

Logarithmisch periodische Antennen

DK 621.396.674.3

Von D. NOWATZKY, Berlin

(Rundfunk- und Fernsehtechnisches Zentralamt)

Für viele Anwendungsgebiete werden Antennen mit Bandbreiten bis 10 : 1 und mehr benötigt. Wesentliche Vorteile gegenüber anderen extrem breitbandigen Antennen bieten sogenannte logarithmisch periodische Dipolantennen, deren Bandbreite theoretisch beliebig groß gemacht werden kann. Der Aufsatz befaßt sich mit dem Aufbau, der Wirkungsweise und der Dimensionierung derartiger logarithmisch periodischer Dipolantennen.

Many fields of application require antennae with band-widths up to 10: 1 and more. The so-called log-periodic dipole antennae the band-width of which may theoretically be extended to any value offer important advantages compared with other extremely broad-band antennae. Their design, performance and dimensions are dealt with in the present paper.

1. Einleitung

Der Wunsch nach Schaffung extrem breitbandiger Antennen besteht schon seit langer Zeit. Da es Sender und Empfänger für Bandbreiten bis 10: 1 und darüber gibt, wird in vielen Fällen die Bandbreite des gesamten Übertragungssystems allein durch die Bandbreite der Antenne bestimmt. Die elektrischen Eigenschaften extrem breitbandiger Antennen (Eingangswiderstand, Strahlungsdiagramm, Polarisations-eigenschaften usw.) sollen über einen möglichst großen Frequenzbereich im wesentlichen konstant sein. Hinzu kommt die für die Praxis äußerst wichtige Forderung, daß die Größe der Antenne - bezogen auf die größte Betriebswellenlänge - möglichst klein sein soll.

Bis vor kurzem gab es lediglich "Breitband"-Antennen, die Frequenzbereiche von maximal etwa 2: 1 bis 4: 1 überstreichen konnten. In den meisten Fällen bezog sich dabei das Breitbandverhalten jedoch nur auf den Eingangswiderstand der Antenne und nicht auch auf ihr Strahlungsdiagramm. Während z. B. der Eingangswiderstand von Kurzwellen-Rhombusantennen über einen Frequenzbereich von etwa 10: 1 annähernd konstant sein kann, beträgt die ausnutzbare Bandbreite wegen des stark frequenzabhängigen Strahlungsdiagramms maximal nur etwa 2: 1 bis 3: 1.

Es war bisher eine allgemeine Erfahrungstatsache, daß die Hauptkeule einer beliebigen Antenne mit steigender Frequenz schmäler wird, wobei gleichzeitig die Zahl der Nebenzipfel ansteigt. Es ist daher auf den ersten Blick äußerst erstaunlich, daß in den letzten Jahren Antennen entwickelt werden konnten, die neben annähernd konstantem Eingangswiderstand auch nahezu frequenzunabhängige Strahlungsdiagramme über theoretisch unbegrenzte Bandbreiten besitzen. Es sind dies ebene und nichtebene logarithmische Spiralantennen sowie sogenannte logarithmisch periodische Antennen. Ihre untere Frequenzgrenze wird allein durch die Antennengröße bestimmt, die obere Grenzfrequenz hängt dagegen lediglich von der Art und der Größe des Speisesystems sowie von der erreichbaren Herstellungsgenauigkeit ab. Bandbreiten bis etwa 20: 1 lassen sich ohne größere Schwierigkeiten erreichen. Es hat den Anschein, daß die logarithmisch periodischen Antennen allen anderen extrem breitbandigen Antennen an Vielseitigkeit weit überlegen sind.

