

Toleranzprobleme bei Fernseh-Sendeantennen, insbesondere im Band IV/V

DIETER NOWATZKY, Deutsche Post, Rundfunk- und Fernsehtechnisches Zentralamt

0. Einleitung

Fernseh-Sendeantennen im Band IV/V bestehen meist aus einzelnen Antennenfeldern. Diese sind in mehreren Ebenen quadratisch um einen stählernen Antennenträger herum angeordnet und mit einer zylinderförmigen Kunststoffverkleidung versehen. Bei modernen Anlagen befinden sich die Antennenfelder in einem selbsttragenden Kunststoffzylinder [1, 2, 3, 4, 38].

In letzter Zeit werden Fernseh-Sendeantennen für Band IV/V auch aus mehreren übereinander angeordneten Gruppen aus Kreuzdipolen oder Schmetterlingsantennen (Turnstile- bzw. Superturnstile-Antennen) aufgebaut. Derartige Antennen weisen hervorragende Rundstrahleigenschaften auf. Aufgrund ihrer geringen Querabmessungen werden auch sie in selbsttragenden Kunststoffzylindern montiert [5, 6, 41].

Um ein vorgegebenes Gebiet optimal mit Fernsehen versorgen zu können, müssen die Strahlungseigenschaften der Fernseh-Sendeantennenanlage (Gewinn, Horizontaldiagramm, Vertikaldiagramme) optimal an die Besonderheiten des Versorgungsgebietes angepaßt sein. Liegt die Geometrie der Antenne fest, dann müssen die einzelnen Antennenfelder bzw. Strahlerelemente mit geeigneter Amplitude und Phase gespeist werden. Durch die Wahl der Speiseschaltung muß sichergestellt werden, daß die geforderten Strahlungseigenschaften in allen Betriebskanälen eingehalten werden, auch wenn diese weit auseinander liegen [9]. Am Antenneneingang darf außerdem ein Reflexionsfaktor von etwa 2,5% nicht überschritten werden.

Die Einhaltung dieser Forderungen ist schwierig, da die Antennenfelder bzw. Strahlerelemente wegen des umgebenden Kunststoffzylinders erhebliche Fehlanpassungen aufweisen können. Bei Antennenfeldern in selbsttragenden Kunststoffzylindern aus glasfaserverstärktem Polyesterharz können Welligkeiten bei einzelnen Frequenzen bis $s = 2$ auftreten, da die Wandstärken des Zylinders aus statischen Gründen maximal etwa 20 mm betragen. Es ist meist günstig, alle Antennenelemente mit gleicher Leistung zu speisen und alle Diagrammforderungen bei gegebener Antennengeometrie ausschließlich durch geeignete Wahl der Speisephasen zu realisieren. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Längenänderung ΔL eines HF-Kabels die Speisephase des angeschlossenen Antennenelements um $2\pi\Delta L/\lambda$ verschiebt. Dieser einfache lineare Zusammenhang ist jedoch wegen der Fehlanpassung der Antennenelemente in der Praxis nicht vorhanden.

Mehrere Antennenelemente werden im allgemeinen zu Gruppen zusammengefaßt, die sowohl das gewünschte Horizontaldiagramm aufweisen als auch die Anpassungsforderungen einhalten und damit voll funktionsfähig sind. Zur Erfüllung dieser Forderungen im gesamten Band IV/V ist eine meist doppelte Phasenkompensation erforderlich

[7, 8, 9]. Einige Firmen verwenden 3-dB-Koppler als Verteiler, um eine möglichst breitbandige Kompensation zu erreichen [1, 10]. Die so gebildeten Gruppen sollen möglichst wenige Ebenen umfassen und damit eine geringe vertikale Ausdehnung besitzen [9].

Die vollständige Antenne besteht aus mehreren solcher Gruppen, die ohne Spiegelung oder Verdrehung genau gleich sind und übereinander angeordnet sind. Durch geeignete Wahl der Speisephasen dieser Gruppen kann ein Vertikaldiagramm realisiert werden, das innerhalb des Versorgungsbereiches gegenüber der Horizontalen abgesenkt ist und keine Nullstellen aufweist.

