Energieleitungen und Anpassung.

H. Roder, Berlin

Beim Entwurf und Bau einer Energieleitung werden vor allem zwei Gesichtspunkte ausschlaggebend sein: nämlich, die Leitung soll einen hohen Uebertragungswirkungsgrad haben und sie soll betriebssicher sein. Die Energieverluste in der Leitung haben ihre Ursache im Längswiderstand des Leiters und in der Leitfähigkeit des Isolationsmaterials zwischen den Leitern. Diese Verluste werden bekanntlich dann ein Minimum, wenn die Leitung an einem Ende angepasst ist, d.h. wenn sie auf einen Abschlußwiderstand arbeitet, der gleich ist ihrem Wellenwiderstand. Neben der richtigen Anpassung hängen die Verluste aber auch in hohem Maße von der richtigen Dimensionierung der Energieleitung ab. Die Betriebssicherheit wird - ausser von der mechanischen Ausführung - davon abhängen, wieweit die Leitung bzgl. Spannung und Erwärmung beansprucht wird. Unter diesen Gesichtspunkten wollen wir die beiden wichtigsten Formen der Energieleitung, die konzentrische Leitung und die Zweidrahtleitung, etwas näher betrachten.

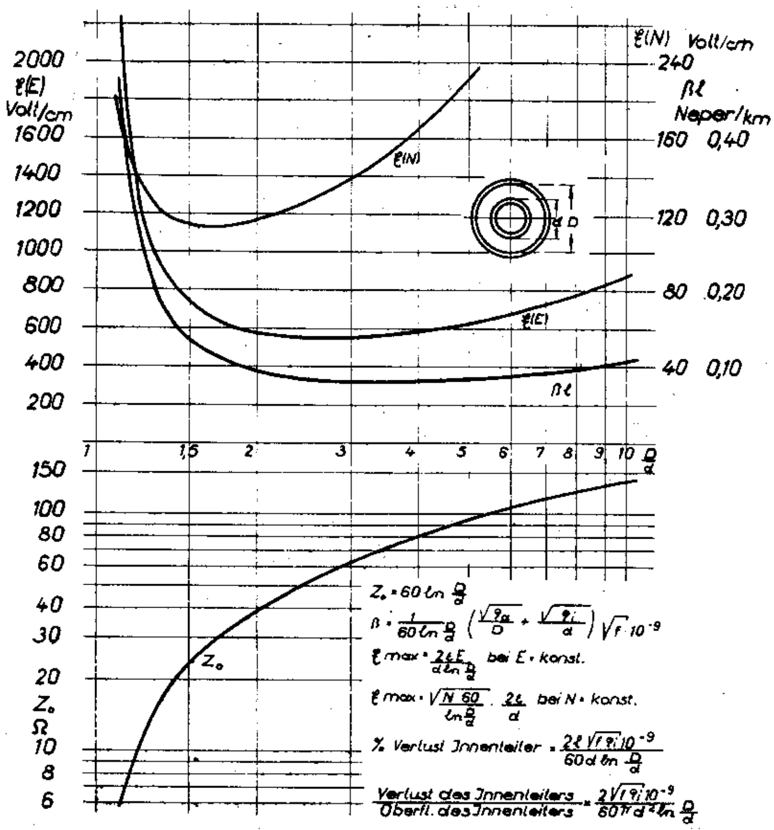


Abb. 1 Konzentrische Energieleitung.