Logarithmisch periodische Antennen eignen sich für Frequenzen oberhalb etwa 1,5 MHz. Es lassen sich Antennen aufbauen, die entweder linear oder zirkular polarisierte, ein- oder zweiseitig gerichtete Strahlungsdiagramme oder linear polarisierte Rundstrahlungsdiagramme besitzen. Derartige Antennen werden u. a. mit Erfolg als Sende- und Empfangsantennen im Kurzwellenbereich eingesetzt, da dort infolge rasch wechselnder Übertragungsbedingungen ein schneller Frequenzwechsel erforderlich sein kann. Weitere Anwendung finden logarithmisch periodische Antennen u. a. bei der Funküberwachung, in der Radioastronomie, bei der Verfolgung von Satelliten und Raketen, in der Feldstärkemeßtechnik sowie auf militärischem Gebiet.

Es gibt viele verschiedene logarithmisch periodische Antennenformen, von denen sich die sog. logarithmisch periodischen Dipolantennen bisher als einzige rechnerisch erfassen lassen. Da sie auch sonst viele Vorzüge besitzen, soll ausführlich über Aufbau, Wirkungsweise, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendungsmöglichkeiten derartiger logarithmisch periodischer Dipolantennen berichtet werden.

2. Verschiedene Arten extrem breitbandiger Antennen

2.1. Grundlegendes

Die Eigenschaften verlustfreier Antennen bleiben unverändert, wenn sowohl ihre Abmessungen als auch die Betriebswellenlänge um den gleichen Maßstabsfaktor geändert werden. Eine Antenne wird daher dann frequenzunabhängige Eigenschaften besitzen, wenn bei einer Änderung der Betriebswellenlänge ihre auf diese Wellenlänge bezogenen Abmessungen unverändert bleiben, bzw. wenn bei einer Maßstabsänderung ursprüngliche und maßstäblich geänderte Antennen kongruent sind. Daraus folgt daß sich eine frequenzunabhängige Antenne vom Ursprungspunkt aus bis ins Unendliche erstrecken muß, wobei Speisepunkt und Ursprung zusammenfallen. Eine praktisch ausgeführte Antenne kann aber zwangsläufig nur aus einem Teil der unendlichen Struktur bestehen, der durch zwei Kugeln mit den Radien r_1 und r_2 ($r_1 < r_2$) mit dem Speisepunkt als Mittelpunkt begrenzt wird. Diese Verhältnisse sind in Abb. 1 am Beispiel der Doppelkonusantenne dargestellt.

Der Radius r_2 , der durch die Antennengröße gegeben ist, bestimmt die untere Grenzfrequenz, während r_1 , für die

obere Grenzfrequenz verantwortlich ist. Die obere Grenzfrequenz hängt praktisch nur von der Ausbildung des Speisepunktes ab, da bei hohen Frequenzen lediglich die in unmittelbarer Nachbarschaft des Speisepunktes gelegenen Teile, der Antenne zur Strahlung beitragen. Je kleiner also die Abmessungen der Speiseleitung gehalten werden können, um so höhere obere Grenzfrequenzen lassen sich erreichen.

Obige Überlegungen gelten nur, wenn der Einfluß der Enden der Antenne auf ihre elektrischen Eigenschaften klein ist. Extrem breitbandige Antennen müssen daher genügend große Strahlungsdämpfungen besitzen, um diesen sog. "Endeffekt" möglichst klein zu halten. Obgleich nur eine unendlich ausgedehnte Antenne vollständig frequenzunabhängig sein kann, spricht man auch bei endlich ausgedehnten Antennen von einem frequenzunabhängigen Verhalten, wenn sich ihre Bandbreite allein durch geometrische Fortsetzung der Antennenstruktur beliebig vergrößern läßt, wie dies bei den in diesem Aufsatz beschriebenen Antennen der Fall ist.