Die tatsächlich an den Antennenelementen auftretenden Speisephasen können in der Praxis erheblich von den idealen Werten abweichen, die durch den linearen Zusammenhang zwischen Kabellänge und Speisephase gegeben sind:

- Infolge der Fehlanpassung der Antennenelemente in Verbindung mit verschiedenen langen Kabeln zu den Antennenelementen erscheinen an den Verzweigungspunkten unterschiedliche Admittanzen. Dadurch findet eine ungleichmäßige Leistungsaufteilung statt und die Phasen weichen von den Sollwerten ab [8]. Diese Abweichungen können durch die Verkopplung benachbarter Antennenelemente noch weiter vergrößert werden.

- Die durch die Kabellängen bewirkten Speisephasen sind frequenzabhängig. Liegen die Betriebskanäle weit auseinander, dann ergeben sich hier besondere Probleme [9].

- Alle Bauelemente (Antennenfelder, Verteiler usw.) einschließlich der Kabellängen weisen gewisse Fertigungstoleranzen auf.

Die Richtcharakteristik kompletter UHF-Sendeantennen wird aus den gemessenen Richteigenschaften der Antennenelemente, aus der Antennengeometrie sowie aus den Speisephasen und -amplituden durch vektorielle Addition der einzelnen Strahlungsanteile berechnet. Der Einfluß des Kunststoffzylinders, der Halterungen, Leitern und der Kabel auf die komplexe Strahlungscharakteristik der Antennenelemente werden dabei im allgemeinen nicht berücksichtigt. Das Horizontaldiagramm der kompletten Antenne kann durch Messung auf einem speziellen Meßgelände relativ einfach gemessen werden. Normalerweise reicht es aus, die Horizontaldiagramme einer aus wenigen Ebenen bestehenden Antennengruppe zu messen. Der Einfluß der Antennengeometrie, der Schaltung und der Kabellängen auf das horizontale Strahlungsverhalten kann somit genau verfolgt werden.

Anders sieht es hinsichtlich der Vertikaldiagramme aus. Eine genaue Messung auf dem Meßgelände ist nicht ohne weiteres möglich. Die Antenne muß daher so dimensioniert werden, daß unkontrollierte Feldstärkeeinbrüche in beliebigen Richtungen möglichst von vornherein vermieden werden.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich daher ausschließlich auf die Vertikaldiagramme von UHF-Antennen, auf mögliche Abweichungen von den idealisierten Werten infolge von Störeinflüssen sowie auf Möglichkeiten zur meßtechnischen Überprüfung der Strahlungseigenschaften der Antenne, und zwar aus der Sicht des Betreibers der Antennenanlage.

1. Der Einfluß von Amplituden- und Phasenfehlern auf das Vertikaldiagramm

Messungen an Antennen haben gezeigt, daß die tatsächlich an den Antennenelementen auftretenden Amplituden und Phasen der Einspeisung annähernd normal verteilte Zufallsgrößen sind, die durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben werden können. Mit dieser Annahme ist es möglich, rechnerisch zu untersuchen, wie sich Abweichungen von den Sollwerten der Amplituden und Phasen auf die Strahlungseigenschaften der Antenne auswirken können.

Diese Problematik soll an einem Beispiel näher erläutert werden. Die stark ausgezogene Kurve in Abb. 1 zeigt das berechnete Vertikaldiagramm der in [1] beschriebenen Bd. IV/V-Sendeantenne des VEB Funkwerk Köpenick. Die Antenne besteht aus 16 Ebenen Achterfeldern in einem selbsttragenden Kunststoffzylinder. Jeweils zwei Ebenen bilden eine selbständige, voll funktionsfähige Gruppe hinsichtlich Anpassung und Strahlungseigenschaften. Zur Realisierung eines nullstellenauffüllten Vertikaldiagramms werden diese 8 selbständigen Gruppen mit unterschiedlichen Phasen gespeist. Im vorliegenden Fall eilt die Phase der oberen Gruppe gegenüber den übrigen Gruppen um 90° vor. Diese Lösung bietet sich an, da in der Antenne 3-dB-Koppler als Verteiler verwendet werden, deren Ausgangsspannungen breitbandig um 90° gegeneinander phasenverschoben sind.

