Antennenstruktur dargestellt. Bei der Simulation zeigte sich, dass der Gewinn der Antenne stark von der Aufbauhöhe abhing. Ähnliche Änderungen der Strahlungseigenschaften traten bei Veränderungen der Bodenwerte auf.



Abb. 4.4: Strahlungsdiagramm, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP

4.1.3 Impedanz

Die Impedanz der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne beträgt laut Simulation auf der Nutzfrequenz 53,5 MHz etwa $Z = 190\Omega$. Die Abweichung zur gewünschten Impedanz von $Z = 200\Omega$ und die sich daraus ergebene Rückflussdämpfung a> 32 dB ist zu vernachlässigen, zumal dies beim Aufbau durch Abgleich der Elementlänge korrigiert und an die Umgebung angepasst werden kann.

Input Impedance vs Frequency



Abb. 4.5: Impedanz, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP

In Abbildung 4.5 ist der simulierte Verlauf der Impedanz für die 3-element Kreuz-Yagi-Antenne dargestellt. Der imaginäre Anteil der Impedanz (blau dargestellt) steigt bis 56 MHz nahezu linear an, eine Welligkeit ist nicht zu erkennen. Zwischen 56 MHz und 57 MHz schwanken Imaginärteil und Realteil (rot dargestellt) um nahezu 200Ω, der Betrag (magentarot dargestellt) erreicht bei 56,5 MHz 450Ω. Diese Impedanzsprünge oberhalb der Resonanzfrequenz sind typisch für Yagi-Antennen.





Abb. 4.6: Stehwellenverhältnis, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP

Abbildung 4.6 zeigt das Stehwellenverhältnis für eine Impedanz von 200 Ω und damit die nutzbare Bandbreite der Impedanz von über 8 MHz, legt man ein maximales Stehwellenverhältnis von 3 für eine Beurteilung fest. Diese Antenne ist ohne größere mechanische Arbeiten auch bei Änderungen der Nutzfrequenz um +2 bzw. -4 MHz nutzbar, wobei sich neben der Impedanz der Gewinn von 5,4 dBi bei 49,5 MHz auf 7,55 dBi bei 55,5 MHz ändert. Gleichzeitig verkleinert sich der Öffnungswinkel von 136° bei 49,5 MHz auf 88° bei 55,5 MHz.

Da die 3-element Kreuz-Yagi-Antenne als Sendeantenne für Meteorbetrieb dient, ist ein großer Öffnungswinkel für eine nahezu gleichmäßige Strahlung für $\theta = 0^{\circ}$ bis 60° erwünscht, daher ist eine weitere Optimierung zur Gewinnsteigerung nicht zweckmäßig, da dadurch zwangsläufig der Öffnungswinkel und die Bandbreite der Impedanz verringert wird.

4.2 Standard 4-element Yagi-Antenne IAP

Die Standard 4-element Yagi-Antenne des IAP ist eine 2,07 m lange lineare Richtantenne. Sie wurde beim IAP bei den 53,5 MHz Radarsystemen - SOUnding SYstem - OSWIN (Kühlungsborn) und ALWIN (Andenes, Norwegen) verwendet.

Die Entwicklung und der Aufbau des OSWIN-Radarsystems wurde in der Beleg- und Diplomarbeit von J. Rubach in [Rub97] und [Rub98] beschrieben. Die Antenne hat eine Impedanz am Faltdipol von etwa $Z = (190 + / - 0j)\Omega$ bei der Nutzfrequenz 53,5 MHz.

Der Entwurf dieser Antenne beruht auf der kommerziellen Anwendung für VHF-Fernseh-Empfang, wobei die notwendige Breitbandigkeit über das VHF-Fernseh-Frequenzband bestimmend war. Aus dieser Breitbandigkeit und der hohen Impedanz des Faltdipoles resultiert eine relativ große Halbwertsbreite (3 dB-Öffnungswinkel) von etwa 65,6° bzw. 113,6° mit einem Gewinn von 7.3 dB über einem Isotropstrahler in Hauptstrahlrichtung.

Modell	Name	SOUSY4el
	Beschreibung	4-element SOUSY Yagi-Antenne
	Boden	freier Raum
Analyse	Maximaler Gewinn, G	7,3 dBi
	$\phi = 0^{\circ} \text{ (E-Feld)}$	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	$65, 6^{\circ}$
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	-
	$\phi = 90^{\circ}$ (H-Feld):	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	$113,6^{\circ}$
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	-
	${ m Nebenzipfeld} { m ampfung}$	-

4.2.1 Antennengeometrie

In nachfolgender Tabelle sind die Abmaße der Standard 4-element Yagi-Antenne des IAP aufgeführt.

Elementlänge	Länge Reflektor	3,200 m
	Länge Faltdipol	$2,\!674 { m m}$
	Länge 1. Direktor	$2,430 { m m}$
	Länge 2. Direktor	$2,400 { m m}$
Position zu Faltdipol	Reflektor	-0,980 m
	Faltdipol	$0,000 { m m}$
	1. Direktor	$0,285~\mathrm{m}$
	2. Direktor	$1,090 { m m}$

Die Abmaße der Standard 4-element Yagi-Antenne sind in der Abbildung 4.7 dargestellt. Das Tragrohr der Antennenelemente ist wie bei der 3-elemente Kreuz-Yagi-Antenne nicht dargestellt.



Abb. 4.7: Antennengeometrie, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP

Auffallend ist der mit 3,2m relativ lange Reflektor (0,5714 λ) und die nahe Lage des ersten Direktors am gespeisten Faltdipol, die für eine Impedanz von etwa $Z = 200\Omega$ bei Yagi-Antennen mit mehr als 3 Elementen nötig ist. Desweiteren ist aus den Abmaßen zu erkennen, dass es sich um eine Antenne mit großer Bandbreite handelt, Anhaltspunkt dafür ist, dass 4 Elemente auf einer Antennenlänge von nur 0,357 λ aufgebaut sind.

\mathbf{Z} 3 0.5 0 Directive gain / dBi $\sin(\theta) \sin(\phi)$ -3 0 -6 _9 -0.5-12 S NEC model v4el fre -15 -0.5 $0\\\sin(\theta)\cos(\phi)$ 0.5 1 W Е

4.2.2 Strahlungsdiagramm

Abb. 4.8: Strahlungsdiagramm, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP

In Abbildung 4.8 ist das Strahlungsdiagramm der Standard 4-element Yagi-Antenne im freien Raum mit Sicht in Längsrichtung der Antennenstruktur dargestellt. Abbildung 4.9 zeigt das Strahlungsdiagramm der Standard 4-element Yagi-Antenne für Schnitte von $\phi = 0^{\circ}$ (E-Feld), 45° und 90° (H-Feld).



Abb. 4.9: Strahlungsdiagramm, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP

4.2.3 Impedanz

Die Impedanz der Standard 4-element Yagi-Antenne beträgt auf der Nutzfrequenz 53,5 MHz im freien Raum etwa $Z = 190\Omega$, dies entspricht einer Rückflussdämpfung von a> 32 dB.

Input Impedance vs Frequency



Abb. 4.10: Impedanz, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP

In Abbildung 4.10 ist der simulierte Verlauf der Impedanz für die Standard 4-element Yagi-Antenne dargestellt.

Der Realteil der Impedanz ist im Bereich 48 MHz bis 55 MHz nahezu konstant bei 200 Ω .

Der Imaginärteil der Impedanz steigt bis 56 MHz nahezu linear an, eine Welligkeit ist nicht zu erkennen.

Zwischen 56 MHz und 60MHz schwankt der Imaginärteil um über 200 Ω , gleichzeitig steigt der Realteil auf 400 Ω bei etwa 57 MHz. Dabei erreicht der Imaginärteil zweimal den Wert Null. Diese Impedanzsprünge oberhalb der Resonanzfrequenz sind typisch für Yagi-Antennen und waren zuvor auch bei der 3-element Kreuzyagi zu erkennen.

VSWR vs Frequency



Abb. 4.11: Stehwellenverhältnis, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP

Abbildung 4.11 zeigt das Stehwellenverhältnis für eine Impedanz von 200 Ω . Es ist die große Bandbreite der Impedanz von über 10 MHz zu erkennen, legt man ein maximales Stehwellenverhältnis von 3 für eine Beurteilung fest. Weiterhin ist diese Antenne ohne mechanische Arbeiten auch bei Änderungen der Nutzfrequenz um +/- 3 MHz nutzbar, wobei sich neben der Impedanz der Gewinn von 6.4 dBi bei 50,5 MHz auf 8.2 dBi bei 56,5 MHz ändert. Der prinzipielle Verlauf des Strahlungsdiagramms bleibt dabei unverändert. Ingesamt zeigt dies, dass diese Antenne aus einer Breitbandentwicklung hervorgeht.

Das bei 58 MHz vorhandene lokale Minimum beim Stehwellenverhältnis entsteht durch die zuvor erwähnte Änderung des Imaginärteils oberhalb der Resonanzfrequenz, wobei die Reaktanz zweimal 0 Ω erreicht. Bei 57,2 MHz beträgt der Imaginärteil etwa 0 Ω , der Realteil liegt allerdings bei 400 Ω , wodurch das lokale Maximum bei 57MHz geprägt ist. Prinzipiell ist es möglich eine Anpassung für die Frequenzen, bei denen die Reaktanz 0 Ω annimmt, zu erreichen, allerdings wäre dies bei 57,2 MHz eine hochohmige und bei 58,3 MHz eine niederohmige Speisung. In beiden Fällen wäre die nutzbare Bandbreite sehr gering und sollte nicht verwendet werden, wenngleich sich bei diesen Frequenzen ein höherer Gewinn einstellt.

Desweiteren zeigte sich, dass sich die Anpassung der Antenne bei geringen Längen- und Positionsänderungen der Elemente nur unwesentlich verändert.

Insgesamt ist festzustellen, dass es sich bei der 4-element Standard-Antenne um eine breitbandige und robuste Antenne handelt. Bei einer derartigen Antenne sind keine größeren Veränderungen der nutzbaren Bandbreite, auch bei Einbringung der Antenne in andere in der direkten Nähe aufgebauten Antennensysteme, zu erwarten.

4.3 Optimierte 4-element Yagi-Antenne

Da bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung und Verwendung des in Abschnitt 4.4 dargestellten Aufbaus mit der Standard 4-element Yagi-Antenne die gegebenen Anforderungen nicht erfüllt werden konnten, wurde eine optimierte 4-element Yagi-Antenne entwickelt.

Mit NECWin-Professional , Version 1.6, von Nittany Scientific (siehe Kapitel 9.1), wurde ein Antennenmodell mit dem Ziel entworfen, möglichst hohen Gewinn bei vorgegebener Trägerrohrlänge der Antenne zu erreichen.

Als Trägerrohrlänge der Antenne wurden etwa 3m festgelegt, da diese Länge unterhalb der mechanischen Stabilitätsgrenze einer Yagi-Richtantenne für den vorgegebenen Frequenzbereich liegt. Dies war besonders wichtig, da über eine zukünftige Nutzung der Antenne auf Andøya, Norwegen (69,3°N), nachgedacht wird, wo neben der Witterungsbeständigkeit vor allem die mechanische Belastbarkeit eine entscheidende Rolle spielt.

Der endgültige Entwurf stellt eine 4-element Yagi-Antenne mit einer Trägerrohrlänge von etwa 3,20m dar.

Die Antenne wurde vor allem mit Blick auf den Gewinn optimiert, da dieser für das Strahlungsdiagramm der geplanten Gruppenantenne hauptverantwortlich ist. Dabei sollte eine möglichst große Rückdämpfung vorhanden sein und Nebenmaxima in $+/-90^{\circ}$ vom Hauptmaxima vermieden werden.

Als erster Entwurf wurde eine optimierte 4-element Yagi-Antenne entwickelt, mit einer Impedanz von $Z = 112\Omega$ des Faltdipols auf der Resonanzfrequenz. Die Wahl dieser Impedanz wurde im Abschnitt 3.2 erläutert. Der nutzbare Frequenzbereich lag bei dem Modell bei +0,5 MHz bzw. -1,5MHz bezüglich der Nutzfrequenz, was mit Blick auf mögliche Resonanzverschiebung durch z.B. Eisbesatz zu gering ist für ein automatisch operierendes Radarsystem.

Dieser Entwurf wurde folglich aufgrund mangelnder Bandbreite und zu geringer Toleranzen wieder verworfen.

Zugunsten größerer Bandbreite und damit größerer Toleranz gegenüber Witterungs- und Umgebungseinflüssen wurde die Impedanz, durch Änderungen an der Antennenstruktur, von $Z = 112\Omega$ auf $Z = 200\Omega$ erhöht, wodurch allerdings der Gewinn um etwa 0,35 dB und die Rückdämpfung um 2 dB verringert wurde.

