

Kompensation von Dipol-Antennen im Fußpunkt

W. Buschbeck, Berlin.

Das Problem der Breitbandtechnik ist praktisch beinahe ebenso alt wie die eigentliche Funktechnik selbst. Bereits bei den ersten nur für Telegrafiebetrieb eingerichteten Maschinensendern, die auf vielen km langen Wellen arbeiteten, war es wegen der natürlichen Selektion der Antenne schwierig, ein genügend rasches Tasttempo zu erzielen. Bei den im Interesse guten Wirkungsgrades außerordentlich niedrig gehaltenen Spulen- und Erdwiderständen und den trotz mehrerer 100 m hohen Antennentürmen doch kleinen Strahlungswiderständen liegen die zur Erzielung eines einigermaßen eckigen Tastzeichens erforderlichen Harmonischen bereits bei mässigem Tasttempo weit auf der Flanke der Resonanzkurve. Ein Mittel zur Behebung dieser Schwierigkeit wurde in dem angeführten Falle durch Einführung einer Tastpausendämpfung mit Hilfe der magnetisch beeinflussten Tastdrossel gefunden, die während des Zeichens eine zusätzliche Antennenbedämpfung kurzschließt. Wenngleich dieses Mittel bei Telegrafiesendern durchaus zufriedenstellend arbeitet, ist dadurch doch noch keine eigentliche Verbesserung im Sinne der Breitbandtechnik geschaffen. Diese wurde wohl erstmalig bei den Rundfunksendern des Langwellenbereichs erforderlich und hier durch geeignete überkritische Kopplung des Zwischenkreises bzw. entsprechende Dimensionierung der zwischen Antenne und Röhre liegenden Kreise wenigstens annähernd erreicht.

Betrachten wir einmal den Fall eines Rundfunksenders von 1500 m Wellenlänge, also einer Trägerfrequenz von 200 kHz. Die für Rundfunksender verlangte höchste Modulationsfrequenz von 10 kHz bedeutet in diesem Fall eine Verstimmung der äußersten Seitenbänder um 5%, während die Antennendämpfung bestenfalls bei etwa 6% liegen dürfte, was einem amplitudenmäßigen Abfall auf der Resonanzkurve auf 0,5 ent-

spricht. Natürlich kann dieser gegebenenfalls durch entsprechende Niedrighaltung des Generator-Innenwiderstandes verkleinert werden, aber nur auf Kosten einer entsprechenden Stromübersteuerung, d.h. einer für den Trägerzustand unausgenützten Emissionsreserve. Abb. 1 zeigt die entsprechenden Zusammenhänge beim Einkreisender. Man erkennt z.B., daß in

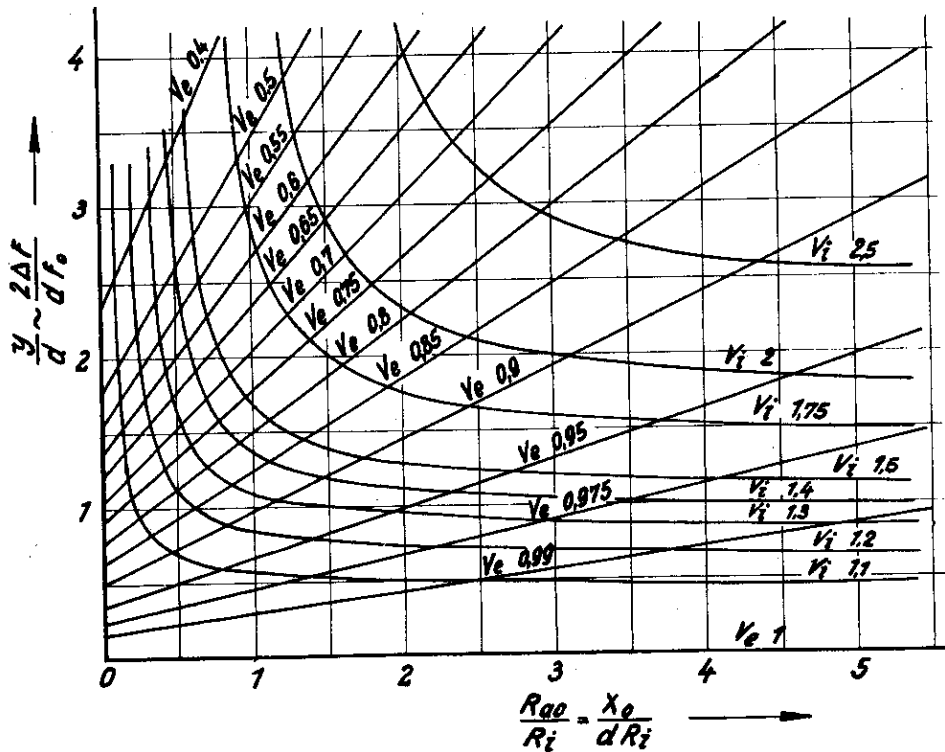


Abb. 1 Strom- und Spannungsdurchlässigkeit von Einkreisendern.

dem angegebenen Falle für $R_a = R_i$ die Spannung nur noch auf 72% des Trägerwertes absinken würde, allerdings auf Kosten einer strommässigen Übersteuerung auf das 1,5-fache.

