

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 41 (1963)

Heft: 10

Artikel: Homogenität der Pupinkabel = Homogénéité des câbles pupinisés

Autor: Nüsseler, F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874341>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 11.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Homogenität der Pupinkabel

Homogénéité des câbles pupinisés

Zusammenfassung. Von Pupinkabeln verlangt man, dass alle Spulenfelder gleich lang sind und gleiche Kapazität aufweisen. Diese strenge Forderung gilt heute mehr denn je. Im vorliegenden Aufsatz wird versucht, die Zusammenhänge zwischen den Längsstreuungen und der Rückflussdämpfung zu zeigen. Es werden die Grenzen der zulässigen Streuung gesucht und durch Messergebnisse dokumentiert. Zuhanden des Praktikers werden die Mittel und Wege zur Erfüllung der Forderung auf Homogenität beschrieben.

Résumé. On exige des câbles pupinisés que toutes les sections Pupin aient la même longueur et la même capacité. Ces conditions rigoureuses sont de plus en plus nécessaires. Dans cet article, nous tentons de montrer les relations liant les écarts longitudinaux à l'affaiblissement de régularité. Il s'agit de définir les limites des écarts admissibles sur la base des mesures effectuées. Les moyens permettant de satisfaire aux conditions d'homogénéité sont décrits à l'intention du praticien.

1. Allgemeines

Unser Strassennetz erfährt heute eine starke Erweiterung und Umgestaltung. Neue Strassen werden gebaut, bestehende den Anforderungen des gewaltig gestiegenen Verkehrs angepasst. Strassenbauten bedingen nur zu oft die Umlegung von Kabeln. Aber auch bei andern Bauprojekten wird kaum Rücksicht auf die das Land unsichtbar durchquerenden Kabelstränge genommen. Aus naheliegenden Gründen stellen die Kabel meistens die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten dar, somit ist jede Trasseverlegung mit Mehrlängen verbunden. Da aber beträchtliche Verlegungen oft nur scheinbar geringe Zusatzlängen erfordern, ist man geneigt, der Auswirkung auf die Übertragungseigenschaften keine besondere Beachtung zu schenken. Diese Überlegung mag für die Dämpfung der Niederfrequenzleitungen (Fig. 1) zutreffen, handelt es sich aber um ein verstärktes, pupinisiertes Kabel, so entsteht durch die eingesetzte zusätzliche Länge eine Reflexion – das Kabel ist nicht mehr homogen.

2. Warum homogene Kabel?

Die klassische Entdämpfung einer Zweidrahtleitung bedingt die Trennung der beiden Sprechrichtungen durch Gabelschaltungen. Die Entkopplung gelingt nur soweit als es möglich ist, die Impedanz der anschliessenden Zweidrahtleitung durch ein Netzwerk nachzubilden. Folgende Bedingung muss eingehalten werden (Fig. 2):

$$A_{F1} + A_{F2} > g_1 + g_2$$

Es bedeuten:

g_1 und g_2 die Betriebsverstärkungsgrade,
 A_{F1} und A_{F2} die Fehlerdämpfungen an den Gabelschaltungen.

Die Fehlerdämpfungen wiederum sind durch folgende Beziehungen gegeben:

$$A_{F1} = \ln \frac{Z_1 + N_1}{Z_1 - N_1} \quad A_{F2} = \ln \frac{Z_2 + N_2}{Z_2 - N_2}$$

1. Généralités

Le réseau routier connaît des extensions importantes et de profondes modifications. De nouvelles artères sont tracées, adaptées aux exigences d'un trafic toujours plus intense. Les constructions routières nous contraignent souvent à détourner les câbles. Mais même en établissant d'autres projets de construction, on ne tient pas toujours compte des câbles existants. Pour des raisons faciles à comprendre, le tracé d'un câble correspond dans la plupart des cas au plus court chemin entre deux points. Chaque modification entraîne donc une augmentation de longueur. Comme un déplacement important ne paraît entraîner souvent qu'une augmentation réduite de la longueur, on est porté à ne pas considérer les caractéristiques de transmission avec suffisamment d'attention. Si cette façon de procéder peut être tolérée lorsqu'il s'agit seulement de l'affaiblissement de lignes à basse fréquence (fig. 1), il n'en est pas de même pour les lignes pupinisées amplifiées. La longueur supplémentaire introduit une réflexion; le câble n'est plus homogène.

2. Pourquoi des câbles homogènes?

L'amplification classique d'une ligne à deux fils conduit à la séparation des deux sens de transmission par un termineur. Le découplage est réalisé en tant qu'il est possible de reproduire l'impédance de la ligne deux fils au moyen d'un réseau spécial, l'équilibreur. La condition suivante doit être respectée (fig. 2):

$$A_{F1} + A_{F2} > g_1 + g_2$$

Légende:

g_1 et g_2 gains de chaque sens d'amplification
 A_{F1} , A_{F2} affaiblissements d'équilibrage aux termineurs.