Die Simulation der neu entworfenen optimierten Yagi-Antenne zeigt um die gewünschte Nutzfrequenz von 53,5 MHz eine Impedanz des Faltdipols von $Z = 200\Omega$.

Nachfolgend wird die optimierte 4-element Yagi-Antenne im freien Raum und anschließend über realem Boden untersucht.

Modell	Name	$meteortx4el_{200r_freespace}$
	Beschreibung	optimierte 4-element
		Yagi-Antenne
	Boden	freier Raum
Analyse	Maximaler Gewinn, G	9,45 dBi
	$\phi = 0^{\circ}$ (E-Feld):	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	$57, 2^{\circ}$
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	85°
	$\phi = 90^{\circ} \text{ (H-Feld)}$:	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	$79,6^{\circ}$
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	$83,7^{\circ}$
	Nebenzipfeldämpfung ($\theta = -90^{\circ}90^{\circ}$)	-
	Rückdämpfung	13,2 dB

4.3.1 Optimierte 4-element Yagi-Antenne im freien Raum

Antennengeometrie

In der nachfolgenden Tabbelle sind die Abmaße der optimierten 4-element Yagi-Antenne aufgeführt, Abbildung 4.12 stellt die Antennengeometrie grafisch dar.

Elementlänge	Länge Reflektor	$2,790 { m m}$
	Länge Faltdipol	$2,\!604 { m m}$
	Länge 1. Direktor	$2,540 \mathrm{~m}$
	Länge 2. Direktor	$2,460 { m m}$
Position zu Faltdipol	Reflektor	-1,20 m
	Faltdipol	$0,00 \mathrm{~m}$
	1. Direktor	$0,82~\mathrm{m}$
	2. Direktor	$1,97 \mathrm{~m}$

In Abbildung 4.12 wird wiederum das in z-Richtung verlaufende Tragrohr für die Antennenelemente wie zuvor bei der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne und der Standard 4-element Yagi-Antenne nicht dargestellt.

Zu erkennen ist, dass die 4 Antennenelemente auf 3,17 m verteilt sind, dies entspricht 0,565 λ . Zum Vergleich wurden die 4 Antennenelemente bei der Standard 4-element Yagi-Antenne auf 2,08 m angeordnet (0,357 λ).



Abb. 4.12: Antennengeometrie der optimierten 4-element Yagi-Antenne

Strahlungsdiagramm

Das Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum ist in Abbildung 4.13 in Draufsicht dargestellt.

Es ist im Vergleich zum in Abbildung 4.8 dargestellten Strahlungsdiagramm der Standard 4-element Yagi-Antenne der kleinere Öffnungswinkel an dem stärker bedämpften Außenring ($\theta = 80^{\circ} - 90^{\circ}$) zu erkennen.



Abb. 4.13: Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum

Abbildung 4.14 zeigt das Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum für Schnitte von $\phi = 0^{\circ}$ (E-Feld), 45° und 90° (H-Feld).

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Antenne keine Nebenmaxima besitzt, es ist allerdings ab $\theta = 84^{\circ}$ ein Anstieg festzustellen. Die Rückdämpfung mit etwa 13 dB ist bei $\theta = 180^{\circ}$ zu erkennen.



Abb. 4.14: Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum

Impedanz

In Abbildung 4.15 ist der simulierte Verlauf der Impedanz für die optimierte 4-element Yagi-Antenne im freien Raum dargestellt.

Der Betrag der Impedanz beträgt im Bereich um die Nutzfrequenz 53,5 MHz etwa $Z=200\Omega.$

Input Impedance vs Frequency



Abb. 4.15: Impedanz der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum

Um die Nutzfrequenz 53,5 MHz ist eine Welligkeit der Reaktanz zu erkennen. Diese Welligkeit der Reaktanz wurde beim Entwurf bewusst erzielt. Die Begründung dafür ist die Entstehung von jeweils einem Rücklaufminimum unter- und oberhalb der Nutzfrequenz, die in Abbildung 4.16 zu erkennen sind.

Der Realteil der Impedanz liegt auf der Nutzfrequenz bei etwa 210 Ω .

Abbildung 4.16 zeigt das Stehwellenverhältnis der optimierten 4-element Yagi-Antenne, die Bandbreite der Impedanz im freien Raum beträgt etwa 3 MHz, legt man ein maximales Stehwellenverhältnis von 3 für eine Beurteilung fest.

Diese Antenne ist ohne mechanische Arbeiten in einem Frequenzbereich von +1,5 bzw. -2,5 MHz nutzbar.

<figure>

Abb. 4.16: Stehwellenverhältnis der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum

Die Minima des Stehwellenverhältnisses wurden absichtlich nicht auf die Nutzfrequenz gelegt, sondern mittig zwischen diese, um einen möglichst großen Toleranzbereich zu erhalten, um die Empfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen wie Regen- oder Schneebesatz zu verringen. Das bei der Nutzfrequenz 53,5 MHz vorhandene lokale Maximum liegt unterhalb von VSWR 1,1, die Rückflussdämpfung beträgt damit mindestens 26 dB und ist damit absolut unkritisch. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch die Speisung mit verlustbehaftetem Koaxialkabel nicht unerheblicher Länge die Anpassung verbessert wird.

Bei Veränderung der Nutzfrequenz im angegebenen Bereich ändert sich der Gewinn von 8,95 dBi bei 51 MHz und 9,78 dBi bei 55 MHz, wobei sich der Öffnungswinkel von 61° bei 51 MHz auf 55° bei 55 MHz verkleinert.

VSWR vs Frequency

4.3.2 Optimierte 4-element Yagi-Antenne über realem Boden

Antennengeometrie

An der Antennengeometrie wurden gegenüber der Simulation im freien Raum keine Änderungen vorgenommen, die Simulation und Analyse berücksichtigen nun den Einfluss des Bodens auf die Antenne, bei einem Aufbau des Reflektors der Antenne 1m über dem Erdboden. Als Boden wurde ein für die Gegend um das IAP typisches Geländeprofil ohne Einfluss von Schnee genutzt.

Modell	Name	meteortx4el_200r
	Beschreibung	opt. 4-element Yagi-Antenne
	Boden	
	- Relative Dielektrizitätszahl ϵ	13,0
	- Leitfähigkeit σ	$0,004 \mathrm{S/m}$
Analyse	Maximaler Gewinn, G	9,09 dBi
	$\phi = 0^{\circ}$ (E-Feld):	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	$64, 8^{\circ}$
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	$80, 2^{\circ}$
	$\phi = 90^{\circ} \text{ (H-Feld)}$:	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	88,8°
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	$67, 3^{\circ}$
	min. Nebenzipfeldämpfung ($\theta = -90^{\circ}90^{\circ}$)	$15,3 \mathrm{dB}$

Strahlungsdiagramm

Im Vergleich zur Simulation im freien Raum fällt auf, dass die rückwärtige Strahlung vom Modell des freien Raumes am Boden reflektiert wird. Dies ist mithilfe einer Spiegelquelle zu erklären, wobei der Boden die Spiegelfläche bildet. Die reflektierten Anteile bilden abhängig von den Bodenwerten durch Überlagerung mit den im freien Raum in dieser Richtung vorhandenen Strahlungsanteilen für das E-Feld bei $\theta = 85^{\circ}$ ein Nebenmaximum im Strahlungsdiagramm, dieses ist mit 41,8 dB gedämpft. Für das H-Feld befindet sich das Nebenmaximum bei $\theta = 75^{\circ}$ und ist mit 15,3 dB gedämpft.



Abb. 4.17: Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem Boden



Abb. 4.18: Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem Boden

Impedanz

Abbildung 4.19 zeigt den Verlauf der Impedanz und Abbildung 4.20 den Verlauf des Stehwellenverhältnisses bei Aufbau der optimierten 4-element Yagi-Antenne mit dem Reflektor 1m über realem Boden.



Input Impedance vs Frequency

Abb. 4.19: Impedanz der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem Boden

Bei Berücksichtigung eines realen Bodens veränderte sich der Impedanzverlauf im Vergleich zur Simulation für den freien Raum nur unwesentlich. Dies spricht für eine relativ unempfindliche Antennenstruktur.

Es ist allerdings festzustellen, dass sich der Impedanzverlauf und die Resonanzfrequenz für gleich lange Dipole in den Ausführungen als gestreckten Dipol und Faltdipol unterscheiden. Das Modell der Antenne mit einem Faltdipol als gespeistes Element ist etwa 3cm kürzer als das Modell der Antenne mit gestrecktem Dipol.

Allerdings scheint dies direkt auf den NEC-2 Code zurückzuführen, da ähnliches auch bei dem Programm EZNEC von Roy Lewallen auftrat, das ebenfalls auf dem NEC-2 Code beruht.

Diese Abweichung der Dipollängen war zuvor bereits bei allen anderen simulierten Yagi-Antennen zu erkennen. Aus diesem Grund ist es vor allem sinnvoll von der neu entworfenen optimierten 4-element Yagi-Antenne ein Probeexemplar zu bauen und an diesem die Eigenschaften nachzuweisen und gegebenenfalls Änderungen an der Antennenstruktur vorzunehmen.





Abb. 4.20: Stehwellenverhältnis der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem Boden

Die Bandbreite ist bei der Berücksichtigung des Bodens im Vergleich zum freien Raum um 0,1 MHz geringer geworden, was aber gegenüber 4 MHz Gesamtbandbreite für ein VSWR kleiner 2 eine unbedeutende Veränderung darstellt.

Auf der Nutzfrequenz 53,5 MHz liegt das Stehwellenverhältnis deutlich unter 1,1. Oberhalb der Nutzfrequenz steigt das Stehwellenverhältnis wie bei der Simulation für den freien Raum stärker an als unterhalb.

Es wurden weitere Simulationen durchgeführt, wobei die Durchmesser und Längen der Elemente variiert wurden. Bis zu einer Veränderung aller Elemente von 2 cm Länge, dies entspricht etwa 0,36% der Wellenlänge, waren die Veränderungen der Eigenschaften unwesentlich, d.h. die Strahlungseigenschaften haben sich nicht erkennbar verändert. Es war bei der gegebenen Auflösung der Simulation lediglich eine geringe Verschiebung der Resonanzfrequenz zu erkennen sowie eine geringe Änderung der Reaktanz festzustellen. Diese Abweichungen sind allerdins derart gering, dass weder die Anpassung auf der Nutzfrequenz, noch die nutzbare Gesamtbandbreite entscheidend verschlechtert werden.

Damit sollte die Antenne ausreichend tolerant gegenüber Abweichungen in der Produktion und beim Aufbau sein.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass die optimierte 4-element Yagi-Antenne unkritisch wirkt und für eine Nutzung am IAP für ein 53,5 MHz Radar in Frage kommt.

4.4 Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen

4.4.1 Anforderungen an die Antennengruppe

Aus der Aufgabenstellung dieser Arbeit gehen folgende Schwerpunkte hervor:

- hoher Gewinn im Bereich $\theta=15^\circ-60^\circ$ für $\phi=0-360^\circ$ als Ringstruktur,
- Gewinn bei $\theta = -15^\circ$ bis $+15^\circ$ um den Zenit nicht erforderlich,
- hohe Seitendämpfung bei $\theta \approx 80^{\circ}$,
- Ausnutzung aller 6 Senderendstufen des Radars.

Desweiteren wurden folgende Vorgaben gestellt:

- geringe Gewinnschwankungen im Bereich $\theta = 15^{\circ} 50^{\circ}$ bei verschiedenen ϕ ,
- geringe Gewinnschwankungen im Bereich $\theta = 15^{\circ} 50^{\circ}$ bei festem ϕ ,
- einfacher mechanischer Aufbau der Antennengruppe,
- Möglichkeit zur späteren Erweiterung der Antennengruppe.

Auf eine möglichst hohe Dämpfung in Richtung $\theta \approx 80^{\circ}$ wird aus Gründen der Elektromagnetischen Verträglichkeit für die in der Nähe des Antennenfeldes betriebenen Geräte und Berücksichtigung des Pesonenschutzes Wert gelegt, da in etwa 60m Entfernung zum möglichen Aufbauort entlang des IAP die öffentliche Hauptstraße von Kröpelin nach Kühlungsborn führt. Es zeigt sich, dass sich bei etwa $\theta \approx 80^{\circ}$ ein Nebenmaximum im Strahlungsdiagramm ausbildet, das für derartige Betrachtungen zu berücksichtigen ist. Desweiteren soll eine Störung des dänischen Fernsehprogrammes auf VHF Kanal 03 (55,25 MHz) durch troposphärische Ausbreitung vermieden werden, der entsprechende aktive Fernsehsender befindet sich auf der Insel Fünen und ist vom IAP etwa 150 km entfernt.

4.4.2 Antennengeometrie

Als Grundlage für den Aufbau der Antennengruppe wurde die Form eines Mills-Cross genutzt.

