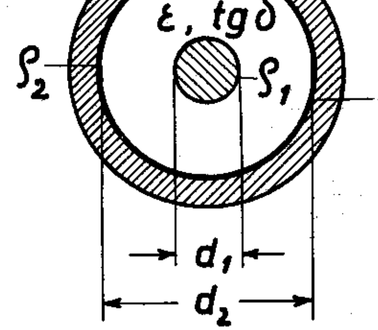
Die Zusammensetzung der Dämpfung bei konzentrischen Hochfrequenzleitungen.

O. Cords, Berlin.

In der Leitungstheorie kennzeichnet die Dämpfungskonstante ß die Abnahme der Schwingungsweite mit zunehmendem Abstand vom Ausgangspunkt. Hier interessieren uns nun die Verhältnisse bei der konzentrischen Leitung, die sich heute fast ausschliesslich für die Uebertragung von hochfrequenten Wechselströmen durchgesetzt hat. Wesentlich ist hierbei die Abhängigkeit der Dämpfung von der Frequenz, die sich in einer sehr einfachen Form beschreiben lässt :

In Bild 1 ist ein Querschnitt durch eine konzentrische Leitung gezeichnet worden und ausserdem sind die hier interessierenden Daten, für den Durchmesser des Mittelleiters d_1 und für die lichte Weite des Rückleiters d_2 , angegeben worden, deren Verhältnis als Durchmesserverhältnis N bezeichnet sei.



$$\beta_{ges} = A \cdot \sqrt{f} + B \cdot f \left[\frac{Neper}{km}\right]$$

$$A = \frac{31{,}6}{Z} \cdot \left[\frac{\sqrt{\rho_1}}{d_1} + \frac{\sqrt{\rho_2}}{d_2}\right]$$

$$= \frac{0{,}527\sqrt{\varepsilon}}{d_2} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}}{\ln N}$$

Z in Ω, d in cm, ρ in Ωcm

$$\frac{d_2}{d_1} = N \qquad B = \frac{\pi}{3} \cdot tg\delta \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot 10^{-5}$$

Abb.1 Dämpfungsfaktoren für konzentrische Leitungen.

Schliesslich gehen noch die Eigenschaften der Isolierung ein, die durch die resultierende Dielektrizitätskonstante ε und den dielektrischen Verlustwinkel $\operatorname{tg}\delta$ gekennzeichnet werden. Mit diesen wenigen Begriffen lassen sich alle Abhängigkeiten der Dämpfung von der Frequenz in folgender einfachen Form darstellen :

$$\beta \text{ ges.} = A \cdot \sqrt{f} + B \cdot f \text{ (Neper/km).}$$

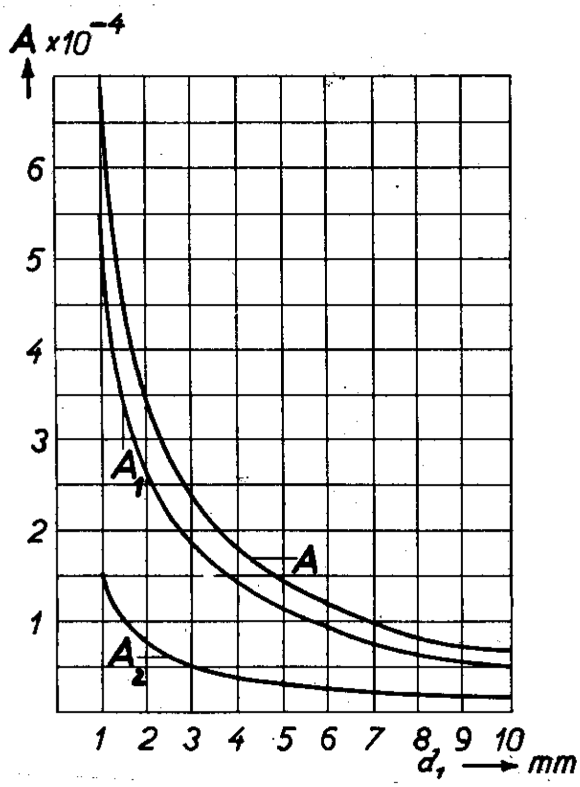
Die Grösse A ist der Widerstandsfaktor der konzentrischen Leitung, so dass der 1. Teil dieser Formel den Dämpfungsanteil wiedergibt, der durch die Widerstandsverluste entsteht. Diese Verluste steigen folglich mit der Wurzel aus der Frequenz. In dem 2. Teil der Formel sind die dielektrischen Verluste in dem Dielektrikumsfaktor B zusammengefasst worden, die also auf die Eigenschaften des verwendeten Isolierstoffes zurückzuführen sind und proportional mit der Frequenz ansteigen.

