

Was zeigen Dämpfungs- und Impedanzkurven? = Comment interpréter les courbes d'affaiblissement et d'impédance?

Autor(en): **Nüsseler, Franz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **46 (1968)**

Heft 5

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875648>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Was zeigen Dämpfungs- und Impedanzkurven?

Comment interpréter les courbes d'affaiblissement et d'impédance?

Franz NÜSSELER, Bern

621.317.35.011.21.018.8

Zusammenfassung. Aus dem Verlauf der Dämpfungs- und Impedanzkurven lassen sich Schlüsse über den Aufbau einer Leitung und die Abschlussbedingungen ziehen. Die angeführten Beispiele behandeln die klassischen Fälle und sind mit den entsprechenden Kurven dokumentiert.

Résumé. On peut tirer de l'allure des courbes d'affaiblissement et d'impédance des conclusions sur la composition d'une ligne et les conditions de terminaison. Les exemples cités traitent les cas classiques et sont illustrés par les courbes correspondantes.

Che cosa indicano le curve d'attenuazione e d'impedenza?

Riassunto. Dal decorso delle curve d'attenuazione e d'impedenza si possono dedurre la struttura d'una linea e le condizioni di terminazione. Gli esempi elencati trattano i casi classici e sono documentati con le rispettive curve.

Wellendämpfung und Wellenwiderstand sind neben dem Phasenmass die eigentlichen Übertragungsgrössen einer Leitung. Die beiden ersten treten aber nur bei guter Homogenität und idealem Abschluss der Leitung unverfälscht in Erscheinung. Man kann somit aus Dämpfungs- und Impedanzkurven interessante Rückschlüsse auf die Schaltung ziehen. Frequenzverlauf von Impedanz und Dämpfung lassen sich heute bequem mit Pegelsichtgeräten darstellen. Bei aufmerksamer Betrachtung der Kurven kann man somit aus allfälligen Unregelmässigkeiten auf Fehler schliessen, vorausgesetzt, dass diese nicht bereits durch die Messschaltung bedingt sind. Zusätzliche Längs- oder Querelemente in einer Leitung wirken sich je nach Impedanz verschieden auf die Übertragungseigenschaften einer Leitung aus. Grundsätzlich muss die am Fehlerort auftretende Reflexion alle übrigen schwachen Reflexionen der Leitung dominieren. Dämpfung und Impedanz reagieren ihrer Natur nach verschieden auf Stossstellen.

Impedanzkurven

Der Wellenwiderstand Z_w entspricht an jedem beliebigen Punkt der Leitung dem Verhältnis von Spannungswelle zu zugehöriger Stromwelle

$$Z_w = \frac{U_x}{J_x} \quad \Omega$$

Ändert nun die Impedanz im Leitungszug, so müssen sich Spannung und Strom der neuen Bedingung anpassen, was eine rücklaufende Welle zur Folge hat. Am Leitungsanfang erscheint dann je nach Phasenlage zwischen abgehender und zurückgeworfener Welle eine höhere oder niedrigere Eingangsimpedanz

$$Z_1 = \frac{U_1}{J_1} = \frac{U_2 \cdot \cos h \gamma l + J_2 \cdot Z_w \cdot \sin h \gamma l}{J_2 \cdot \cos h l + \frac{U_2}{Z_w} \cdot \sin h \gamma \cdot l} \quad \Omega$$

U_2 = Spannung am Leitungsende

J_2 = Strom am Leitungsende

oder nach entsprechender Umformung

$$Z_1 = Z_w \cdot \frac{1 + r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}}{1 - r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}} \quad \Omega$$

L'affaiblissement et l'impédance caractéristiques sont, en plus du déphasage, les grandeurs essentielles définissant la qualité de transmission d'une ligne. Les deux premières n'apparaissent sans altération que si l'homogénéité est bonne et si la terminaison de la ligne est idéale. On peut donc tirer des courbes d'affaiblissement et d'impédance des conclusions intéressantes au sujet du circuit. L'allure de l'impédance et de l'affaiblissement en fonction de la fréquence peut aujourd'hui être démontrée commodément au moyen d'hypsoscopes. En observant attentivement les courbes, on peut même déduire d'éventuelles irrégularités l'existence de défauts, à condition qu'elles ne soient pas déjà provoquées par le dispositif de mesure. Des éléments supplémentaires branchés en série ou en parallèle sur une ligne exercent sur les qualités de transmission des actions différentes suivant l'impédance. La condition fondamentale est que la réflexion produite au lieu du défaut domine toutes les autres réflexions de la ligne. L'affaiblissement et l'impédance réagissent différemment aux irrégularités, suivant leur nature.