Ähnliche Anordnungen werden unter anderem auch beim IAP seit einigen Jahren für die MF-Radare in Juliusruh und bei Andenes und Saura auf Andøya, Norwegen $(69, 3^{\circ}N)$, genutzt.

Aus der Vorgabe alle 6 Sendeendstufen des Radars zu nutzen, ergab sich die Anzahl der Antennen als Vielfaches von 6, um mit möglichst geringem Aufwand die gesamte Sendeleistung für die Antennengruppe zu nutzen.

Um eine einfache und räumlich begrenzte Antennengruppe aufzubauen wurde eine Struktur von insgesamt 12 Antennen gewählt. Dazu werden je 6 Antennen in Längsrichtung und dazu 90° um den Mittelpunkt gedreht eine Reihe von 6 weiteren Antennen angeordnet.

Dabei bilden die 4 Antennen, die sich am dichtesten an der Mitte der Antennenstruktur befinden, den inneren Ring, die 4 äußeren Antennen den äußeren Ring, entsprechendes gilt für die mittleren Antennen. Die Ringe sind symbolisiert in Abbildung 4.21 dargestellt.



Abb. 4.21: Darstellung der Ringe für die Speisung der 12 Antennen

In der Mitte der Antennenstruktur befindet sich keine Antenne, da diese hauptsächlich unnötige zusätzliche Anteile in Richtung Zenit bedeuten würde und zudem die Aufteilung der Sendeleistung auf 13 Antennen deutlich verkomplizieren würde. Der räumliche Platzbedarf lässt sich bei diesem Aufbau auf etwa 25 x 25m beschränken.

Abbildung 4.22 zeigt die Anordnung der Antennengruppe in der Draufsicht, diesem Aufbau wurde die Bezeichnung lin2 gegeben.

Die für die Antennengruppe verwendete Einzelantenne ist die zuvor beschriebene optimierte 4-element Yagi-Antenne.

Die Antennen sind im Modell so aufgebaut, dass die Reflektoren in einer Höhe von 1m über dem Boden befestigt sind. Der Abstand zwischen den Antennen (Spacing) beträgt 3,5m.



Abb. 4.22: Antennengeometrie, Antennengruppe aus 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, lin2

Von der in Abbildung 4.23 dargestellten Anordnung der Antennen, Bezeichnung lin, wurde abgesehen. Grund dafür ist die hohe Strahlungskopplung der parallel ausgerichteten Antennen. Es ist dabei zu erwarten, dass die abgestrahlte Sendeleistung von einer Antenne auf die benachbarten wirkt und diese Leistung dabei als Leistungsrücklauf auf die Endstufenmodule wirkt.



Abb. 4.23: Antennengeometrie, Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen, lin

Prinzipiell wären aber bei diesem Aufbau ähnliche Strahlungseigenschaften wie mit der in Abbildung 4.22 gezeigten Anordnung (lin2) zu erreichen.

4.4.3 Speisung der 12x 4-element Yagi-Gruppe

Durch die Speisung der 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen wird das Strahlungsdiagramm der Antennengruppe mitbestimmt.

Bei gleichphasiger Speisung aller gleich ausgerichteten Antennen entsteht ein deutliches Maximum in Richtung der Längsachse der Antennen. Dieses Maximum kann durch phasenverschobene Speisung der Einzelstrahler vom Zenit weg geschwenkt werden.

Entsprechende Untersuchungen dazu stellte J. Rubach 1998 in seiner Diplomarbeit zum ST-Radar des IAP in Kühlungsborn vor. [Rub98]

Durch die Phasenlage der Antennen zueinander können die Strahlungseigenschaften der Antennengruppe derart verändert werden, dass Richtung und Ausprägung der Strahlungsanteile in gewissen Ausmaßen geformt werden können. Im Allgemeinen bedingen sich aber Eigenschaften gegenseitig, so liegt der maximal mögliche Gewinn bei einem solchem Aufbau immer in Richtung Zenit und bedarf einer gleichphasigen Speisung. Beim Schwenken der Hauptstrahlrichtung vergrößert sich gleichzeitig die 3 dB-Halbwertsbreite. Eine Speisung der Antennen mit nichtlinearem Phasenversatz beim Schwenken der Hauptstrahlrichtung ist eine weitere Möglichkeit zum Formen gewünschter Strahlungsdiagramme, so ist bei nichtlinearem Phasenversatz im Allgemeinen eine größere Halbwertsbreite zu erreichen, allerdings ist gleichzeitig mit einer Reduzierung des maximalen Gewinns zu rechnen. Durch die gezielte Speisung der Antennen ist es möglich in gewissem Umfang in gewünschten Richtungen Minima oder Maxima zu erzeugen.

Im folgenden werden die Phasenlagen der 3 Ringe mit den zugehörigen Strahlungseigenschaften untersucht.

Die angebenen Phasenwinkel gelten jeweils für eine Längsachse der Antennenstruktur, die zweite erhält zu dem angegebenen Phasenwinkel zusätzlich weitere 90° Phasenversatz, um ein zirkulares Strahlungsfeld zu erreichen. Dies wird allerdings zur besseren Übersicht bei der folgenden Untersuchung des Phasenversatz-Faktors nicht aufgeführt, ist aber in den Simulationen und damit in der Ergebnissen berücksichtigt.

Gleichphasige Speisung aller Antennen über realem Boden

Bei gleichphasiger Speisung aller gleichartig ausgerichteter Antennen wird der für diese Antennengruppe und Aufbau maximal mögliche Antennengewinn erreicht. Bei ungleichphasiger Speisung ist unter der Bedingung des gleichen mechanischen Aufbaus der maximale Gesamtgewinn immer geringer.

Für die Simulation wurde wie bei der Einzelantenne zuvor ein realer Boden angenommen.

4. Antennenanalyse

Modell	Name	meteortx12_4
	Beschreibung	12 optimierte 4-element
		Yagi-Antennen
	Boden	
	- Relative Dielektrizitätszahl ϵ	13,0
	- Leitfähigkeit σ	$0,004 \mathrm{~S/m}$
	Aufbauhöhe, Reflektor über Boden	1 m
	Spacing der Antennen	$3,5 \mathrm{~m}$
Analyse	Maximaler Gewinn, G	15,7 dBi
	für $\phi = 0^{\circ}$ und 90°:	
	Halbwertsbreite (-3 dB)	15°
	1. Nullstelle (θ_{1zp})	$16,5^{\circ}$
	Nebenzipfeldämpfung ($\theta = -90^{\circ}90^{\circ}$)	-9,3 dB

Im Strahlungsdiagramm für gleichphasige Speisung (Bild 4.24) ist deutlich die Antennenstruktur zu erkennen. Die für ein festes θ bis 70° vorhandenen Strahlungsmaxima bilden sich bei $\phi = 0^{\circ} + k\frac{\Pi}{2}$ (für k = 0, 1, 2, 3) entlang der Achse der Antennenstruktur. Bei $\theta \approx 0^{\circ}$ (Richtung Zenit) ist das Maximum deutlich zu erkennen.



Abb. 4.24: Strahlungsdiagramm der 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen, gleichphasig

Die Strahlungsanteile für $\phi = 0^{\circ} + k\frac{\Pi}{2}$ (für k= 0, 1, 2,3) und $\theta = 9 - 25^{\circ}$ sind nur geringfügig gedämpft. Für nicht ganzzahlige k entstehen große Gewinnschwankungen und Nullstellen im Strahlungsdiagramm.


Abb. 4.25: Strahlungsdiagramm der 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen, gleichphasig

Speisung mit linearem Phasenversatz Ψ

Um das Strahlungsmaximum der Antennengruppe vom Zenit weg zu schwenken, ist ein Phasenversatz zwischen den Ringen nötig. Der nötige Phasenversatz wird nachfolgend unter den Vorgaben der Aufgabenstellung dieser Arbeit betrachtet.

Zur Beurteilung der Strahlungsdiagramme der Antennengruppe für verschiedene Phasenlagen der Speisung wurden Merkmale festgelegt, die zur weiteren Auswertung genutzt werden.

Gain_Zenith	Gewinn in Richtung Zenit ($\theta = 0^{\circ}$)
$\operatorname{Gain}_15^\circ$ - 50°	maximaler Gewinn für $\theta = 15^{\circ} - 40^{\circ}$
$Gain_{80^{\circ}}$	maximaler Gewinn in Richtung $\theta = 80^{\circ}$
delta	maximale Differenz des Gewinns für $\theta = 15^{\circ} - 50^{\circ}$ für
	$\text{verschiedene } \phi$
$ m delta~Gmax~DB-50^\circ$	Differenz zwischen Gain $15^{\circ}-50^{\circ}$ und des Gewinns bei $\theta = 50^{\circ}$

Der maximale Gesamtgewinn wird entweder durch Gain_Zenith oder Gain_ $15^{\circ}-50^{\circ}$ gebildet.

In den Vorgaben wird ein möglichst hoher Gewinn für $\theta = 15^{\circ} - 60^{\circ}$ gefordert. Weiterhin soll eine möglichst große Dämpfung für $\theta = 80^{\circ}$ vorhanden sein.

In Abbildung 4.26 sind die Merkmale für linearen Phasenversatz Ψ der 3 Ringe dargestellt. Der in den folgenden Abbildungen angegebene Winkel Ψ bezieht sich auf die Phasenlage des mittleren Ringes der Antennenstruktur. Der innere Ring hat die Phasenlage $\Psi = 0^{\circ}$, der äußere Ring hat bei linearem Phasenversatz die doppelte Phase des mittleren Ringes.



Abb. 4.26: 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, linearer Phasenversatz Ψ

Zu erkennen ist, dass der Gewinn im Bereich $\theta = 15^{\circ} - 50^{\circ}$ ab etwa $\Psi > 70^{\circ}$ den maximalen Gesamtgewinn bildet. Unterhalb von etwa $\Psi = 70^{\circ}$ bildet sich ein Strahlungsmaximum in Richtung Zenit aus. Ab einem Phasenversatz $\Psi > 70^{\circ}$ nimmt die Welligkeit im Bereich $\theta = 15^{\circ} - 50^{\circ}$ zu. Die geringste Welligkeit tritt bei $\Psi = 70^{\circ}$ auf. Die Minima für den Gewinn in Richtung Zenit und 80° bilden sich ebenfalls bei unterschiedlichem Phasenversatz Ψ aus. Die maximale Dämpfung für $\theta = 80^{\circ}$ ergibt sich bei $\Psi = 80^{\circ}$, die maximale Dämpfung in Richtung Zenit ($\theta = 0^{\circ}$) mit 34 dB bei $\Psi = 110^{\circ}$. Somit ist aufgrund der Vorgaben aus den Ergebnissen der Merkmale ein Kompromiss zu finden.

Speisung mit nichtlinearem Phasenversatz Ψ

Aus der Aufgabenstellung geht hervor, dass nicht nur ein Strahlungsmaximum im Bereich von $\theta = 15^{\circ} - 60^{\circ}$ gefordert wird, sondern zudem noch möglichst geringe Gewinnschwankungen in diesem Winkelbereich.

Aus diesem Grund wurde die Möglichkeit der nichtlinearen Phasenänderung der Ringe zueinander untersucht.

In Abbildung 4.27 sind die Merkmale für nichtlinearen Phasenversatz Ψ dargestellt, dabei wurde der Faktor 1,8 verwendet. Der Faktor 1,8 bezeichnet die Phasenlage des äußeren Ringes als das Vielfache des Phasenversatzes Ψ vom mittleren Ring. Der innere Ring hat immer die Phasenlage $\Psi = 0^{\circ}$.



Abb. 4.27: 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, nichtlinearer Phasenversatz Ψ , Faktor 1,8

Die maximale Dämpfung für $\theta = 80^{\circ}$, bei nichtlinearer Phasenänderung mit dem Faktor 1,8 , liegt bei $\Psi = 90^{\circ}$. Die maximale Dämpfung in Richtung Zenit bildet sich bei $\Psi = 120^{\circ}$ aus. Die Welligkeit **delta** hat ihr Minimum bei $\theta = 70^{\circ} - 80^{\circ}$.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die maximale Dämpfung in Richtung Zenit etwa 26 dB beträgt und ist damit 8 dB geringer als bei dem zuvor betrachtetem linearem Phasenversatz.

Der dargestellte maximale Gesamtgewinn beträgt 13,4 d Bi in Richtung Zenit be
i $\Psi=50^\circ,$ etwa 0,6 d B mehr als bei linearem Phasenversatz. In Abbildung 4.28 sind die Merkmale für nichtline
aren Phasenversatz Ψ für den Faktor 2,3 dargestellt.



