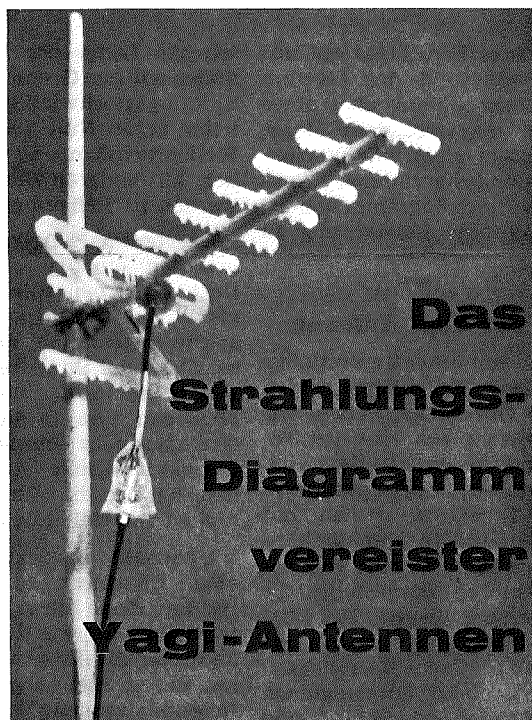


YAGI-ANTENNEN UND EIS

"... Yagi-Antennen sind empfindlich gegen Vereisung. Zur Abhilfe wird meist das Anregungssystem mit einer Hülle aus Kunststoff umgeben. Damit lässt sich die Rückwirkung des Eisbelages auf den Eingangswiderstand der Antenne weitgehend unterdrücken. Das Strahlungsdiagramm aber ändert sich trotzdem bis zur UNBRÄUCHBARKEIT ..."

Lesen Sie den sehr aufschlussreichen Auszug aus einem Aufsatz von Herrn Dr. Max Lohr, Kathreinwerke KG, Rosenheim!

Aus diesem Aufsatz geht hervor, dass sich die Überlegungen hauptsächlich auf Frequenzen bis 800 MHz beziehen. Bei wesentlich höheren Frequenzen, zB. oberhalb 1 GHz, wird der Einfluss eines Eisbelages bestimmter Dicke auf die Antenneneigenschaften noch gravierender.



B O N A N O M I A G
Postfach, 8052 Zürich, Tel. 01/301 18 91, Tlx. 82 36 31

Ihr Antennenspezialist mit der langjährigen Erfahrung

KATHREIN

Das Strahlungs-Diagramm vereister Yagi-Antennen

Die Yagi-Antenne ist die meist verbreitete Form von Richtantennen im Frequenzbereich von 30 bis 800 MHz. Für den Fernsehempfang werden fast ausschliesslich Yagis verwendet. Die Yagi-Antenne gehört zur Gruppe der Längsstrahler und zeichnet sich gegenüber Querstrahlern durch einfachen Aufbau und kleine Windlast aus. Bei professionellen Anlagen unter extremen Klimaverhältnissen ist allerdings Vorsicht geboten. Yagi-Antennen sind empfindlich gegen Vereisung. Zur Abhilfe wird meist das Anregungssystem mit einer Hülle aus Kunststoff umgeben. Damit lässt sich die Rückwirkung des Eisbelags auf den Eingangswiderstand der Antenne weitgehend unterdrücken. Das Strahlungsdiagramm aber ändert sich trotzdem. Im folgenden wird gezeigt, dass das Richtdiagramm von Yagi-Antennen bei starker Vereisung bis zur Unbrauchbarkeit deformiert wird.

Grundlagen

Vor mehreren Jahren schon wurden bei uns grundsätzliche Untersuchungen über vereiste Yagi-Antennen angestellt. Es zeigte sich, daß mit wachsendem Eisbelag sowohl die Widerstandsanpassung als auch das Strahlungsdiagramm immer schlechter werden. Bei gleicher Dicke des Eisbelages werden die Abweichungen vom Sollwert mit steigender Frequenz grösser.

Für Fernseh-Empfangsantennen ist dieser Effekt unbedeutend, da in unmittelbarer Nähe von Wohnhäusern keine merkliche Vereisung auftritt. Schnee- belag dagegen zeigt keinen nennenswerten Einfluss auf die Antenneneigenschaften, da Schnee ein Gemisch aus Eiskristallen und Luft darstellt, bei dem die Lufträume weit überwiegen. Interessant aber ist das Vereisungsproblem für professionelle Antennen-Anlagen, die meist auf exponierten Bodenerhebungen oder gar im Gebirge errichtet werden. Besonders gefährdet sind Fernsehsumersetzer im UHF-Bereich, da wegen der hohen Frequenz Yagi-Antennen bereits mit einem Eisbelag von einigen Millimetern unbrauchbar werden können.