Les affaiblissements d'équilibrage sont donnés par les relations suivantes:

$$A_{F1} = \ln \frac{Z_1 + N_1}{Z_1 - N_1} \quad A_{F2} = \ln \frac{Z_2 + N_2}{Z_2 - N_2}$$

Z_1 et Z_2 représentent les impédances d'entrée de la

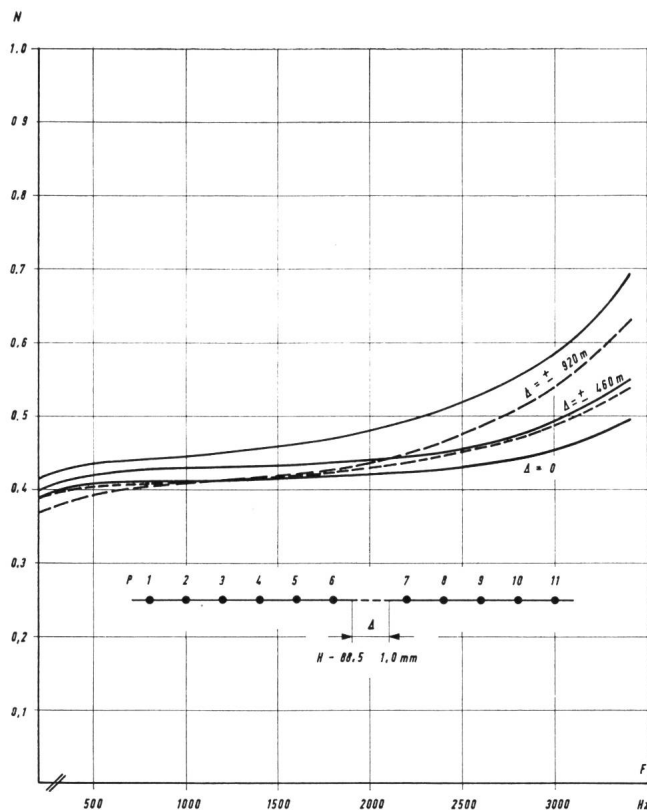


Fig. 1. Kabeldämpfung und ungenaue Pupinsektion
Affaiblissement du câble et section Pupin anormale

Z_1 und Z_2 stellen die Eingangsscheinwiderstände der Leitung dar; sie ergeben sich aus den Wellenwiderständen und allfälligen Reflexionen.

Für die Pupinleitung ist die Wellenimpedanz mit grosser Annäherung durch

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 LC}{4}}}$$

gegeben, wobei L der Induktivität der Pupinspulen und C der Kapazität der Pupinsektion gleichkommt.

Der Wellenwiderstand jeder Pupinsektion entspricht aber auch dem Verhältnis von Spannung zu Strom. Ändert nun das Verhältnis von L zu C an einer Stelle des Kabels, so entsteht zwangsläufig eine Reflexion; Energie läuft an den Anfang der Leitung zurück. Die Folge davon ist eine Eingangsimpedanz Z_1 , die wellig ist und sich durch ein Netzwerk nur noch beschränkt nachbilden lässt. Ungenügende Fehlerdämpfungen haben bei Verstärkung zusätzliche Verzerrungen und Welligkeit der Dämpfungskurve zur Folge; in extremen Fällen kann die Leitung sogar pfeifen.

Auch wenn noch nicht alle Leitungen mit Zweidrahtverstärkern beschaltet sind, muss gerade heute der Homogenität die notwendige Beachtung geschenkt werden. Mit der kommenden Vierdrahtdurchschaltung wird in absehbarer Zeit jedes Fernendamt zu einem Verstärkeramt. An die Stelle der Wahlverstärkung tritt dann die feste Entdämpfung mit Endverstärkern, wobei auch das Bezirksnetz mit-einbezogen wird.

ligne; elles sont données par l'impédance caractéristique et les réflexions éventuelles.

Pour les lignes pupinisées, nous obtenons, d'une manière très approchée, l'impédance caractéristique par la formule suivante:

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 LC}{4}}}$$

dans laquelle L correspond à l'inductivité des bobines Pupin, et C à la capacité de la section de pupinisation.

L'impédance caractéristique de chaque section Pupin est égale au rapport de la tension et du courant. Le rapport de l'inductivité L à la capacité C est-il modifié en un point du câble, il apparaît inévitablement une réflexion provoquant un reflux d'énergie. Il s'ensuit que l'impédance d'entrée Z_1 ne correspond pas parfaitement à l'impédance caractéristique et qu'elle ne peut être reproduite que dans des limites restreintes, par un équilibreur. Un affaiblissement d'équilibrage insuffisant produit en cas d'amplification une augmentation de la distorsion et des ondulations de la courbe d'affaiblissement; dans les cas extrêmes, cela peut même conduire à des sifflements.

Même si, de nos jours, toutes les lignes ne sont pas encore équipées d'amplificateurs deux fils, il est nécessaire de vouer toute son attention à l'homogénéité. Avec l'introduction de la connexion 4 fils, chaque central interurbain terminus deviendra, dans un proche avenir, une station de répéteurs. En lieu et place d'amplificateurs commutés, nous aurons des amplificateurs terminaux à gain fixe qui équiperont également le réseau rural.

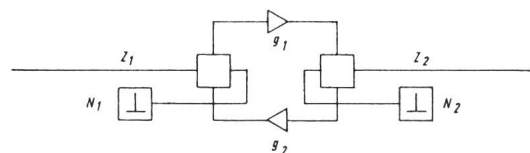


Fig. 2.