Courbes d'impédance

L'impédance caractéristique Z_w correspond à n'importe quel point de la ligne au rapport de l'onde de tension à l'onde de courant correspondante:

$$Z_w = \frac{U_x}{J_x} \quad \Omega$$

Si l'impédance du circuit change, la tension et le courant doivent s'adapter à la nouvelle condition, ce qui provoque une onde réfléchie. A l'extrémité de départ de la ligne apparaîtra alors une impédance d'entrée plus élevée ou plus basse suivant le déphasage entre l'onde partante et l'onde incidente:

$$Z_1 = \frac{U_1}{J_1} = \frac{U_2 \cdot \cos h \gamma l + J_2 \cdot Z_w \cdot \sin h \gamma l}{J_2 \cdot \cos h l + \frac{U_2}{Z_w} \cdot \sin h \gamma \cdot l} \quad \Omega$$

U_2 = tension à l'extrémité de la ligne

J_2 = courant à l'extrémité de la ligne,

ou, après une transformation correspondante,

$$Z_1 = Z_w \cdot \frac{1 + r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}}{1 - r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}} \quad \Omega$$

immer für den Fall, dass nur eine Stossstelle vorliegt.

Es bedeuten $r = \frac{Z_2 - Z_w}{Z_2 + Z_w}$ = Reflexionskoeffizient

- γ = Übertragungskonstante = $\alpha + j\beta$
- l = Leitungslänge bis zur Stossstelle
- α = Dämpfungsbelag
- β = Phasenbelag

Die Impedanz Z_2 ergibt sich an der Stossstelle je nach Art des Fehlers als Parallel- oder Serienschaltung mit dem Wellenwiderstand (Figur 1).

In der Formel für Z_1 kommt weiter zum Ausdruck, dass die Reflexion am Leitungsanfang doppelt gedämpft erscheint, die zurückgeworfene Welle hat die Leitung zweimal durchlaufen. Wenn also der Fehler zu wenig ausgeprägt ist, kann er durch die Leitungsdämpfung verdeckt werden. Auf Stossstellen empfindlich sind besonders Pupinleitungen, denn ihre Dämpfung ist gering. Für den Fall, dass das Produkt $r \cdot e^{-2\alpha l} \ll 1$

ist, ergibt sich der Eingangsscheinwiderstand zu

$$Z_1 \cong Z_w + 2 Z_w \cdot r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}$$

oder die Impedanzabweichung wird

$$\Delta Z_1 \cong 2 \cdot Z_w \cdot r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}$$

ΔZ_1 rotiert mit dem Winkel $2\beta l$ um den Wellenwiderstand, und der Eingangsscheinwiderstand erscheint als wellige Kurve. Für den Fall, dass

- $2\pi \cdot f L' > R'$
 - und $f < 0,7 \cdot f_0$
 - gilt $\beta \cong 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L' \cdot C'}$
- L' = Induktivitätsbelag
 - R' = Widerstandsbelag
 - f_0 = Grenzfrequenz des Kabels wenn pupinisiert
 - C' = Kapazitätsbelag

Somit ist die Welligkeit der Kurve eine direkte Funktion der Frequenz. Zwischen zwei einander folgenden Maxima

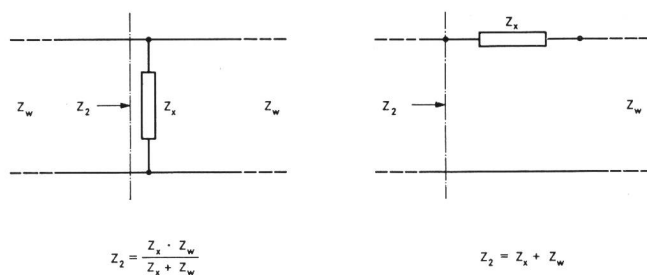


Fig. 1
Ersatzimpedanz bei Stossstelle mitten im Leitungszug
Impedanz resultante avec un point de réflexion sur la ligne

toujours pour le cas d'un seul point de réflexion.

où $r = \frac{Z_2 - Z_w}{Z_2 + Z_w}$ = coefficient de réflexion

- γ = constante de propagation $\alpha + j\beta$
- l = longueur de la ligne jusqu'au point de réflexion
- α = constante d'affaiblissement
- β = constante de phase

L'impédance Z_2 au point de réflexion apparaît, suivant le genre du défaut, comme une connexion en parallèle ou en série avec l'impédance caractéristique (figure 1).

