

Neuere Erfahrungen der Deutschen Reichspost in der
Speisung von Antennen für lange und kurze Wellen.

Ellrodt, Berlin.

Vor etwa 15 Jahren wurde die mittelbare Speisung der Antennen über Energieleitungen eingeführt und hat sich seitdem für die meisten Zwecke gegenüber der unmittelbaren Speisung durchgesetzt.

Die Vorteile der mittelbaren Antennenspeisung sind dabei

1. die Befreiung des nächsten Strahlungsfeldes der Antennen von Strahlungshindernissen, besonders grösseren Sendergebäuden;
2. die Verhinderung der Rückwirkung der Antenne auf die kleinen frequenzbestimmenden Stufen bei Sendern grosser Antennenleistung;
3. die Möglichkeit, bei grösseren Anlagen mit mehreren Sendern und Antennen letztere entweder nach dem Standpunkt der günstigsten Ausnützung der Stützpunkte oder geringster gegenseitiger Beeinflussung anzuordnen. Schliesslich können andere Gründe, z.B. getarnte Unterbringung des Senders in grösserer Entfernung von der Antenne die Verwendung einer Energieleitung erfordern.

Alle Antennenformen, für deren Wirkung die Reflexion an der ebenen Erdoberfläche erforderlich ist, müssen von Sendergebäude entfernt und über Energieleitungen gespeist werden; hierher gehören insbesondere Richtantennen und schwundmindernde Antennen. Auch ermöglicht erst der abgesetzte Betrieb die annähernd ideale Erdung der Antennen, was für den Wirkungsgrad oft ausschlaggebend ist.

Nach der Bauart der Energieleitungen unterscheiden wir Freileitungen, Rohrleitungen und Hochfrequenz-Energiekabel.

Die Freileitungen können wir wiederum in erdsymmetrische und erdunsymmetrische Energieleitungen aufgliedern. An erdsymmetrischen Energieleitungen werden sowohl Zweidraht- wie Vierdrahtleitungen verwendet. Die Zweidrahtleitungen sind einfacher im Aufbau, bei den Vierdrahtleitungen ist dagegen die Erdsymmetrie und damit die Strahlungsfreiheit leichter zu erreichen. Ausserdem unterscheiden sie sich im Wellenwiderstand, da erstere praktisch am besten für Wellenwiderstände von 400 bis 600 Ohm, letztere für 200 bis 250 Ohm ausführbar sind. Die Zweidrahtleitung ist wohl die älteste Form, die als Lechersystem aus den ersten Anfängen der Funktechnik bekannt ist.

Erdunsymmetrische Freileitungen sind bei uns nicht im Gebrauch, während sie sich im Ausland, z.B. in Frankreich, für die Speisung von Mittelwellenantennen grosser Beliebtheit erfreuen.

Ein Nachteil aller Freileitungen ist die Tatsache, dass ihre Spannungsfestigkeit durch Regen und Nebel herabgesetzt wird und sie ihre Eigenschaften bei Schnee und Rauhreifansatz ändern. Ausserdem verursachen die Querkapazitäten der Isolatoren Schwankungen des Wellenwiderstandes, wenn ihre Abstände in die Grössenordnung halber und viertel Wellenlängen kommen. Auch sind Freileitungen nie völlig strahlungsfrei. Alle diese Gesichtspunkte führten hin zur geschlossenen Leitung, zunächst in Form der Rohrleitung, später in Form des Hochfrequenzenergiekabels. Dabei spielte für die Uebertragung grosser Hochfrequenzleistungen die symmetrische Rohrleitung nur eine vorübergehende Rolle, da, wie elementare Ueberlegungen zeigen, die konzentrische Leitung bei gegebenem Aussendurchmesser die grösste Spannungsfestigkeit aufweist bzw. die grösste Leistung zu übertragen vermag. Dagegen hat die konzentrische Rohrleitung, obwohl in vielen Anwendungen durch das beweglichere Kabel verdrängt, ihre Bedeutung noch nicht verloren, wenn es gilt, extrem hohe Leistungen bei mittleren und kurzen Wellen zu meistern.