3. Longueur additionnelle et réflexions

Comme nous l'avons dit plus haut, il se produit des réflexions lorsque le rapport L/C est perturbé. Le maintien d'une inductivité constante pour le même circuit ne présente aujourd'hui plus de difficultés particulières: les bobines Pupin sont montées dans les caissons, dans l'ordre décroissant de leurs valeurs, ce qui entraîne une réduction notable de l'écart longitudinal de chaque ligne.

L'utilisation de câbles toronnés en étoile, relativement homogènes, permet, si l'on respecte les prescriptions de montage, d'obtenir une ligne à faible réflexion. Des difficultés apparaissent souvent, après coup, lors du déplacement d'un câble et il est intéres-

3. Mehrlänge und Reflexion

Wie bereits dargelegt, entstehen Reflexionen, wenn das Verhältnis von L/C gestört ist. Die Einhaltung einer gleichmässigen Induktivität für denselben Stromkreis bereitet heute keine besonderen Schwierigkeiten mehr: die Pupinspulen sind nach fallenden Werten in die Kasten eingebaut, wodurch die Streuung je Leitung ganz beträchtlich vermindert wird. Aber auch die verwendeten sternverseilten Kabel sind verhältnismässig homogen, und bei richtiger Anwendung der Montagevorschriften gelingt es, Kabel mit geringen Reflexionen zu bauen. Die Schwierigkeiten treten meist erst später bei Umbauten auf. Es interessiert nun der Zusammenhang zwischen Mehrlänge und Reflexion.

Eine Mehr- oder Minderlänge einer Pupinsektion kann als Parallelschaltung einer Kapazität zum Wellenwiderstand Z_w betrachtet werden. Es wird dann

$$Z' = \frac{Z_w}{1 \pm j \omega \Delta C \cdot Z_w}$$

Zwischen der Impedanz Z_w und Z' entsteht eine Stossstelle mit folgendem Reflexionsfaktor:

$$r = \frac{Z' - Z_w}{Z' + Z_w} = \frac{\pm j \omega \Delta C \cdot Z_w}{2 \pm j \omega \Delta C \cdot Z_w}$$

Die Reflexion ist also nicht nur durch die Grösse des Kapazitätssprunges gegeben, sondern auch von der Frequenz und der Wellenimpedanz abhängig. Der Ausdruck für den Reflexionsfaktor lässt sich aber nach G. Chardon¹ in eine allgemein gültige Form umwandeln:

$$r = \frac{\operatorname{tg} \frac{b}{2} \cdot K_c}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \frac{b}{2} \cdot K_c^2 + 1}} \quad \text{worin} \quad \sin \frac{b}{2} = \frac{f}{f_0} \quad K_c = \frac{\Delta C}{C}$$

und f_0 = Grenzfrequenz

bedeuten.

Mit Hilfe dieser Beziehung wurde die Kurvenschar gemäss Figur 3 errechnet. Sie zeigt die Reflexionsdämpfung $A_r = \ln \frac{1}{r}$ für verschiedene Streuungen der Induktivität und Kapazität in Abhängigkeit von der relativen Frequenz $\frac{f}{f_0}$. Auch hier kommt deutlich zum Ausdruck, dass Induktivitäts- und Kapazitätssprünge die Reflexionsdämpfung bei den höheren Frequenzen beeinflussen.

4. Rückflussdämpfung und regelmässige Streuungen

Der Reflexionsfaktor entspricht dem Amplitudenverhältnis von zurückgeworfener zu einfallender Welle. Auf den Leitungsanfang übertragen, wird der

¹ G. Chardon. Calcul des irrégularités d'impédances des lignes pupinisées. Annales des PTT, Paris, 1937, p. 983.

sant de rechercher la relation entre la longueur additionnelle et la réflexion.

L'allongement ou le raccourcissement de la section Pupin revient à connecter une capacité en parallèle sur l'impédance caractéristique Z . On a:

$$Z' = \frac{Z_w}{1 \pm j \omega \Delta C \cdot Z_w}$$

Un point de réflexion apparaît entre les impédances Z et Z' dont le facteur de réflexion est donné par la formule suivante:

$$r = \frac{Z' - Z_w}{Z' + Z_w} = \frac{\pm j \omega \Delta C \cdot Z_w}{2 \pm j \omega \Delta C \cdot Z_w}$$

La réflexion n'est pas seulement fonction des variations de capacité, mais encore de l'impédance caractéristique et de la fréquence. L'expression du facteur de réflexion, selon la formule de G. Chardon¹, peut être mise sous une forme plus générale, dans laquelle:

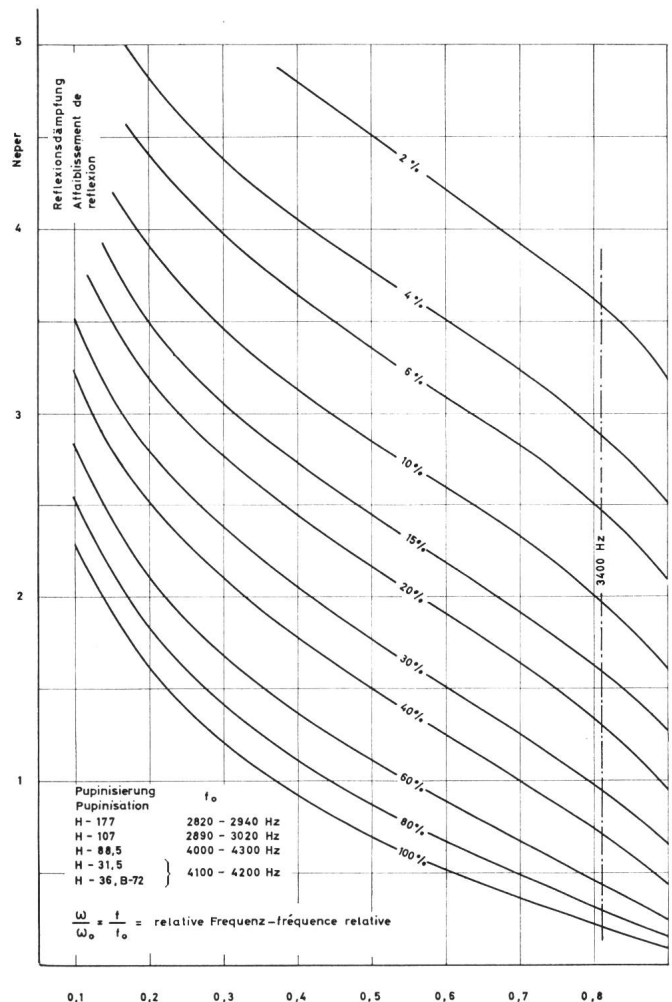


Fig. 3. Reflexionsdämpfung und Streuung $\frac{\Delta L}{L_0}$ und $\frac{\Delta C}{C_0}$ % der Pupinsektion

Affaiblissement de réflexion et écarts $\frac{\Delta L}{L_0}$ et $\frac{\Delta C}{C_0}$ %

Abstand der Amplituden durch die Leitungsdämpfung grösser, der Reflexionsfaktor entsprechend geringer, und es gilt:

$$|r_o| = |r_x| \cdot e^{-2\alpha x}$$

Da aber meistens verschiedene Stossstellen bestehen, sammeln sich die Reflexionen und bilden am Anfang der Leitung einen Gesamtückfluss. Wegen der Verschiedenheit in der Phasenlage kommt nur eine quadratische Addition der Reflexionen in Betracht. Es ist

$$|r_{o\ res}| = \sqrt{|r_{o1}|^2 + |r_{o2}|^2 + |r_{o3}|^2 + \dots}$$

und man erhält daraus die Rückflussdämpfung zu:

$$Ar_{o\ res} = \ln \left| \frac{1}{r_{o\ res}} \right|$$

Was besonders interessiert, ist die Auswirkung von regelmässigen, geringen Streuungen, wie sie sich in der Praxis ergeben. Setzt man voraus, dass jede Pupinsektion annähernd die gleiche Streuung um den Mittelwert aufweist, ergibt sich der resultierende Reflexionsfaktor zu:

$$|r_{o\ res}|^2 = |r|^2 + |r|^2 \cdot e^{-4a} + |r|^2 \cdot e^{-8a} + \dots + |r|^2 \cdot e^{-4na}$$

a = Dämpfung je Pupinsektion

n = Anzahl Pupinsektionen

Da es sich um eine abbrechende geometrische Folge handelt, erhält man das Resultat:

$$|r_{o\ res}|^2 = |r|^2 \cdot \frac{1 - e^{-4na}}{1 - e^{-4a}} \cong |r|^2 \cdot \frac{1 - e^{-4na}}{4a}$$

$$|r_{o\ res}| = |r| \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-4na}}{4a}}$$

Mit dieser Formel rechnen wir folgendes Beispiel aus:

Die mittlere Kapazitätsstreuung der Pupinsektionen eines Kabels H-88,5 $\varnothing$ 1,0 mm, beläuft sich auf $\pm 2\%$. Da die Auswirkung der Kapazitätssprünge bei den höheren Frequenzen schlimmer und zudem wegen der Entzerrung der Leitungen die Verstärkung entsprechend höher ist, interessiert die resultierende Reflexionsdämpfung bei 3400 Hz. Die Dämpfung beträgt 0,0458 N/Pupinsektion bei der betrachteten Frequenz. Das Kabel hat 11 Pupinsektionen (20 km).

Der Streuung von 2% entspricht ein Reflexionsfaktor von $r = 0,0273$ ($A_r = 3,6$ N) je Sektion. Damit wird

$$r_{o\ res} = 0,0273 \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-4 \cdot 11 \cdot 0,0458}}{4 \cdot 0,0458}} = 0,0594$$

oder die Rückflussdämpfung

$$Ar_{o\ res} = 2,82 \text{ N}$$

Dieser Wert entspricht ungefähr der von einer älteren Kabelanlage zu erwartenden minimalen Rückflussdämpfung. Aus dem Beispiel kann auch der Schluss gezogen werden, dass Kapazitäts- (einschliesslich Längen-) Streuungen von $\pm 2\%$ schon eine verhältnismässig niedrige Rückflussdämpfung zur Folge haben. Die Forderungen zur Erreichung einer guten Längshomogenität sind also nicht unbe-

$$r = \frac{tg \frac{b}{2} \cdot K_c}{\sqrt{tg^2 \frac{b}{2} \cdot K_c^2 + 1}} \quad \text{où } \sin \frac{b}{2} = \frac{f}{f_o} \quad K_c = \frac{\Delta C}{C}$$

et f_o = fréquence de coupure

La famille de courbes de la figure 3 a été calculée à l'aide de cette relation. Elle montre l'affaiblissement de réflexion $A_r = \ln \frac{1}{r}$ pour divers écarts de l'inductivité et de la capacité, en fonction de la fréquence relative $\frac{f}{f_o}$. Il en ressort clairement que les variations de l'inductivité et de la capacité ont une influence sur l'affaiblissement de réflexion aux fréquences élevées.