Es ist weitgehend bekannt, wie der Einfluss von Eis auf den Eingangswiderstand der Yagi-Antennen klein gehalten werden kann. Man umgibt dazu den gespeisten Dipol und möglichst den ersten und den zweiten benachbarten Direktor mit einem Schutzgehäuse aus Kunststoff [1]. Damit erhält man zwischen den Strahlern und dem Eismantel einen Luftraum, so dass die höhere Dielektrizitätskonstante der Eisschicht nur zum kleinen Teil auf die Strahler wirkt. Die Verstimmung der Strahler wird dadurch erheblich reduziert.

Der Einfluss eines Eisbelages auf das Strahlungsdiagramm und den Gewinn einer Yagi-Antenne scheint aber einer näheren Betrachtung wert, denn dieser Eisschutz verhindert nicht eine Verformung des Strahlungsdiagrammes. Warum sich das Strahlungsdiagramm ändert, ist durch eine einfache Betrachtung zu erklären.

Die Funktion der Yagi-Antenne

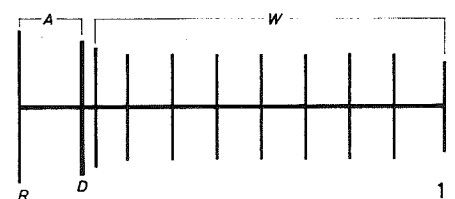
Yagi-Antennen mit einer Gesamtlänge von mehr als einer Wellenlänge zählen zur Gruppe der Oberflächenwellen-Antennen. Sie bestehen aus einem Anregungssystem und einem Wellenleiter. Das Anregungssystem bildet gewöhnlich ein gespeister Dipol, zusammen mit einem Reflektor (Bild 1). Der Wellenleiter wird durch eine Anzahl von sogenannten Direktoren dargestellt, die alle in einer Ebene liegen. Das Anregungssystem strahlt eine elektromagnetische Welle ab, die zum überwiegenden Teil vom Wellenleiter aufgenommen wird, diesen Wellenleiter durchläuft und an dessen Ende in den Raum abgestrahlt wird.

Der Wellenleiter stellt mit seinen Direktoren eine Verzögerungsleitung dar, längs der sich eine Welle mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die kleiner ist als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im freien Raum (Lichtgeschwindigkeit). Das Mass der Verzögerung ist wesentlich für die Richtwirkung der Antenne und wird bestimmt durch die Länge und Dicke der einzelnen Direktoren. Direktoren, die wesentlich kürzer als eine halbe Wellenlänge sind, ergeben eine sehr kleine Verzögerung der Welle. Die Verzögerung wächst, je länger die Direktoren werden, das heisst die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird ständig kleiner. Bei einer elek-

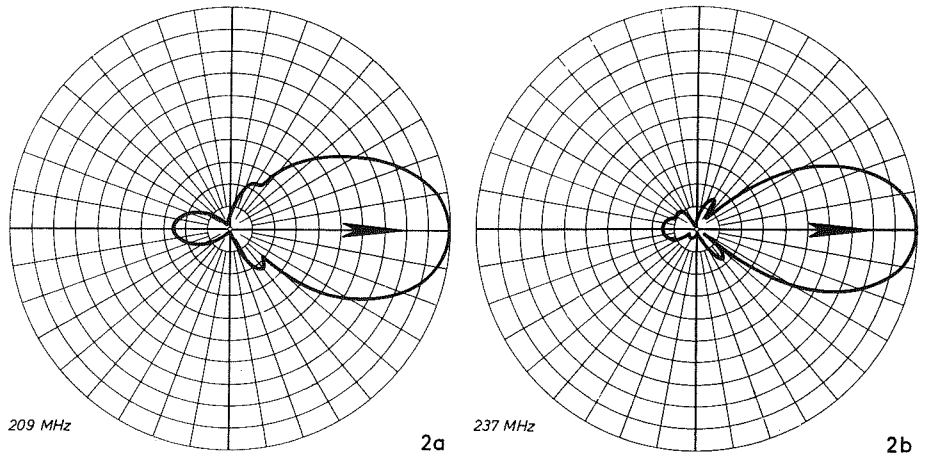
trischen Länge der Direktoren von $\lambda/2$ finden wir den Grenzfall, womit die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wellenleiter gegen Null geht. Das heisst, eine Wellenfortpflanzung ist nicht mehr möglich. Mit anderen Worten: die Direktoren werden zu Reflektoren.