La formule pour Z_1 démontre en plus que la réflexion apparaît à l'origine de la ligne doublement atténuée, l'onde réfléchie ayant parcouru la ligne deux fois. Si le défaut n'est donc pas assez prononcé, il peut être camouflé par l'affaiblissement de la ligne. Les lignes pupinisées sont particulièrement sensibles à des inhomogénéités, car leur affaiblissement est petit. Dans le cas où le produit $r \cdot e^{-2\alpha l} \ll 1$ l'impédance d'entrée sera donnée par

$$Z_1 \cong Z_w + 2 Z_w \cdot r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}$$

où

$$\Delta Z_1 \cong 2 \cdot Z_w \cdot r \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2j\beta l}$$

représente l'oscillation d'impédance.

ΔZ_1 tourne avec l'argument $2\beta l$ autour de l'impédance caractéristique et l'impédance d'entrée se présente avec des oscillations. Dans le cas où

- $2\pi \cdot f L' > R'$
 - et $f < 0,7 \cdot f_0$
 - on a $\beta \cong 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L' \cdot C'}$
- L' = inductance linéique
 - R' = résistance linéique
 - f_0 = fréquence de coupure dans le cas d'un câble pupinisé
 - C' = capacité linéique

Ainsi l'ondulation de la courbe est une fonction directe de la fréquence. Entre deux maximums ou minimums de la courbe d'impédance se succédant, le vecteur réfléchi a fait une rotation de phase complète de 2π , et on peut porter

$$2\pi = 2(\beta_2 - \beta_1) l = 2 \cdot 2\pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot \sqrt{L' \cdot C'} \cdot l$$

La vitesse de phase

$$V = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = 2 \cdot (f_2 - f_1) \cdot l$$

est contenue dans cette relation.

Comme la vitesse de phase est constante dans la bande de fréquences considérée, la relation entre la largeur d'une onde (en Hz) et la distance jusqu'au point de réflexion ressort clairement de la dernière formule. D'un défaut à proximité de l'origine de la ligne résultera une ondulation très étendue. L'inverse est valable pour des défauts éloignés, à condition que la réflexion ne soit pas trop affaiblie par la ligne.

oder Minima der Impedanzkurve hat der zurückgeworfene Vektor eine weitere volle Phasendrehung von 2π vollzogen, und es gilt

$$2\pi = 2(\beta_2 - \beta_1)l = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot \sqrt{L' \cdot C'} \cdot l$$

Darin ist die Phasengeschwindigkeit enthalten

$$V = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = 2 \cdot (f_2 - f_1) \cdot l$$

Da die Phasengeschwindigkeit im betrachteten Frequenzgebiet konstant ist, geht aus der letzten Beziehung der Zusammenhang zwischen Wellenbreite (in Hz) und Abstand zur Stosstelle eindeutig hervor. Für einen Fehler in der Nähe des Leitungsanfanges wird eine sehr gedehnte Welligkeit resultieren. Das umgekehrte gilt für entfernte Fehlerorte, vorausgesetzt, dass die Reflexion durch die Leitung nicht zu stark gedämpft ist.

Liegt die Stosstelle noch vor dem ersten Pupinpunkt, so ist das Phasenmass gleich Null, es entsteht keine Welligkeit, und man kann die Wirkung einer Parallel- oder Serienschaltung klar erkennen. In diesem Spezialfall ist dann der Fehler auch über die Grenzfrequenz hinaus erkennbar, denn eine Sperrwirkung tritt für die Reflexion noch nicht ein. In *Figur 2* sind die typischen Impedanzkurven dargestellt. Die Impedanz einer Leitung H-88,5 \varnothing 1,0 mm nach Kurve a) wird durch Parallelschalten mit 1200Ω zur Kurve b) reduziert. Den Widerstand von 1200Ω erkennt man bei sehr tiefer Frequenz und bei der Grenzfrequenz, bei denen in beiden Fällen der Wellenwiderstand sehr hoch ist. Erfolgt die Parallelschaltung zwischen Pupinpunkten 6 und 7, so

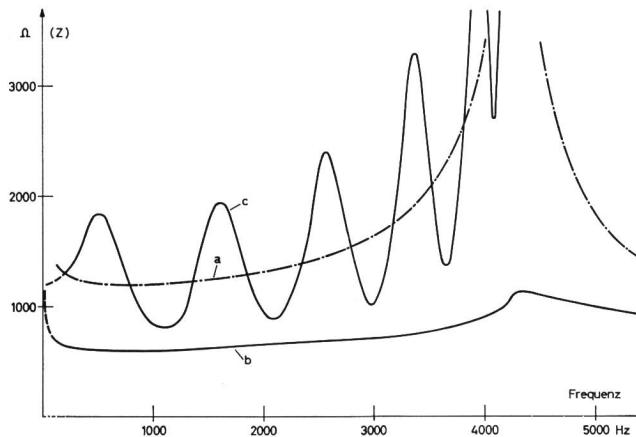


Fig. 2
Eingangsscheinwiderstand einer Pupinleitung H-88,5 \varnothing 1,0 mm
Impédance d'entrée d'un lacet pupinisé H-88,5 \varnothing 1,0 mm