Das abgebildete Vertikaldiagramm weist eine für viele Anwendungsfälle ausreichende Nullstellenauffüllung auf. Dabei ist jedoch vorausgesetzt, daß alle Amplituden tatsächlich gleich sind und die Phasen den Sollphasen entsprechen. Da die Werte aber in der Praxis mehr oder weniger stark streuen (vgl. Abschn. 0), können insbesondere einzelne Minima wesentlich tiefer sein, oder es treten sogar einzelne Nullstellen auf.

Mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes kann abgeschätzt werden, wie sich Amplituden- und Phasenfehler auf das Vertikaldiagramm auswirken.

Es gilt

$$\sigma_E = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_{\delta n}^2 \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_n} \right)^2 + \sum_{n=1}^N \sigma_{A_n}^2 \left(\frac{\partial E}{\partial A_n} \right)^2} \quad (1)$$

Dabei ist

- N Zahl Ebenen bzw. Gruppen, deren Phasen gegeneinander verschoben werden,
- σ_E Standardabweichung der relativen Feldstärke E für einen bestimmten Elevationswinkel θ ,
- $\sigma_{\delta n}$ Standardabweichung der Speisephase der n -ten Ebene, Mittelwert δ_n ,
- σ_{A_n} Standardabweichung der Amplitude der n -ten Ebene, Mittelwert A_n .

$\frac{\partial E}{\partial \delta_n}$, $\frac{\partial E}{\partial A_n}$ partielle Ableitung der Feldstärke nach der Phase bzw. nach der Amplitude der n -ten Ebene.

Man kann im allgemeinen davon ausgehen, daß die Standardabweichungen aller Phasen und aller Amplituden gleich sind. Bezeichnet man diese Werte mit σ_δ bzw. σ_A , dann ergibt sich aus (1)

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_\delta^2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_n} \right)^2 + \sigma_A^2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial E}{\partial A_n} \right)^2} \quad (2)$$

Die Summen der Ableitungsquadrate lassen sich aus dem Algorithmus zur Berechnung des Vertikaldiagramms leicht ermitteln, wozu bereits ein programmierbarer Tisch- oder Taschenrechner ausreicht. Als Beispiel soll eine Standardabweichung für die Amplitude von $\sigma_A = 0,1$ bei einem Mittelwert $A = 1$ und für die Phase von $\sigma_\delta = 7,5^\circ$ bei den in Abb. 1 angegebenen Mittelwerten δ_n angenommen werden. Dann liegen z. B. im Intervall $(A - 1,96\sigma_A) \dots (A + 1,96\sigma_A)$ entsprechend $A \pm 0,2$ bzw. $(\delta_n - 1,96\sigma_\delta) \dots (\delta_n + 1,96\sigma_\delta)$ entsprechend $\delta_n \pm 15^\circ$ 95% aller Beobachtungswerte. Diese Zahlen ergeben sich in bekannter Weise durch Integration der Verteilungsfunktion der Normalverteilung (vgl. z. B. [11]). Die numerische Auswertung von (2) liefert den Streubereich, in dem mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% für einen gegebenen Elevationswinkel θ die tatsächlich auftretende relative Feldstärke liegt. Dieser Streubereich ist in Abb. 1 eingezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Feldstärke unterhalb des Streubereichs liegt, beträgt somit 2,5%.

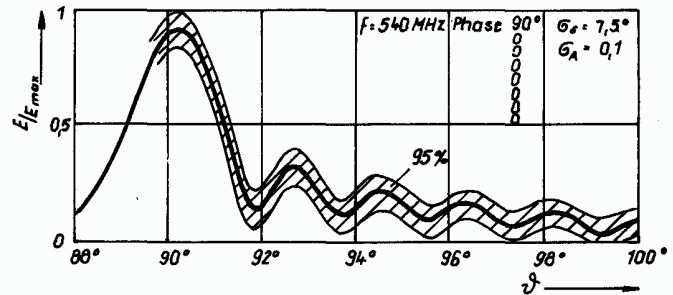


Abb. 1 Vertikaldiagramm der Band-IV/V-Sendeantenne des VEB FWB

tionswinkel θ die tatsächlich auftretende relative Feldstärke liegt. Dieser Streubereich ist in Abb. 1 eingezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Feldstärke unterhalb des Streubereichs liegt, beträgt somit 2,5%.