Der optimale Arbeitsbereich im Wellenleiter einer üblichen Yagi-Antenne liegt aber bei einer Verzögerung von etwa 10% bis 30%. Betreibt man eine solche Antenne bei Frequenzen, die wesentlich über ihrer Betriebsfrequenz liegen, so nimmt das Richtverhältnis rasch ab, wenn man in die Nähe der oberen Grenzfrequenz kommt. Als obere Grenzfrequenz sei hier die Frequenz verstanden, bei der die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wellenleiter Null wird.

Überzieht man die Direktoren mit einer Eisschicht, so wird deren elektrische Länge durch die höhere Dielektrizitätskonstante des Eises verstimmt. Je dicker die Eisschicht auf dem Strahler, um so mehr verschiebt sich dessen Resonanzfrequenz nach unten. In der Wirkung scheint es so, als ob die Direktoren verlängert wären. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem Wellenleiter wird damit stetig kleiner je mehr der Eisbelag auf dessen Direktoren wächst. Durch diese Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ändert sich



Prinzip der Yagi-Antenne, A: Anregungssystem, W: Wellenleiter, R: Reflektor, D: gespeister Dipol.



Antenne A ohne Eisansatz. Strahlungsdiagramme in der E-Ebene

a) bei $f = 209$ MHz,

b) bei $f = 237$ MHz.

auch das Strahlungsdiagramm der Antenne, und die Nebenzipfel wachsen an. Wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wellenleiter Null wird, ist die Yagi-Antenne keine Richtantenne mehr — der Wellenleiter ist zu einem Reflektorsystem geworden.

Das Versuchsprogramm

Um die Änderung des Strahlungsdiagrammes bei Vereisung experimentell zu belegen und um abschätzen zu können, bei welchem Vereisungsgrad die obere Grenzfrequenz sich in den Betriebsfrequenzbereich verlagert, wurden Versuchsreihen durchgeführt. Zunächst muss festgestellt werden, dass bei natürlicher Vereisung von Antennen der Eisbelag weder gleichmässig dick ist, noch eine gleichmässige Dichte aufweist [2]. (Im allgemeinen liegt die Dichte des Eisbelags zwischen 0,5 und 0,8.) Um aber einfach auswertbare und vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, wurden mehrere Yagi-Systeme künstlich mit einer möglichst gleichmässigen Eisschicht überzogen. Bei verschiedener Dicke des Eisbelages wurde dann in einem Antennemessfeld jeweils das Strahlungsdiagramm untersucht.

Zur Vereisung waren die Antennen bei einer Lufttemperatur zwischen -10 und

-20 °C einem Sprühnebel aus Leitungswasser ausgesetzt. Damit liess sich ein sehr dichter Eisüberzug ohne nennenswerte Lufteinschlüsse erzielen. Dass das etwas kalkhaltige Leitungswasser keine wesentliche Abweichung gegenüber Regenwasser bringt, wird weiter unten gezeigt.

Folgende Antennentypen wurden untersucht:

- A) 14-Element-Yagi, Betriebsfrequenz 200 bis 230 MHz (im Fernseh-Bereich III)
- B) 3-Element-Yagi, Betriebsfrequenz 200 bis 230 MHz (im Fernseh-Bereich III)
- C) 10-Element-Yagi, Betriebsfrequenz 470 bis 520 MHz (im Fernseh-Bereich IV)
- D) 8-Element-Yagi, Betriebsfrequenz 470 bis 520 MHz (im Fernseh-Bereich IV)

Der gespeiste Dipol der Antennen A und B war jeweils mit einem Polyesterrohr verkleidet, während bei C und D der Speisedipol ungeschützt blieb.

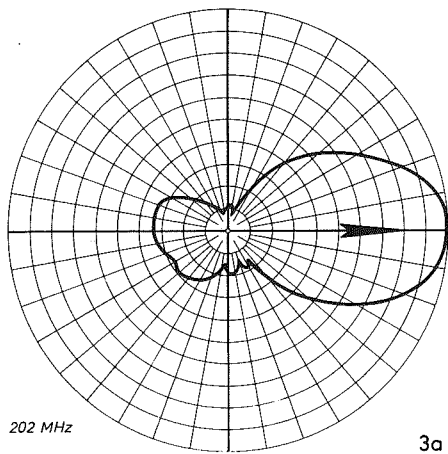
Die Messergebnisse entsprechen weitgehend den Erwartungen. Die meisten