Kurve a: normal
courbe a: cas normal
Kurve b: mit 1200Ω parallel am Leitungsanfang
courbe b: avec 1200Ω en parallèle à l'origine de la ligne
Kurve c: mit 1200Ω parallel nach Pupinspule 6
courbe c: avec 1200Ω en parallèle après la bobine Pupin n° 6

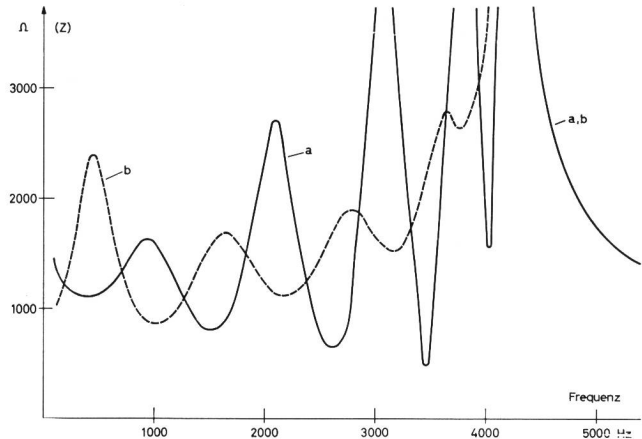


Fig. 3

Eingangsscheinwiderstand einer Pupinleitung H-88,5 \varnothing 1,0 mm
Impédance d'entrée d'un lacet pupinisé H-88,5 \varnothing 1,0 mm

Kurve a: Pupinspule 5 fehlt

courbe a: la bobine Pupin n° 5 fait défaut

Kurve b: nach Pupinspule 5 eine Induktivität zu 0,3 H parallel zur Leitung

courbe b: une inductivité de 0,3 H est branchée en parallèle à la ligne après la bobine Pupin n° 5

Si le défaut se trouve avant le premier point Pupin, le déphasage est égal à zéro; il n'en résulte point d'ondulation, et on peut reconnaître clairement l'effet d'une connexion en parallèle ou en série. Dans ce cas spécial, le défaut se fait sentir aussi en dessus de la fréquence de coupure, car il n'y aura point d'effet de blocage pour la réflexion. La *figure 2* montre les courbes d'impédance typiques. L'impédance d'une ligne H-88,5 \varnothing 1,0 mm, courbe a, est ramenée à la courbe b par une connexion en parallèle avec 1200Ω . On reconnaît la résistance de 1200Ω à une fréquence très basse et à la fréquence de coupure, où l'impédance caractéristique est très élevée pour les deux cas. Si la mise en parallèle se trouve entre les points Pupin 6 et 7, on obtient une impédance d'entrée ondulée selon la courbe c. Au-dessus de la fréquence de coupure, l'irrégularité ne se fait plus remarquer.

Suivant le genre du défaut, le coefficient de réflexion peut même varier en fonction de la fréquence, et on peut éventuellement, de l'allure de l'ondulation, tirer des conclusions sur la nature du défaut: une inductivité en parallèle à la ligne provoque une réflexion surtout aux fréquences basses. L'amplitude de l'ondulation de la courbe d'impédance sera donc grande à fréquence basse et diminuera en fonction de la fréquence. La courbe a de la *figure 3* est marquée par l'absence de la cinquième bobine Pupin, d'où résulte une capacité de 100% trop grande entre les points Pupin n° 4 et 6. L'ondulation de la courbe b est provoquée par une inductivité de 0,3 H en parallèle à la ligne. Jusqu'à 2000 Hz, les ondes des courbes a et b se distinguent aussi par leur

wird der Eingangsscheinwiderstand wellig nach Kurve c). Oberhalb der Grenzfrequenz macht sich der Fehler nicht mehr bemerkbar.