Während in den bisher betrachteten Fällen die Antenne ohne Zwischenschaltung einer Energieleitung direkt an die Röhrenkreise angekoppelt werden konnte, ist dieser in vieler Hinsicht besonders einfache Betriebszustand bei neueren Anlagen und insbesondere bei Fernsehsendern im allgemeinen nicht mehr gegeben. Da die Antenne aus Ausbreitungsgründen in einigem Abstand vom Sendergebäude bzw. möglichst hoch

aufgestellt werden soll, ergibt sich in fast allen Fällen eine oft viele Wellenlängen lange Energieleitung. Dies hat zur Folge, daß selbst bei den - prozentual gesehen - den Bereich eines Langwellen-Rundfunksenders nicht überschreitenden Seitenbandabständen der Fernsendsendung (2,5 MHz max. Modulationsfrequenz ergibt bei 6 m Wellenlänge 5% max. Seitenbandabstand) am Eingang der Energieleitung die Extremwerte der Fehlanpassungskreise im ganzen Frequenzband unter Umständen mehrfach durchlaufen werden und dadurch besonders stark schwankende Eingangsimpedanzen ergeben, wie Abb.2 für den Fall des alten Berliner Fernsenders mit seinem 210 m langen Energieleitungskabel zeigt. Dabei sind in diesem Fall die

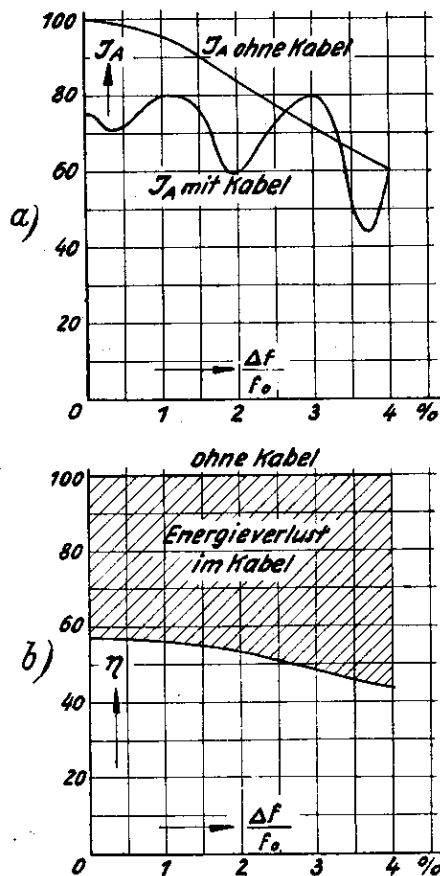


Abb. 2 a) Amplitudenmäßige Durchlässigkeitskurve eines $\frac{\lambda}{4}$ - Strahlers mit $W_a = 600$ Ohm ohne Kabel und bei Speisung über ein 30λ langes Kabel. EMK konstant.
 b) Wirkungsgrad abhängig von der Verstimmung.

Extremwerte durch die durchaus nicht zu vernachlässigende Eigendämpfung des Kabels sogar noch merklich eingeebnet. Wie stark verschlechternd selbst ganz kurze Energieleitungen schon

wirken können, zeigt Abb. 3a. Die in diesem Diagramm gezeig-

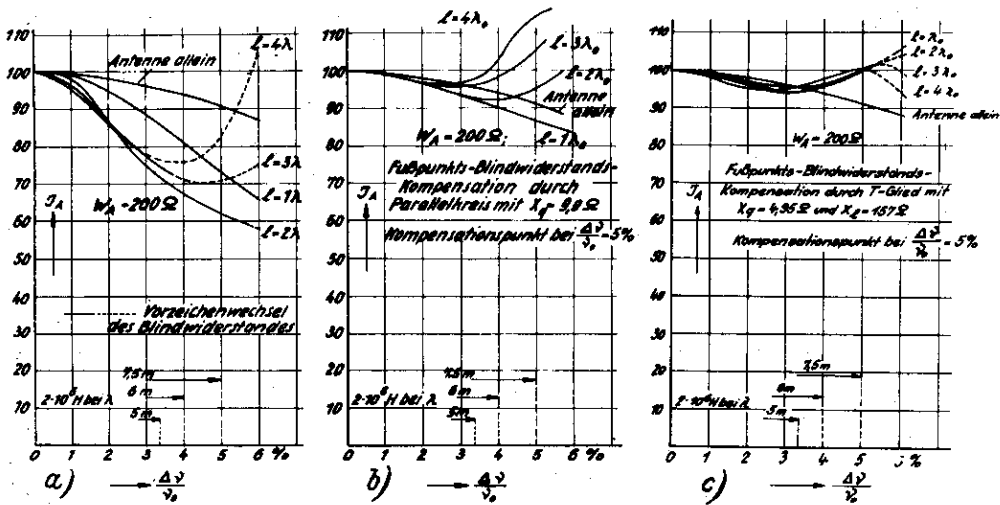


Abb. 3. Amplitudenmäßige Durchlässigkeitskurve eines $\frac{\lambda}{4}$ - Strahlers an Habel der Länge ℓ von 36 Ohm Wellenwiderstand für konstante Eingangs-EMK.

ten Fehlanpassungen sind praktisch allein durch den bei Verstimmung auftretenden Fußpunkts-Blindwiderstand bedingt. Es ist daher anzunehmen, daß sie sich bis zu einem gewissen Grade durch aus reinen Blindwiderständen zusammengesetzte Anordnungen ausgleichen lassen. Daß diese Annahme dem Reaktanz-Satz nicht widerspricht, bzw. bis zu welchem Grade Kompensation überhaupt theoretisch möglich ist, wird in dem folgenden Vortrag von Dr. Fränz gezeigt werden. Bei den nun folgenden Betrachtungen sollen nur solche Antennenformen behandelt werden, die ohne Energieverzehr durch zusätzliche künstliche Dämpfung Breitbandcharakter ergeben, also nicht die mit fortschreitenden Wellen arbeitenden mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossenen Langdrahtantennen, als deren typischster Vertreter die Rhombus-Antenne zu gelten hat oder jene Antennenformen, bei denen der Abschlußwiderstand an ein kapazitives Schluckende genügender Raumkapazität geführt ist.