Abb. 4.28: 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, nichtlinearer Phasenversatz Ψ , Faktor 2,3

Das Maximum der Dämpfung für $\theta = 80^{\circ}$, bei nichtlinearer Phasenänderung mit dem Faktor 2,3 , liegt bei den untersuchten Werten bei $\Psi = 60^{\circ}$, das Maximum für die Dämpfung in Richtung Zenit entsteht bei $\Psi = 90^{\circ}$. Die Welligkeit **delta** hat ihr Minimum bei $\Psi = 60^{\circ}$. Bei den untersuchten Werten steigt die Welligkeit, mit Ausnahme von $\Psi = 110^{\circ}$ und 120°, kontinuierlich mit steigendem Phasenwinkel Ψ . Bei $\Psi = 150^{\circ}$ wird das mit untersuchte Maximum der Welligkeit von über 23 dB erreicht

Die Dämpfung in Richtung Zenit beträg bei den untersuchten Werten maximal 18,3 dB, dies sind in dem untersuchten Wertebereich 15,7 dB weniger als die maximale Dämpfung bei linearem Phasenversatz.

In Abbildung 4.29 sind die Merkmale für nichtlinearen Phasenversatz Ψ dargestellt, dabei wurde der Faktor 2,5 verwendet.



Abb. 4.29: 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, nichtlinearer Phasenversatz Ψ , Faktor 2,5

Das Dämpfungsmaximum für $\theta = 80^{\circ}$, bei nichtlinearer Phasenänderung mit dem Faktor 2,5, liegt bei den untersuchten Werten bei $\Psi = 60^{\circ}$, das Dämpfungsmaximum in Richtung Zenit entsteht bei $\Psi = 90^{\circ}$. Das Maximum der Welligkeit **delta** entsteht bei $\Psi = 140^{\circ}$. Die maximale Dämpfung in Richtung Zenit beträgt bei nichtlinearer Phasenänderung mit dem Faktor 2,5 nur noch 14,9 dB.

Zusammenfassung Phasenversatz Ψ

Insgesamt ist festzustellen, dass mit ansteigendem Faktor die Gewinnminima in Richtung $\theta = 80^{\circ}$ und Zenit sowie das Maximum der Welligkeit **delta** bei kleiner werdendem Phasenversatz Ψ auftreten.

Die Maxima des Gewinns im Bereich $\theta = 15^{\circ} - 50^{\circ}$ treten bei niedrigen Phasenwinkeln Ψ bei $\theta = 15^{\circ} - 25^{\circ}$, bei größeren Ψ bei $\theta = 35 - 50^{\circ}$ auf. Dieser Wechsel des Maximums ist in den Diagrammen anhand des Wendepunktes im Verlauf der Gewinnkurve **gain** zu erkennen. Weiterhin ist ersichtlich, dass dieser Wendepunkt ebenfalls mit ansteigendem Faktor bei kleiner werdendem Phasenversatz Ψ auftritt. Deutlich zu erkennen ist auch, dass die Dämpfung in Richtung Zenit ($\theta = 0^{\circ}$) bei nichtlinearem Phasenversatz geringer ist als bei linearem Phasenversatz. Dabei wird im untersuchten Wertebereich die maximale Dämpfung geringer je weiter der Phasenversatz-Faktor vom Wert 2 abweicht.

Es wurde bei den Untersuchungen keine zweckmäßige Lösung gefunden, bei der die Dämpfung in Richtung $\theta = 60^{\circ}$ unter 10 dB blieb, dies wäre nur mit größerem Phasenversatz Ψ zu erreichen, wobei die Dämpfung in Richtung $\theta = 80^{\circ}$ immer weiter verloren geht und die Welligkeit stark zunimmt. Bis etwa $\theta = 50^{\circ}$ ist allerdings eine Differenz zum Gewinnmaximum deutlich unter 10 dB möglich.

Auswahl Phasenversatz Ψ

Durch die zuvor erhaltenen Ergebnisse können nun aufgrund der Vorgaben günstige Phasenwinkel gewählt werden. Berücksichtigt wurde vor allem:

- großer Gewinn im Bereich $\theta = 15^{\circ} 50^{\circ}$,
- große Dämpfung bei $\theta = 80^{\circ}$,
- geringe Welligkeit.

Auswahl:

Faktor	Phasenwinkel Ψ	$Gain_15^\circ - 50^\circ$	delta	Gain_80°
1,8	90°	$10,\!67~\mathrm{dBi}$	$4,33~\mathrm{dB}$	-7,36 dBi
2	80°	$10,40~\mathrm{dBi}$	$4,25~\mathrm{dB}$	-7,87 dBi
2,3	70°	$10,10~\mathrm{dBi}$	$5,17~\mathrm{dB}$	-8,23 dBi
2,5	60°	$9,93~\mathrm{dBi}$	$5,17~\mathrm{dB}$	-7,53 dBi

Auffällig dabei ist, dass mit steigendem Faktor die - unter gleichen Bedingungen - gewählten Phasenlagen kleiner werden. Wird eine größere Dämpfung in Richtung Zenit gefordert, sind entsprechend andere Phasenwinkel Ψ auszuwählen, diese liegen jeweils etwa 20° über den in der Tabelle aufgeführten Phasenwinkeln. Bei einer größeren Dämpfung in Richtung Zenit verringert sich allerdings die Dämpfung in Richtung $\theta = 80^{\circ}$.

Aus den erhaltenen Strahlungseigenschaften für die Gruppenantenne ergeben sich vor allem zwei Möglichkeiten, die Speisung der 12 Antennen mit den Phasenlagen 0°, 80°, 160° sowie 0°, 70°, 161° erfüllen die vorgegebenen Anforderungen am besten.

Für die Entscheidung spielte vor allem die Dämpfung in Richtung $\theta = 80^{\circ}$ und die geringe Welligkeit im Bereich $\theta = 15^{\circ} - 50^{\circ}$ (**delta**) eine wesentliche Rolle.

Insgesamt ist die Speisung mit den Phasenlagen 0°, 70°, 161° zu bevorzugen, da diese die größere Dämpfung in Richtung $\theta = 80^{\circ}$ und dabei den geringsten Unterschied der jeweils zwei vorhandenen Maxima um $\theta = 25^{\circ}$ und 45° für $\phi = 45^{\circ}$ bedeutet.

Nachfolgend werden die Strahlungsdiagramme für die zuvor gefundenden Phasenwinkel dargestellt.

Modell	Name	$meteortx 12_4_3m5_lin2_90_162$
	Beschreibung	12 optimierte 4-element
		Yagi-Antennen
Phasenlage	innerer Ring	0°
	mittlerer Ring	90°
	äußerer Ring	162°
Analyse	Maximaler Gewinn, G	10,67 dBi
	Gewinn bei $\theta=50^\circ$	$4,40~\mathrm{dBi}$
	Gewinn bei $\theta=80^\circ$	-7,36 dBi
	delta	$4,\!33~\mathrm{dB}$

Strahlungsdiagramm - Faktor 1,8 - $\Psi = 90^\circ$



Abb. 4.30: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 90° 162°



Abb. 4.31: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 90° 162°

4. Antennenanalyse

Modell	Name	$meteortx 12_4_3m5_lin2_80_160$
	Beschreibung	12 optimierte 4-element
		Yagi-Antennen
Phasenlage	innerer Ring	0°
	mittlerer Ring	80°
	äußerer Ring	160°
Analyse	Maximaler Gewinn, G	10,40 dBi
	Gewinn bei $\theta=50^\circ$	4,24 dBi
	Gewinn bei $\theta = 80^{\circ}$	-7,87 dBi
	delta	$4.25~\mathrm{dB}$

Strahlungsdiagramm - Faktor 2 - $\Psi {=}~80^{\circ}$



Abb. 4.32: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 80° 160°



Abb. 4.33: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 80° 160°

4. Antennenanalyse

Modell	Name	$meteortx 12_4_3m5_lin2_70_161$
	Beschreibung	12 optimierte 4-element
		Yagi-Antennen
Phasenlage	innerer Ring	0°
	mittlerer Ring	70°
	äußerer Ring	161°
Analyse	Maximaler Gewinn, G	10,11 dBi
	Gewinn bei $\theta=50^\circ$	$4,87~\mathrm{dBi}$
	Gewinn bei $\theta = 80^{\circ}$	-8,23 dBi
	delta	$5.17 \mathrm{dB}$

Strahlungsdiagramm - Faktor 2,3 - $\Psi {= 70^{\circ}}$



Abb. 4.34: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 70° 161°



Abb. 4.35: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 70° 161°

4. Antennenanalyse

Modell	Name	$meteortx 12_4_3m5_lin2_60_150$
	Beschreibung	12 optimierte 4-element
		Yagi-Antennen
Phasenlage	innerer Ring	0°
	mittlerer Ring	60°
	äußerer Ring	150°
Analyse	Maximaler Gewinn, G	9,93 dBi
	Gewinn bei $\theta=50^\circ$	$4,90~\mathrm{dBi}$
	Gewinn bei $\theta = 80^{\circ}$	-7,53 dBi
	delta	$5.17 \mathrm{dB}$

Strahlungsdiagramm - Faktor 2,5 - $\Psi = 60^\circ$



Abb. 4.36: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 60° 150°



Abb. 4.37: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 60° 150°

4.5 Vergleich 12x 4-element Yagi-Antennengruppe mit bisher genutzter 3-element Kreuz-Yagi-Antenne

Aufgrund der zuvor erhaltenen Phasenwinkel für die Speisung ist es nun möglich die 12x 4-element Antennengruppe mit der bisher genutzten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne zu vergleichen.

Für den Vergleich wird für die Antennengruppe eine Speisung mit $\Psi = 70^{\circ}$ und nichtlinearem Phasenversatz mit Faktor 2,3 genutzt.

Bei der in der Tabelle angegebenen Differenz sind bereits die bei der Nutzung der 12x 4-element Yagi-Antennengruppe zusätzlichen zwei Endstufenmodule (+1,5 dB) berücksichtigt.

	3-element	12x 4-element	$+1,5~\mathrm{dB}$	Differenz [dB]
	Kreuz-Yagi	Yagi, lin2		
		Speisung: 0°70°163°		
gain max [dBi]	6,99	10, 10	$11,\!60$	4,61
gain abs 15° [dBi]	6,67	$9,\!35$	$10,\!85$	4,18
gain abs 50° [dBi]	4,11	$4,\!87$	$6,\!37$	2,26
gain max 15-50° [dBi]	$6,\!67$	10,10	$11,\!60$	4,93
delta 15-50° [dB]	2,55	4,38	$5,\!88$	3,33
gain zenith [dBi]	$6,\!99$	$6,\!43$	$7,\!93$	$0,\!94$
$gain 80^{\circ} [dBi]$	-4,28	-8,23	-6,73	2,45

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass bei Nutzung der Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen gegenüber der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne in Richtung des gewünschten Bereiches $\theta = 15^{\circ} - 50^{\circ}$ bis über 4 dB Gewinnzuwachs zu erwarten sind. Dass bei einer anderen Speisung ein höherer Gewinn möglich wird, wurde in den vorherigen Abschnitten gezeigt.

Dafür werden die Strahlungsanteile bei $\theta = 80^{\circ}$ um nahezu 2,5 dB gegenüber der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne verringert, dies entspricht etwa einer um den Faktor 1,8 kleineren Strahlungsleistung in dieser Richtung.

5 Speisung der optimierten Yagi-Antennen

5.1 Speisung der Einzelantenne

Wie die Simulationen zeigen, liegt die Impedanz des Faltdipols der Einzelantenne um die Nutzfrequenz 53,5 MHz bei $Z = 200\Omega$. Dies entspricht den vom IAP bisher genutzten Antennen bei den Systemen OSWIN, ALWIN und den Antennensystemen für das Meteorradar.

Eine häufige und auch vom IAP genutzte Anpassung der Antennenimpedanz von $Z = 200\Omega$ auf die Impedanz der genutzten Koaxialspeisekabel mit $Z = 50\Omega$ ist die Halbwellen-Umwegleitung (nach Gothe, Roosenstein, Walter von 1931). Diese Umwegleitung wirkt als 1:4 Transformation und Symmetrierung vom unsymmetrischen Speisekabel auf die symmetrische Antenne. Die Abbildung 5.1 zeigt den symbolisierten Aufbau und den Anschluss der Umwegleitung an den Faltdipol und das Speisekabel.



Abb. 5.1: Halbwellen-Umwegleitung aus [Rot95]

5.2 Speisung der Antennengruppe

Um die zuvor simulierten Phasenwinkel der einzelnen Antennen zu erhalten, ist es möglich Phasenleitungen aus Koaxialkabel mit entsprechender elektrischer Länge zu verwenden. Die nötigen 3dB-Koppler zum Aufteilen der Leistung haben 0° und -90° Ausgänge, dies ist bei der Erstellung der Phasenleitungen zu berücksichtigen.

Der Aufbau der Antennengruppe mit Bezeichnungen und Phasen der Antennen ist in der Abbildung 5.2 symbolisiert dargestellt.