Je nach Art des Fehlers kann der Reflexionskoeffizient selbst stark frequenzabhängig sein, und es lässt sich aus dem Verlauf der Welligkeit möglicherweise auf die Natur des Fehlers schliessen: Eine Induktivität quer zur Leitung bewirkt eine Reflexion besonders bei tiefer Frequenz. Die Amplitude der Welligkeit der Impedanzkurve ist also gross bei tiefer Frequenz und nimmt mit steigender Frequenz ab. Bei der Kurve a) von *Figur 3* fehlt auf der Leitung die fünfte Pupinspule, wodurch zwischen Pupinpunkten 4 und 6 die Spulenfeldkapazität um 100 % zu gross wird. Die Welligkeit der Kurve b) wurde durch eine Induktivität von 0,3 H parallel zur Leitung hervorgerufen. Bis zu 2000 Hz unterscheiden sich die Wellen der Kurven a) und b) auch durch die Phasenlage: der Reflexionsfaktor hat einen verschiedenen Winkel, je nach Art des Fehlers. Bei der Interpretation einer welligen Impedanzkurve ist zu berücksichtigen, dass wegen der Dualität der Schaltungen unter Umständen zwei Varianten möglich sind: Eine Querkapazität parallel zur Leitung hat eine ähnliche Wirkung wie eine Serieinduktivität, und ein Serienkondensator kann eine Querinduktivität simulieren (*Figur 4*).

Da Betrag und Phase des Wellenwiderstandes der Leitung selbst frequenzabhängig sein können, kann sich auch ein konstanter (ohmscher) Fehler unterschiedlich auswirken.

Zur Aufnahme von Impedanzkurven sind für das ferne Leitungsende keine besonderen Messgeräte, dafür ist aber ein geeigneter Abschluss in Form einer Nachbildung erforderlich. Je niedriger die Leitungsdämpfung, desto besser muss der Abschluss passen. Ist ein Abschluss nicht verfügbar, so kann die zu untersuchende Leitung auf einer «gesunden» Leitung zurückgeschlauft werden. Je grösser die Leitungsdämpfung bis zum Abschluss ist, desto geringer wird die Auswirkung eines Kompromissabschlusses. Anzustreben wäre eine Rückflussdämpfung von

$$2\alpha \cdot l + A_r > 6 N$$

A_r = Reflexionsdämpfung am Leitungsende

Bei einem Pupinkabel ist weiter darauf zu achten, dass mit der Schlaufung wieder eine vollwertige Pupinsektion entsteht.

Weist die Leitung einen Unterbruch oder einen Kurzschluss auf, so ist ein Abschluss am fernem Ende nicht nötig.

Dämpfungskurven

Die direkte Aussage über die Brauchbarkeit einer Verbindung liefert die Dämpfungskurve. Dabei besteht der ge-

phase: der Koeffizient der Reflexion hat einen Winkel der Phase verschieden, je nach Art des Fehlers. En interprétant une courbe d'impédance ondulée, il ne faut pas oublier que, par suite de la dualité des schémas, deux variantes sont éventuellement possibles: une capacité en parallèle à la ligne a un effet similaire à celui d'une inductivité en série, et un condensateur en série peut simuler une inductivité en parallèle (*fig. 4*).

Comme le module et la phase de l'impédance caractéristique pourront dépendre eux-mêmes de la fréquence, un défaut constant (ohmique) peut donc avoir un effet variable.

Pour relever des courbes d'impédance, aucun instrument spécial n'est nécessaire à l'extrémité de la ligne, par contre une terminaison appropriée en forme d'équilibreur est exigée. Plus faible est l'affaiblissement de la ligne, mieux la terminaison doit être adaptée. A défaut d'une terminaison, on peut boucler en retour la ligne à analyser sur une ligne homogène. Plus l'affaiblissement jusqu'à la terminaison sera grand, d'autant plus faible sera l'effet d'une terminaison de compromis. Il conviendrait d'obtenir un affaiblissement d'écho de

$$2\alpha \cdot l + A_r > 6 N$$

A_r = affaiblissement de réflexion à la terminaison.

Dans le cas d'un câble pupinisé, il faut veiller que la boucle forme une section Pupin entière.

Si la ligne est interrompue ou court-circuitée, une terminaison à l'extrémité éloignée n'est pas nécessaire.