Das einfachste schon 1936 vorgeschlagene Mittel ¹⁾ zur Verbesserung der Breitbandqualität von $\lambda/4$ -Antennen ist ein dem Antennenanschluß parallel liegender auf die Trägerwelle abgestimmter Fußpunktskreis, der so bemessen wird, daß der in der Antenne auftretende Blindwiderstand für eine bestimmte z.B. die äußerste Seitenbandfrequenz sich gerade kompensiert. Die Wirkung ist leicht verständlich. In erster Näherung läßt sich ja bekanntlich der $\lambda/4$ -Strahler durch eine Serienschaltung von Widerstand, Induktivität und Kapazität darstellen, bei der Induktivität und Kapazität gerade in Serienresonanz sind (Abb. 4). Für irgend eine höhere z.B. die höch-

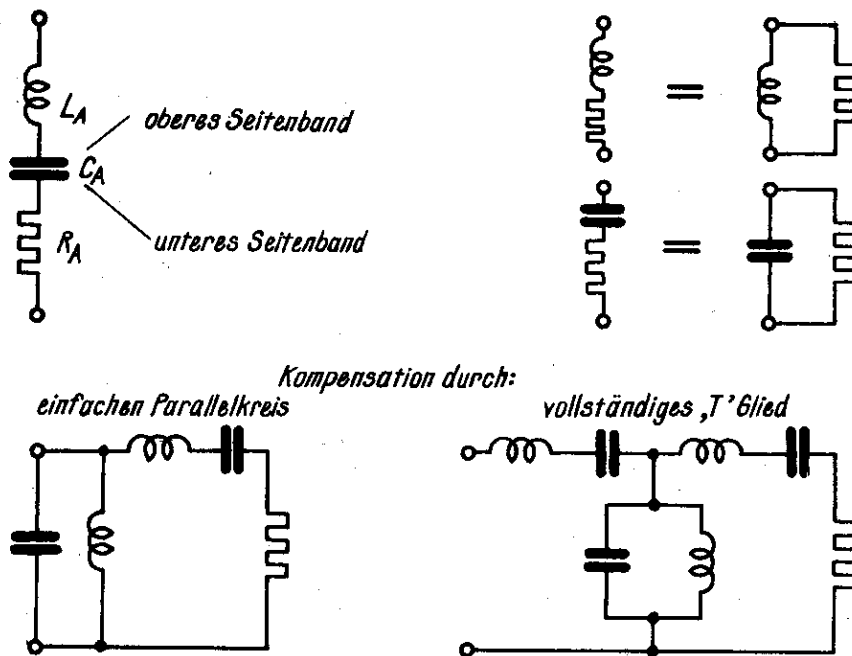


Abb. 4 Antennenkompensations-Anordnungen.

ste Seitenbandfrequenz verbleibt zusätzlich zum Wirkwiderstand R_A eine resultierende Induktivität; für diese eine Welle kann die Serien-Anordnung natürlich auch durch die entsprechende Parallelkombination ersetzt gedacht werden; in dieser nimmt bei nicht allzu großer Blindkomponente, wie leicht einzusehen, der Wirkwiderstand einen etwas größeren Wert an. Gelingt es nun, für eben diese erhöhte Frequenz einen kapazi-

1) Anmeldung T 47 826 v. 28.11.36 (W.Buschbeck)

tiven Parallelblindwiderstand solcher Größe zur Verfügung zu stellen, daß er sich mit der gedachten Parallelinduktivität zu einem Sperrkreis ergänzt, so verbleibt doch lediglich der etwas nach oben transformierte Wirkwiderstand. Einen Frequenzgang wie verlangt besitzt nun ein auf die Trägerwelle abgestimmter Parallelresonanzkreis, der bei dieser als extrem hoher Wirkwiderstand nicht in Erscheinung tritt und außerdem für die unteren Seitenbänder ebenso wie die Antenne das Vorzeichen wechselt. Wie gut schon diese einfache Kompensations-schaltung wirken kann, zeigt Abb. 3b.

Anordnungen dieser Art lassen sich noch weiter vervollkommen durch Rückführung des bei den beiden Kompensationsfrequenzen nach oben transformierten Wirkwiderstandes auf den Trägerwert. Durch einen ganz analogen, im umgekehrten Sinn verlaufenden Vorgang, also durch Parallelschaltung eines entsprechenden Blindwiderstandes und nachträgliche Kompensation der jetzt wieder verbleibenden Serien-Blindkomponente erhält man außer für den Träger auch für eine obere und untere Seitenbandfrequenz wieder exakte Anpassung. Die dadurch ermöglichte weitere Verbesserung zeigt Abb. 3c. Dieses Verfahren stellt nun nichts anderes dar als die schon 1937 von H.O. Roosenstein vorgeschlagene Ergänzung von Antennen zu kompletten Kettenleitergliedern ¹⁾, in diesem Fall also die Ergänzung der $\lambda/4$ -Antenne zu einem kompletten angepaßten T-Glied; in diesem Sinne kann der einfache Parallelkreis als Ergänzung der Antenne zu einem I-Glied aufgefaßt werden. Natürlich ist zu einem guten Erfolg derartiger Maßnahmen von vornherein eine möglichst hohe Eigendämpfung der Antenne anzustreben.

Versuche mit kegelförmigen Strahlern, die den Vorteil konstanten der Berechnung zugänglichen Wellenwiderstandes hätten - sie wurden übrigens gleichzeitig mit uns auch von Carter in Amerika vorgenommen - brachten nicht den erwarteten Erfolg; hauptsächlich wohl wegen der durch die große Bodenfläche bedingten Endkapazität, die eine beträchtliche

1) Anmeldung T 48 612 v.13.5.37 (Roosenstein)

räumliche Verkürzung und damit Herabsetzung der Effektivhöhe zur Folge hat. Natürlich muß zur Erzielung hoher Eigendämpfung der Wellenwiderstand der Antenne möglichst herabgedrückt werden, was durch Querabmessungen bis zur Größenordnung von etwa $\lambda/10$ geschieht und dadurch der von Prof. Fiebitz schon vor vielen Jahren für Rundfunksender vorgeschlagenen sogenannten "Gasometer"-Antenne nahekommt. Als besonders günstig haben sich die von W. Moser und H.E. Paul wohl zuerst vorgeschlagenen bleistiftähnlichen dicken Strahler und Reusen namentlich bei $\lambda/2$ Resonanz erwiesen.