Von besonderer Bedeutung ist der Einfluß der Streuung der Einspeisung auf die Größe der Minima. Es müssen mit Sicherheit solche Feldstärkeeinbrüche vermieden werden, die zu ernsthaften Störungen des Fernsehempfangs führen. Geht man davon aus, daß das Auftreten der einzelnen Minima im Vertikaldiagramm voneinander unabhängig ist, dann ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß z. B. mindestens eins der 4 Minima unterhalb des Streubereichs liegt, $4 \times 2,5\% = 10\%$. Diese Aussage gilt für das Diagramm einer Spalte. Da die Antenne aus 4 Spalten besteht, wäre die Wahrscheinlichkeit 40%, daß mindestens 1 Minimum unterhalb des Streubereichs liegt, wenn je Spaltenrichtung 4 Minima betrachtet werden.

Nun ist diese gegenseitige Unabhängigkeit für das Auftreten der einzelnen Minima in dieser Vollständigkeit sicher nicht gegeben. Man erkennt aber aus den vorangegangenen Betrachtungen, daß Amplituden- und Phasenfehler erhebliche Auswirkungen auf die Tiefe der Minima und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten unkontrollierter Feldstärkeeinbrüche haben können. Hinzu kommt, daß die Vertikaldiagramme infolge der Amplituden- und Phasenstreuungen in den einzelnen Spaltenrichtungen unterschiedlich sind. Das kann dazu führen, daß in den Zwischenrichtungen zusätzliche Einbrüche auftreten können.

Es reicht also nicht aus, nur das Vertikaldiagramm bei idealer Amplituden- und Phasenverteilung zu betrachten, sondern es ist notwendig, Toleranzüberlegungen anzustellen. Es ist unbedingt erforderlich, die Nullstellen in dem in Frage kommenden Winkelbereich soweit aufzufüllen, daß auch im ungünstigsten Fall überall eine ausreichende Feldstärke vorhanden ist.

Die vorliegenden theoretischen Überlegungen wurden durch praktische Erfahrungen mit der in [1] beschriebenen und in der Praxis bewährten Bd.-IV/V-Antenne des VEB Funkwerk Köpenick bestätigt.

In wenigen Einzelfällen wurden im Bereich des 2. und 3. Minimums derart tiefe Feldstärkeeinbrüche festgestellt, daß dort ein qualitätsge rechter Fernsehempfang nicht möglich war. Bei Überprüfung der Antenne wurden keine Fehler gefunden. Diese Erscheinungen wurden teilweise erst lange nach Inbetriebnahme der Anlage festgestellt, als in dem vorher kaum besiedelten Gebiet ein Neubaukomplex errichtet wurde. Abhilfe wurde durch geeignete Phasenänderungen in der Bd. IV/V-Sendeantenne geschaffen.

Aus (2) läßt sich durch einfache Überlegungen ableiten, daß sich Amplituden- und Phasenfehler um so weniger auf das Vertikaldiagramm auswirken, je mehr Strahlerelemente die Antenne bei gegebener vertikaler Ausdehnung enthält. Wird z. B. eine Antenne statt aus Sechszehnfeldern aus Achterfeldern aufgebaut, dann verringert sich die Standardabweichung der relativen Feldstärke σ_E etwa auf die Hälfte. Das bedeutet, daß entsprechend größere Toleranzen für Amplitude und Phase zugelassen werden können.

2. Störungen infolge Antennenauslenkung durch Sonneneinstrahlung

Bei Sendeantennen im Bd. IV/V mit hohem Gewinn können Versorgungsprobleme auftreten, wenn die Antenne infolge einseitiger Erwärmung durch die Sonne schief steht [13, 14, 15, 16, 17]. Diese Gefahr ist besonders groß, wenn die Antenne in einem selbsttragenden Kunststoffzylinder untergebracht ist.