Courbes d'affaiblissement

La courbe d'affaiblissement fournit une information directe sur l'utilité d'une liaison. La valeur mesurée se compo-

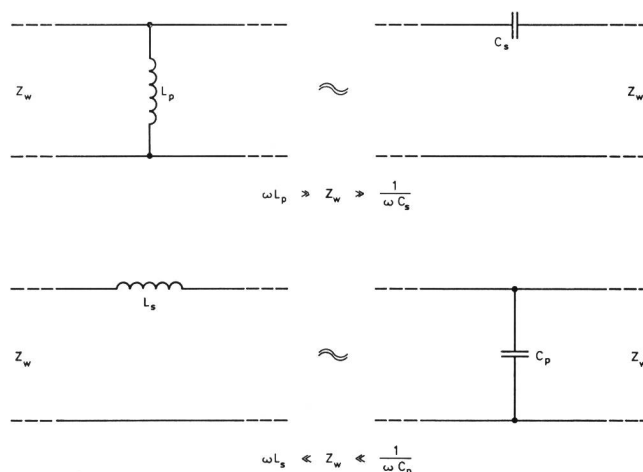


Fig. 4
Zusatzelemente in Leitung mit analoger Wirkung
Éléments avec effet analogue branchés sur la ligne

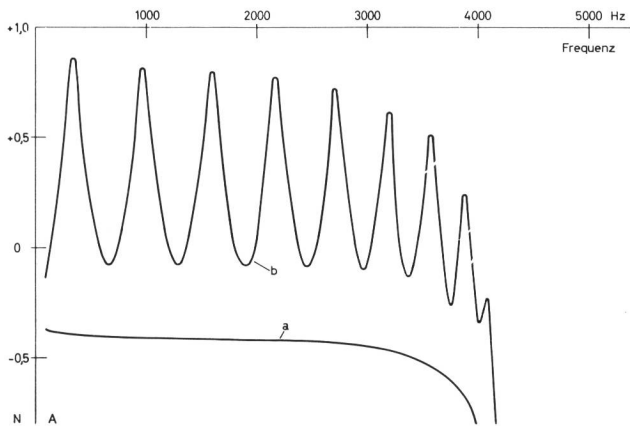


Fig. 5
 Kurve a: Wellendämpfungskurve einer Pupinleitung H-88,5 \varnothing 1,0 mm, Länge 18,3 km
 Kurve b: Dämpfungskurve der gleichen Leitung, Generatorinnenwiderstand = 0. Impedanz des Empfängers $> 30 \text{ k}\Omega$
 Kurve a: curve de l'affaiblissement caractéristique d'un lacet pupinisé H-88,5 \varnothing 1,0 mm, longueur 18,3 km
 Kurve b: courbe de la même ligne, résistance intérieure du générateur = 0. Impédance du récepteur $> 30 \text{ k}\Omega$

gemessene Wert wohl zur Hauptsache aus der Wellendämpfung, aber vermehrt um weitere Anteile. Es ist

$$A = \alpha \cdot l + A_{St1} + A_{St2} + \ln(1 - r_1 \cdot r_2 \cdot e^{-2\gamma l}) N$$

Darin bedeuten A_{St1} und A_{St2} die Stossdämpfungen am Anfang und Ende der Leitung (allenfalls noch weitere), während $\ln(1 - r_1 \cdot r_2 \cdot e^{-2\gamma l})$ die Auswirkung einer doppelt reflektierten Welle darstellt. Diese kann die resultierende Dämpfung, je nach den Phasenbedingungen am Empfangsende, erhöhen oder vermindern. Erscheint also eine Dämpfungskurve wellig, so ist dies auf zweifache Reflexion zurückzuführen. Der Extremfall liegt dann vor, wenn man mit konstanter Spannung sendet (niederohmige Quelle, $R_i = 0$) und am Leitungsende die Leerlaufspannung misst ($R_a = \infty$). Das Resultat zeigt Figur 5. Die Kurve a) entspricht der Wellendämpfung, die Kurve b) entstand bei Totalreflexion an beiden Enden.

Ist die Leitung an beiden Enden gut angepasst, wird ein dazwischenliegender Fehler keine merkbare Welligkeit verursachen, denn die Reflexion läuft sich tot. Je nach dem Charakter des Fehlers wird er aber eine zusätzliche Dämpfung verursachen. Denn an einem Seriewiderstand entsteht ein Spannungsabfall und an einem Querglied ein Stromverlust. Die Kurven der Figur 6 zeigen die Wellendämpfung (a) und die sich ergebende Dämpfung, wenn 1200 Ω einmal in Serie (b) und einmal parallel (c) zusätzlich zur Leitung geschaltet sind. Die Auswirkung des Fehlers hängt von der Leitungsimpedanz ab. Im Frequenzbereich, in welchem diese selbst 1200 Ω beträgt, ist die entstehende

se in majeure partie de l'affaiblissement linéique, mais augmenté par d'autres composantes. On a

$$A = \alpha \cdot l + A_{St1} + A_{St2} + \ln(1 - r_1 \cdot r_2 \cdot e^{-2\gamma l}) N$$