4. L'affaiblissement de régularité et variation uniformément réparties

Le facteur de réflexion correspond au rapport des amplitudes de l'onde réfléchiée à l'onde incidente. Rapporté aux conditions à l'entrée de la ligne, l'écart des amplitudes est augmenté de l'affaiblissement de ligne et le facteur de réflexion est diminué en proportion. La relation suivante est valable:

$$|r_o| = |r_x| \cdot e^{-2\alpha x}$$

Cependant, comme dans la plupart des cas on a affaire à plusieurs irrégularités, les réflexions s'additionnent en un reflux à l'origine. Pour tenir compte des différentes phases, seule une addition quadratique des réflexions entre en ligne de compte:

$$|r_{o\ res}| = \sqrt{|r_{o1}|^2 + |r_{o2}|^2 + |r_{o3}|^2 + \dots}$$

d'où l'on tire l'affaiblissement de régularité:

$$Ar_{o\ res} = \ln \left| \frac{1}{r_{o\ res}} \right|$$

Il est particulièrement intéressant de connaître l'effet des petits écarts de régularité apparaissant à intervalles réguliers tels qu'ils sont produits dans la pratique. Si l'on admet que chaque section Pupin présente approximativement le même écart au voisinage de la valeur moyenne, le facteur de réflexion résultant sera:

$$|r_{o\ res}|^2 = |r|^2 + |r|^2 \cdot e^{-4a} + |r|^2 \cdot e^{-8a} + \dots + |r|^2 \cdot e^{-4na}$$

a = affaiblissement d'une section Pupin

n = nombre de sections Pupin

En développant en une série géométrique discontinue, on obtient alors:

$$|r_{o\ res}|^2 = |r|^2 \cdot \frac{1 - e^{-4na}}{1 - e^{-4a}} \cong |r|^2 \cdot \frac{1 - e^{-4na}}{4a}$$

$$|r_{o\ res}| = |r| \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-4na}}{4a}}$$

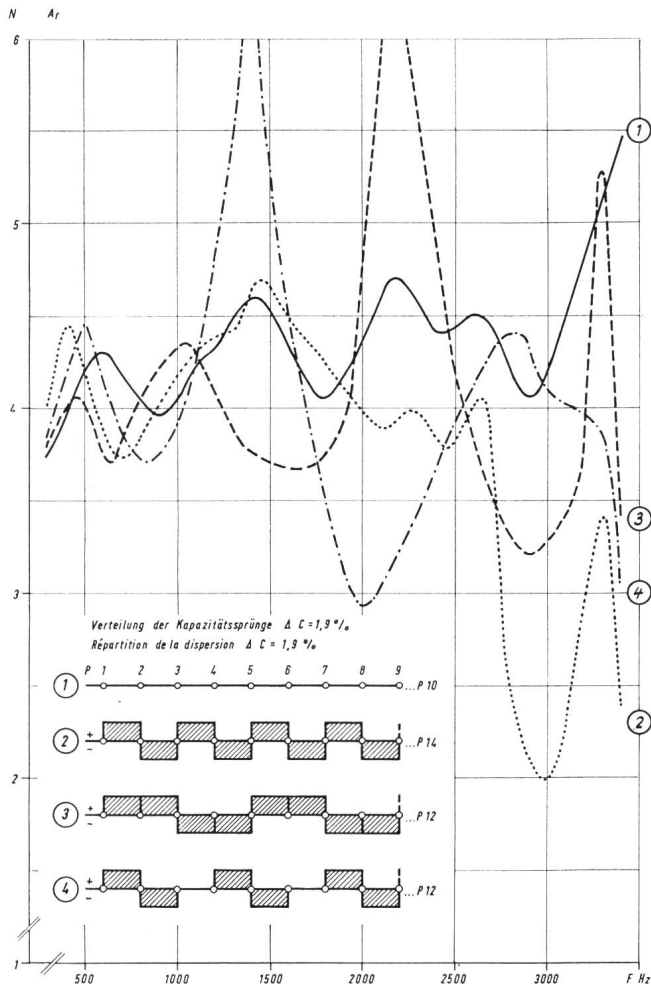


Fig. 4. Rückflussdämpfung einer Pupinleitung H-88,5 1,0 Ø mit Kapazitätsstreuungen
Affaiblissement de régularité d'une ligne pupinisée H-88,5 1,0 Ø avec variations des capacités

gründet. In der Formel für $r_{o\text{ res}}$ wird das Glied e^{-4na} mit zunehmender Leitungsdämpfung immer kleiner. Unter der Voraussetzung, dass $e^{-4na} \ll 1$ ist, vereinfacht sich die Formel, und die resultierende Reflexion am Leitungsanfang wird mit guter Annäherung

$$r_{o\text{ res}} \cong \frac{r}{2 \cdot \sqrt{a}}$$

und

$$Ar_{o\text{ res}} \cong \ln \frac{1}{r} + \ln 2 \cdot \sqrt{a}$$

Dadurch kommt zum Ausdruck, dass mit zunehmender Leitungsdämpfung, die Rückflussdämpfung einem Grundwert zustrebt, das heisst, die weit entfernten Stossstellen leisten keinen wesentlichen Beitrag mehr zum Rückfluss. Für das angeführte Beispiel würde der Grundwert 2,75 Neper betragen.