Vom VEB Kombinat Geodäsie und Kartografie sowie von der Sektion Geodäsie der TU Dresden wurden entsprechende Bewegungsmessungen

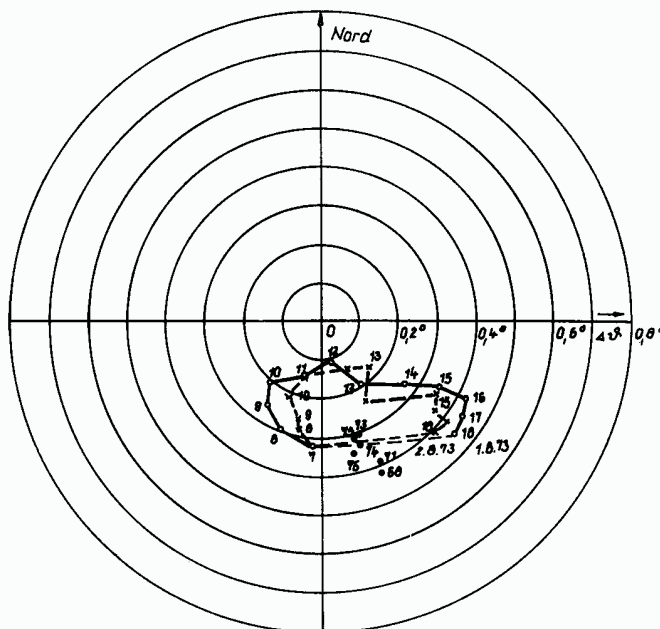


Abb. 2 Winkelauslenkung der Band-IV/V-Sendeantenne Dresden am 13./14. 7. 1971

Zugehörige meteorologische Daten:

	Uhrzeit	Lufttemperatur/°C		Bemerkungen
		Sonne	Schatten	
13. 7. 71	7	—	+15	bedeckt, leicht windig
	8	+19	+16	Sonne hinter Wolken
	9	+25	+19	dto.
	10	+25	+20	dto.
	11	+24	+19	dto.
	12	+25	+18	dto.
	13	+35	+19	Sonne durchgebrochen
	14	+31	+20	dto.
	15	+30	+19	dto.
	16	+30	+18	Sonne durchgebrochen, leicht windig
14. 7. 71	17	+26	+17	dto.
	18	+24	+16	dto.
	6	+25	+13	Sonne, wolkenlos
	7	+22	+14	Sonne mit Dunstschleier
	8	+30	+18	Sonne, Bewölkungszunahme
	9	+21	+16	Sonne hinter Wolken
	10	+18	+16	bedeckt
	11	+27	+16	Sonne hinter Wolken
	12	+19	+16	bedeckt
	13	+24	+18	Sonne hinter Wolken
	14	+19	+19	bedeckt
	15	+23	+19	bedeckt
	16	+25	+19	Sonne hinter Wolken
	17	+24	+19	bedeckt

am 252 m hohen Fernsehturm Dresden durchgeführt [15, 16]. Registriert wurde die Auslenkung nach Betrag und Richtung in verschiedenen Höhen. Aus den Auslenkungen in Höhe Oberkante und Unterkante der Bd. IV/V-Antenne wurde die Schiefstellung der Bd.-IV-V-Antenne berechnet. Die Ergebnisse zeigen Abb. 2 und 3 jeweils an zwei aufeinanderfolgenden Tagen. Aufgetragen sind der Auslenkwinkel, die zugehörige Richtung der Auslenkung sowie die Uhrzeit; außerdem sind die zugehörigen meteorologischen Daten angegeben. Die eingetragenen Einzelpunkte kennzeichnen die in verschiedenen Jahren gemessenen Ruheauslenkungen der Bd.-IV-V-Antenne, die bei stabilem Wetter ohne Sonneneinstrahlung und ohne Wind gemessen wurden.

Man erkennt, daß die Antenne in ihrer Ruhelage um etwa $0,35^\circ$ schief steht. Geht die Sonne morgens auf, dann erwärmt sich der Zylinder auf der Sonnenseite und wird von der Einfallrichtung der Sonneneinstrahlung weggebogen. Dabei wird eine gewisse Zeitverzögerung wirksam. Über Nacht nimmt der Zylinder etwa wieder die Ruhelage ein. Entsprechende Auslenkungen treten auf, wenn die Sonne nur halbtags scheint.

An den betreffenden Tagen betrug die maximale Auslenkung der Bd.-IV-V-Antenne etwa $0,65^\circ$. Die Auswirkungen auf die Versorgung lassen sich aus dem Vertikaldiagramm Abb. 1 ablesen. Das 1. Minimum tritt bei $91,9^\circ$ auf. Bei einer Auslenkung von $0,65^\circ$ verschieben sich die Werte je nach Richtung auf $91,25^\circ$ bzw. $92,55^\circ$.