In der Regel kommt für Hochfrequenz-Energieleitungen für die Leistungsübertragung nur der angepasste Betrieb in Frage. Dadurch sind Strom und Spannung auf der Leitung gekoppelt, und es hängt von der Bemessung des Wellenwiderstandes

sowie u.U. von der Betriebswelle ab, ob die Spannungsgrenze oder die Stromgrenze zuerst erreicht wird. Es kommen daher folgende Typen in Frage :

1. die spannungsfeste Leitung, die bei gegebenem Durchmesser des Aussenleiters die höchste Spannung verträgt: $D/d = 2,78$;
 $Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}}$ Ohm,

2. die Güteleitung, die im angepassten Betrieb den höchsten Wirkungsgrad bei gegebenem Aussendurchmesser aufweist. Die Güteleitung ähnelt in ihren Abmessungen der spannungsfesten Leitung:

$$D/d = 2,78 \dots 5 \quad Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \dots \frac{96}{\sqrt{\epsilon}} \text{ Ohm};$$

3. die spannungsbegrenzte Leistungsleitung, die bei bekannter maximaler Feldstärke und gegebenem Aussendurchmesser im angepassten Zustand die grösste Leistung überträgt und

4. die wärmebegrenzte Hochleistungsleitung, die bei gegebener höchster Ubertemperatur und gegebenen Aussenmaßen im angepassten Zustand die grösste Leistung überträgt, folgen trotz unterschiedlicher Voraussetzungen dem gleichen Gesetz;
 $D/d = 1,65$; $Z = \frac{30}{\sqrt{\epsilon}}$ Ohm. Die Einzelheiten über die vier Leitungstypen sind dem Beitrag Dr.Roder (Energieleitungen und Anpassung) zu entnehmen.

Die konzentrische Energierohrleitung für 100 kW Trägerleistung im Mittelwellenbereich bestand aus zwei Kupferrohren von 28 und 95 mm \varnothing , die durch keramische Scheibenisolatoren gegeneinander abgestützt waren. Das Dielektrikum ist im wesentlichen Luft, die Abmessungen entsprechen im Mittel- und Langwellenbereich ungefähr der spannungsbegrenzten Leitung bzw. der Güteleitung bei einem Wellenwiderstand von $Z = 63$ Ohm. Aus dieser Rohrleitung, die oberirdisch verlegt wurde, hat Telefunken dann das Schalenkabel entwickelt, das von der AEG gefertigt wird. Das innere Rohr wurde dabei durch ein Kupferhohlseil, der Aussenleiter durch kugelgelenkartig verbundene Kupferblechschalen ersetzt. Ein derartiges Muster war in der Antennenausstellung zu sehen. Mit Bleimantel und Eisenbewehrung versehen war dieses Kabel die erste für Erdverlegung geeignete Energieleitung der Welt und ist lange die einzige geblieben. Sein Nachteil in mechanischer Beziehung ist der grosse Mindest-Krümmungsradius von etwa 1,50 - 2,00 m.

Die Suche nach einem beweglicheren Energiekabel für fahrbare Antennenabstimmittel und fahrbare Sender grosser Leistung, die die Deutsche Reichspost der Industrie in den Jahren 1936/37 in Auftrag gab, sowie das Streben nach Rohstoffeinsparung im Sinne des Vierjahresplans, zusammen mit dem Aufkommen hochwertiger neuer Werkstoffe, regten die Firma C. Lorenz dazu an, in Zusammenarbeit mit zwei Kabelwerken ein neuartiges Energiekabel zu schaffen. Neue Werkstoffe, wie Opanol mit niedriger Dielektrizitätskonstante $\epsilon = 2,0 \dots 2,5$ und kleinem Verlustwinkel zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ und $3 \cdot 10^{-4}$ bei einer Spannungsfestigkeit, die ein Vielfaches der Spannungsfestigkeit der Luft ist, ermöglichten eine wesentliche Herabsetzung des Bauvolumens. Dabei mussten aber alle nur möglichen Massnahmen getroffen werden, um die Kupferverluste besonders beim Innenleiter herabzusetzen, da sonst die Leistung durch die zulässige Erwärmung vorzeitig begrenzt worden wäre. Durch eine geeignete Hochfrequenzlitze als Innenleiter wurde das erstrebte Ziel erreicht. Da das als Dielektrikum benutzte Opanol keineswegs hygroskopisch ist, konnte auch bei Erdverlegung der Bleimantel fortfallen. Das Kabel für mindestens 100-kW Trägerleistung im Mittelwellenrundfunkbereich hat einen Aussendurchmesser von nur 40 ... 45 mm und gestattet Krümmungsradien von 50 cm. Gegenüber dem Schalenkabel 28/95 weist es dabei eine Kupferersparnis von rund 80%, eine Eisenersparnis von rund 65% und eine Bleiersparnis von 100% auf. Dieses Kabel wird vom Kabelwerk Vacha/Rhön hergestellt, das daneben auch kleinere Typen für geringere Leistungen baut. Opanolkabel kleiner Leistungen stellt neuerdings auch die Firma Siemens her.