Betrachten wir zunächst die Spannungsfestigkeit der konzentrischen Leitung, so bemerken wir, dass die Feldstärke, (d.i. der Spannungsgradient), am grössten ist an der Oberfläche des Innenleiters. Bleibt der Durchmesser des Aussenrohrs konstant und ändert man den Durchmesser des Innenrohres, so durchläuft bei konstanter Spannung E die Feldstärke der Kurve $\mathcal{E}$(E); sie wird ein Minimum beim Verhältnis D/d = e = 2,718. Der zugehörige Wellenwiderstand ist 60 Ohm. Der Fall, dass man mit konstanter Spannung zu arbeiten hat, wird allerdings selten auftreten; zumeist handelt es sich ja um die Uebertragung einer gegebenen Leistung. Hält man also D und die Leistung N konstant, so ändert sich $\mathcal{E}$ in Abhängigkeit von D/d nach der Kurve $\mathcal{E}$(N). Der minimale Wert von $\mathcal{E}$ liegt dann bei $D/d = \sqrt{e} = 1,65$, entsprechend einem Wellenwiderstand von 30 Ohm. Die Leitungsverluste verteilen sich ungleichmässig auf Aussen- und Innenleiter. Sind beide Leiter aus dem gleichen Material, so wird die Leitungsdämpfung ein Minimum bei D/d = 3,6, also bei Z_o = 77 Ohm. Aus Gründen der Kupferersparnis verwendet man jedoch vielfach für den Aussenleiter ein Material geringerer Leitfähigkeit, z.B. Aluminium; in diesem Falle verschiebt sich das Optimum zu noch höheren Werten des Wellenwiderstandes. Die Verluste auf dem Innenleiter allein verlaufen proportional der Kurve $\mathcal{E}$ (E); sie werden also ebenfalls ein Minimum bei Z_o = 60 Ohm. Bei der Uebertragung grösserer Leistungen aber kommt es weniger auf die Verluste selbst an als auf die dadurch hervorgerufene Temperatursteigerung des Innenleiters gegenüber dem Aussenleiter, da diese Uebertemperatur zu verschiedener Ausdehnung des Innen- und Aussenleiters und damit zu mechanischen Schädigungen führen kann. Die Uebertemperatur des Innenleiters ist proportional den Verlusten des Innenleiters pro Quadratzentimeter Oberfläche. Die entsprechende Kurve verläuft in Abhängigkeit von D/d proportional der Wurzel aus der Kurve $\mathcal{E}$ (N). Auch hier liegt das Minimum demnach bei 30 Ohm.

Für die Zweidrahtleitung können wir in ähnlicher Weise Kurven ableiten, die uns die günstigste Dimensionierung angeben.

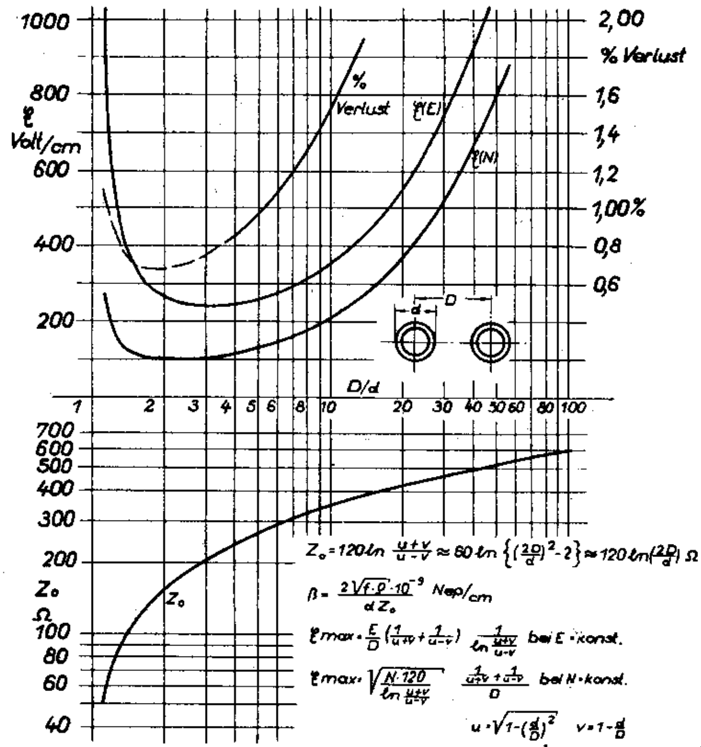


Abb. 2 Zweidraht- Energieleitung.

Die maximale Feldstärke tritt hier an den Punkten der beiden Leiter auf, die einander am nächsten stehen. Wir finden, dass bei konstanter Spannung das Optimum des Durchmesserverhältnisses bei etwa 3,3 liegt, entsprechend einem Wellenwiderstand von 224 Ohm. Bei konstant gehaltener Leistung liegt er niedriger, nämlich etwa bei einem Durchmesserverhältnis 2, entsprechend einem Wellenwiderstand von 158 Ohm. Die Leitungsdämpfung (aufgetragen als prozentualer Verlust bei einer Frequenz von 10 MHz, einer Leitungslänge von 100 m, einem Abstand D von 10 cm und Kupfer als Leitermaterial) wird ein Optimum bei einem Durchmesserverhältnis von 1,667, entsprechend einem Wellenwiderstand von etwa 140 Ohm.