A_{St1} et A_{St2} représentent les pertes par désadaptation au départ et à l'extrémité (éventuellement encore d'autres pertes), tandis que $\ln(1 - r_1 \cdot r_2 \cdot e^{-2\gamma l})$ représente l'affaiblissement d'interaction. Celui-ci peut augmenter ou diminuer l'affaiblissement résultant, suivant les conditions de phase à l'extrémité de réception. Si une courbe d'affaiblissement se présente ondulée, il faut en chercher la cause dans une double réflexion. Le cas extrême se présente lorsqu'on émet avec tension constante (source avec résistance interne négligeable, $R_i = 0$) et en mesurant à l'extrémité la tension à vide ($R_a = \infty$). La figure 5 montre le résultat. La courbe a correspond à l'affaiblissement linéique et la courbe b se présente en cas de réflexion totale aux deux extrémités.

Lorsque la ligne est bien adaptée aux deux extrémités, un défaut sur la ligne ne causera aucune ondulation notable, car la réflexion se perdra. Mais, suivant le caractère du défaut, il entraînera un affaiblissement supplémentaire. Car sur une résistance en série se produit une chute de tension et sur un élément en parallèle une diminution de courant. Les courbes de la figure 6 montrent l'affaiblissement linéique (a) et l'affaiblissement résultant, lorsqu'on branche 1200 Ω une fois en série (b) et une fois en parallèle en supplément à la ligne. L'effet produit par le défaut dépend de l'impédance de la ligne. Dans le spectre de fréquence

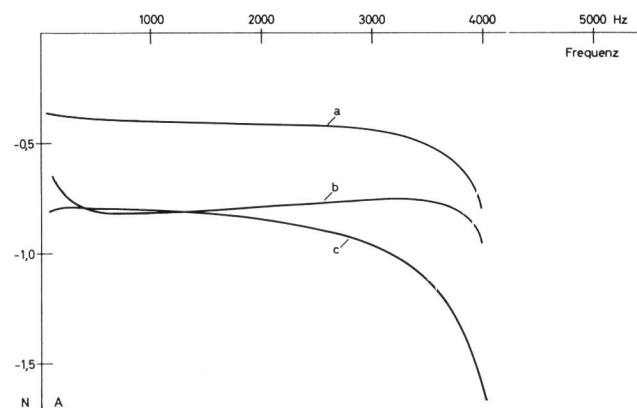


Fig. 6
 Kurve a: Wellendämpfung H-88,5 \varnothing 1,0 mm. Länge 18,3 km
 Kurve b: Dämpfung wenn zusätzlich 1200 Ω in Serie in einem Draht
 Kurve c: Dämpfung wenn zusätzlich 1200 Ω parallel zur Leitung
 Kurve a: affaiblissement caractéristique H-88,5 \varnothing 1,0 mm, longueur 18,3 km
 Kurve b: affaiblissement lorsque 1200 Ω sont branchés en série avec un fil
 Kurve c: affaiblissement lorsque 1200 Ω sont branchés en parallèle à la ligne

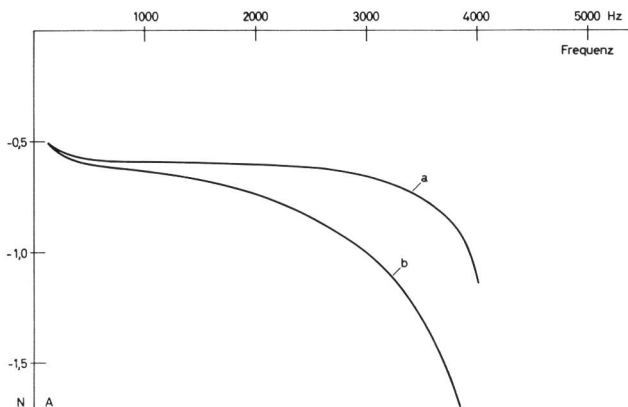


Fig. 7
 Kurve a: Wellendämpfung H-88,5 \varnothing 1,0 mm, Länge 27,45 km
 courbe a: affaiblissement caractéristique H-88,5 \varnothing 1,0 mm, longueur 27,45 km
 Kurve b: Eine Pupinspule ausgeschaltet
 courbe b: une bobine Pupin est déclenchée

Dämpfung für beide Fehlschaltungen gleich gross. Mit steigender Leitungsimpedanz verursacht die Parallelschaltung auch grössere Verluste.

Verlängert man eine Pupinsektion, so wird die Spulenfeldkapazität grösser, die Grenzfrequenz für den betroffenen Abschnitt herabgesetzt, und die Sperrwirkung setzt früher ein. *Figur 7* zeigt die Auswirkung, wenn eine Pupinspule ausgeschaltet ist (b). Der Unterschied zwischen den beiden Kurven veranschaulicht die zusätzliche Dämpfungsverzerrung.