An Luftraumkabeln, die nur teilweise festes Dielektrikum zur Abstützung des Innenleiters enthalten, sind noch zu nennen die Styroflexkabel der Firma Siemens, darunter das sogenannte Sickenkabel, die Styroflexkabel der Firma Felten und Guilleaume und die Fadenkabel der Firma Norddeutsche Kabelwerke. Die genannten Kabeltypen sind teils nur für Empfangszwecke, teils für Senderzwecke kleiner Leistung und nur vereinzelt für grosse Sendeleistungen bestimmt. Da die Polystyrole, die in diesen Luftraumkabeln als Werkstoff für die Abstandhalter dienen, brennbar sind, besteht bei grossen Leistungen die Gefahr, dass durch Sprühen oder Uberschlag ein Kabelbrand eingeleitet wird.

Diese Gefahr besteht bei den Opanolkabeln trotz der Brennbarkeit des Opanols nicht, weil der Luftzutritt fehlt. Dagegen ist ein stoßfreies und betriebssicheres Verbinden zweier Kabelenden durch Muffen bei Lufttraumkabeln leichter als beim Opanolkabel.

Nun komme ich zu den Anwendungsbereichen der verschiedenen Energieleitungsarten.

Die Anwendungsbereiche hängen ab:

1. von der günstigsten Möglichkeit der Antennenanpassung.

Naturgemäß wird die Anpassungsschaltung für eine Antenne, die gegen Erde betrieben wird, bei Benutzung einer unsymmetrischen Energieleitung am einfachsten; umgekehrt ist die Anpassung einer Dipol-, Tannenbaum- und Rhombusantenne an eine symmetrische Energieleitung einfacher als an eine unsymmetrische. Auch die Wahl des geeigneten Wellenwiderstandes der Leitung vereinfacht die Antennenanpassung. So ist z.B. eine Rhombusantenne von etwa 500 bis 600 Ohm Wellenwiderstand ohne Zwischenschaltung von Schaltmitteln aus einer Zweidrahtleitung gleichen Wellenwiderstandes zu speisen, eine Tannenbaumantenne aus $\lambda/2$ -Dipolen dagegen aus einer Vierdrahtleitung von $Z = 240$ Ohm. Dieser unmittelbare Anschluss ohne Anpassungsmittel zwischen Energieleitung und Antenne ist besonders bei der Rhombusantenne von Wichtigkeit, wenn beabsichtigt ist, deren breiten Wellenbereich auszunutzen.

2. von den zu übertragenden Leistungen und Frequenzbereichen.

a) Freileitungen sind anwendbar bei Lang-, Mittel- und Kurzwellen; bei letzteren haben wir bereits festgestellt, dass ihr Einsatz bei Kurzwellenrundfunksendern mit 100 kW Trägerleistung noch keine Schwierigkeit macht. Ob das die obere Grenze ist, konnten wir noch nicht feststellen; dagegen haben wir die Erfahrung gemacht, dass unter 20 m (über 15 MHz) besonders Vorkehrungen getroffen werden müssen, damit die durch die Kapazitäten der Halterungen verursachten Wellenwiderstandsschwankungen nicht zu gross werden. Das gilt besonders für die Zweidrahtleitungen wegen ihres hohen Wellenwiderstandes.

b) Rohrleitungen sind für alle Wellenbereiche und bis zu den grössten Leistungen anwendbar. Die grösste für die Reichspost bisher gebaute Rohrleitung beim Deutschland-

sender überträgt 500 kW-Trägerleistung im Langwellenbereich, doch dürfte das noch nicht ihre Leistungsgrenze sein.