Unbedingte Voraussetzung zur Erzielung eines der Theorie entsprechenden Kompensationseffektes ist, daß die Kompensationsschaltung sich in praxi auch so verhält wie gezeichnet, d.h. nicht durch ungewollte verteilte Erdkapazitäten oder Induktivitäten gestört wird. Wie dies z.B. für den Fall der Ergänzung einer $\lambda/4$ -Antenne zu einem kompletten T-Glied praktisch durchgeführt wurde, zeigt Abb. 5. Dabei ist

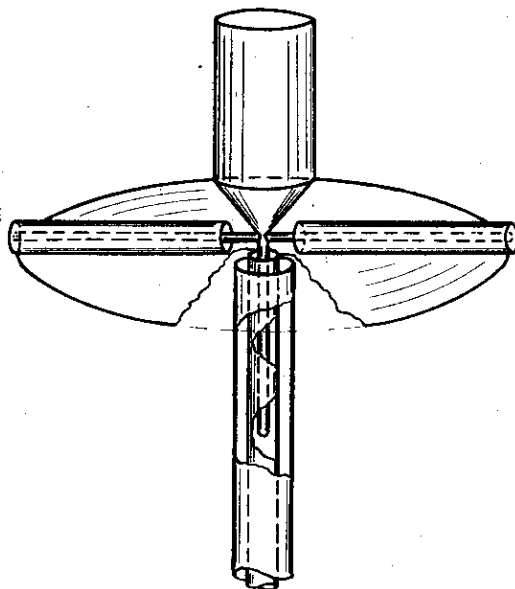


Abb. 5. Durch Ergänzung zu einem T-Glied kompensierte $\frac{\lambda}{4}$ - Antenne.

von der ja wohl allgemein bekannten Tatsache Gebrauch gemacht, daß eine offene bzw. kurzgeschlossene $\lambda/4$ -Leitung sich in erster Näherung wie ein Serien- bzw. Parallel-Resonanzkreis verhält. Durch Einschluß der den Serienresonanzkreis ersetzenden offenen $\lambda/4$ -Leitung ins Innere des Innenleiters der Speise-Energieleitung werden in ebenso einfacher wie einwandfreier Weise sämtliche sonst sehr schwer zu vermeidenden Streukapazitäten des Längsgliedes gegenüber Erde vermieden ¹⁾. Die den Parallelkreis ersetzenden kurzgeschlossenen $\lambda/4$ -Leitungen können direkt auf oder unter dem Gegengewicht liegen bzw., wie dies von Cork namentlich für Fernsehempfangsantennen aus Billigkeitsgründen ausgeführt wurde, als äußerliche $\lambda/4$ -Stäbe das Gegengewicht selbst wirkungsvoll ersetzen.

Eine sich ebenfalls des $\lambda/4$ -Strahlers bedienende auf gänzlich anderen Prinzipien beruhende Breitbandantennenform wurde 1938 von Nils E. Lindenblad ²⁾ angegeben und für den Fernsehsender auf dem Empire-State-Building verwirklicht. Diese Antenne entstand aus der Vorstellung, daß es eine bestimmte Form des gedämpften Parallel- bzw. Serien-Resonanzkreises gäbe, die völlig frequenzunabhängig von Null bis unendlich rein ohmisch von konstantem Ohmwert bleibt. Allgemein bekannt ist dies für den Parallel-Resonanzkreis nach Abb. 6a, sofern die Dämpfung je Seite den angegebenen Wert besitzt. Das gleiche Gesetz gilt aber auch nach einem allgemeinen Satz der Vierpoltheorie, wie die von F. Strecker und K. Matthies ausgearbeiteten Regeln über Widerstandsreziprozität zeigen, auch für die Schaltung nach Abb. 6b.

1) Anmeldung T 47 826 v. 28.11.36 (Buschbeck)

2) R 105 264 v. 18.5.38 (RCA, Lindenblad)

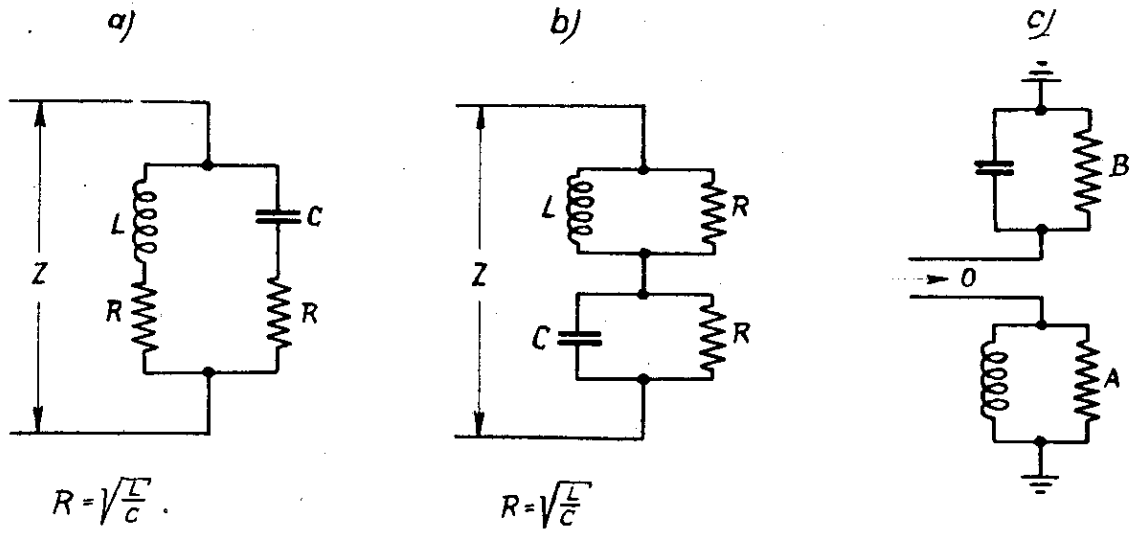


Abb. 6 Kreise konstanter Impedanz bei veränderlicher Frequenz.

Abb. 7 zeigt die Verwirklichung des Gedankens.