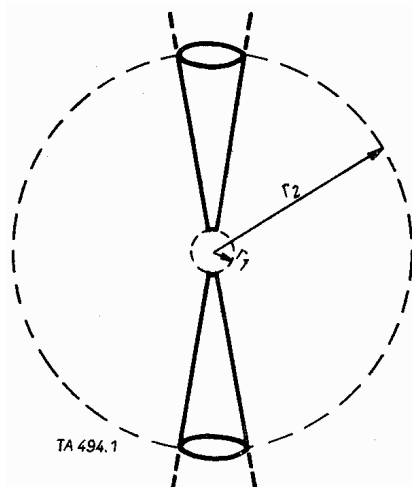


Abb. 1 Begrenzung der unendlich ausgedehnten Antennenstruktur durch Kugeln mit den Radien r_1 und r_2

Man kann drei verschiedene Klassen von Antennen mit theoretisch beliebig großer Bandbreite unterscheiden: frequenzunabhängige Antennen, pseudofrequenzunabhängige Antennen sowie Antennen, bei denen bestimmte elektrische Eigenschaften wie z. B. der Gewinn in erwünschter Weise frequenzabhängig sind. Die elektrischen Eigenschaften (z. B. Gewinn, Fußpunktwiderstand, Polarisationsverhalten) frequenzunabhängiger Antennen ändern sich theoretisch nicht mit der Frequenz. Bei den pseudofrequenzunabhängigen Antennen dagegen sind Schwankungen der elektrischen Eigenschaften um einen Mittelwert vorhanden, die jedoch im allgemeinen verhältnismäßig klein gehalten werden können. Über eine spezielle extrem breitbandige Antenne mit frequenzabhängigen Gewinn soll zu einem späteren Zeitpunkt berichtet werden.

2.2. Frequenzunabhängige Antennen

Unendlich ausgedehnte frequenzunabhängige Antennen müssen die Eigenschaft besitzen, daß bei einer Maßstabsänderung maßstäblich geänderte Antenne und ursprüngliche Antenne kongruent sind. Es läßt sich mathematisch zeigen, daß diese Forderung dann erfüllt ist, wenn die Antennenform nur durch Winkel und nicht durch Längen beschrieben wird (sog. Winkelprinzip) [1]. Bei genügend großer Strahlungsdämpfung ist eine Begrenzung der Antenne durch r_1 und r_2 möglich,

wodurch sich eine obere und eine untere Grenzfrequenz ergibt.

Die einzige auf dem Winkelprinzip beruhende extrem breitbandige Antenne, die bisher umfangreiche Anwendung gefunden hat, ist die logarithmische Spiralantenne [2]. Sie besitzt wegen ihrer großen Strahlungsdämpfung sehr gute Breitbandeigenschaften. Ein Nachteil besteht jedoch darin, daß sie zirkular polarisiert ist und daß sich ihr Gewinn durch Gruppenbildung nicht frequenzunabhängig vergrößern läßt.

Es sind auch räumliche logarithmische Spiralantennen bekannt, die im Gegensatz zur ebenen Ausführung einseitig gerichtete Strahlungsdiagramme besitzen [3]. Die ebenfalls dem Winkelprinzip entsprechenden Sektor- und Doppelkonusantennen eignen sich wegen ihrer relativ geringen Strahlungsdämpfung nicht als extrem breitbandige Antennen [4], [5].

2.3. Pseudofrequenzunabhängige Antennen

Zu den pseudofrequenzunabhängigen Antennen gehört die große Gruppe der logarithmisch periodischen Antennen [6]. Unter einer logarithmisch periodischen Antenne wird eine Antenne verstanden, deren charakteristische elektrische Eigenschaften sich periodisch mit dem Logarithmus der Frequenz ändern (s. Abb. 2). Da es meist gelingt, diese Änderungen klein zu halten und da die Strahlungsdämpfung solcher Antennen sehr groß ist, besitzen log. per. Antennen hervorragende Breitbandeigenschaften. Sie sind im allgemeinen linear polarisiert und lassen sich zwecks Erhöhung des