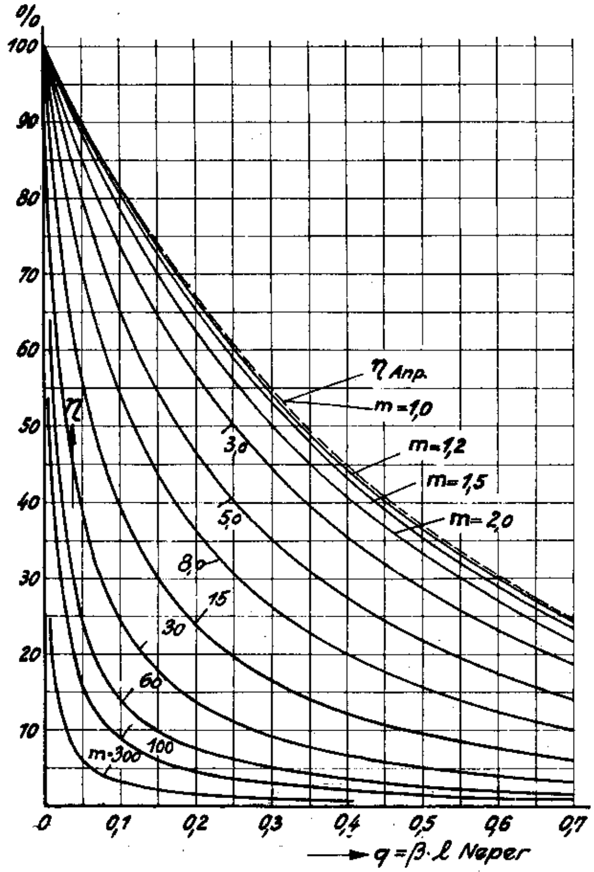


Abb. 3 Kabelwirkungsgrad als Funktion der Kabeldämpfung und Anpassung

$$m = \frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{R_{max}}{Z}$$

Der Wirkungsgrad einer angepassten Energieleitung ist gegeben durch die Beziehung

$$\eta = \varepsilon^{-2\beta\ell}$$

Ist die Anpassung nicht vollständig, so dass sich stehende Wellen mit einem Wellenverhältnis m auf der Leitung ergeben, so ist der Wirkungsgrad der Leitung geringer. Wie man aus den Kurven ersieht, ist indessen der Abfall des Wirkungsgrades bei einem Wellenverhältnis bis zu 1 : 2 noch gering; erst darüber hinaus macht sich die Verschlechterung gegenüber der angepassten Leitung stark bemerkbar. Unangenehmer ist die höhere Spannungsbeanspruchung der Leitung, wenn sie nicht angepasst ist, da dann im Spannungsknoten die Spannung um den Faktor $\sqrt{m}$ grösser ist als im Falle der Anpassung.