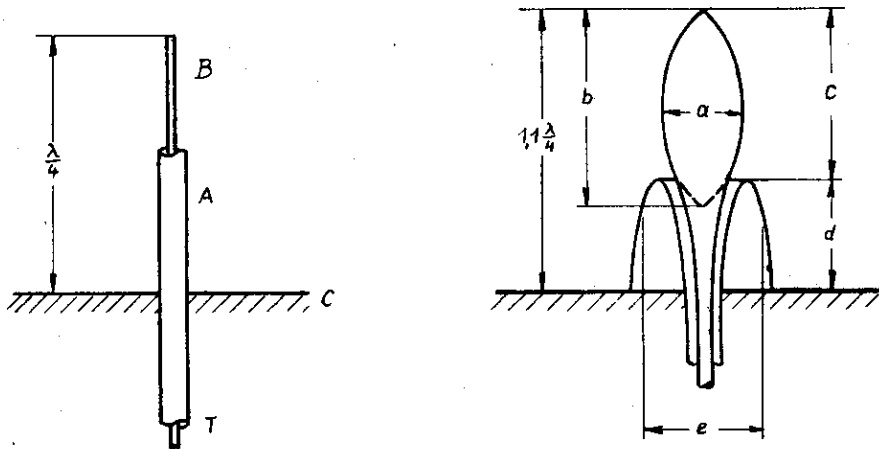


Abb. 7 $\frac{\lambda}{4}$ - Breitbandstrahler nach Nils E. Lindenblad.

Der $\lambda/4$ -Strahler wird aufgeteilt und durch eine Strahlerhälfte hindurch in der Mitte gespeist; er zerfällt dadurch in zwei kurze Stücke der elektrischen Länge $\lambda/8$, von denen das obere endseitig offene in erster Näherung eine Kapazität, das untere durch die Erde bzw. das Gegengewicht abgeschlossene eine Induktivität darstellt. Beide Teile sind durch die Strahlung bedämpft. Durch geeignete Formgebung, die umfangreiche experimentelle Arbeit erforderte und deren Werdegang in Abb. 8 gezeigt ist, gelang es, eine Form (Abb. 7b) zu finden, die tatsächlich eine beachtliche Breitbandqualität besitzt.

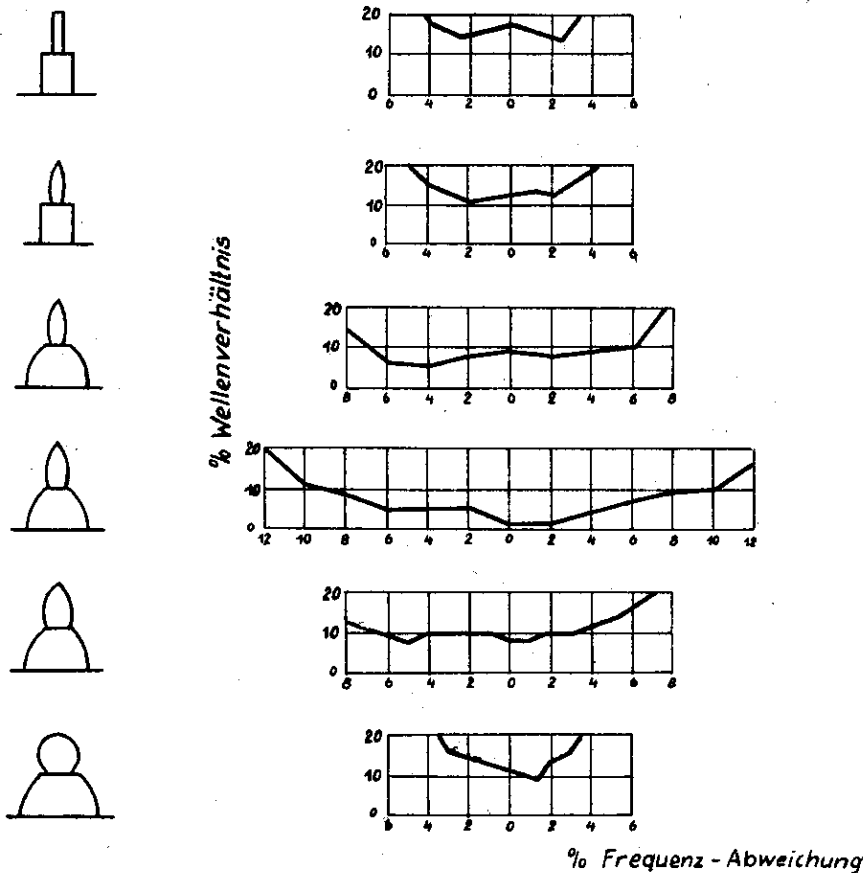


Abb. 8 Verschiedene Entwicklungsstufen des Lindenblad-Breitbandstrahlers.

Abb. 9 zeigt das ausgeführte Modell.

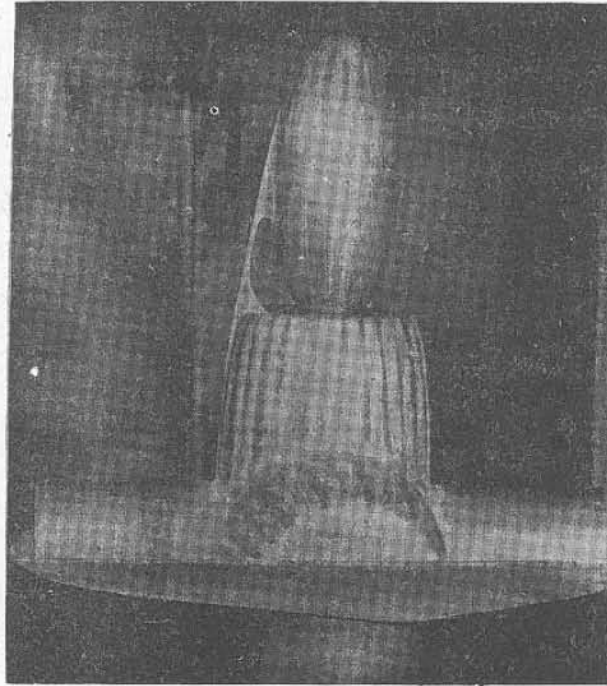


Abb. 9 Modell des $\frac{\lambda}{4}$ - Breitbandstrahlers nach Nils E. Lindenblad.