Auf dem Bild 1 sind die Formeln für A und B angegeben worden. Es geht daraus hervor, dass für die Widerstandsverluste der spezifische Widerstand des Mittelleiters ϱ_1 und der spezifische Widerstand ϱ_2 des Rück- oder Aussenleiters massgebend sind, sowie die Abmessungen der konzentrischen Leitung, ausgedrückt durch d_1 und d_2.

Weiterhin geht aber noch der Wellenwiderstand der Leitung in diese Formel ein, der wegen seiner Beziehung zu der Kapazität auch von der resultierenden Dielektrizitätskonstanten abhängig ist.

Wenn diese Zusammenhänge eingesetzt werden, ergibt sich eine zweite Formel für A, in der dann auch das Durchmesserverhältnis $d_2 : d_1 = N$ enthalten ist. Die Konstante B dagegen enthält gar keine Abhängigkeiten von den Abmessungen der konzentrischen Leitung, sondern nur von den Stoffeigenschaften der Isolierung ε und $\operatorname{tg}\delta$. Die Auswirkungen dieser bestimmenden Grössen A und B für die Dämpfung einer konzentrischen Leitung sollen nun an einigen Beispielen erläutert werden:

Vereinfachte Bedingungen liegen vor, wenn die Dielektrizitätskonstante gleich 1 gesetzt wird und damit der <u>theoretische</u> Fall einer reinen Luftraumisolierung ohne jegliche dielektrischen Verluste zugrundegelegt wird. Dann wirken sich hinsichtlich des Widerstandsfaktors A nur noch die geometrischen Abmessungen und die spezifischen Widerstände aus. Wenn nun auch noch der spezifische Widerstand ρ des Innenleiters und des Aussenleiters gleichgesetzt wird, und zwar mit dem Wert für Kupfer = etwa $1{,}75 \times 10^{-6}$ Ohm cm, so kann man aus Bild 2 die günstigsten Werte für A entnehmen in Abhängigkeit von dem Durchmesser des Mittelleiters.



$$A = \varphi(\rho_1, \rho_2, d_1, N, Z)$$

$$= A_1 \text{(Innenleiter)} + A_2 \text{(Aussenleiter)}$$

bei $\varepsilon = 1$

$N_{opt.} = 3{,}6$

$\rho_1 = \rho_2 = 1{,}75 \times 10^{-6}\ \Omega\,cm$

wenn $\left.\begin{matrix}\text{Innenleiter}\\ \text{Aussenleiter}\end{matrix}\right\}$ Cu

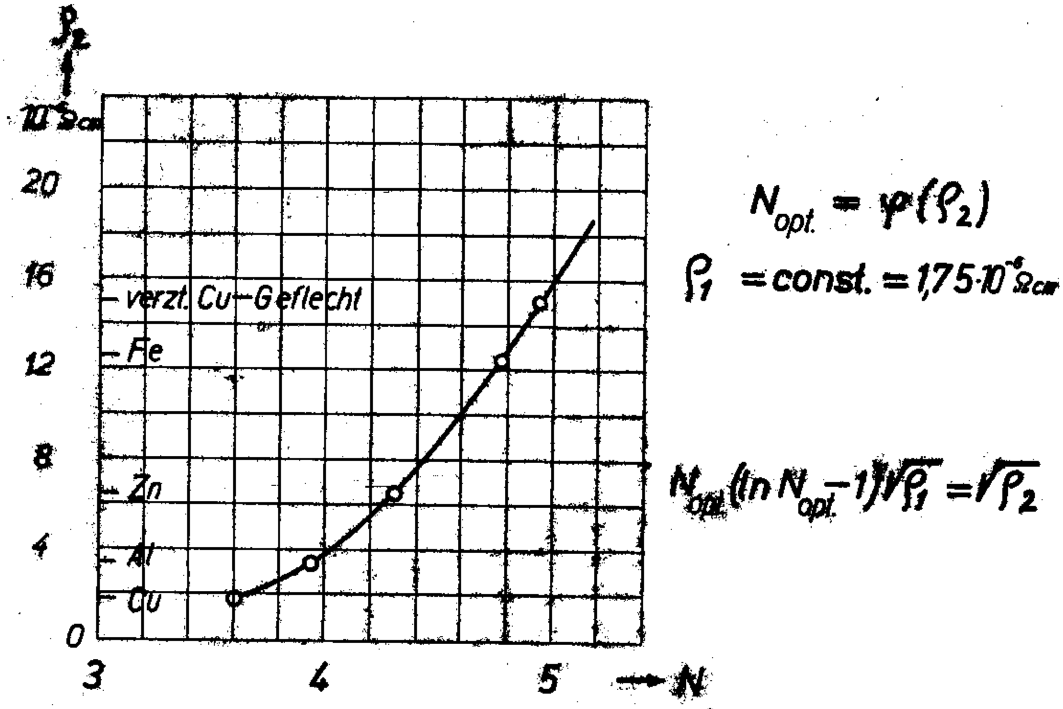
$$\beta_R = A \cdot \sqrt{f} \quad \left[\frac{\text{Neper}}{\text{km}}\right]$$