Diagramme wurden in der E-Ebene, eine kleinere Anzahl in der H-Ebene gemessen. Alle Diagramme sind in relativer Feldstärke beziehungsweise in relativer Empfangsspannung dargestellt. Unter „Haupttrichtung“ sei im folgenden die Hauptstrahlrichtung der unvereisten Yagi-Antenne verstanden. Sie ist in allen Diagrammen durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Bild 2 zeigt das Diagramm in der E-Ebene (entspricht dem Horizontaldiagramm bei horizontaler Polarisationsrichtung) der Antenne A ohne Eisansatz bei 209 und bei 237 MHz. Die obere Frequenz liegt 7 MHz über dem Arbeitsbereich, um zu zeigen, dass die Grenzfrequenz genügend weit ausserhalb des Betriebsbereiches liegt. In Bild 3 und 4 sind Diagramme in der E-Ebene von der gleichen Antenne, aber bei einem allseitigen Eisbelag von 30 mm Dicke dargestellt.

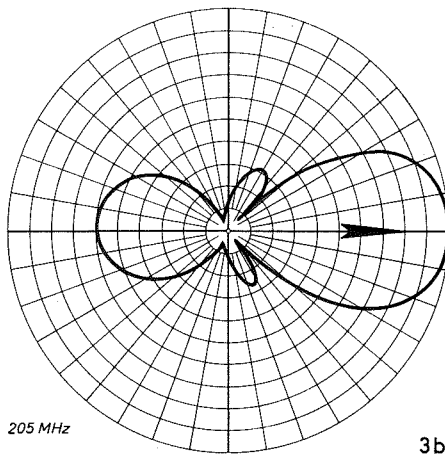
Hier lässt sich sehr gut die rasche Änderung des Strahlungsdiagramms innerhalb eines kleinen Frequenzintervalls erkennen. Während bei 202 MHz das Diagramm noch fast normal ist, treten bei 205 MHz bereits erhebliche Seitenzipfel auf, und die Strahlung nach rück-

Antenne	Anzahl der Reflektoren	Anzahl der Direktoren	relative Antennenlänge a/λ	relative Dicke der Parastrahler d/λ	Betriebsfrequenzbereich		Eisbelag mm	obere Grenzfrequenz f_g MHz	relative obere Grenzfrequenz f_g/f_0	Beurteilung
					f_u	bis f_0				
A	1	12	1,95	0,014	200	230	3,5	250	1,08	brauchbar
							15	220	0,96	nur in kleinem Teilbereich noch brauchbar
							30	206	0,90	unbrauchbar
B	1	1	0,42	0,014	200	230	10	245	1,06	noch brauchbar
							30	210	0,91	unbrauchbar
C	3	6	1,52	0,008	470	520	5	485	0,93	unbrauchbar
							10	445	0,85	unbrauchbar
D	1	6	1,52	0,008	470	520	4	494	0,95	unbrauchbar
							10	445	0,85	unbrauchbar



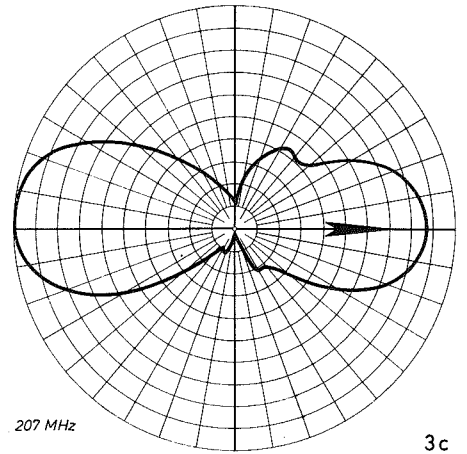
202 MHz

3a



205 MHz

3b



207 MHz

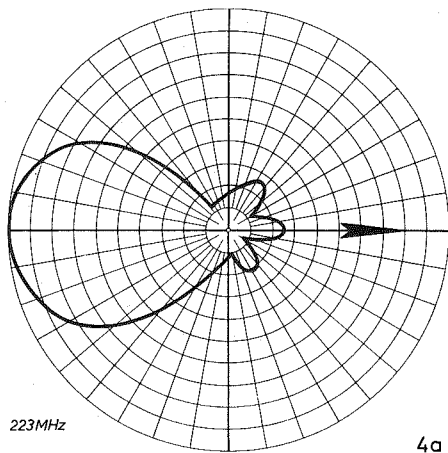
3c

Antenne A bei 30 mm Eisbelag. Strahlungsdigramme in der E-Ebene

a) bei $f = 202$ MHz,

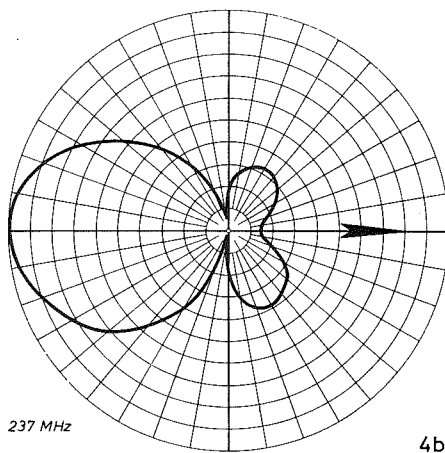
b) bei $f = 205$ MHz,

c) bei $f = 207$ MHz.