Abb. 5.2: Antennengruppe 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen

Die Ausrichtung des Antennenfeldes wird in Abbildung 5.2 derart gezeigt, dass sich die Strahlungsmaxima in den Richtungen Nord, Ost, Süd, West ausbilden.

Eine Lösung zur Speisung der Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen wäre mit Nutzung von 6 elektrisch gleich langen Hauptspeisekabeln möglich, die vom Senderstandort in die Nähe der Antennen führen.

Die auf die 6 Hauptspeisekabel folgenden Phasenleitungen können in der Nähe der Antennen in einem witterungsgeschützten Gehäuse (Außenbox) untergebracht werden. Die zu verwendenden Koaxialkabel weisen laut Hersteller einen ausreichend großen Temperaturbereich auf und sind in "watertight"-Auführung erhältlich, die gegen Eindringen von Feuchtigkeit resistent sein sollen. Gleichzeitig stellen die Phasenleitungen den Übergang von den Hauptspeisekabeln auf die 6 3dB-Koppler dar, diese können ebenfalls in der Nähe der Antennengruppe in einem witterungsgeschützten Gehäuse untergebracht werden. Nachfolgend werden die 12 Antennen durch 12 elektrisch gleich lange Koaxialkabel mit den 6 3dB-Kopplern verbunden.

Dieser Aufbau ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Prinzipiell wäre auch ein Aufbau mit nur einem Hauptspeisekabel möglich, wobei dann im Container zuerst alle 6 Endstufenmodule zusammengefasst werden müssen. In der Nähe der Antennen ist dann eine Aufteilung der Gesamtleistung von dem einen Hauptspeisekabel auf 6 Ausgänge, die Erzeugung der Phasenlage durch 6 Phasenleitungen und die Aufteilung auf 12 Antennenspeisekabel nötig.

Dieser Aufbau wäre günstig, wenn das Antennensystem sehr weit entfernt vom Senderstandort aufgebaut ist, oder das Verlegen mehrerer Speisekabel nicht möglich ist. Der Vorteil wäre im Vergleich zur vorherigen Variante der Bedarf von lediglich $\frac{1}{6}$ der Hauptspeisekabel. Dafür bedarf dieser Aufbau allerdings je einen phasengleichen 1->6 und einen 6->1 Leistungskoppler. Desweiteren ist es bei diesem Aufbau nicht möglich, die Phasenleitungen im Sender-Container unterzubringen.

Während der Erprobungsphase soll eine Wahl zwischen rechts- und linkszirkularer Polarisation möglich sein. Dafür sind an den für die Aufteilung der Leistung auf 12 Antennen genutzten 3dB-Koppler die Ausgangstore gegeneinander auszutauschen (Antenne 1 gegen Antenne 2, 3 gegen 4 usw.).

Von einer Veränderung der elektrischen Länge bzw. der Phasenlage der Hauptspeisekabel ist aufgrund von Witterungseinflüssen und Alterung auszugehen, der Einfluss sollte daher durch entsprechend hochwertige Koaxialkabel minimiert werden. Desweiteren wirken diese Einflüsse auf alle verwendeten Hauptspeisekabel, wodurch letztendlich keine wesentlichen Änderungen der Strahlungseigenschaften des Antennensystems anzunehmen sind. Bei den Phasenleitungen ist keine witterungs- und alterungsbedingte Änderung anzunehmen, solange die Dichtigkeit der Koaxialverbinder gewährleistet ist, da sie lediglich eine Länge von maximal 3,5m besitzen.

Als Hauptspeisekabel des OSWIN-Radars wird das Koaxialkabel LMR-600 on Times Microwave Systems verwendet. Dieses Koaxialkabel ist nach Herstellerangaben in der Lage eine Spitzenleistung bis 40 kW zu übertragen. Durch die Verwendung geschäumten Polyethylens als Dielektrikum beträgt der Verkürzungsfaktor v = 0.87.

Bei der Nutzung von 6 Hauptspeisekabeln sind, bei der für den Sender projektierten maximalen Spitzenleistung pro Kabel, derzeit 15 kW zu übertragen. Damit sollte das Koaxialkabel LMR-600 auch für eine mögliche zukünftige Leistungserhöhung um 3 dB nutzbar sein.

Für die Phasenleitungen sollte ebenfalls LMR-600 genutzt werden, wenn die Phasenleitungen zwischen den Endstufenmodulen und den 3dB-Kopplern eingesetzt werden.



Abb. 5.3: Blockschaltbild, Speisung der 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen

In Abbildung 5.3 wird davon ausgegangen, dass die sechs dargestellten Sender ein gleichphasiges Ausgangssignal liefern, die Hauptspeisekabel sind elektrisch gleich lang, sodass an den Phasenkabeln eine einheitliche Phase vorhanden ist.

Sollte für den Aufbau und die nötigen Verlegearbeiten in der nötigen witterungsgeschützten Außenbox der Platz oder Biegeradius zu gering sein, können für die Phasenleitungen alternativ die dünneren und flexibleren Koaxialkabel LMR-500 mit maximal 22 kW, oder LMR-400 mit 16 kW übertragbarer Spitzenleistung genutzt werden. Bei der Nutzung von LMR-400 wäre allerdings die vom Hersteller angegebene Spitzenleistung bei der derzeitigen Maximalleistung erreicht. Bei der Nutzung von LMR-500 wird die zulässige Spitzenleistung mit der derzeitigen Maximalleistung zu 68% erreicht. Eine zukünftige Leistungserhöhung wäre dabei bei entsprechender Sicherheit nur eingeschränkt möglich. Bei Einbringung der Phasenleitungen zwischen den 3dB-Kopplern und den Antennen wäre eine Nutzung von LMR-400 und LMR-500 unproblematischer, da dann auf diesen Koaxialkabeln lediglich eine Spitzenleistung von 7,5 kW übertragen wird. Bei dieser Anordnung der Speisekabel verdoppelt sich allerdings die Anzahl der nötigen Phasenleitungen.

Für die 6 Hauptspeisekabel von den Endstufenmodulen im Sender-Container zum Aufbauort wäre , abhängig vom Verlegeweg, eine Länge von jeweils etwa 40 m nötig. Der Hersteller gibt für das LMR-600 eine Dämpfung von maximal 2 dB bei 55 MHz auf 100m Länge an. Für die zu verlegende Länge bedeutet dies eine Dämpfung von etwa 0,9 dB.

Insgesamt sollten bei anzunehmenden geringen Verlusten durch die Phasenleitungen, 3dB-Koppler und Koaxialverbinder etwa 65 kW von den projektierten 90 kW Spitzenleistung bei den Antennen vorhanden sein.

5.3 Länge der Phasenleitungen

In der folgenden Tabelle sind die mechanischen Längen der Phasenleitungen für 90°, 160° und 253° bei Nutzung von LMR-400, LMR-500 und LMR-600 angegeben. Diese Längen sind nur als Anhalt für die Herstellung der Phasenleitungen gedacht und dienen zur Abschätzung des notwendigen Materials. Die Phasenleitungen sollten mit Hilfe eines Netzwerkanalysators eingemessen werden, da auch die Koaxialstecker und Verbindungsstücke zu berücksichtigen sind.

	Länge [m]	Länge [m]	Länge [m]
Phasenwinkel	LMR-400	LMR-500	LMR-600
90°	1,190	1,204	1,218
160°	2,116	2,140	2,165
253°	$3,\!345$	$3,\!385$	$3,\!424$

6 Praktische Ausführung der Antennen

6.1 Tragrohr

Das Tragrohr der Antenne (Boom) sollte aufgrund möglichst hoher Stabilität durchgehend über die Gesamtlänge von 3,2m sein. Eine Teilung ist durchaus möglich, verringert aber die mechanische Stabilität der Antenne und könnte nur durch mindestens eine zusätzliche Antennenhalterung zum Mast ausgeglichen werden. Das Tragrohr kann aus Aluminium oder Edelstahl bestehen, wobei Aluminium aufgrund des Gewichts zu bevorzugen ist. Verzinkter Edelstahl sollte bei Kontakt zu Aluminium nicht genutzt werden. Die Profilform des Tragrohres hat prinzipiell keinen Einfluss auf die Abmessungen oder Position der Elemente. Es ist lediglich bei Durchführung der Elemente durch das Tragrohr ein Korrekturfaktor für die Länge zu berücksichtigen. [Hoc77] [Hoc78]

Dabei ist der Einfluss von üblichen Durchmessern des Tragrohres um 25 mm im Vergleich zur Elementlänge von etwa 2,6 m zu vernachlässigen. Eine nötige Korrektur beläuft sich bei 25 mm Tragrohrprofil auf wenige Millimeter, die gegenüber sämtlicher Toleranzen vernachlässigbar sind. Abhängig vom Profil des Tragrohres sind lediglich die Elementhalterungen und Masthalterungen auszuwählen. Eine Abspannung der Elementenden zur Spitze des Tragrohres oder des Mastes wäre möglich. Dafür sind das Tragrohr oder der Mast etwa 0,5 m länger zu wählen und mit einem Stopfen zu versehen, um die Abspannung daran sicher zu befestigen.

6.2 Elemente

Die Elemente, Reflektor und beide Direktoren, können durchgängig ausgeführt werden. Eine Teilung in der Mitte ist zu vermeiden. Insbesondere aus elektrischer Sicht wäre eine Teilung in der Mitte der Elemente problematisch, da an diesen Stellen der maximale Strom fließt. Desweiteren wäre eine mittige Teilung ein zusätzliches mechanisches Problem, das nur durch lange Elementhalter und mehrfaches Klemmen oder Verschrauben auszugleichen ist.

Ein weiterer möglicher Aufbau wäre, die Elemente nach außen zu verjüngen, d.h. die Endstücken mit einem dünneren Rundprofil zu bilden und in das Mittelstück einzuschieben. Das innere und die beiden äußeren Rundprofile können mit Schlauchklemmen befestigt werden. Dieser Aufbau würde ein Nachstimmen der Elementlänge ermöglichen, dies sollte aber prinzipiell nicht nötig sein. Desweiteren birgt dieser Aufbau mögliche mechanische und elektrische Schwachstellen. Nützlich wäre eine Kerbung oder Bohrung der Elemente, die das Verrutschen der Elemente in den Elementhaltern verhindern soll und den Aufbau ohne einzelne Vermessung der Elemente erleichtert. Die Elementenden können entweder zusammen gepresst oder mit Kunststoffkappen aus Polyethylen oder POM (Polyoxymethylen) verschlossen werden. Gleichzeitig ist das Einziehen von dünnem Seil in die Elemente zur Schwingungsdämpfung vorzusehen. Die Enden der Seile können mit den Elementenden verpresst oder durch die Kunststoffkappen verbunden werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Elemente und der Faltdipol an den Enden verspannt werden, um Schwingneigung zu verhindern. Für diese Abspannung kann an den Kunststoffkappen der Elementenden z.B. eine Bohrung vorgesehen sein, um ein Herunterrutschen der Abspannung von den Elementen zu verhindern.

6.3 Faltdipol

Der Faltdipol kann entweder durchgängig oder geteilt aufgebaut sein. Ein durchgehender Faltdipol kann aus Rundprofil gebogen werden, solange ein Einbringen von Abstandhaltern und das Befestigen der Dipolanschlüsse in den Dipolanschlusskasten möglich ist. Dieser Aufbau wäre elektrisch und mechanisch am günstigsten. Die Abstandhalter können gleichzeitig für die Verspannung durch Sehne mit den anderen Elementen genutzt werden. Ein geteilter Faltdipol hätte den Vorteil, die Antenne nachstimmen zu können. Allerdings bedeutet dieser Aufbau nach einiger Nutzungszeit die Gefahr eines schlechten elektrischen Überganges zwischen den einzelnen Dipolteilen.

Die Schleife des Faltdipols besteht bei geteiltem Aufbau aus mindestens 5 Teilen, 3 Mittelstücke und 2 Endstücke. Von den 3 Mittelstücken sind 2 beim Speisepunkt. Die Endstücke haben zu den Mittelstücken einen geringeren Durchmesser, sodass diese in die Mittelstücke eingeschoben und mit Schlauchklemmen befestigt werden können. Durch diesen posaunenartigen Aufbau ist ein Abstimmen der Antennen mit den verjüngten Endstücke möglich.

Die Mittelstücke werden mit einem etwa 50 bis 60cm langen Rundprofil (Frässtück aus POM) verbunden und mechanisch stabilisiert, sodass das Rundprofil in die Mittelstücke etwa 20 bis 25cm hineinragt.

Zu den Endstücken hin werden auf den Mittelstücken Abstandhalter aus gefrästem POM angebracht, die den Faltdipol mechanisch stabilisieren sollen.