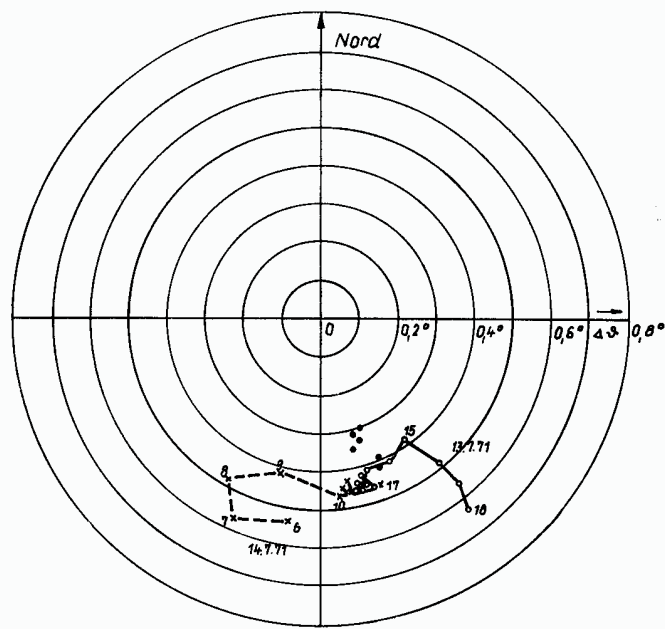


Abb. 3 Winkelauslenkung der Band-IV/V-Sendeantenne Dresden am 1./2. 8. 1973

Zugehörige meteorologische Daten:

	Uhrzeit	Lufttemperatur/°C	Bemerkungen
1. 8. 73	7	+16	
	8	+16	
	9	+22	
	10	+26	Sonne
	11	+30	Sonne
	12	+30	teilweise Wolken
	13	+30	teilweise Wolken
	14	+27	Sonne
	15	+28	Sonne, leichter Wind
	16	+28	Sonne
2. 8. 73	17	+27	Sonne
	18	+25	Sonne
	7	+20	Sonne, leichter Wind
	8	+23	Sonne, leichter Wind
	9	+27	Sonne, leichter Wind
	10	+27	
	11	+29	Sonne
	12	+28	Sonne
	13	+31	bewölkt bis bedeckt
	14	+27	Dunst
	15	+30	Sonne
	16	+29	Sonne
	17	+28	Sonne
	18	+26	Sonne

Im vorliegenden Fall soll das Minimum in etwa 11 km vom Sender empfangswirksam werden. Durch die Schiefstellung der Antenne ändern sich die Werte auf etwa 8 bzw. 17 km. Liegt das Minimum infolge der Streuung der Amplituden und Phasen in der Nähe der unteren Grenze des Toleranzbereichs (Abb. 1), dann reicht die Empfangsfeldstärke in 17 km Entfernung für einen qualitätsgerechten Farbeempfang im allgemeinen nicht aus. Diese Störung ist zeitabhängig. Die Feldstärke kann sich im Tagesverlauf um 10 dB und darüber ändern. Probleme der Antennenauslenkung durch Wind sollen hier nicht behandelt werden. Vgl. hierzu u. a. [14–27, 35, 36, 37].

3. Messung der Speisephasen und -amplituden bei UKW/FS-Sendeantennenanlagen

3.1. Allgemeines

Insbesondere bei Breitbandantennen im Bd.-IV/V, bei denen der störende Einfluß des Kunststoffzylinders kompensiert werden muß, ergeben sich sehr komplizierte Schaltungen, die viele Fehlermöglichkeiten bieten. Sind Kabel vertauscht oder stimmen die Längen einzelner Kabel nicht, dann werden die geplanten Strahlungseigenschaften nicht erreicht. Durch Messung der Strahlungsdiagramme von in Betrieb befindlichen UHF-Sendeantennen mittels Hubschrauber wurde z. B. festgestellt, daß viele der untersuchten Antennen zu große Rundstrahlfehler und zu geringen Gewinn aufwiesen. Ursache dafür waren oft Schaltfehler [28, 29].