5. Durchgeführte Messungen

Die im obigen Abschnitt aufgestellten Beziehungen wurden an einer Versuchsanlage überprüft. Die Streuung der Pupinsektionen wurde durch Parallelschaltung von Kapazitäten erreicht. Für die vier verschiedenen Fälle sind die gemessenen Rückflussdämpfungen in Figur 4 aufgezeichnet.

A l'aide de cette formule, nous calculons l'exemple suivant:

L'écart moyen de la capacité des sections Pupin d'un câble H-88,5 Ø 1 mm, est de $\pm 2\%$. Comme l'effet de l'écart des capacités est plus grand aux fréquences élevées, et que de plus l'amplification augmente pour compenser la distorsion, il est intéressant de calculer l'affaiblissement de réflexion résultant à 3400 Hz. L'affaiblissement s'élève à 0,0458 N par section Pupin à la fréquence considérée. Le câble a 11 sections Pupin (20 km).

L'écart de 2% correspond à un facteur de réflexion $r = 0,0273$ ($A_r = 3,6$ N) par section. Nous aurons:

$$r_{o\text{ res}} = 0,0273 \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-4 \cdot 11 \cdot 0,0458}}{4 \cdot 0,0458}} = 0,0594$$

ou l'affaiblissement de régularité:

$$Ar_{o\text{ res}} = 2,82 \text{ N}$$

Cette valeur correspond environ à la grandeur minimum de l'affaiblissement de régularité que l'on peut attendre d'une ancienne installation de câbles. De cet exemple, on peut conclure que des écarts de capacité de $\pm 2\%$, y compris la dispersion longitudinale, provoquent un affaiblissement de régularité relativement petit. Les exigences quant à l'homogénéité de longueur ne sont donc pas dénuées de fondement. Dans la formule pour r_o résiduelle, le facteur e^{-4na} tend à diminuer pour une augmentation de l'affaiblissement. Pour $e^{-4na} \ll 1$, la formule se simplifie et la réflexion résultant à l'origine de la ligne sera, avec une bonne approximation:

$$r_{o\text{ res}} \cong \frac{r}{2 \cdot \sqrt{a}}$$

et

$$Ar_{o\text{ res}} \cong \ln \frac{1}{r} + \ln 2 \cdot \sqrt{a}$$

Il s'ensuit que, pour un affaiblissement croissant, l'affaiblissement de régularité tend vers une valeur constante. En d'autres termes, les points de réflexion éloignés n'apportent, à l'origine, aucune modification sensible de l'affaiblissement de régularité. Dans l'exemple décrit, la valeur de base serait de 2,75 N.

5. Mesures exécutées

Les relations mentionnées dans le paragraphe précédent ont été vérifiées à l'aide d'une installation d'essai. L'écart des sections Pupin a été provoqué par les insertions en parallèle de capacités. La figure 4 donne l'affaiblissement de régularité mesuré dans les quatre cas.

La courbe 1 correspond à une installation homogène; l'affaiblissement de régularité est excellent. Dans l'installation selon courbe 2, l'écart varie régulièrement de $\pm 1,9\%$. Les réflexions ne sont pas très grandes pour les fréquences basses et moyennes, mais très importantes à 3000 Hz. Ce résultat étrange s'explique par le fait que pour les fréquences basses et moyennes le déphasage entre deux sections Pupin

Die Kurve 1 entspricht einer homogenen Anlage; die Rückflusssdämpfung ist sehr gut. Bei der Anlage nach Kurve 2 alterniert die Streuung regelmässig um $\pm 1,9\%$. Der Rückfluss ist für die tiefen und mittleren Frequenzen gering, wird aber bei 3000 Hz sehr stark. Die Erklärung für dieses sonderbare Verhalten liegt darin, dass bei den tiefen und mittleren Frequenzen die Phasendrehung zwischen zwei Pupinsektionen mässig ist, und sich die Streuung ausgleichen kann. Bei der Frequenz 3000 Hz aber ist die Phasendrehung gerade so gross, dass sich die Reflexionen summieren (Fig. 5).

Es gilt weiter

$$\sin \frac{b}{2} = \frac{f}{f_0} = \sin \frac{90^\circ}{2} = 0,707$$

und man erhält $f = 0,707 \cdot f_0 = 0,707 \cdot 4200 = 2970$ Hz.

In diesem Fall wirkt sich also die Regelmässigkeit in der Verteilung der Streuung, zusammen mit der Phasendrehung, ungünstig aus. Bei den Anlagen gemäss Kurven 3 und 4 ist die Streuung unregelmässiger, die Rückflusssdämpfung fällt im ganzen gesehen besser aus. In der Welligkeit der Kurven kommt die vektorielle frequenzabhängige Addition der Reflexionen zum Ausdruck.

6. Einmalige grössere Streuung

Die geltenden Vorschriften für die Lieferung der Fern- und Bezirkskabel verlangen, dass die Kapazitätswerte der Pupinsektionen vom Mittelwert der ganzen Anlage nicht mehr als $\pm 2\%$ abweichen, wobei aber der Kapazitätssprung zwischen zwei benachbarten Sektionen nicht grösser als 2% sein darf. Dank diesen Einschränkungen und den Vorkehrungen bei der Kabelmontage, gelingt es, eine befriedigende Rückflusssdämpfung zu erreichen. Diese sollte

für Bezirkskabel 2,8 Neper,
für Fernkabel 3,2 Neper,

betragen.