6.4 Dipolanschlusskasten

Der Dipolanschlusskasten kann aus witterungsbeständigem Kunststoff oder Aluminium bestehen. Es ist dabei möglichst auf Dichtigkeit gegen Staub und Feuchtigkeit zu achten, Norm z.B. IP54 oder höher, um z.B. Korrosion an den Anschluss- und Verbindungsstücken des Dipols, der Umwegleitung und des Hauptspeisekabels vorzubeugen. Dafür eignen sich insbesondere Aluminumdruckgussbehälter oder Kunststoffgehäuse mit umlaufender Gummidichtung.

Die nötigen Bohrungen für die Durchführungen der Mittelstücke des Faltdipols (2), den Anschluss des Speisekabels (1) und den Anschluss der Umwegleitung (2) sind mit Dichtungsabschlüssen zu versehen. Im Dipolanschlusskasten wird eine Zugentlastung für das Speisekabel und die Umwegleitung benötigt, dazu kann z.B. ein Frässtück aus POM als Klemme eingebracht werden. Es ist durch die zu erwartende Sendeleistung von etwa 5 kW pro Antenne mit einer nötigen Spannungsfestigkeit von etwa 1 kV zu rechnen.

Die Verbindungen von den Mittelstücken des Faltdipols zum Speisekabel und der Umwegleitung werden mit Litze angemessenen Querschnitts hergestellt, wobei die Litze mittels Schlauchklemmen an die Mittelstücken geklemmt wird oder direkt mit den Dipolhälften verlötet werden kann. Dies hat den Vorteil, eine relativ flexible Verbindung zu haben, bei der die Gefahr des Brechens der Verbindung durch mechanische Belastung oder Temperatureinfluss minimiert wird.

6.5 Elementhalter

Als Elementhalterung bieten sich mehrere Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit der Halterung ist die Nutzung der Elementhalter aus gepresstem Aluminium oder Stahl, die bereits bei den ALWIN- und OSWIN-Systemen verwendet wurden. Dabei ist ein großflächiges Verschweißen der Elementhalter mit dem Tragrohr wichtig, um eine möglichst hohe Stabilität zu erreichen und ein Ausbrechen der Halterung zu vermeiden.

Eine isolierte Halterung der Elemente ist ebenfalls möglich, dazu wären gefräste Halter aus PE, POM oder ähnlich geeignetem Material nötig. In der Form könnten diese Halter ähnlich den zuvor erwähnten OSWIN-Haltern sein. Sollten die metallischen Elementhalter genutzt werden, müssten die Elemente durch Überzug von Isolierschläuchen isoliert werden.

Die Elemente sind durch Verschraubung oder Klemmung mit den Elementhaltern vor Verrutschen zu sichern.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Durchdringung des Tragrohres, wobei allerdings die mechanische Stabilität des Tragrohres beeinträchtigt wird. Die Instabilität ist aber bei dem geplanten Aufbau mit Befestigung parallel zu einem senkrechten Mast minimiert. Für eine notwendige Klemmung der Elemente im Tragrohr gegen Verrutschen und vor allem dauerhaft guten elektrischen Kontakt muss dabei gesorgt sein. Neue Elementhalter sind entweder aus gepresstem Aluminium oder Frässtücken zu erstellen, die dann auf oder in das Tragrohr geklemmt werden.

7 Anordung der Antennengruppe auf dem IAP-Antennenfeld

7.1 Anordnung der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne

Da vorerst auch die bisher verwendete Sendeantenne weiterhin nutzbar sein soll, ist diese entweder in der Mitte der neuen Sendeantennen oder etwas abgesetzt von der neuen Sendeantennengruppe anzuordnen.

Bei einer Platzierung der bisher genutzten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne in der Mitte der neuen Antennengruppe (Bild 7.1) ist der Einfluss der umliegenden Antennen auf die Kreuz-Yagi-Antenne zu berücksichtigen.



Abb. 7.1: Anordnung der Meteorsendeantennen - 3-element Kreuz-Yagi-Antenne mittig

Der Betrag der Impedanz des Faltdipols weicht um etwa 3% vom Sollwert ab, zudem ist eine zusätzliche reaktive Belastung zu erkennen. Die Resonanzfrequenz der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne ist um etwa 0,2 MHz verschoben, was aber durch Nachstimmen der Antenne an den Elementen zu korrigieren ist.

Das Strahlungsdiagramm (Bild 7.2) der mittig angeordneten, allein gespeisten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne ist aufgrund der Kopplung zu den umgebenen Atennen deutlich verformt. Das Strahlungsmaximum befindet sich nicht mehr in der Längsachse der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne, sondern bei etwa $\theta = 60^{\circ}$.

Desweiteren werden, durch die zusätzliche Antenne in der Mitte, die Strahlungseigenschaften der neuen Antennengruppe beeinflusst (Bild 7.3), es wurden die Phasenlagen 0° , 90° und 180° ($\Psi = 90^{\circ}$ und linearer Phasenversatz) verwendet. Dabei wird das Strahlungsmaximum bei $\theta = 21^{\circ}$ um 0,3 dB gedämpft und das lokale Maximum bei $\theta = 42^{\circ}$ um 0,4 dB angehoben, wobei diese Veränderungen zu vernachlässigen sind. Wesentlicher ist der Anstieg der Strahlungsanteile für $\phi = 22$ bei $\theta = 70^{\circ} - 85^{\circ}$ um etwa 5 dB, allerdings liegen diese Strahlungsanteile noch unterhalb derer von $\phi = 0^{\circ}$ und 45°.



Abb. 7.2: Strahlungsdiagramm der mittig angeordneten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne



Abb. 7.3: Strahlungsdiagramm der 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen bei mittig angeordneter 3-element Kreuz-Yagi-Antenne für $\Psi = 90$ und linearem Phasenversatz

Vorzug sollte ein abgesetzter Aufbau der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne von der neuen Sendeantennengruppe haben, da der gegenseitige Einfluss beider Antennensysteme dabei minimiert wird.

Bild 7.4 zeigt einen möglichen abgesetzten Aufbau der bisher genutzten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne mit 15m Entfernung zur Mitte entlang der Antennenachse der neuen Antennengruppe.



Abb. 7.4: Anordnung der Meteorsendeantennen - abgesetzte 3-element Kreuz-Yagi-Antenne

Bei abgesetztem Aufbau der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne verändert sich laut Simulation der Impedanzbetrag der Antenne um lediglich 1% und ist damit zu vernachlässigen.

Das in Bild 7.5 gezeigte Strahlungsdiagramm, als Schnitte von $\phi = 0^{\circ}, 22^{\circ}$ und 45°, der allein gespeisten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne, verändert sich gegenüber dem freien Aufbau, durch die nahegelegene neue Antennengruppe kaum. Der Gewinn steigt in der Simulation unwesentlich um 0,05 dB und ist daher zu vernachlässigen. Der Öffnungswinkel vergrößert sich um 5° für $\phi = 0^{\circ}$ und um etwa 10° für $\phi = 45^{\circ}$. Es entsteht eine unwesentliche und vernachlässigbar kleine Welligkeit.

Auf die Strahlungseigenschaften der 12x 4-element Antennengruppe hat die abgesetzte 3-element Kreuz-Yagi-Antenne keinen erkennbaren Einfluss.

Prinzipiell ist somit zwar eine Einbringung der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne in die Mitte der neuen Antennengruppe möglich, eine Anordnung längs der Antennengruppe ist allerdings unkritischer, da vor allem die eigentliche Strahlungseigenschaft der 3-element Kreuz-Yagi-Antenne erhalten bleibt. Desweiteren dürfte der Aufbau der Antenne, mit Sicht auf die nötige Abspannung bei unterschiedlich langen Antennen, außerhalb der Antennengruppe einfacher sein.



Abb. 7.5: Strahlungsdiagramm der abgesetzten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne

7.2 Anordnung der Meteorradar-Sendeantennen

Die geplante Antennengruppe benötigt einen Platz von etwa 25m x 25m. Gleichzeitig ist ein möglichst großer Abstand der Antennengruppe zu den 5 Empfangsantennen notwendig, um die Kopplung zwischen den beiden Antennengruppen zu minimieren.

Ein möglicher Aufbauplatz der 12 Sendeantennen wäre in der Nähe der bisher genutzten Sendeantenne (3-element Kreuz-Yagi-Antenne) des Meteorradars, mittig zwischen dem OSWIN-Antennenfeld und Haus 4 vorhanden. Das OSWIN-Antennenfeld ist mit mindestens 10m Abstand weit genug entfernt, sodass diese Antennen keinen zu berücksichtigenden Einfluss auf die Meteorantennen haben.

Zur Verbesserung der Entkopplung zwischen Meteorsende- und Empfangsantennen können die Empfangsantennen etwa 30 bis 40m nach Südosten verschoben werden. Dabei ist darauf zu achten, dass umliegende Bäume in Richtung Süd bis Südost den Empfang nicht beeinträchtigen.

Die Ausrichtung der Sendeantennen hat nach den gewünschten Hauptstrahlrichtungen zu erfolgen. Die Maxima der Strahlungsleistung liegen jeweils 45° versetzt zur Längsachse der Antennengruppe. Somit ist für die gewünschten Hautstrahlrichtungen Nord, Ost, Süd, West die Achse der Antennengruppe in Nordwest-Südost, bzw. Nordost-Südwest Richtung aufzubauen.

Die bisher genutzte 3-element Kreuz-Yagi-Antenne ist nach den vorherigen Betrachtungen längs der Achse der Antennengruppe (Bild 7.4) aufzubauen. Günstig wäre dabei ein Aufbau nordwestwärts der Antennengruppe, um sowohl einen möglichst großen Abstand zum OSWIN-Antennenfeld, zu den Meteorempfangsantennen und zu Haus 4 zu erhalten.

Die Antennen sollten mittels Parallelklemmen an senkrechten etwa 2,5m hohen Masten befestigt werden.

Aufgrund der Bodenbeschaffenheit auf dem Antennenfeld des IAP, im Boden sind Reste einer bis etwa 1940 ansässigen Ziegelei enthalten, sollte auf Erdarbeiten verzichtet werden. Daher sind die nötigen Masten wie beim OSWIN-Antennenfeld mittels Straßenverkehrsschildständer aufzubauen und abzuspannen. Zudem ermöglicht dieser Aufbau mit geringem Aufwand Änderungen der Antennenstruktur, wie z.B. verändertes Spacing der Antennen zueinander oder Neuausrichtung des Antennenfeldes.

Da das Gelände um das Antennenfeld keinerlei Windschutz in den Richtungen Nordwest bis Ost bietet, ist das Antennenfeld dahingehend zu sichern. Die Masten sind daher mit den benachbarten Masten und zudem jeweils seitlich mit Erdankern zu verspannen. Somit sind als Erdarbeiten lediglich die Erdanker für die Abspannungen und Erdungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Der geplante Aufbau ist in der Abbildung 7.6 dargestellt.



Abb. 7.6: Skizze des IAP Antennenfeldes

8 Erweiterungsmöglichkeiten

8.1 24 optimierte 4-element Yagi-Antennen

Eine mögliche Erweiterung des Antennenfeldes besteht darin, zusätzliche Antennen in den Längsachsen anzuordnen, um die Strahlungsleistung zu steigern. Für eine sinnvolle Erweiterung, eine Erhöhung der Strahlungsleistung um annähernd 3 dB, wären 12 zusätzliche Antennen nötig.

Dieser Aufbau ist in Abbildung 8.1 dargestellt.



Abb. 8.1: mögliche Erweiterung auf 24 optimierte 4-element Yagi-Antennen

Bei einem solchen Aufbau würde allerdings die Halbwertsbreite der Strahlungsanteile um die Maxima ebenfalls halbiert werden. Dies dürfte für die spezielle Anwendung als Sendeantenne für das Meteorradar nicht zweckmäßig sein.

Desweiteren hätte ein solches Antennensystem einen Platzbedarf von 45m x 45m, der auf dem Antennenfeld des IAP nur schwer, bei entsprechender Entkopplung zu den anderen Antennensystemen, zu realisieren ist. Um den benötigten Platz zu verringern wäre es möglich, lediglich 2 weitere Antennen pro Längsachse und zusätzliche 8 Antennen 45° versetzt zur Längsachse der 12 4-element Yagi-Antennengruppe einzubringen.

Abbildung 8.2 zeigt diesen Aufbau.



Abb. 8.2: mögliche Erweiterung auf 24 optimierte 4-element Yagi-Antennen in Sternform

Die Folge wäre ein höherer Gewinn der Maxima, aber auch eine Verkleinerung der Halbwertsbreiten um die Maxima. Es ist davon auszugehen, dass die Welligkeit verringert wird, allerdings ist durch die 45° versetzten Antennen anzunehmen, dass eine zu starke Kopplung zwischen den Längsachsen und den um 45° versetzten Antennen auftritt. Dadurch würde jeweils ein Teil der Sendeleistung einer Antenne auf die anderen benachbarten überkoppeln und als Rücklauf bei den Endstufenmodulen auftreten. Aus diesem Grund sollte auf einen derartigen Aufbau grundsätzlich verzichtet werden.