Abb.2 Widerstandsfaktor einer konzentrischen Leitung.

Dabei ist berücksichtigt, dass das Durchmesserverhältnis so gewählt ist, dass die niedrigste Dämpfung herauskommt. In dem hier vorliegenden Fall für Kupfer als Hin- und Rückleiterbaustoff ist das optimale Durchmesserverhältnis gleich 3,6 zu setzen. Die Aufteilung des Widerstandsfaktors A in A_1 und A_2 zeigt deutlich, dass der Dämpfungsanteil des Innenleiters bei weitem überwiegt.

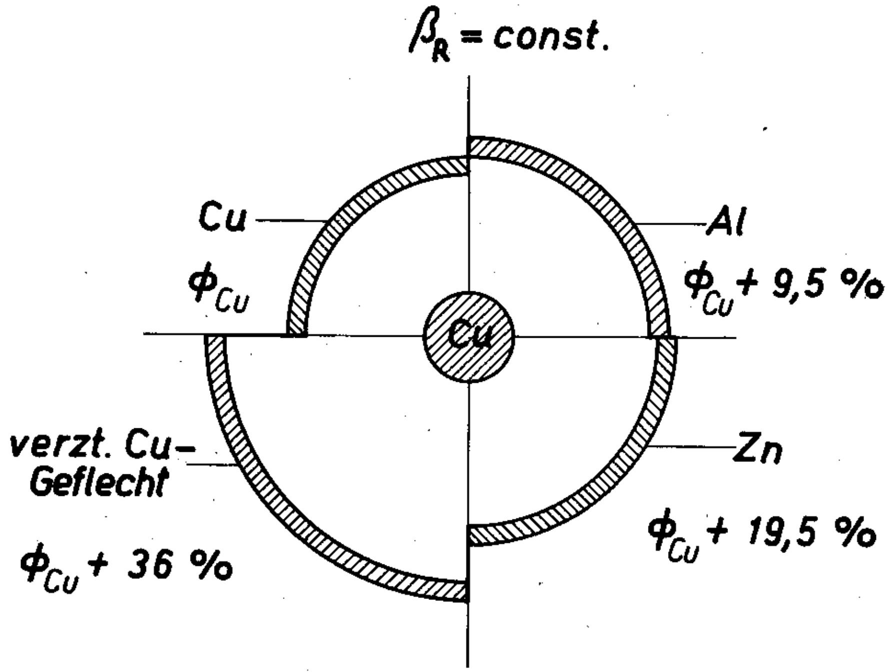
Die Optimumbedingung für das Durchmesserverhältnis kann nun auch für den Fall abgeleitet werden, dass der Rückleiter aus einem anderen Rohstoff als Kupfer besteht.

In Bild 3 ist eine Kurve für das günstigste Durchmesserverhältnis dargestellt, das bei verschiedenen Werten für den spezifischen Widerstand des Rückleiters besteht. Dabei sind die Werte für interessierende Baustoffe, wie Aluminium, Zink und Eisen eingetragen.



<u>Abb.3</u> Durchmesserverhältnis und Aussenleiterwiderstand bei konzentrischen Leitungen.

Man kann nun bei gegebenem Mittelleiter die Abmessung der konzentrischen Leitung angeben für eine möglichst geringe Widerstandsdämpfung, wobei ein widerstandsmässig schlechterer Baustoff für den Rückleiter durch eine Vergrösserung des Durchmesserverhältnisses ausgeglichen wird. In dem Bild 4 sind die Abmessungen von konzentrischen Leitungen gegenübergestellt, bei denen Kupfer, Aluminium und Zink als Baustoff für den Rückleiter gewählt werden.