Nun ergibt es sich aber in der Praxis oft, dass bei nachträglicher Anpassung eine Pupinsektion mehr als 2% länger wird. Theoretisch sind nun verschiedene Lösungen zur Korrektur möglich:

- Einsatz eines Kabels mit reduzierter Kapazität;
- Einbau eines zusätzlichen Pupinpunktes und Ergänzung durch Kondensatoren;
- Verteilung der Mehrlänge auf die benachbarten Sektionen durch Verschiebung der Pupinpunkte;
- Künstliche Erhöhung der Kapazität der benachbarten Sektionen zur Verminderung des Kapazitätssprunges.

Diese theoretischen Varianten zeichnen sich durch verhältnismässig grossen Aufwand aus.

Da die Rückflusssdämpfung der unberührten Kabel häufig über 2,8 N beziehungsweise 3,2 N liegt, ergibt sich daraus eine weitere Lösungsmöglichkeit. Unter der Annahme, dass diese Werte eher bei 3,2 N für ein Bezirks- und bei 3,5 N für ein Fernkabel liegen, kann eine einmalige grössere Abweichung zugelassen

est modéré, donc l'écart peut se compenser. A la fréquence 3000 Hz, par contre, le déphasage est tel que les réflexions s'additionnent (fig. 5).

De plus, nous avons:

$$\sin \frac{b}{2} = \frac{f}{f_0} = \sin \frac{90^\circ}{2} = 0,707$$

et on obtient $f = 0,707 \cdot f_0 = 0,707 \cdot 4200 = 2970$ Hz.

Dans ce cas, la régularité dans la répartition des écarts, combinée avec le déphasage, a une influence défavorable. Pour les installations selon courbes 3 et 4, l'écart est moins régulier et l'affaiblissement de régularité est mieux compensé. L'addition vectorielle des réflexions en fonction de la fréquence se remarque à l'ondulation des courbes.

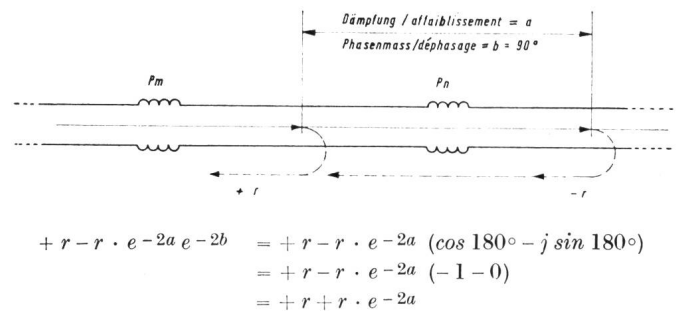


Fig. 5.

6. Ecarts importants uniques

Les prescriptions en vigueur pour la livraison des câbles interurbains et ruraux exigent que la capacité moyenne d'une section Pupin ne diffère pas de plus de $\pm 2\%$ de la valeur moyenne de toute l'installation, l'écart de capacité entre deux sections voisines ne devant pas être supérieur à 2% . Grâce à ces restrictions et aux dispositions prises lors du montage, il est possible d'obtenir un affaiblissement de régularité satisfaisant. Il devrait atteindre 2,8 N pour les câbles ruraux et 3,2 N pour les câbles interurbains.

Cependant il arrive souvent dans la pratique que la longueur d'une section Pupin augmente de plus de 2% à la suite d'une adaptation ultérieure.

Théoriquement, nous avons plusieurs solutions possibles de correction:

- Utilisation d'un câble à capacité réduite.
- Etablissement d'un point Pupin additionnel et adjonction de condensateurs.
- Répartition de la longueur additionnelle entre les sections voisines par déplacement des points Pupin.
- Augmentation artificielle de la capacité des sections voisines afin de réduire les écarts de capacité.

Ces solutions théoriques entraînent des frais relativement élevés.

Comme l'affaiblissement de régularité des câbles non touchés par les travaux est fréquemment supérieur à 2,8 N ou à 3,2 N, une autre possibilité se pré-