In einer späteren Patentschrift ¹⁾ hat Lindenblad eine leichter fabrizierbare Ausführungsform angegeben, bei der z.B. die äußere Keule durch ein zylindrisches Rohr mit aufgesteckter verschiebbarer Scheibe ersetzt ist. Eine weitere Verbesserung, die aber von der Form des Einzelstrahlers unabhängig ist, erzielte Lindenblad durch Vereinigung von zwei gekreuzten, also voneinander entkoppelten Dipolen zu einer Drehfeldantenne. Da die zur Erzeugung der 90-gradigen zeitlichen Phasenverschiebung benützte $\lambda/4$ -Leitung bekanntlich bei kleinen Fehlanpassungen jede ausgangsseitige Blindkomponente eingangsseitig in eine gleich große entgegengesetzten Vorzeichens verwandelt, wird der am Eingang ja nochmals vorhandene gleichartige Fehler zu einem Sperrkreis ergänzt und dadurch die resultierende Fehlanpassung beträchtlich verringert, ebenso werden Fehler des Wirkwiderstandes weitgehend ausgeglichen.

1) R 110 555 v. 10.7.40 (RCA, Lindenblad).

Günstiger noch als die bisher behandelten $\lambda/4$ -Strahler sind, wie bereits gesagt, solche von $\lambda/2$ elektr. Länge. Im allgemeinen ist nicht nur die Eigendämpfung grösser, sondern vor allem der Einfluß des Gegengewichts wesentlich geringer, da ja ein großer Teil der Feldlinien sich auf dem Strahler selbst schließt. Außerdem herrschen zu beiden Seiten der Trägerabstimmung symmetrische Verhältnisse vor, da der Wirkwiderstand beiderseits der $\lambda/2$ -Resonanz abfällt, während er schräg durch den Wert der $\lambda/4$ -Resonanz hindurchgeht, wodurch selbst bei völliger Kompensation der auftretenden Blindfehler Seitenbandunsymmetrie und damit unerwünschte Phasenmodulation hervorgerufen werden kann. Bekanntlich läßt sich eine Antenne in der Gegend der $\lambda/2$ -Resonanz durch einen parallel bedämpften Parallelresonanzkreis darstellen, so daß die auf Serie umgerechneten Wirk- und Blindwiderstandswerte etwa einen Verlauf, wie Abb. 10 ihn zeigt, aufweisen werden.

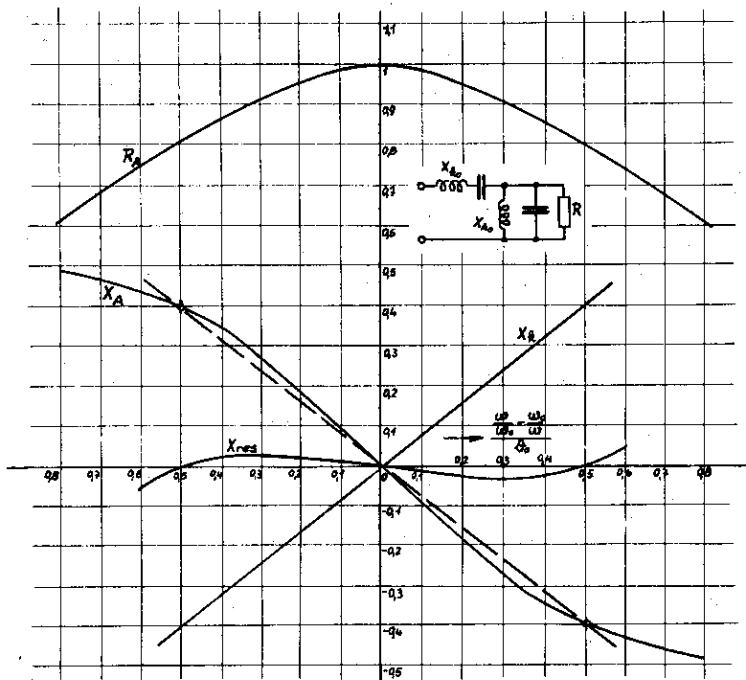


Abb. 10 Blindwiderstands-Kompensation eines parallel bedämpften Parallel-Resonanzkreises durch Serienglied.

Man erkennt, daß der Blindwiderstand in der Nähe der Resonanz praktisch geradlinig mit steigender Frequenz ins Kapazitive

läuft, sich daher über ein verhältnismäßig breites Gebiet durch einen Serienresonanzkreis ausgleichen läßt. Auch in diesem Fall ist es natürlich von besonderer Wichtigkeit, den Kompensationskreis frei von schädlichen Erdkapazitäten zu halten. Dies könnte prinzipiell bei Ausbildung des Kompensationskreises als offene $\lambda/4$ -Leitung (die übrigens in Analogie zu der ja auch eine Leitung darstellenden Antenne einen besseren Kompensationsverlauf ergibt als das quasistationäre Serienglied) ebenso geschehen wie im Falle der kompensierten $\lambda/4$ -Antenne, nämlich im Inneren der Energieleitung. Praktisch ist jedoch eine derartige Ausführung wohl immer ausgeschlossen, da die Fußpunktswiderstände von $\lambda/2$ -Antennen stets wesentlich höher sein werden als der Wert bei $\lambda/4$ -Resonanz. Aus diesem Grunde wird der Innenleiter der Energieleitung bei technisch noch tragbaren Rohrdurchmessern viel zu dünn, um noch in spannungssicherer Form als Außenleiter des Kompensationsgliedes dienen zu können. Es mußte daher ein anderer Weg gesucht werden. Die Lösung fand sich darin, das Kompensationsglied bzw. die als solches dienende Leitung ins Innere des ja sehr geräumigen Strahlers ¹⁾ selbst zu verlegen, wie Abb. 11