<u>Abb.4</u> Lichte Weite einer konzentrischen Leitung bei verschiedenen Aussenleitern.

Die Verwendung von Aluminium bewirkt eine Durchmessererhöhung um fast 10 %, die von Zink eine Durchmessererhöhung von etwa 20 %, wenn derselbe Wert für die Widerstandsdämpfung eingehalten werden soll. Ein überraschendes Ergebnis liegt dann vor, wenn aus Messungen der Rückleiterwiderstand errechnet wird, den eine verzinnte Kupferdrahtbeflechtung, wie sie für Hochfrequenzkabel sehr verbreitet ist, besitzt. Um hier eine gleich niedrige Widerstandsdämpfung zu erhalten, muss der Durchmesser um 36 % erhöht werden. Daraus ergibt sich, dass der Hochfrequenzwiderstand einer solchen Beflechtung sehr ungünstig ist und einem Baustoff entsprechen würde, der einen spezifischen Widerstand von etwa 15×10^{-6} Ohm cm besitzt. Das ist aber ein 8 1/2 mal so hoher Wert wie ihn Kupfer aufweist. Wir werden später sehen, dass der Rückleiterwiderstand von ausschlaggebender Bedeutung wird, wenn es darauf ankommt, die kleinstmöglichen Dämpfungswerte zu erreichen.

Die Faktoren A und B geben erst im Zusammenhang mit den Abhängigkeiten von der Frequenz die Dämpfungswerte in Neper an, und es kommt hierbei darauf an, eine Vorstellung von der Auswirkung der einzelnen Komponenten zu erhalten. Zu dem Zweck ist es vorteilhaft, eine graphische Darstellung der Dämpfung in

Abhängigkeit von der Frequenz zu wählen, bei der beide Koordinaten gleichmässig logarithmisch geteilt sind. In dem Falle wird die Funktion $A \cdot \sqrt{f}$ eine Gerade mit der Neigung 0,5 darstellen, während die Proportionalität mit der Frequenz, wie sie bei der Dämpfung durch dielektrische Verluste entsteht, durch eine Gerade mit der Steigung 1 zum Ausdruck kommt. Die Gesamtdämpfung bildet die Summe beider Komponenten und kann somit nicht bei dieser Darstellung durch eine Gerade wiedergegeben werden.

In der Hochfrequenztechnik haben sich die Abmessungen des sogenannten Breitbandkabels besonders weitgehend eingeführt, unter dem meist ein konzentrisches Leitergebilde verstanden wird, dessen Mittelleiter 5 mm stark ist. Für diesen Fall ist die Zusammensetzung der Gesamtdämpfung aus Widerstandsdämpfung und Ableitungsdämpfung in dem folgenden Bild 5 dargestellt worden. Gegenüber der oben benutzten Vereinfachung, eine Dielektrizitätskonstante von 1, ist aber hier ein praktisch möglicher Wert einer Luftraumisolierung von 1,15 zugrundegelegt worden.