Besondere Überraschungen kann man bei direkter Parallelschaltung von Leitungen erleben. Nur kurze am Ende isolierte Abzweige stellen für tiefe Frequenzen eine kapazitive Belastung dar. Sobald aber das Phasenmass $\beta \cdot l$ des Abzweiges über $\pi/4$ hinaus wächst, wird dessen Leerlaufimpedanz sehr niederohmig und verursacht eine Dämpfung der Signale auf der Hauptleitung. Bei der Pupinleitung ist die Dämpfung gering, das Phasenmass dafür gross und praktisch proportional zur Frequenz. Die Auswirkung eines klassischen Falles zeigt die *Figur 8*. Durch die Parallelschaltung entstehen Dämpfungspole (b). Nur bei den Frequenzen, bei denen der Abzweig verhältnismässig hochohmig ist, nähert sich die Kurve c) der Kurve a) des Idealalles. Schliesst man den Abzweig mit seiner Wellenimpedanz ab, verschwindet die Welligkeit (c), es bleibt aber die Zusatzdämpfung, resultierend aus der Leistungsteilung bei der Parallelschaltung und der damit verbundenen Fehlanpassung. In solchen Fällen leistet eine Gabelschaltung gute Dienste. Bei dieser sind die beiden Ausgänge voneinander entkoppelt, und ein Kurzschluss in einem Zweig beeinflusst den andern Zweig nicht. Schluss siehe S. 242

où celle-ci atteint aussi 1200 Ω , l'affaiblissement résultant est le même pour les deux fausses connexions. Lorsque l'impédance s'accroît, la mise en parallèle cause aussi des pertes plus élevées.

Lorsqu'on prolonge une section Pupin, la capacité devient plus grande, la fréquence de coupure du tronçon touché est réduite et l'effet de blocage commence plus tôt. La *figure 7* montre le résultat lorsqu'une bobine Pupin est déconnectée (b). L'écart entre les courbes représente la distorsion d'affaiblissement supplémentaire.

On peut rencontrer des surprises lors de la mise en parallèle directe de lignes. Seuls les embranchements isolés et courts représentent pour ces fréquences basses une charge capacitive. Dès que le déphasage $\beta \cdot l$ de l'embranchement dépasse $\pi/4$, son impédance à circuit ouvert devient très faible et entraîne un affaiblissement des signaux transmis sur la ligne principale. Sur la ligne pupinisée, l'affaiblissement est minime, le déphasage par contre très grand et pratiquement proportionnel à la fréquence. La *figure 8* montre le résultat d'un cas classique. La mise en parallèle engendre des crêtes d'affaiblissement (b). La courbe c ne se rapproche de la courbe a du cas idéal qu'aux fréquences pour lesquelles l'impédance de l'embranchement est relativement haute. En bouclant l'embranchement par son impédance caractéristique, on fait disparaître l'ondulation (c) mais il reste l'affaiblissement supplémentaire provenant de la division de la puissance au parallélisme et de la désa-

Fin voir p. 242

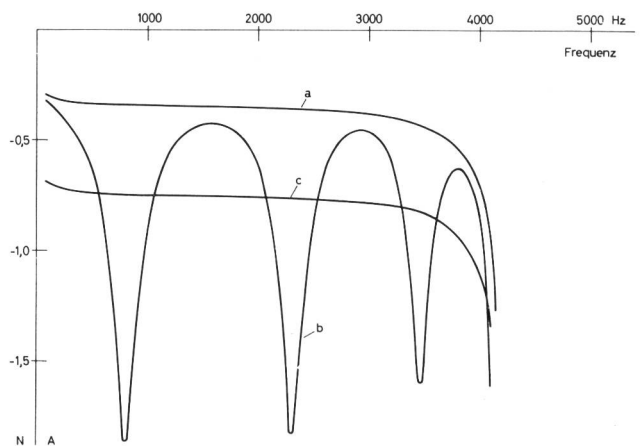


Fig. 8
 Kurve a: Wellendämpfung H-88,5 \varnothing 1,0 mm, Länge 16,5 km
 courbe a: affaiblissement caractéristique H-88,5 \varnothing 1,0 mm, longueur 16,5 km
 Kurve b: Dämpfung mit einem Abgang von 4 Pupinsektionen parallel, Ende offen
 courbe b: affaiblissement avec un embranchement de 4 sections Pupin en parallèle, extrémité ouverte
 Kurve c: Abgang am Ende reflexionsfrei abgeschlossen
 courbe c: embranchement fermé sur son impédance caractéristique