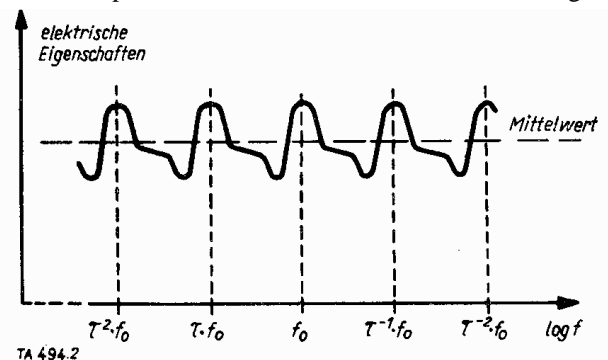


Abb. 2 Theoretische Änderung der charakteristischen elektrischen Eigenschaften einer log. per. Antenne mit der Frequenz (Beispiel)

Gewinns zu pseudofrequenzunabhängigen Gruppen zusammenschalten. Nähere Einzelheiten über log. per. Dipolantennen, die eine spezielle log. per. Antennenform darstellen, werden in Abschnitt 3 gebracht. Die dortigen Angaben gelten z. T. nicht nur speziell für log. per. Dipolantennen, sondern ganz allgemein für beliebige log. per. Antennen.

3. Logarithmisch periodische Dipolantennen

3.1. Aufbau und Wirkungsweise

Es gibt sehr viele log. per. Antennenfortnen, von denen die relativ einfach aufgebauten log. per. Dipolantennen eine besondere Bedeutung besitzen [7], [8], [9]. Da bei ihnen ein Einblick in die Wirkungsweise mit herkömmlichen Vorstellungen möglich ist, sind sie bisher die einzigen log. per. Antennen, die sich rechnerisch erfassen lassen. Es lassen sich sowohl ihre Strahlungseigenschaften als auch ihr Fuß-

punkt-widerstand berechnen. Als besonderer Vorteil kommt hinzu, daß sich der Fußpunkt-widerstand durch einfache Maßnahmen auf jeden gewünschten Wert bringen läßt, ohne daß sich das Strahlungsverhalten der Antenne wesentlich ändert. Im Gegensatz zu anderen log. per. Antennen wird daher kein Anpassungstransformator benötigt. Eine gesonderte Symmetrierung der unsymmetrischen Speisespannung ist ebenfalls nicht erforderlich. Die Bandbreite kann durch Hinzufügen weiterer Dipole nahezu beliebig vergrößert werden, eine Grenze ist nur durch praktische Gesichtspunkte gegeben.

In Abb. 3 ist eine log. per. Dipolantenne schematisch dargestellt. Die einzelnen Dipole, deren Abmessungen linear

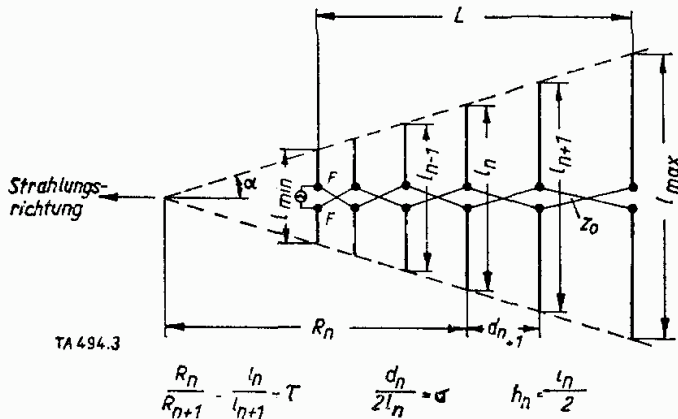


Abb. 3 Schematische Darstellung einer log. per. Dipolantenne mit dem Abstand von der fiktiven Spitze zunehmen, werden über eine Zweidrahtleitung konstanten Wellenwiderstandes gespeist. Ein pseudofrequenzunabhängiger Betrieb ist nur möglich, wenn die Strahlung in Richtung der Spitze erfolgt. Um diese Bedingung zu erfüllen, wird die Phase im Dipolfußpunkt von Dipol zu Dipol jeweils zusätzlich um 180° verdreht. Die elektrischen Eigenschaften der Antenne hängen vom Wellenwiderstand der Zweidrahtleitung Z_0 , vom Schlankheitsgrad der Dipole h/D und von den beiden Parametern α und τ ab.