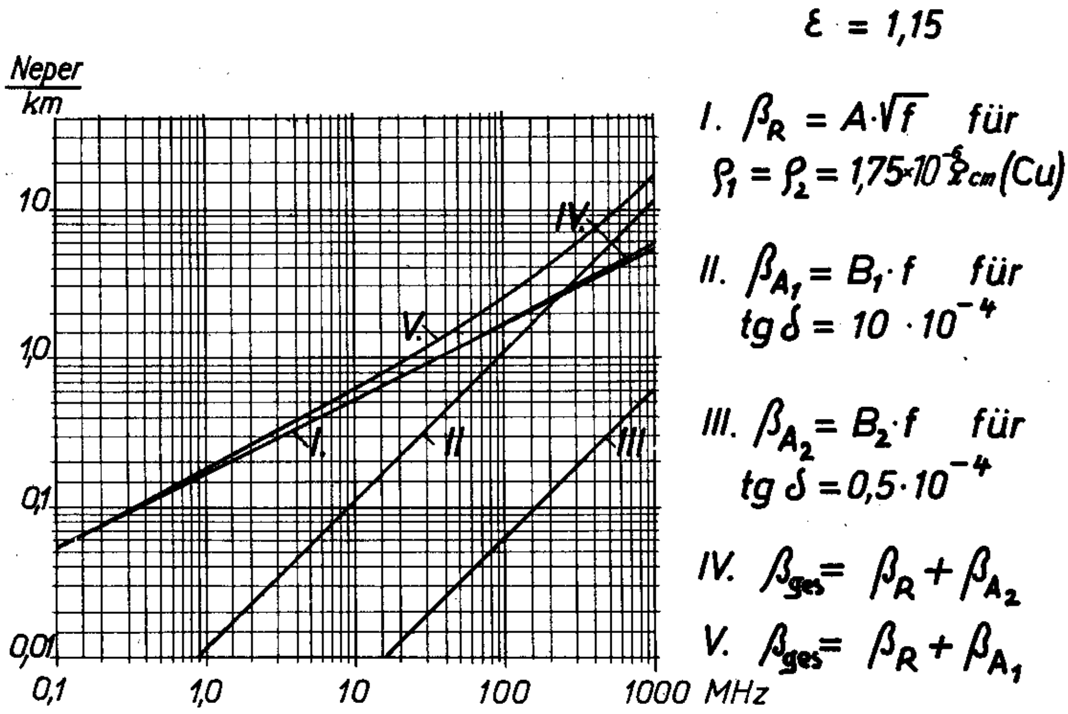


Abb. 5 Zusammensetzung der Dämpfung einer konzentrischen Leitung 5/18 mm Ø.

Die Widerstandsdämpfung ist für diesen Fall bei Kupfer- Hin- und Rückleitung in der Kurve I dargestellt. Je nach der Güte des Dielektrikums tritt zu dieser Widerstandsdämpfung die Ableitungsdämpfung hinzu. Bei einem extrem guten Wert für $tg\delta = 0{,}5 \times 10^{-4}$ erhöht sich die Gesamtdämpfung unter etwa 300 MHz praktisch gar nicht. Bei einem solchen Dielektrikum bestehen folglich keine Bedenken zur Verwendung bis zu den höchsten, heute interessierenden Frequenzen.

Anders dagegen ist es bei einer Ableitungsdämpfung, die auf einen dielektrischen Verlustfaktor von 10×10^{-4} zurückzuführen ist. Hier tritt bereits eine Divergenz der Kurven über 1 MHz in Erscheinung und oberhalb von 100 MHz wird der Anteil der Ableitungsdämpfung schon von entscheidender Bedeutung.

Heute übliche Isolierungen für Hochfrequenzkabel lassen sich in folgende 3 Bauprinzipien einordnen :

1) Isolierung aus einem dielektrisch hochwertigen Baustoff wie HF-Keramik oder Polystyrol, $tg\delta$ etwa 1×10^{-4}.

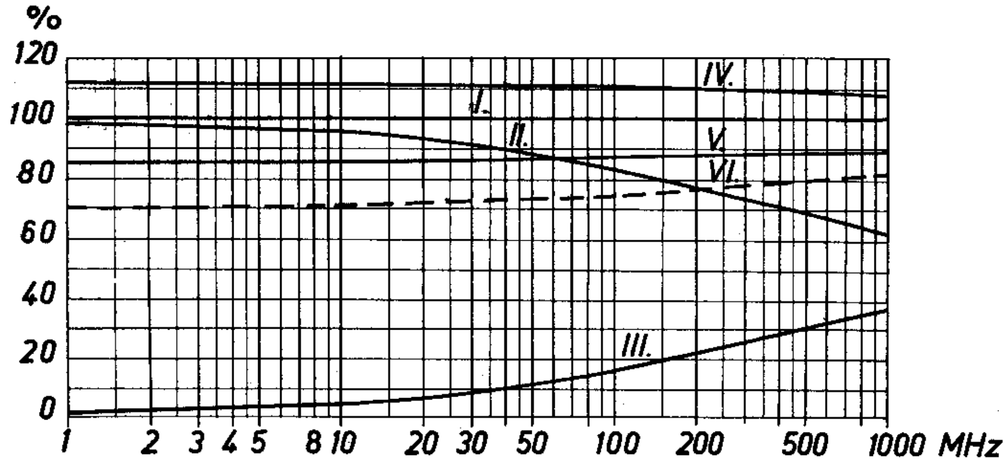
2) Vollisolierung auf Opanolbasis, mittlerer Wert für $tg\delta = 7 \times 10^{-4}$.