223 MHz

4a



237 MHz

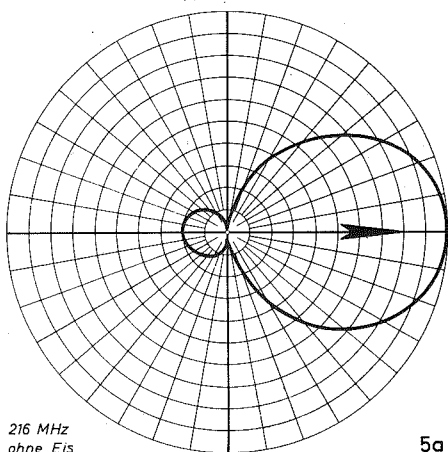
4b

Antenne A bei 30 mm Eisbelag. Strahlungsdigramme in der E-Ebene

a) bei $f = 223$ MHz,

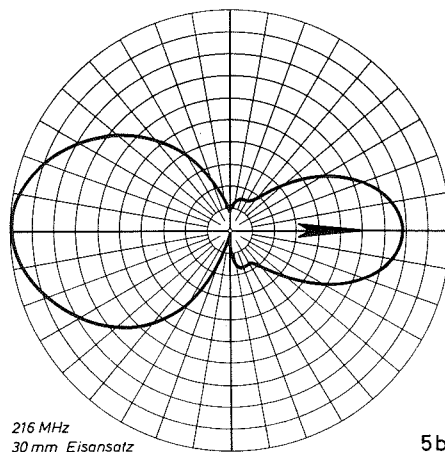
b) bei $f = 237$ MHz.

Die Antenne strahlt nach rückwärts.



216 MHz
ohne Eis

5a



216 MHz
30 mm Eisansatz

5b

Antenne B. Strahlungsdigramme in der E-Ebene bei 216 MHz

a) ohne Eisbelag,

b) mit 30 mm Eisbelag.

wärts nimmt wesentlich zu. Bei 207 MHz ist die Rückwärtsstrahlung bereits stärker als die Strahlung in Hauptrichtung. In Bild 4 erkennt man eine extreme Verformung des Diagramms. Bei 223 MHz ist das ursprüngliche Diagramm praktisch um 180° verdreht; und bei 237 MHz tritt in der Hauptrichtung sogar ein Minimum auf.

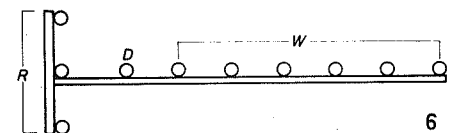
Als Grenzfall wurde die Antenne B mit nur 3 Elementen, also aus Reflektor, gespeistem Dipol und einem Direktor bestehend, untersucht. Auch hier ergaben sich ähnliche Diagrammänderungen wie bei Antenne A. Als Beispiel sind in Bild 5 die Diagramme der vereisten und der nicht vereisten Antenne B bei 216 MHz in der E-Ebene gegenübergestellt. Die

Grenzfrequenz wird bei vergleichbarem Eisbelag in gleichem Masse nach unten verschoben wie bei Antenne A, und die Hauptstrahlrichtung dreht um 180° . Allerdings wird oberhalb der Grenzfrequenz die Strahlung in Hauptrichtung nicht so stark reduziert wie bei Antenne A, die viele Direktoren enthält.

Im unteren UHF-Bereich brachte die Antenne D, bestehend aus einem Reflektor, einem gespeistem Dipol und 6 Direktoren, ganz ähnliche Diagramm-Verformungen wie Antenne A. Allerdings war nur ein Eisbelag von 5 mm notwendig, um die Grenzfrequenz bis an den unteren Rand des Betriebs-Frequenzbereiches zu verschieben.