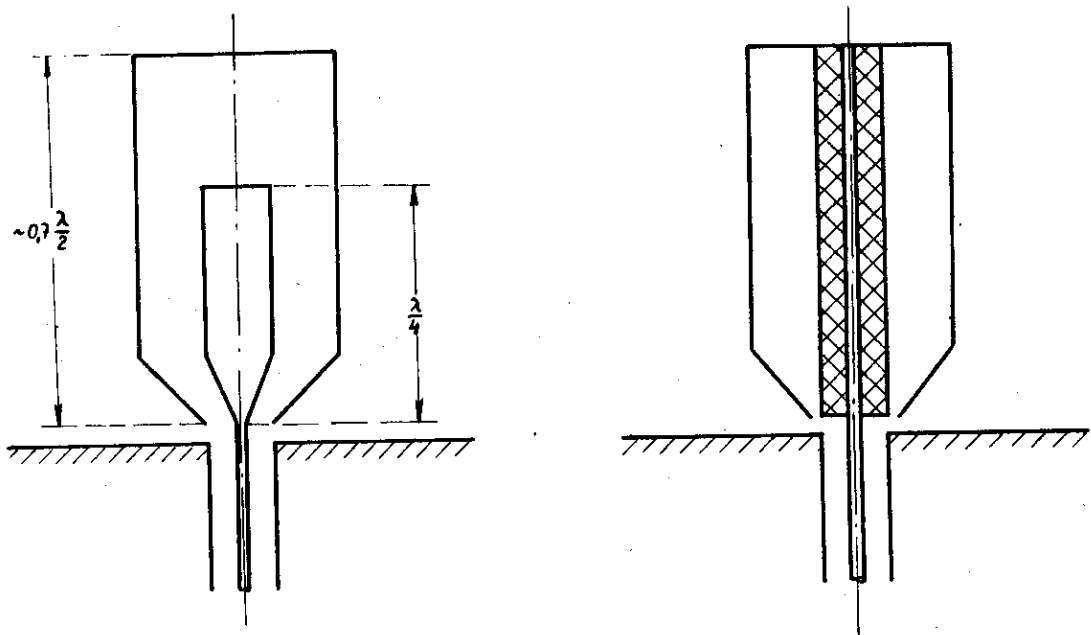


Abb. 11 Verschiedene Ausführungsformen des innerlich kompensierten $\frac{\lambda}{2}$ - Strahlers.

1) T 52 062 v. 3.4.39 (Buschbeck u. Zumbusch).

für zwei verschiedene Ausführungen zeigt. Da die Antenne infolge ihrer Erdkapazität räumlich kürzer als $\lambda/2$ lang ist, muß im Falle der Kompensation durch eine eingebaute kurzgeschlossene $\lambda/2$ -Leitung, die vom Standpunkt statischer Entladungen besonders zweckmässig ist, durch Anwendung von Keramik oder dergleichen die elektrische Länge ebenfalls auf $\lambda/2$ gebracht werden. Abb. 12 zeigt die an der Fernsehantenne Witzleben praktisch erzielten Ergebnisse, wobei zum Vergleich nochmals die günstigste Form des Lindenblad-Strahlers ange-

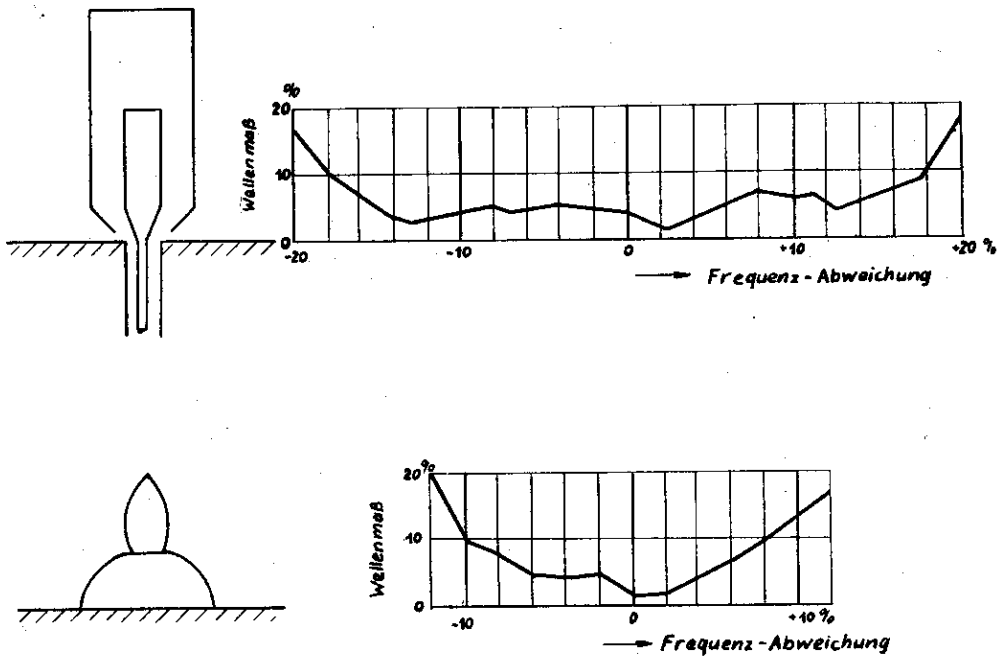


Abb.12. Vergleich des kompensierten $\frac{\lambda}{2}$ - Strahlers mit dem Lindenblad-Strahler.

führt ist. Man erkennt, daß die Ausführung der Witzlebener Antenne ein etwa 66% breiteres Frequenzband ergibt als der Lindenblad-Strahler. Natürlich kann der gleiche Gedanke auch durch reusenförmige Ausführungen (Abb. 13) anstelle der etwas plump wirkenden massiven Zylinder (Abb. 14) verwirklicht werden:

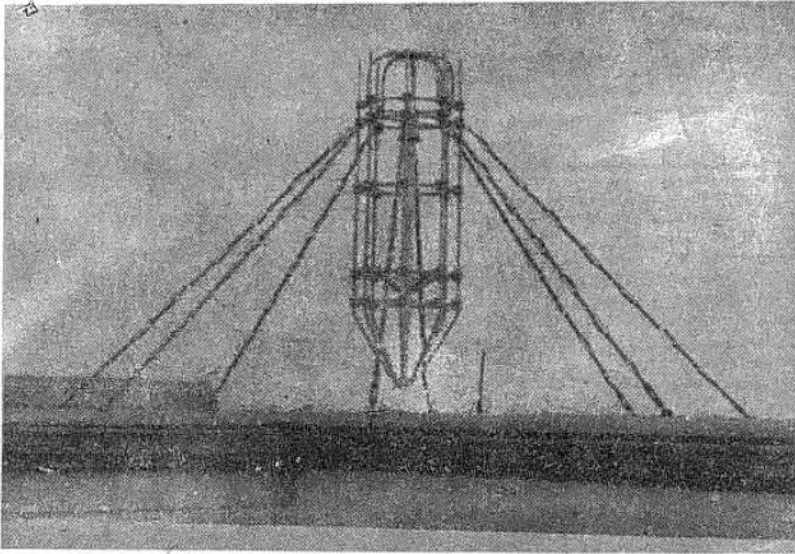


Abb. 13 Innenkompensierte $\lambda/2$ -Breitbandreuse.