8.2 12 optimierte 4-element Kreuz-Yagi-Antennen

Eine weitere mögliche Erweiterung der behandelten Antennengruppe wäre, die linearen Einzelantennen durch um 90° in Längsachse gedrehte weitere 12 lineare Antennen zu Kreuz-Yagi-Antennen umzubauen. Die Einzelantennen sollten zudem in Längsrichtung um 45° gedreht werden, um eine nahezu gleichmäßige Kopplung zu den anderen Antennen zu erhalten, d.h. keine der Einzelantennen liegt parallel zu einer anderen Einzelantenne, wobei die maximale Kopplung auftreten würde. Hingegen würden die zueinander um 90° gedrehten Antennen die größte Entkopplung haben.

Dieser Aufbau würde, je nach Speisung der Antennen, bei den Strahlungsmaxima einen zusätzlichen Gewinn von etwa 3 dB im Bereich $\theta = 15^{\circ}$ - 50° ermöglichen. Die Speisung für eine Gruppe aus 12 optimierten 4-element Kreuz-Yagi-Antennen ist gesondert zu untersuchen, da sich die Strahlungseigenschaften zu der in dieser Arbeit behandelten Antennengruppe deutlich unterscheiden.

Abbildung 8.3 zeigt den Aufbau der Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Kreuz-Yagi-Antennen.



Abb. 8.3: mögliche Erweiterung auf 12 4-element Kreuz-Yagi-Antennen

In Bild 8.5 und Bild 8.4 sind die möglichen Strahlungsdiagramme einer Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Kreuz-Yagi-Antennen dargestellt. In dem gezeigten Bespiel wurde für die Ringe ein Phasenversatz $\Psi = 120^{\circ}$ genutzt. Die zusätzlichen 90° gedrehten Einzelantennen werden mit 90° Phasenversatz gespeist.

Für eine derartige Erweiterung werden 6 zusätzliche 3dB-Koppler und entsprechend andere Phasenleitungen benötigt.

Desweiteren ist festzustellen, dass bei Nutzung von 12 optimierten 4-element Kreuz-Yagi-Antennen die Dämpfung in Richtung $\theta = 80^{\circ}$ größer ist, als bei der Gruppe aus linearpolarisierten Einzelantennen.

Es sollte möglichst das Spacing zwischen den Antennen von 3,5 m beibehalten werden, obwohl eine Änderung bei variablem Aufbau (siehe Abschnitt 7.2) möglich ist und deutlichen Einfluss auf die Strahlungseigenschaften hat. So würde bei geringerem Spacing der Gewinn etwas niedriger sein und das Maximum über einen weiteren Winkelbereich von θ auftreten. Die im Strahlungsdiagramm von $\phi = 22^{\circ}$ vorhandene Nullstelle wird dabei zu größeren θ verschoben.

In den Abbildungen 8.4 und 8.5 sind die Strahlungsdiagramme für die Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Kreuz-Yagi-Antennen dargestellt.



Abb. 8.4: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Kreuz-Yagi-Antennen, $\Psi = 130^{\circ}$


Abb. 8.5: Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Kreuz-Yagi-Antennen, $\Psi = 130^{\circ}$

9 NEC

9.1 NecWinPro

Die für diese Arbeit genutzten Simulationen wurden mit dem Programm NecWinPro (Version 1.6) von Nittany Scientific durchgeführt, das auf der Basis des NEC-2 Kerns beruht. Bei NEC werden Antennenstrukturen durch Drahtstücke (wires) nachgebildet, die wiederum in Segmente zerlegt sind.

Bei der genutzten Version von NecWinPro ist es möglich, Strahlungsdiagramme als Schnitte von ϕ und θ sowie 3D-Plots von Antennenstrukturen zu berechnen. Desweiteren können auch unter anderem Impedanzverläufe simuliert werden. Bei allen Berechnungen ist es möglich den Bodeneinfluss des um die Antennenstruktur befindlichen Untergrundes zu berücksichtigen. Der Boden wird dabei bis maximal zweischichtig durch die Bodenkonstanten (κ , ϵ) definiert.

Auf die simulierten Strahlungsdiagramme wirken sich - neben der Antennenstruktur selbst - der Boden, die Höhe der Antennenstruktur über dem Boden und auch die Anzahl der <u>Segmente</u> der <u>Segmente</u> aus.

Für die dargestellten Strahlungsdiagramme wurde eine Winkelauflösung von $\Delta \theta = \Delta \phi = 0,1^{\circ}$ genutzt.

Die Quellcodes für die simulierten Antennenstrukturen sind dieser Arbeit im Anhang beigefügt.

9.2 Minder- und Übersegmentierung

In der Dokumentation von NecWinPro werden 10 $\frac{Segmente}{Wellenlänge}$ angegeben.

Es wurde zur Abschätzung des Simulationsfehlers für vor allem größere Antennensysteme untersucht, welche Abweichungen bei Minder- bzw. Übersegmentierung auftreten.

Für die Untersuchung wurde als Basisantenne die neu entwickelte optimierte 4-element Yagi-Antenne genutzt. Es wurde Minder- und Übersegmentierung für die Einzelantenne, eine Gruppe aus 4 und 32 optimierten 4-element Yagi-Antennen simuliert.

Als Bezugsgröße für weitere Vergleiche wurden 47 $\frac{Segmente}{\lambda}$ genutzt, da ab dieser Segmentierung der Gewinn nur noch unwesentlich ansteigt.

Die Ergebnisse aus den zugehörigen Simulationen sind in nachfolgenden Tabellen aufgeführt.

optimierte 4-element Yagi-Antenne			
Segmente $/\lambda$	Gewinn /dBi	Gewinn rel. zu 47 Segm. $/\lambda$	
90	$9,\!10$	1,0022026	
47	9,08	1	
22	9,03	$0,\!9944933$	
13	8,98	$0,\!9889868$	
9	$8,\!93$	$0,\!9834802$	
5	8,67	$0,\!9548458$	

4 op	timierte 4-elem	ent Yagi-Antennen
Segmente $/\lambda$	Gewinn /dBi	Gewinn rel. zu 47 Segm. / λ
90	14,12	1,0007087
47	$14,\!11$	1
22	$14,\!09$	$0,\!9985826$
13	$14,\!04$	$0,\!9950390$
9	$14,\!03$	$0,\!9943303$
5	$13,\!8$	$0,\!9780298$

32 op	ptimierte 4-elem	nent Yagi-Antennen
Segmente $/\lambda$	Gewinn /dBi	Gewinn rel. zu 47 Segm. $/\lambda$
90		
47	$22,\!94$	1
22	$22,\!90$	$0,\!9982563$
13	$22,\!82$	$0,\!9947690$
9	22,76	$0,\!9921534$
5	$22,\!49$	$0,\!9803836$

Die Ergebnisse stellt die Abbildung 9.1 zusammenfassend dar.

Es ist festzustellen, dass der Einfluss von Mindersegmentierung bei komplexeren Modellen bei der Simulation abnimmt.

Bei einfachen Antennenstrukturen, wie kleine Einzelantennen, mit einer Mindersegmentierung unter 10 $\frac{Segmenten}{\lambda}$ kann der Fehler mit bis zu 5% abgeschätzt werden. Bei wesentlich komplexeren Strukturen, wie die Gruppe aus 32 optimierten 4-element Yagi-Antennen, kann der Fehler bei Mindersegmentierung mit unter 2% angenommen werden. Dies ist vor allem für die Simulation von großen Antennenstrukturen wichtig, da durch eine Mindersegmentierung die für die Simulation nötige Rechenzeit deutlich verringert werden kann.



Abb. 9.1: Segmentierung - Gewinn am Beispiel der optimierten 4-element Yagi-Antenne

Weiterhin wurde untersucht, wie sich eine Mindersegmentierung aller Antennenelemente außer des gespeisten Elementes auswirkt.

Bei Simulationen zeigte sich, dass Mindersegmentierung der nichtgespeisten Elemente einen geringeren Fehlereinfluss hat, als eine Mindersegmentierung aller Elemente. Durch diese Maßnahme wurde es möglich, das Svalbard VHF-Radar mit 356 Antennen sinnvoll zu simulieren. Frühere Versuche dieses komplexe Antennensystem, mit gleichmäßiger Segmentierung, mit der von Nittany Scientific vorgegebenen 10 $\frac{Segmente}{\lambda}$ zu simulieren, schlugen aufgrund des daraus folgenden Rechenaufwandes fehl.

Eine deutliche Übersegmentierung mit mehr als 50 $\frac{Segmente}{\lambda}$ hat nur noch geringen Einfluss, der berechnete Gewinn stieg lediglich um 0,2% bei der einzelnen 4-element Yagi-Antenne, bei der Gruppe aus 32x 4-element Yagi-Antennen um nur noch 0,04%.

Dieses Ergebnis bestätigt die vorherige Festlegung der Bezugsgröße für die Untersuchung der Minder- und Übersegmentierung von 47 $\frac{Segmente}{\lambda}$.

Am Beispiel der Gruppe aus 32x 4-element Yagi-Antennen war zu erkennen, dass durch die Übersegmentierung von 47 auf 90 $\frac{Segmente}{\lambda}$ der Gewinn um 0,04% anstieg, die nötige Simulationszeit dabei allerdings etwa auf das zehnfache.

Insgesamt ist für die Untersuchungen der neu entwickelten Gruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen der Fehler für den Gewinn insgesamt mit unter 1% anzunehmen.

9.3 Zeitaufwand

Die von NecWinPro benötigte Rechenzeit zur Simulation ist abhängig von der Komplexität des Modells, Berücksichtigung von Bodenwerten und Rechenleistung des verwendeten PCs.

Für die Simulationen wurde zuletzt ein PC mit AMD Athlon 1,3 GHz CPU-Kern, 1 GB Arbeitsspeicher und dem Betriebssystem Windows XP SP2 genutzt.

Bei Simulationen verschiedener Antennensysteme wurde die benötigte Zeit in Abhängigkeit der Komplexität festgehalten. Die Komplexität ist hierbei zur Veranschauung vereinfacht durch die Segmentanzahl definiert.

Abbildung 9.2 zeigt die benötigte Zeit in Minuten abhängig von der Segmentanzahl.



Abb. 9.2: Segmentierung - Zeit am Beispiel der optimierten 4-element Yagi-Antenne

Bis auf die Werte bei Zeit t
=257, 90 und 32 Minuten ist ein deutlicher Anstieg der notwenigen Zeit zu erkennen.

Insgesamt dürfte ein exponentieller Anstieg der notwendigen Zeit über die Segmentanzahl anzunehmen sein. Die von der anzunehmenden Kurvenform abweichenden Werte sind auf Simulationen zurückzuführen, bei denen der PC neben der Simulation für andere Anwendungen genutzt wurde und so nicht die volle Rechenleistung für die Simulationen genutzt werden konnte.

Der zuvor angegebene Zeitbedarf bezog sich ausschließlich auf die Berechnung der Modelleigenschaften für eine Frequenz, sollen diese für mehrere Frequenzen berechnet werden, ist ein Vielfaches der Zeit, in Abhängigkeit von der Anzahl der zu berücksichtigenden Frequenzen, nötig. Dies ist insbesondere der Fall, wenn von dem Simulationsmodell zum Beispiel Impedanzverläufe erstellt werden sollen.

10 Zusammenfassung

Schwerpunkt dieser Arbeit war der Nachweis zur Realisierbarkeit der Vorgaben und das Aufzeigen der Freiheiten, die ein solches Antennensystem bietet. Die Arbeit zeigt, dass es möglich ist die Vorgaben mit geringen Einschränkungen umzusetzen. Allerdings ist dafür ein recht großer Materialaufwand nötig. Dies ist insbesondere zu erkennen, betrachtet man, dass für eine Erhöhung der Strahlungsleistung um 4 dB bei dem gewünschten Strahlungsbild - eine Ringstruktur bei $\theta = 15^{\circ}-60^{\circ}$ - mindestens 12 Antennen notwendig sind. Die dafür nötige Einzelantenne muss einen hohen Eigengewinn haben, der entscheidend auf das Strahlungsbild der Gruppenantenne wirkt. Es wurde weiter gezeigt, dass durch die Schwenkung des Strahlungsmaximums vom Zenit weg zur Ringstruktur der Gesamtgewinn verringert wird. Der maximale Gewinn in Richtung $\theta = 15^{\circ}-50^{\circ}$ liegt etwa 5 dB unter dem maximal möglichen Gewinn in Richtung Zenit. Desweiteren kommt hinzu, dass durch die Nutzung eines nichtlinearen Phasenversatzes Ψ der maximale Gewinn etwas reduziert wird, dafür aber die entstehenden Maxima eine kleinere Gewinndifferenz zueinander aufweisen.