- c) Energiekabel müssen verwendet werden, wenn Erdverlegung gefordert wird, oder wenn zahlreiche Krümmungen im Leitungszug notwendig werden, oder wenn bei ortsbeweglichen Anlagen wiederholter Ab- und Aufbau in Frage kommt. Wegen ihres geringen Bedarfs an Sparmetallen, ihrer Unempfindlichkeit gegen Wasser und ihrer hohen Biegsamkeit sind Vollkabel mit Öpanolisierung oder dergl. den anderen Formen vorzuziehen, sofern Wellen- und Leistungsbereich ihre Anwendung gestatten. Während diese im Mittelwellenbereich je nach Welle 100 bis 200 kW Trägerleistung, im Langwellenbereich noch mehr bei einem Aussendurchmesser von nur 40 bis 45 mm zu übertragen vermögen, liegen für Kurzwellen geeignete Ausführungen dieser Kabel für grosse Leistungen noch nicht vor. Hier sind bisher für grosse Leistungen nur die Schalenkabel verwendbar und auch diese nur beschränkt; während sie bei 100 kW-Telegraphie-Oberstrichleistung sehr zufriedenstellend arbeiten, haben sie sich im Betrieb mit Kurzwellenrundfunksendern von 50 kW Trägerleistung als unzuverlässig erwiesen, indem sie teils bei vorübergehenden Anpassungsfehlern durch Rauhreif auf den Antennen, oft aber aus nicht erkennbarer Ursache schadhafte wurden. Bemerkenswert ist, dass die Schalenkabel im Kurzwellenbereich durch zunehmende Verluste am Innenleiter strombegrenzt sind. Eine Versuchslänge Styroflexkabel der Firma Felten und Guilleaume für Kurzwellensender von 50 kW-Trägerleistung konnte bisher noch nicht genügend erprobt werden, um ein Urteil zu gestatten. Wo also für Kurzwellensender Energiekabel verwendet werden müssen, sind die Schalenkabel vorläufig noch unentbehrlich.

Nun komme ich zum Rohstoffaufwand für die verschiedenen Energieleitungsarten.

Eine Freileitung für 50 bis 100 kW-Trägerleistung muss sowohl wegen der Sprühsicherheit als auch aus Verlust- und Erwärmungsgründen aus Seilen von etwa 9 mm \emptyset hergestellt werden. Dies sind Seile von 50 qmm Querschnitt. Aus Rein-aluminium hat 1 km Doppelleitung von dieser Stärke einen

Metallbedarf von 270 kg Al. Dazu kommt der Metallbedarf für die Halterungen, der sehr niedrig gehalten werden kann, und der Holzbedarf für die Gestänge. Die gleiche Leitung aus Stahl- Kupferseil benötigt ein Einsatzgewicht von 270 kg Cu und 800 kg Stahl und hat ein Eigengewicht von etwa 800 kg, ist also rund dreimal so schwer. Welche der beiden Ausführungen rohstoffmässig zu bevorzugen ist, entzieht sich meiner Kenntnis. Wenn es gelänge, einen Stahldraht mit gut haftender Aluminiemaufgabe zu schaffen, so wäre m.E. für den genannten Verwendungszweck rohstoffmässig das Optimum erreicht.

Nun eine Gegenüberstellung des Rohstoffbedarfs zweier Kabeltypen, die im Wellenbereich für 100 kW Trägerleistung geeignet sind. Es benötigen je km Länge

das Schalenkabel 23/95 von Telefunken/ AEG		das Opanolkabel von Lorenz / Vacha
Kupfer	7,0 t	1,43 t (z.T.versilbert)
Blei	14,1 t	-
Eisen	5,9 t	2,1 t (verbleit)
Keramik	3333 Scheiben	-
Opanol	-	• 1 t

Für Rohrleitungen kann ich keine Vergleichszahlen bringen, da diese im allgemeinen wegen ihres Anwendungsbereichs leistungsmässig oder wellenmässig nicht mit vorstehenden Beispielen vergleichbar sind. Bemerken möchte ich noch, dass es bei Rohrleitungen grösster Leistung ohne nennenswerte Dämpfungserhöhung möglich ist, den Aussenleiter aus Aluminium, aus Zink und für Kurzwellen vielleicht sogar aus verzinktem Eisen herzustellen. Beim Innenleiter wird man dagegen wenigstens eine kupferplattierte Ausführung verwenden müssen.