Die Periodizität τ ist definiert als Quotient zweier benachbarter gleichartiger Abmessungen, wie dies bei log. per. Antennen allgemein üblich ist. Es ist z. B.

$$\tau = \frac{R_n}{R_{n+1}} = \frac{l_n}{l_{n+1}} \quad (1)$$

$R_{n-1}, R_n, R_{n+1}, \dots$ und $l_{n-1}, l_n, l_{n+1}, \dots$ (n = beliebige ganze Zahl) bilden eine geometrische Folge von Zahlen mit dem gleichen charakteristischen Quotienten τ . Der Winkel α begrenzt die Länge der Dipole (s. Abb. 3).

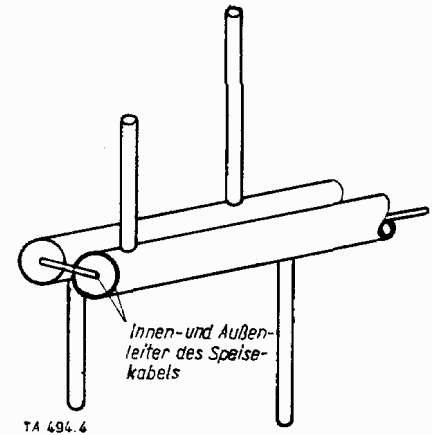
Ist die Antenne unendlich ausgedehnt, dann bleibt die Form der Antenne unverändert, wenn der Maßstab um den Faktor τ geändert wird. Bei einer Frequenzänderung um den Faktor τ^n ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$) bleiben die elektrischen Eigenschaften der Antenne also unverändert, so daß sich die elektrischen Eigenschaften der log. per. Dipolantenne (z. B. Gewinn, Fußpunkt-widerstand, Polarisationsverhalten) periodisch mit dem Logarithmus der Frequenz ändern. Eine

Periode erstreckt sich dabei über den Frequenzbereich von f bis τf (vgl. Abb. 2).

Durch geeignete Wahl von α und τ gelingt es, die Änderungen der charakteristischen Werte der Antenne innerhalb einer Frequenzperiode klein zu halten. Wegen der periodischen Wiederholung der Eigenschaften sind deren Änderungen dann in allen Perioden klein, so daß die Antenne nahezu frequenzunabhängige Eigenschaften besitzt. Da die Strahlungsdämpfung log. per. Dipolantennen außerordentlich groß ist, lassen sich durch geeignete geometrische Weiterführung der Antennenstruktur theoretisch beliebig breitbandige Antennen aufbauen.

Abb.4 zeigt die in der Praxis am häufigsten angewendete Ausführungsform des in Abb. 3 gezeigten Grundprinzips der Antenne. Die Phasenumkehr erfolgt durch ein Vertauschen der Dipolanschlußpunkte gegenüber den benachbarten Dipolen, wobei die Zweidrahtleitung durch zwei

Abb. 4 Praktischer Aufbau einer log. per. Dipolantenne



starre Rohre mit konstantem Abstand gebildet wird (vgl. auch Abb. 5). Die Speisung wird so vorgenommen, daß die koaxiale Speiseleitung durch eines der beiden Tragrohre zugeführt wird. Dabei wird der Außenleiter an dem einen Rohr, der Innenleiter am anderen Rohr leitend befestigt. Ist die Dipollänge groß gegen den Abstand der Leiter der Zweidrahtleitung, dann ist der Fehler klein, der dadurch entsteht, daß die beiden Dipolhälften gegeneinander versetzt sind. Zur strengen Erfüllung des logarithmisch periodischen Prinzips müßte sowohl der auf die Dipollänge bezogene Dipolversatz als auch der Schlankheitsgrad der Dipole h/D konstant sein. Das würde bedeuten, daß die Zweidrahtleitung als Doppelkegelleitung aufgebaut sein müßte. Wie streng diese Forderungen in der Praxis erfüllt werden müssen, hängt u. a. sowohl von der geforderten Bandbreite als auch von der zulässigen Änderung der elektrischen Werte mit der Frequenz ab. Je größer die Bandbreite sein soll, um so genauer muß das logarithmisch periodische Prinzip eingehalten werden. Im allgemeinen genügt es, den Schlankheitsgrad der Dipole in erster Näherung konstant zu halten und die Zweidrahtleitung mit konstantem Leiterdurchmesser und gleichem Abstand aufzubauen.