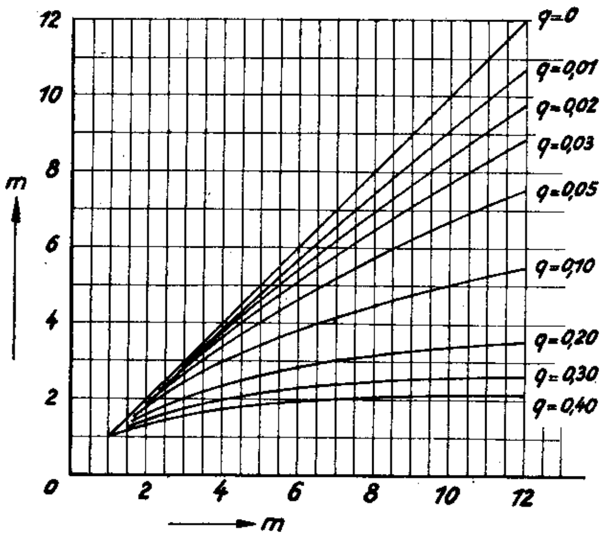
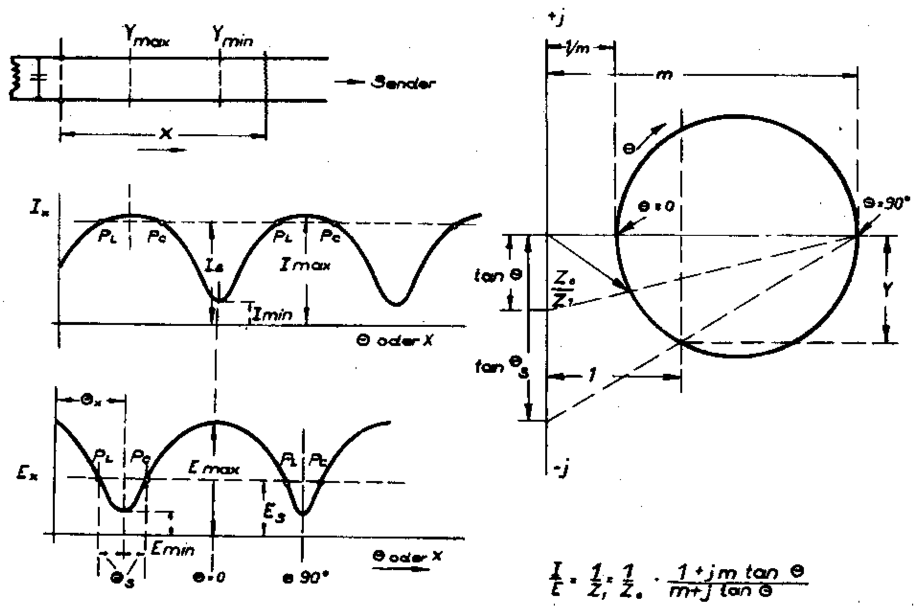


Abb. 4 Eingangsseitige Reduktion stehender Wellen infolge der Leitungsdämpfung.

Infolge der Leitungsdämpfung tritt bei grösseren Leitungslängen eine erhebliche Verringerung des Wellenverhältnisses ein.



$$\frac{I}{E} = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{1 + jm \tan \Theta}{m + j \tan \Theta}$$

$$\tan \Theta_s = \sqrt{\frac{1}{m}}$$

$$E_s = \sqrt{E_{max} \cdot E_{min}}$$

$$m = \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

Abb. 5 Leitungsanpassung.

Die Anpassung der Leitung wird senderseitig zumeist transformatorisch unter Potentialtrennung erzielt. Auf der Antennenseite werden zumeist quasistationäre Mittel vorgezogen. Das Anpassungsverfahren beruht darauf, dass ein kurzes Stück nicht angepasster Leitung zur Widerstandstransformation benutzt wird. Misst man nämlich längs der Leitung die Verteilung von Strom und Spannung, so ergibt das Verhältnis Strom : Spannung das bekannte Kreisdiagramm für den Leitwert. Man sucht nun diejenigen Stellen längs der Leitung, an denen die Wirkkomponente des Leitwertes gleich wird dem reziproken Wellenwiderstand der Leitung. Die an dieser Stelle noch vorhandene Blindkomponente wird durch einen Blindwiderstand gleicher Grösse und entgegengesetzten Vorzeichens kompensiert. Hierfür eignet sich am besten ein Stück der gleichen Leitung, das entweder kurzgeschlossen oder offen verwendet wird, und dessen Länge so bemessen wird, dass sich am Anschlusspunkte der gewünschte Blindwiderstand ergibt. Der Anschlusspunkt dieser "Stichleitung" ergibt sich an den Stellen, bei denen die Spannung gleich ist dem geometrischen Mittel von maximaler zu minimaler Spannung.

Neben der Aufgabe der richtigen Anpassung des Antennenscheinwiderstandes auf den Wellenwiderstand der Leitung tritt sehr häufig das Problem auf, eine erdsymmetrische Antenne an eine erdunsymmetrische Energieleitung oder umgekehrt anzuschliessen.

Auch hierfür können Uebertragungsmittel mit konzentrierten Blindwiderständen oder auch solche, die mit verteiltem L und C, also aus Leitungsstücken, aufgebaut sind, verwendet werden. Die letzteren werden zumeist vorgezogen.