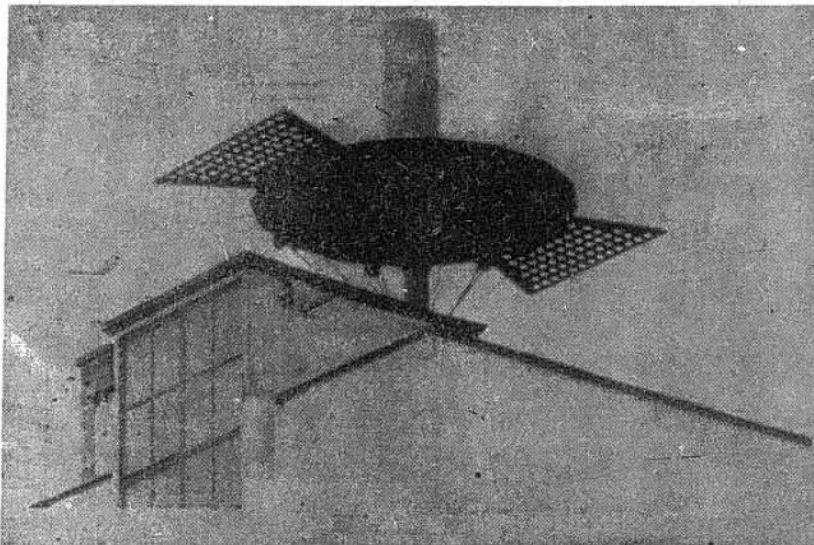


Abb. 14 Innenkompensierte $\lambda/2$ -Breitbandantenne.

Wenngleich durch die geschilderte Ausführungsform bereits alle Wünsche der Fernstechnik wenigstens für absehbare Zeit zu befriedigen sind, läßt sich auch diese Anordnung noch weiter vervollkommen. Die gezeigte Kompensation des $\lambda/2$ -Strahlers läuft ja ebenfalls auf Ausbildung der Antenne zu einem L-Glied hinaus. Wie bereits gesagt, kann - ebenso wie die $\lambda/4$ -Antenne zum T-Glied - die $\lambda/2$ -Antenne zu einem kompletten π -Glied ergänzt werden. Die Verbesserung, die hierdurch erzielt werden kann, zeigt die für einen parallel bedämpften Parallel-Resonanzkreis gerechnete Kurve der Abb. 15, wobei im Falle symmetrischer Antennen die Induktivität des ersten Querkreises sogar gleichzeitig zum Übergang auf Erdsymmetrie nach Art der Symmetrierschleife ausgenutzt werden kann ¹⁾

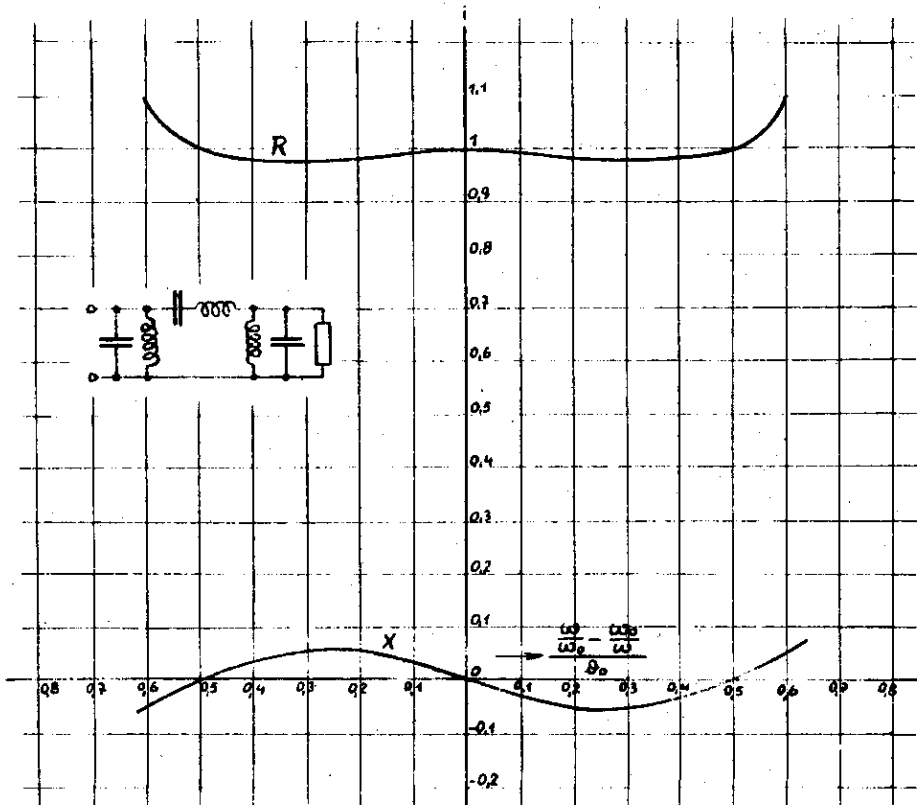


Abb. 15 Kompensation eines parallel bedämpften Parallel-Resonanzkreises durch Ergänzung zum π -Glied.

1) T 57 481 v. 1.6.42 (Buschbeck)