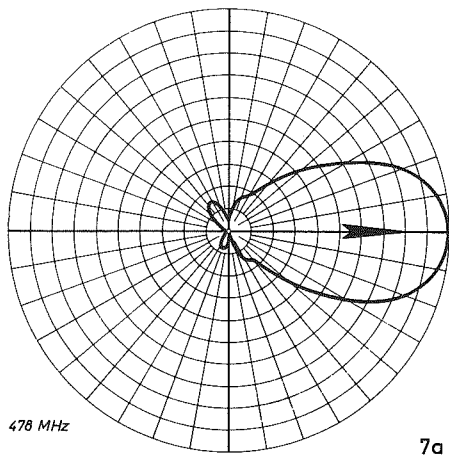
Yagi-Antennen werden häufig auch mit einem Mehrfachreflektor gebaut. An Stelle eines Reflektorstabes sind dann meist 2 oder 3 Reflektoren hinter dem gespeistem Dipol angeordnet (Bild 6). Damit lässt sich eine bessere Vorbündelung des Anregungssystems und somit ein schärferes Richtdiagramm der Antenne erzielen. Ausserdem lassen sich die Breitbandeigenschaften von Yagis durch einen Mehrfachreflektor verbessern.

Auch bei vereisten Antennen macht sich der Mehrfachreflektor günstig bemerkbar. Während bei der vereisten Antenne A 10% oberhalb der Grenzfrequenz die nach rückwärts abgestrahlte Leistung mindestens 20mal so gross ist wie in Hauptrichtung, wird die Rückwärtsstrahlung bei Antennen mit einem Mehrfach-Reflektor begrenzt. Bei der Versuchsantenne C blieb die Rückwärtsstrahlung oberhalb der Grenzfrequenz ziemlich konstant in der Grössenordnung der in Hauptrichtung abgestrahlten Leistung.



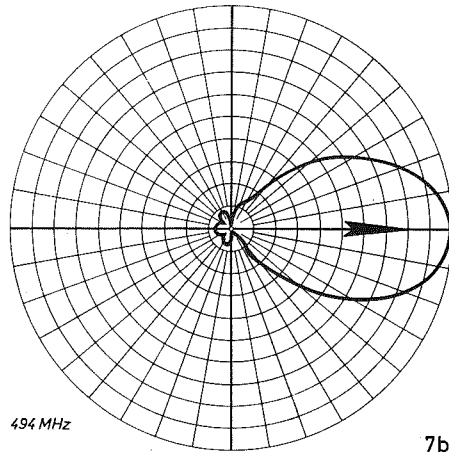
6

Yagi-Antenne mit 3-fach-Reflektor R, W: Wellenleiter, D: gespeistem Dipol.



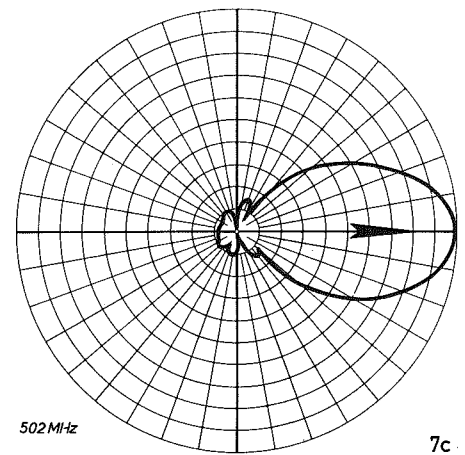
478 MHz

7a



494 MHz

7b



502 MHz

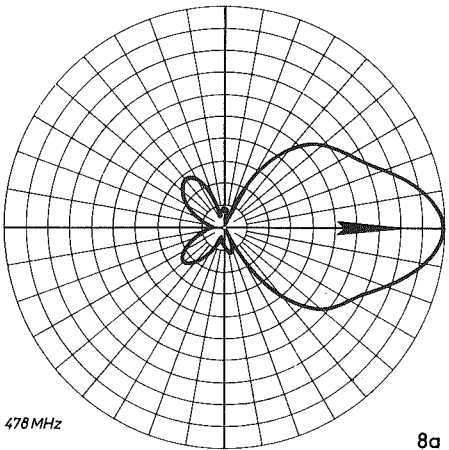
7c

Antenne C ohne Eisbelag. Strahlungsdiagramme in der E-Ebene.

a) bei $f = 478$ MHz,

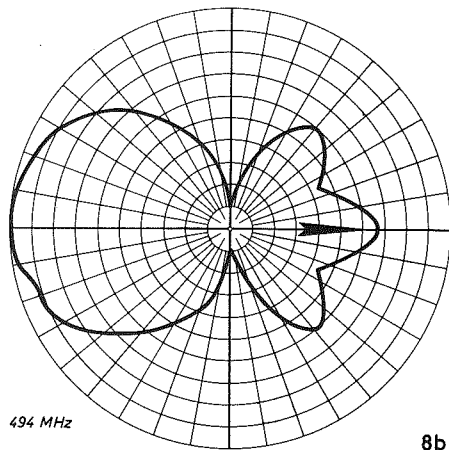
b) bei $f = 494$ MHz,

c) bei $f = 502$ MHz.