Die Wirkungsweise logarithmisch periodischer Dipolantennen läßt sich sehr anschaulich und einleuchtend erklären. Von der Einspeisungsstelle aus läuft eine TEM-Welle die Zweidrahtleitung entlang und erregt die Dipole. Da der Abstand der kurzen Dipole voneinander sehr klein ist, heben sich die von ihnen herrührenden Feldstärkeanteile im Fernfeld wegen der dann annähernd gegenphasigen Speisung der einzelnen Dipole nahezu auf.

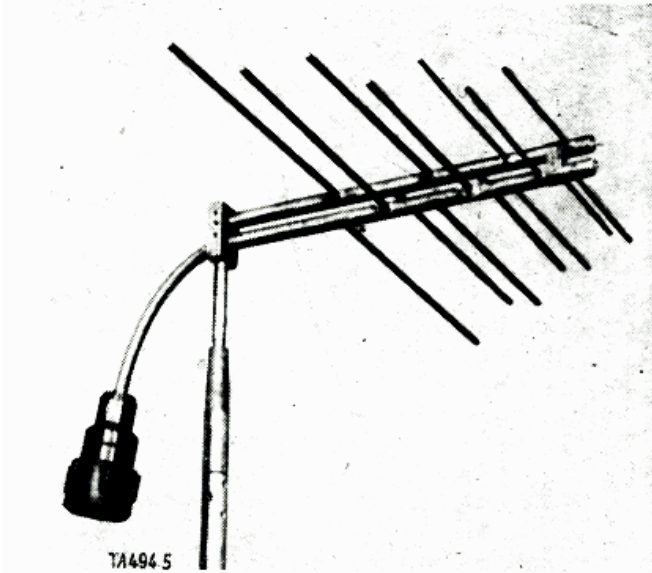


Abb. 5 Log. per. Dipolantenne ($\alpha = 35^\circ$, $\tau = 0,89$), $f = 470 \dots 635$ MHz

Von den kurzen Dipolen wird also nur wenig Energie abgestrahlt, so daß diese Dipole praktisch keinen Einfluß auf die Strahlungseigenschaften der Antenne haben. Der größte Teil der Energie wird von den Dipolen abgestrahlt, deren Länge in der Größenordnung einer halben Wellenlänge liegt und die die sog. "aktive Zone" der Antenne bilden. Nur noch ein kleiner Bruchteil der Energie erreicht die längeren Dipole. Diese liefern daher ebenso wie die kurzen Dipole keinen wesentlichen Beitrag zum Fernfeld, d. h. es ist kein nennenswerter Endeffekt vorhanden.

Die "aktive Zone" ist als der eigentlich strahlende Teil der logarithmisch periodischen Antenne für deren Fernfeldeigenschaften verantwortlich. Sie wandelt die Leitungswelle in eine Strahlungswelle um und dient somit als Wellentypwandler. Ihre Länge sowie ihr Abstand von der fiktiven Antennenspitze sind bezogen auf die Betriebswellenlänge - konstant. Mit steigender Frequenz wandert die aktive Zone zur Spitze hin, wobei gleichzeitig ihre Ausdehnung kleiner wird. Wird die Frequenz um den Faktor τ geändert, dann hat sich die aktive Zone genau um einen Dipol verschoben. Durch die Energieabstrahlung wird die Leitungswelle in der aktiven Zone so stark gedämpft, daß sie dahinter praktisch vernachlässigbar klein ist. Der Teil der Antenne, der von der Spitze aus gesehen hinter der aktiven Zone liegt, hat auf die elektrischen Eigenschaften der Antenne praktisch keinen Einfluß. Aus dieser Tatsache erklärt sich der vernachlässigbare Endeffekt logarithmisch periodischer Antennen.