Damit komme ich zu den Austauschfragen.

Im Mittelwellenbereich ist das Opanolkabel rohstoffmässig als Austausch kabel für das Schalenkabel anzusehen. Es enthält zwar noch Kupfer und u.U. etwas Silber, aber kein Blei mehr, und die Kupferersparnis beträgt 80% gegenüber dem Schalenkabel. Da die Leitmetalle bei diesem wärmebegrenzten Hochleistungskabel fast optimal ausgenutzt sind, kommt eine Umstellung auf Metalle geringerer Leitfähigkeit bei diesem Kabel für 100 kW und darüber kaum in

Frage. Bei den kleineren Bauformen, die einen Vollenleiter enthalten, könnte man dagegen ohne Nachteil auf einen kupferplattierten Leiter übergehen, wobei namentlich bei Verwendung für Langwellen die Eindringtiefe für die Stärke der Auflage zu berücksichtigen ist. Bei spannungsfesten Kabeln für unangepassten Betrieb, die leistungs- und strommässig gering belastet sind und nur in kürzeren Längen verwendet werden, würde dagegen ein Austausch der Cu-Leiter gegen Al-Leiter nichts schaden.

Bei Freileitungen für Kurzwellensender wird man im allgemeinen Al- oder Staku-Seile verwenden müssen. Verzinkte Eisenseile können nur für kürzere Leitungen bei kleineren Senderleistungen in Betracht kommen, da sonst der Leistungsverlust durch die Leitungsdämpfung relativ und auch absolut zu hoch wird und der Ersparnis an Leitmetall für die Energieleitung ein unverhältnismässig hoher Materialaufwand im Sender gegenübersteht, um die in der Leitung vernichtete Leistung zu erzeugen.

Für Empfangszwecke, z.B. Leitungen von Empfangs-Rhombusantennen, zum Empfänger, können dagegen verzinkte Eisenseile durchaus in Betracht kommen.

Aus dem Gesagten ist zu entnehmen, dass ein allgemeines Verwendungsverbot für Kupfer für Hochfrequenzenergiekabel und ein solches für Aluminium und Stahlkupfer für Hochfrequenz-Freileitungen untragbar wäre. Dagegen könnten für Freileitungen neuartige Seilformen mit einer Umklöpfung aus Leitmetall in Frage kommen, um dieses optimal auszunutzen.

Zusammenfassend ist über die Anwendung der Energieleitungen im Bereich der Deutschen Reichspost folgendes zu sagen:

Für Grossrundfunksender im Mittelwellenbereich von 60 bis 100 kW Trägerleistung wurden in den Jahren 1931/32 nebeneinander Freileitungen und Rohrleitungen eingeführt, bei den Kurzwellensendern seit 1927. Im Jahre 1933 wurde das Schalenkabel eingeführt, und von diesem Zeitpunkt an haben sich die Kabel für alle Wellenbereiche durchgesetzt. Seit etwa 1938 haben wir seine Leistungsgrenzen im Kurzwellenbereich erkannt, während es seit etwa 1937 im Mittel- und Langwellenbereich durch das Opanolkabel verdrängt wird. Heute

verwenden wir nebeneinander:

Öpanolkabel für alle Leistungen bis etwa 100 kW Trägerleistung im Mittel- und Langwellenbereich,

Rohrleitungen bis 500 kW Trägerleistung im Langwellenbereich und bis 50 kW Trägerleistung im Kurzwellenbereich,

Schalenkabel für Kurzwellen-Telegraphiesender bis 100 kW
Oberstrich und

Freileitungen für Kurzwellensender von 50 kW Trägerleistung aufwärts sowie in allen Fällen, wo Rhombusantennen zu speisen sind. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die genannten Leitungsarten heute allesamt lebensberechtigt sind, wenn sie richtig eingesetzt werden.

Zum Schluss möchte ich noch eine Forderung der Deutschen Reichspost an die Weiterentwicklung der Energieleitungen aussprechen. Wir benötigen ein Hochfrequenzkabel, das zuverlässig 100 kW Trägerleistung auf Kurzwellen bis herab zu 13 m Wellenlänge zu übertragen vermag, und möglichst rohstoffsparend aufgebaut ist.