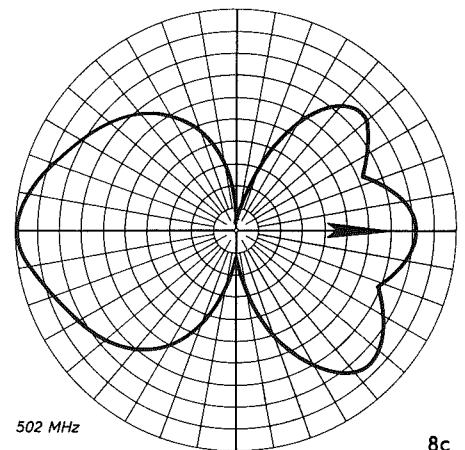
478 MHz

8a



494 MHz

8b



502 MHz

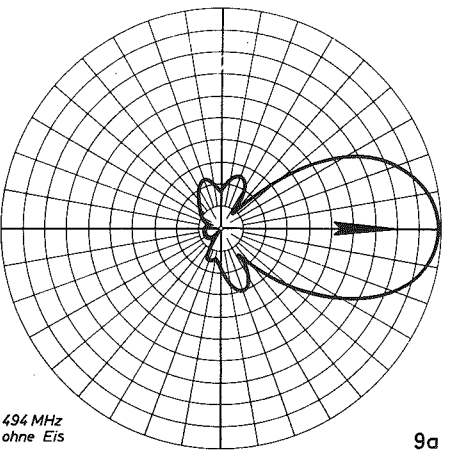
8c

Antenne C mit 5 mm Eisbelag. Strahlungsdiagramme in der E-Ebene

a) bei $f = 478$ MHz,

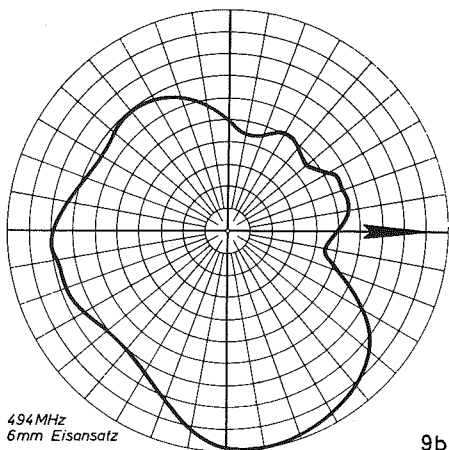
b) bei $f = 494$ MHz,

c) bei $f = 502$ MHz.



494 MHz
ohne Eis

9a



494 MHz
6mm Eisansatz

9b

Antenne C. Strahlungsdiagramme in der H-Ebene bei 494 MHz

a) ohne Eisbelag,

b) mit 6 mm Eisbelag.

gramme in der H-Ebene zeigen die erwartete Tendenz oberhalb der Grenzfrequenz.

Auswertung

In der Tabelle sind die wesentlichen Daten der Versuche zusammengestellt. Bei den Antennen im Fernseh-Bereich III ergeben Eisbeläge bis zu 10 mm Dicke noch vertretbare Richtdiagramme. Im Fernseh-Bereich IV aber ist mit einem Eisbelag von 4 mm Dicke das Yagi-System bereits unbrauchbar. Mit grosser Wahrscheinlichkeit führt im Fernseh-Bereich V ein Eisbelag von 2 mm bereits zu Diagrammstörungen.

Die Verformung des Strahlungsdiagramms hat natürlich auch eine Reduzierung des Antennengewinns zur Folge. Da mit zunehmender Vereisung die Hauptkeule breiter wird und die Nebenzipfel wachsen, geht der Antennengewinn, der ja auf die Hauptrichtung bezogen ist, ebenfalls mit wachsendem Eisbelag zurück. Bei Betrachtung der Horizontal- und Vertikaldiagramme kommt man zu dem Schluss, dass eine vereiste Yagi-Antenne oberhalb ihrer Grenzfrequenz nur noch einen Gewinn von kleiner 1 (oder $G < 0$ dB), bezogen auf den Halbwellenstrahler, haben kann.