3) Fadenaufhängung des Mittelleiters, $tg\delta$ etwa 10×10^{-4}.

Die beiden obengenannten Grenzfälle haben gezeigt, dass für Kabel mit möglichst geringer Dämpfung und für sehr hohe Frequenzen die beiden letzten Ausführungsformen ausfallen, wenn es nicht gelingt, bei der Fadenaufhängung ein Polystyrolmaterial zu verwenden. Hier sind aber ganz aussichtsreich erscheinende Entwicklungsarbeiten im Gange.

Das Hochfrequenzkabel mit einem voll ausgefüllten Dielektrikum hat sich trotzdem, wenn der Dämpfungswert nicht entscheidend ist, in überaus grossem Maße in der Praxis eingeführt, weil es sich hierbei um eine mechanisch sehr widerstandsfähige Ausführung handelt. Eine besondere Bedeutung wird in Zukunft immer mehr diese Isolierung in Verbindung mit einem Zinkrohrmantel finden, da damit eine Kupferersparnis eintritt und damit die heutige Rohstofflage berücksichtigt wird.

Im Bild 6 ist die Gesamtdämpfung eines solchen Kabels mit 1,5 mm Leiter = 100 gesetzt worden und der prozentuale Anteil der Dämpfungskomponenten angegeben. Bei niedrigen Frequenzen ist der Anteil der Ableitungsdämpfung fast unmerklich, steigt aber dann bis 1000 MHz etwa bis 40 % an. Folglich nähert man sich hier sichtlich dem Frequenzbereich, wo die Widerstandsdämpfung nicht mehr ausschlaggebend ist, sondern die Güte des Dielektrikums.



$\varepsilon = 2{,}3$ Aussenleiter Zn

I. $\beta_{ges} = 100$

II. β_R [%]

III. β_A [%] für $tg\delta = 7 \cdot 10^{-4}$

IV. β_{ges} [%] für Cu-Geflecht

V. β_{ges} [%] für Cu-Mantel

VI. β_{ges} [%] für Zn-Mantel, jedoch für $\varepsilon = 1{,}1$

bezogen auf I.

Abb.6 Prozentualer Anteil der Dämpfungskomponenten beim konzentrischen Vollkabel mit Zn-Rohr-Mantel.

Zum Vergleich ist hier nun noch die Gesamtdämpfung angedeutet, die bei einem biegsamen Kabel mit einem Aussenleiter aus verzinntem Kupfergeflecht vorliegt und etwa 10 % höher liegt als bei einem Zn-Mantel. Etwa um denselben Prozentsatz tiefer liegt die Dämpfung, wenn ein Kupfermantel als Aussenleiter Verwendung findet.

Schliesslich ist noch ein weiterer Gewinn von etwa 12 % möglich, wenn ein Dielektrikum zur Anwendung käme, das die Dielektrizitätskonstante einer Luftraumisolierung besässe. Dazu besteht aber nach heutiger Kenntnis der Dinge bei einer Vollisolierung wenig Aussicht.

Als Schlussfolgerung aus diesen Darlegungen ist zu entnehmen, dass insbesondere bei hohen Frequenzen die Auswirkung des Aussenleiters auf die Dämpfung zu beachten ist und hier möglichst ein rohrförmiger Leiter gewählt werden sollte. Jedoch lässt sich diese Forderung dann schlecht erfüllen, wenn es sich um ein Hochfrequenz<u>kabel</u> handelt, also um ein Gebilde, das eine gewisse Biegsamkeit besitzen muss. Es ist aber zweifellos häufig der Fall, dass bei Hochfrequenzanlagen fest verlegte Leitungen möglich sind, die nur bei der Verlegung einmal in die richtige Lage gebogen werden. Wenn man in Anpassung an die bekannten Zinkrohrdrähte der Starkstrominstallationstechnik denkt, ist hier entsprechend eine Hochfrequenzleitung zweckmässig, die einen Zinkrohrmantel mit einer dielektrisch einwandfreien Isolierung kombiniert enthält und damit eine Hochfrequenz-Installationsleitung darstellt.

Es war Zweck dieser Ausführungen, den Einfluss der Stoffeigenschaften und Abmessungen auf die Gesamtdämpfung einer konzentrischen Leitung zu ermitteln und darzulegen und dabei zu Kabeln und Leitungen für die Praxis zu kommen, die die mechanischen Anforderungen der Hochfrequenztechnik am besten mit den elektrischen vereinen.