Insgesamt können die Vorgaben aber mit dem gezeigten Entwurf realisiert werden, wobei der Entwurf einen späteren Ausbau des Antennensystems, zum Zweck der Gewinnsteigerung oder Verringerung der Welligkeit, ermöglicht. Bei der Verwendung der behandelten Antennengruppe aus 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen sollte im Vergleich zur bisher genutzten 3-element Kreuz-Yagi-Antenne, aufgrund der deutlich anderen Richtcharakteristik, die Stärke und Häufigkeit der Meteorreflektionen im Bereich $\theta = 15^{\circ}-50^{\circ}$ ein Anstieg zu erkennen sein. Die Stärke und Häufigkeit der Reflektionen aus Horizontnähe ($\theta > 70^{\circ}$) sollten im Vergleich zur bisherigen 3-element Kreuz-Yagi geringer werden.

Für eine spätere Erweiterung ist der Umbau auf 12 Kreuz-Yagi-Antennen vorzusehen, da alle anderen Erweiterungen entweder die Vorgaben einschränken oder einen zu großen Platzbedarf benötigen. Die für diese Erweiterung nötigen Phasenwinkel sind in der zugehörigen Planungsphase zu ermitteln.

Die praktische Umsetzung des in dieser Arbeit gezeigten Entwurfes ist vom IAP für den Sommer 2006 auf dem Institutsgelände geplant, sobald das Probeexemplar der Einzelantenne den simulierten Eigenschaften entspricht und die 12 Einzelantennen fertig gestellt sind.

Abschließend möchte ich all denen danken, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich Dr. W. Singer und Dr. R. Latteck für die Möglichkeit zur Bearbeitung dieser interessanten Aufgabenstellung, sowie Prof. T. Weber und PD Dr. A. Ahrens für die Übernahme der Betreuung am Institut für Nachrichtentechnik und Informationstechnik an der Universität Rostock.

$Begriffe\,und\,Abk{\ddot{u}}rzungen$

4el opt.	optimierte 4-element (Yagi-Antenne)
ALWIN	53,5 MHz ALomar WINd-Radar auf Andøya, Norwegen
ANT	Antenne
IAP	Institut für Atmosphärenphysik e.V.
G	Antennengewinn
MF-Radar	Radar im Bereich 2-3MHz, z.B vom IAP auf Andøya, Norwegen und
	in Juliusruh
NEC	Numerical Electromagnetics Code
NecWinPro	Antennenanalyse-Programm von Nittany Scientific
OSWIN	53,5 MHz Wind-Radar Kühlungsborn, OstSee WINd-Radar
\mathbf{PEP}	Peak Envelope Power, Spitzenleistung
POM	Polyoxymethylen
$\mathbf{R}\mathbf{X}$	Receiver, Empfänger
SkiYMET	Meteorradar auf Andøya, Norwegen (32,55 MHz)
SOUSY	SOUnding SYstem
ST-Radar	Stratosphären-Troposphären-Radar
$\mathbf{T}\mathbf{X}$	Transmitter, Sender
VHF	Very High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio, Stehwellenverhältnis
ϵ	Dielektrizitätszahl
ϕ	Azimutwinkel, Orientierung nach NEC
κ	Leitfähigkeit
θ	Zenitwinkel
Ψ	Phasenversatz der speisenden Ströme

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung empfangener Meteorreflektionen über die Zenitwinkel vom 11. April 2006	3
4.1	NEC Koordinaten	6
4.2	Antennengeometrie, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP	8
4.3	Strahlungsdiagramm, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP	8
4.4	Strahlungsdiagramm, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP	9
4.5	Impedanz, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP	10
4.6	Stehwellenverhältnis, 3-element Kreuz-Yagi-Antenne Meteor IAP	11
4.7	Antennengeometrie, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP	13
4.8	Strahlungsdiagramm, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP	13
4.9	Strahlungsdiagramm, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP	14
4.10	Impedanz, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP	15
4.11	Stehwellenverhältnis, Standard 4-element Yagi-Antenne IAP	16
4.12	Antennengeometrie der optimierten 4-element Yagi-Antenne	19
4.13	Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien	
	Raum	19
4.14	Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien	
	Raum	20
4.15	Impedanz der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum	21
4.16	Stehwellenverhältnis der optimierten 4-element Yagi-Antenne im freien Raum	22
4.17	Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem	
	Boden	23
4.18	Strahlungsdiagramm der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem	~ (
	Boden	24
4.19	Impedanz der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem Boden	25
4.20	Stehwellenverhaltnis der optimierten 4-element Yagi-Antenne über realem	~~
4.01		20
4.21	Darstellung der Ringe für die Speisung der 12 Antennen	28
4.22	Antennengeometrie, Antennengruppe aus 12 optimierte 4-element	20
4 99	Yagi-Antennen, nn2	29
4.23	Vari Antennen lin	20
1 94	Strahlungsdiagramm der 12 optimierten 4 element Vagi Antennen	29
4.24	gleichphasig	21
1 25	Strahlungsdingramm der 12 optimierten 4 element Vagi Antennen	91
4.20	gleichphasig	<u>3</u> 9
1 96	12 optimierte 1 element Vari Antennen, linearer Phasenversatz W	57 34
4.20 4.97	12 optimierte 4-element Vagi Antennen, nichtlingerer Phasenversetz W	04
7.41	Faktor 1.8	35
	1 WILLOUT 1,0	50

 Faktor 2,3
 4.29 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, nichtlinearer Phasenversatz Ψ, Faktor 2,5
Faktor 2,5374.30Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 90° 162°394.31Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 90° 162°404.32Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 80° 160°414.33Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 80° 160°424.34Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 70° 161°43
$\begin{array}{rll} 4.32 \;\; Strahlungsdiagramm, 12 \; optimierte \; 4-element \; Yagi-Antennen, 0^{\circ} \; 80^{\circ} \; 160^{\circ} & . \; \; 41 \\ 4.33 \;\; Strahlungsdiagramm, 12 \; optimierte \; 4-element \; Yagi-Antennen, 0^{\circ} \; 80^{\circ} \; 160^{\circ} & . \; \; 42 \\ 4.34 \;\; Strahlungsdiagramm, 12 \; optimierte \; 4-element \; Yagi-Antennen, 0^{\circ} \; 70^{\circ} \; 161^{\circ} & . \; \; 43 \end{array}$
4.33 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 80° 160° . 42 4.34 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 70° 161° . 43
4.34 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 70° 161° . 43
4.35 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 70° 161° . 44
4.36 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 60° 150° . 45
4.37 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen, 0° 60° 150° . 46
5.1 Halbwellen-Umwegleitung aus [Rot95]
5.2 Antennengruppe 12 optimierte 4-element Yagi-Antennen
5.3 Blockschaltbild, Speisung der 12 optimierten 4-element Yagi-Antennen 51
7.1 Anordnung der Meteorsendeentennen 3 element Kreuz Vegi Antenne mittig 56
7.1 Anordnung der Meteorsendeantennen - 5-eiement Kreuz-Fagi-Antenne inttig 50 7.2 Strahlungsdiagramm der mittig angeordnoten 3 element Kreuz-Vagi Antenne 58
7.2 Strahlungsdiagramm der 12 optimierten 4 element Vagi Antennen bei
mittig appeordneter 3 element Kreuz Vagi Antenne für $\Psi = 00$ und
linearon Phaenversitz 50
74 Anordnung der Meteorsendeentennen ehgesetzte 3 element Kreuz Vegi
Antenne 60
7.5 Strahlungsdiagramm der abgesetzten 3-element Kreuz-Vagi-Antenne 61
7.6 Skizze des IAP Antennenfeldes
8.1 mögliche Erweiterung auf 24 optimierte 4-element Yagi-Antennen 64
8.2 mögliche Erweiterung auf 24 optimierte 4-element Yagi-Antennen in
Sternform \ldots
8.3 mögliche Erweiterung auf 12 4-element Kreuz-Yagi-Antennen
8.4 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Kreuz-Yagi-Antennen,
$\Psi = 130^{\circ} \dots \dots$
8.5 Strahlungsdiagramm, 12 optimierte 4-element Kreuz-Yagi-Antennen,
$\Psi = 130^{\circ} \dots \dots$
9.1 Segmentierung - Gewinn am Beispiel der optimierten 4-element Vagi-Antenne 71
9.2 Segmentierung - Zeit am Beispiel der optimierten 4-element Yagi-Antenne . 72

Literaturverzeichnis

- [Ber90] BERTELSMEIER, R.: Yagi-Antennas for 144MHz, DUBUS, Heft 1 1990
- [Ehr59] EHRENSPECK, H. W., POEHLER, H.: A new method for obtaining maximum gain from Yagi antennas, IEEE Trans. Antennas and Propagation 10, AP-7, 1959
- [Hoc77] HOCH, G.: Wirkungsweise und optimale Dimensionierung von Yagi-Antennen, UKW-Berichte 17, Heft 1 1977
- [Hoc78] HOCH, G.: Mehr Gewinn mit Yagi-Antennen ,UKW-Berichte 18, Heft 1, 1978
- [IAP99] IAP an der Universität Rostock (e.V.): Institutsbericht 1998/1999
- [Joh93] JOHNSON, R. C.: Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill Professional Publishing 1993
- [Kar04] KARK, K.: Antennen und Strahlungsfelder, elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung, 1. Auflage, 2004
- [Mai94] MAILLOUX, R. J.: Phased Array Antenna Handbook. Bosten, Artech House, Inc. 1994
- [Mei04] MEINKE, H. H.: GUNDLACH, F. W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik , 5. Auflage, 2004
- [NEC] NEC-Win Pro Users Manual, A Hand's-On Tutorial, Nittany Scientific
- [Obe82] OBERRENDER, O.: Tips und Tricks für UKW-Yagis , Funkamateur 31, Heft 8 1982
- [Rub97] RUBACH, J.: Untersuchungen zur Richtcharakteristik des Antennenfeldes des geplanten VHF-ST-Radars in Kühlungsborn. Großer Beleg, Universität Rostock, 1997
- [Rub98] RUBACH, J.: Optimierung der Phased-Array Antenne des ST-Radars in Kühlungsborn für senkrechte und schräge Abstrahlung. Diplomarbeit, Universität Rostock, 1998
- [Rot95] ROTHAMMEL, K.: Rothammels Antennenbuch. Stuttgart,Franckh-Kosmos 1995
- [Sin05] SINGER, W., LATTECK, R., HOFFMANN, P., BREMER, J.: Bodengebundene Radarmethoden zur Untersuchung der mittleren Atmosphäre, Deutscher Wetterdienst, promet, Jahrgang 31, Heft 1, S. 44-49, 2005
- [Ste97] STEYER, M.: Hochleistungsyagis für das 2m-Band in 28Ohm-Technik, Funkamateur 46 (1997), Heft 1, 1997

Anhang

NEC-Quellcode

Ein Beispiel für einen NEC-Quellcode ist nachfolgend für die optimierte 4-element Yagi-Antenne dargestellt. Die Quellcodes für die übrigen NEC-Modelle sind auf der beiliegenden CD enthalten.

CM MeteorRadar 4el Yagi 200R Faltdipol - 50R gestr. Dipol CM Anpassung über L/2 50R Leitung CE CM Segment 1-4 für Faltdipol GA 1 2 0.025 -90 90 0.006 GM 0 0 90 0 0 1.28 0.0 1.2 000.000 GA 2 2 0.025 90 270 0.006 GM 0 0 90 0 0 -1.28 0.0 1.2 002.200 GW 3 21 -1.28 -0.025 1.2 1.28 -0.025 1.2 0.006 GW 4 21 -1.28 0.025 1.2 1.28 0.025 1.2 0.006 CM Segment 4 für gestreckten Dipol CM GW 4 21 -1.323 0 1.2 1.323 0 1.2 0.006 CM GW 5 21 -1.395 0 0.00 1.395 0 0.00 0.006 GW 6 21 -1.27 0 2.02 1.27 0 2.02 0.006 GW 7 21 -1.23 0 3.17 1.23 0 3.17 0.006 GM 0 0 0 0 0 0 0 0 1.0 000.000 GE 1GN 2000130.004 FR 0 61 0 0 50.0 0.1 0 CM FR 0 0 0 0 53.5 0 0 EK -1 EX 0 4 11 00 100.00000 0.00000 RP 0 1801 1 1010 -90 0. 0.10000 1.00000 1000 RP 0 1801 1 1010 -90 45. 0.10000 1.00000 1000 RP 0 1801 1 1010 -90 90. 0.10000 1.00000 1000 EN

Listing $meteortx4el_{200r.nec}$

Datenträger

Diese CD enthält:

- die Bachelorarbeit als pdf-Datei
- die NEC-Quellcodes

Erklärung

Ich erkläre, diese Arbeit selbstständig angefertigt und die benutzten Unterlagen vollständig angegeben zu haben.

Rostock, 12. April 2006

Toralf Renkwitz