Die Strahlungsdiagramme der Antenne C sind in Bild 7 und 8 gegenübergestellt. Es handelt sich wieder um Diagramme in der E-Ebene, und zwar Bild 7 ohne Eis und Bild 8 mit einem Eisansatz von 5 mm Dicke. Dabei fällt auf, dass in vereistem Zustand die Strahlungskeulen in Hauptrichtung und nach rückwärts sehr breit werden, wesentlich breiter als bei einem Halbwellendipol.

Als Beispiel für die Strahlung von vereisten Yagis in der H-Ebene mag Bild 9 dienen. Hier ist das Diagramm der Antenne C bei 494 MHz einmal ohne Eis und zum anderen mit 6 mm Eisbelag gezeigt. Die Unsymmetrie senkrecht zur Hauptrichtung ist offenbar dadurch bedingt, dass der gespeiste Dipol etwas ausserhalb der Ebene, in der die Direktoren liegen, angeordnet ist. Die Dia-

Vorausgesetzt ist dabei, dass in den Richtungen, die nicht durch die gemessenen Diagramme erfasst sind, nichts Aussergewöhnliches passiert.

Der Gewinn der Antenne C wurde deshalb bei 6 mm Eisbelag kontrolliert. Zwischen 490 und 510 MHz ergaben sich Werte zwischen $G = -1,1$ dB und $G = -4,9$ dB. Bei Yagis mit nur einem Reflektor sinkt der Gewinn noch erheblich weiter ab, da die Strahlung in Hauptrichtung von der Grenzfrequenz ab mit wachsender Frequenz zurückgeht (Bild 3 und 4). In Hauptrichtung sind hier sogar Minima festzustellen, was den Gewinn erheblich beeinflusst.

Obwohl der Eisbelag auf Yagi-Antennen sehr störend wirkt, ist es erleichternd, feststellen zu können, dass in dem betrachteten Frequenzbereich Eis eine relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r von nur 3 aufweist. Bei Wasser dagegen ist $\epsilon_r \approx 80$. Die Dielektrizitätskonstante von Wasser ändert sich in weiten Grenzen als Funktion von Temperatur und Frequenz [3] [4]. Beim Übergang zwischen festem und flüssigem Aggregatzustand tritt eine sprunghafte Änderung auf. Bei 0 °C in flüssigem Zustand liegt die Dielektrizitätskonstante im Bereich von 500 MHz bei etwa 90. Es ist daher denkbar, dass beim Tauen von vereisten Yagis die Strahlungseigenschaften etwas ungünstiger werden als oben dargestellt.

Andererseits wirkt sich in der Praxis günstig aus, dass bei natürlicher Vereisung der Belag nur in ganz seltenen Fällen so dicht wird, wie bei den Versuchsentennen. Während hier die Eisdichte grösser als 0,9 war, rechnet man in der Praxis mit folgenden Dichtezahlen:

Rauheis	0,8
Rauhrost	0,5
Rauhreif	0,2.

Je kleiner die Dichtezahl, desto kleiner ist auch die wirksame Dielektrizitätskonstante des Eisbelages. Bei natürlicher Vereisung wird daher der Einfluss auf

das Strahlungsdiagramm meist etwas kleiner sein als bei den hier beschriebenen Versuchen.

Es bleibt nun noch nachzuweisen, dass das für die Vereisung verwendete Leitungswasser keine merklichen Fehler verursacht gegenüber Natureis, wie es durch Ablagerung von Luftfeuchtigkeit entsteht. Dazu wurden zwei gleiche Halbwellendipole gleichartig vereist und im Bereich um 500 MHz bezüglich Eingangswiderstand verglichen. Der eine Dipol erhielt eine Eisschicht aus Leitungswasser, während für den zweiten Dipol destilliertes Wasser verwendet wurde. Die Abweichungen zwischen beiden Messungen waren so klein, dass ein Einfluss auf die Versuchsergebnisse ausgeschlossen werden kann.

Literatur:

- [1] „Die Yagi-Antenne bei Vereisung“. Funkschau 1962, Heft 21, Seite 547 und 548.
- [2] F. Staiger: „Belastungsannahmen für Antennenträger im Falle Vereisung“. Der Stahlbau 1961, Heft 1/ Seite 24–27.
- [3] Landolt - Börnstein: „Zahlenwerte und Funktionen aus Physik . . . Chemie“, II. Band, 6. Teil. Springer-Verlag 1959.
- [4] H. J. Eckhardt: „Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen“, Nr. 642.

**Wir lösen
nicht nur Antennenprobleme!**

B O N A N O M I A G
Postfach, 8052 Zürich, Tel. 01/301 18 91, Tlx. 82 36 31

Ihr Antennenspezialist mit der langjährigen Erfahrung

KATHREIN