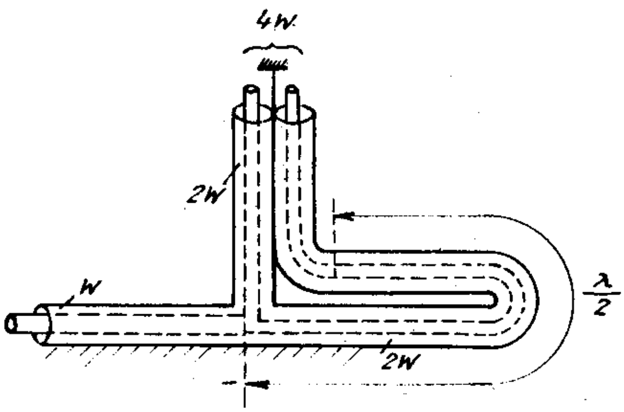


Abb. 6 $\frac{\lambda}{2}$ - Umwegleitung.

Das bekannteste Mittel ist die $\frac{\lambda}{2}$ -Umwegleitung, die gleichzeitig eine Widerstandstransformation im Verhältnis 1 : 4 bedingt. Müssen grössere Wellenbereiche mit einem Gerät überstrichen werden, so muss man die $\frac{\lambda}{2}$ -Umwegleitung aufwickeln; es entsteht dann der Phasentransformator nach Buschbeck, der für Wellenbereiche bis zu 1 : 6 ausgeführt worden ist.

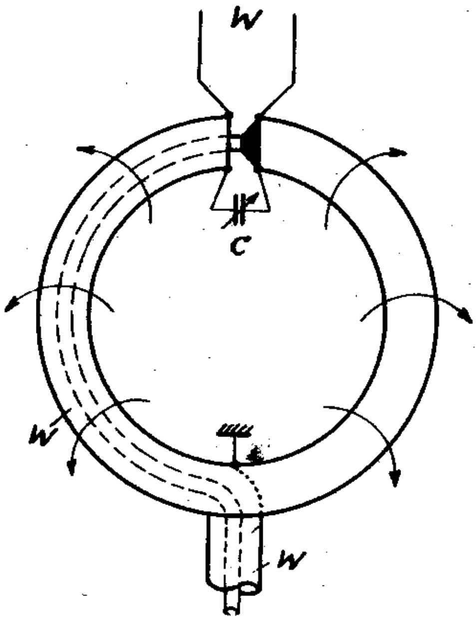


Abb. 7 Symmetrierungsschleife.
Uebersetzungsverhältnis 1 : 1

Eine Anordnung, die mit einem Transformationsverhältnis von 1 : 1 arbeitet, ist die Symmetrierungsschleife. Diese hat gleichzeitig die Eigenschaft, dass die anzuschliessende Antenne mit der Induktivität der Schleife belastet wird, ein Umstand, der sich allerdings in vielen Fällen durchaus günstig auswirkt und z.B. zur Breitbandanpassung benutzt werden kann. Der Kondensator C ergänzt die Schleife zum Sperrkreis.

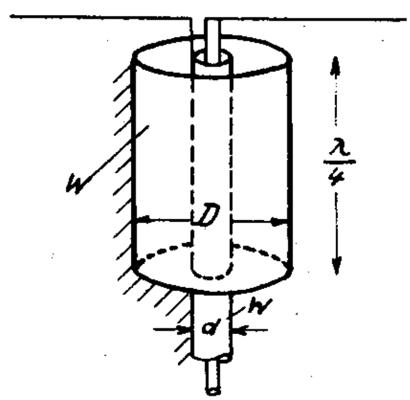


Abb. 8 $\frac{\lambda}{4}$ - Sperrtopf.

In ähnlicher Weise arbeitet der $\frac{\lambda}{4}$ -Sperrtopf ebenfalls mit einem Transformationsverhältnis 1 : 1. Im Vergleich zur Symmetrierungsschleife besteht jedoch der Unterschied, dass hier die Transformation nur bei der Nennfrequenz, d.h. wenn der Sperrtopf genau $\frac{\lambda}{4}$ lang ist, symmetrisch ist.