Da im Nennfrequenzbereich auf Grund der großen Strahlungsdämpfung nur wenig Energie das Ende der Zweidrahtleitung erreicht, spielt die Art des Abschlusses dieser Leitung nur eine untergeordnete Rolle. Im allgemeinen genügt es, die Leitung etwa im Abstand $0,12 \dots$ hinter dem längsten Dipol kurzzuschließen. Bei Frequenzen unterhalb der unteren Grenzfrequenz ist die Strahlungsdämpfung sehr gering, so daß dort der Fußpunktwiderstand der Antenne stark vom Abschlußwiderstand der Zweidrahtleitung abhängt. Man kann daher, falls das erforderlich sein sollte, die Anpassung bei diesen Frequenzen dadurch verbessern, daß man die Zweidrahtleitung mit ihrem Wellenwiderstand abschließt.

Bei einer Betrachtung der Antenne als Vierpol und Messung des Strahlungswirkungsgrades η_R als Funktion der

Dipollänge wurde von Isbell festgestellt, daß z. B. für $\alpha = 45^\circ$ und $\tau = 0,89$ von der Einspeisungsstelle aus bis zum Dipol der Länge $\lambda/3$ erst etwa 10% der Energie abgestrahlt worden sind (Abb. 6). Dann steigt jedoch der Wirkungsgrad rasch an und bis zum $\lambda/2$ langen Dipol sind schon etwa 80% der Energie abgestrahlt worden [7]. Diese Messungen, die auch für verschiedene andere Parameter α und τ durchgeführt wurden, bestätigen die Richtigkeit der oben beschriebenen Vorstellung über die Wirkungsweise logarithmisch periodischer Dipolantennen.

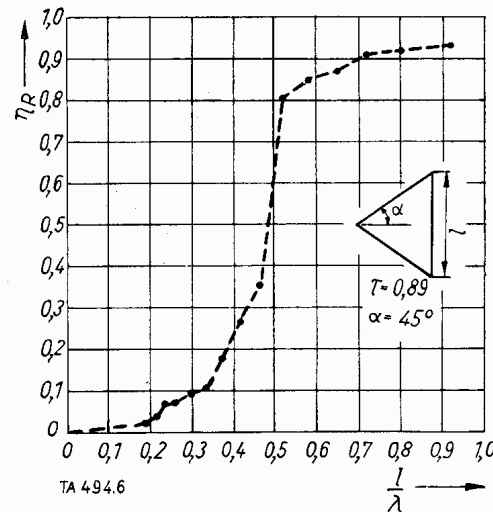


Abb. 6 Strahlungswirkungsgrad η_R einer log. per. Dipolantenne als Funktion der Dipollänge

Ein weiterer Versuch, die Wirkungsweise logarithmisch periodischer Antennen zu erklären, wird in [10] gemacht. Auf diese Deutung, die davon ausgeht, daß sich auf der Antennenstruktur Wellen befinden, deren Ausbreitungsgeschwindigkeiten kleiner als die Freiraumgeschwindigkeit sind, soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Von Carrel wurden die elektrischen Eigenschaften logarithmisch periodischer Dipolantennen aus den Parametern α , τ , dem Wellenwiderstand der Zweidrahtleitung Z_0 sowie dem Schlankheitsgrad h/D der Dipole berechnet [9]. Die sehr umfangreichen und komplizierten Berechnungen der Strahlungseigenschaften wurden auf einer sehr schnellen elektronischen Rechenmaschine vom Typ Illiac durchgeführt. Die Ergebnisse stimmen recht gut mit den tatsächlichen Verhältnissen überein. Das gleiche kann auch über die berechneten Eingangswiderstände gesagt werden.

Fortsetzung in Heft 3/1963