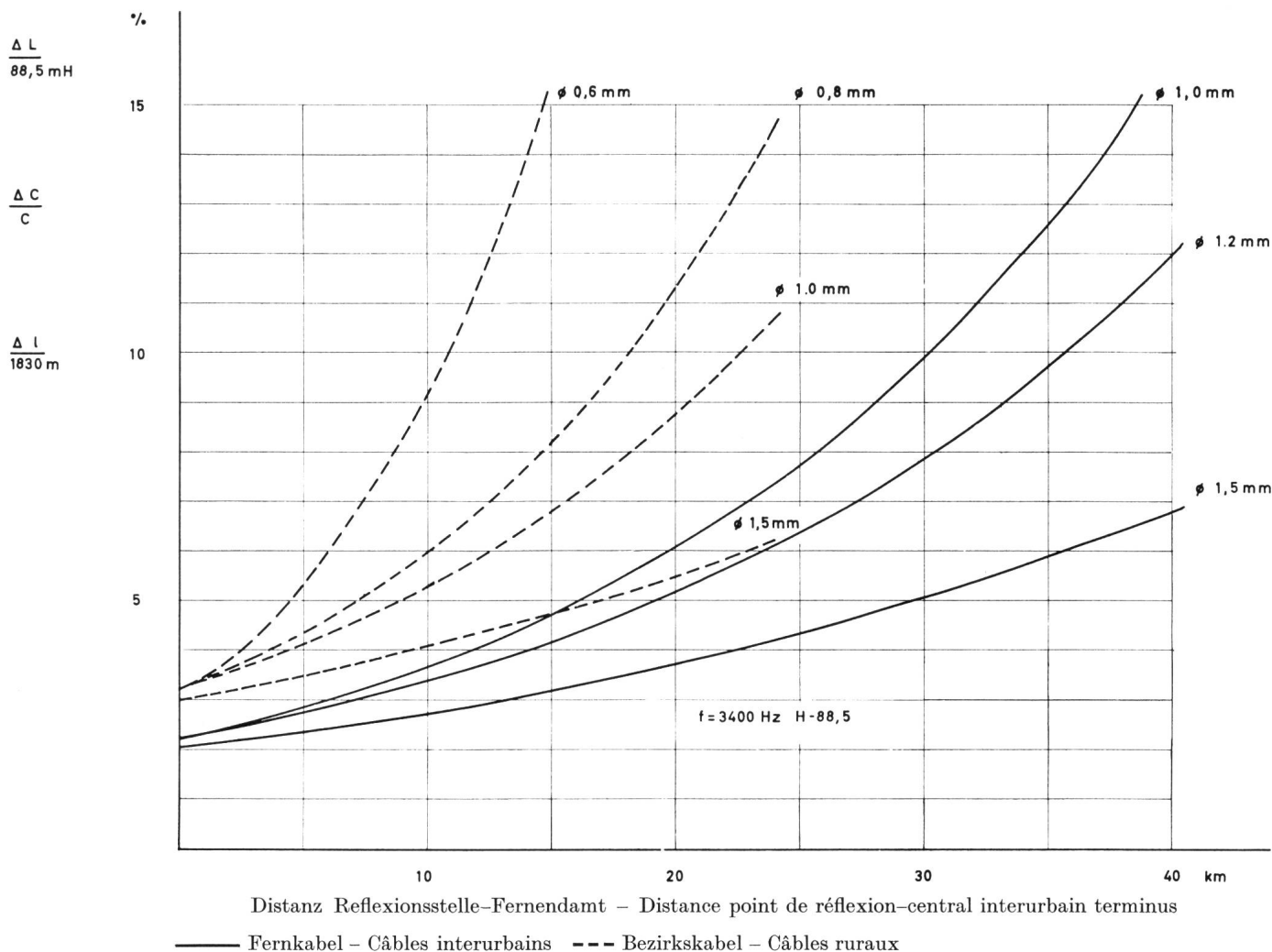


Fig. 6. Einmalige zulässige Streuung für ein Spulenfeld eines Pupinkabels
Ecart tolérable unique d'une section de câble pupinisé

werden. Die Rechnung zeigt aber, dass diese relativ bescheiden ausfällt, wenn nicht der korrigierende Einfluss der Leitungsdämpfung einbezogen wird; denn jede Reflexion wird von der Leitung zweifach gedämpft, also richtet sich das Ausmass der zulässigen einmaligen Streuung nach der Entfernung vom nächsten Verstärkeramt und dem Aderdurchmesser. Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde die Kurvenschar nach *Figur 6* errechnet.

7. Ergänzung durch künstliche Pupinsektionen

Im vorangehenden Abschnitt wurde bereits der Einsatz von künstlichen Pupinsektionen als Lösung erwähnt. Da aber eine Pupinspule und zwei Kondensatoren noch kein richtiges Kabel ausmachen, stellt sich oft die Frage, ob, abgesehen vom Aufwand, der Einbau einer fast ganzen künstlichen Sektion, oder eine Mehrlänge, die den zulässigen Wert überschreitet, besser sei. Eine Messung verschaffte hier Klarheit. In eine Pupinanlage wurde in verschiedenen Abständen ein künstliches Pupinglied eingefügt und die Rückflussdämpfung gemessen. Die Resultate (*Fig. 7*) zeigen, dass es möglich ist, eine

sente. En admettant que ces valeurs sont plus près de 3,2 N pour un câble rural et de 3,5 N pour un câble interurbain, on peut tolérer un écart important unique. Le calcul montre néanmoins que cet écart reste relativement faible si l'on ne tient pas compte de l'effet correctif de l'affaiblissement de ligne. Chaque réflexion est atténuée deux fois par la ligne, si bien que la grandeur de l'écart unique admissible est déterminée par la distance de la prochaine station de répéteurs et par le diamètre des conducteurs. Les courbes de la *figure 6* ont été établies sur la base de ces considérations.

7. Adaptation par sections Pupin artificielles

Le paragraphe précédent mentionnait l'introduction de sections Pupin artificielles pour obtenir la correction désirée. Comme une bobine Pupin avec deux condensateurs ne peut pas remplacer une section de câble réelle, on peut se demander si, abstraction faite des frais, l'introduction d'une section Pupin presque entièrement artificielle ou d'une longueur additionnelle dépassant la valeur admissible ne serait pas une meilleure solution. Cette question

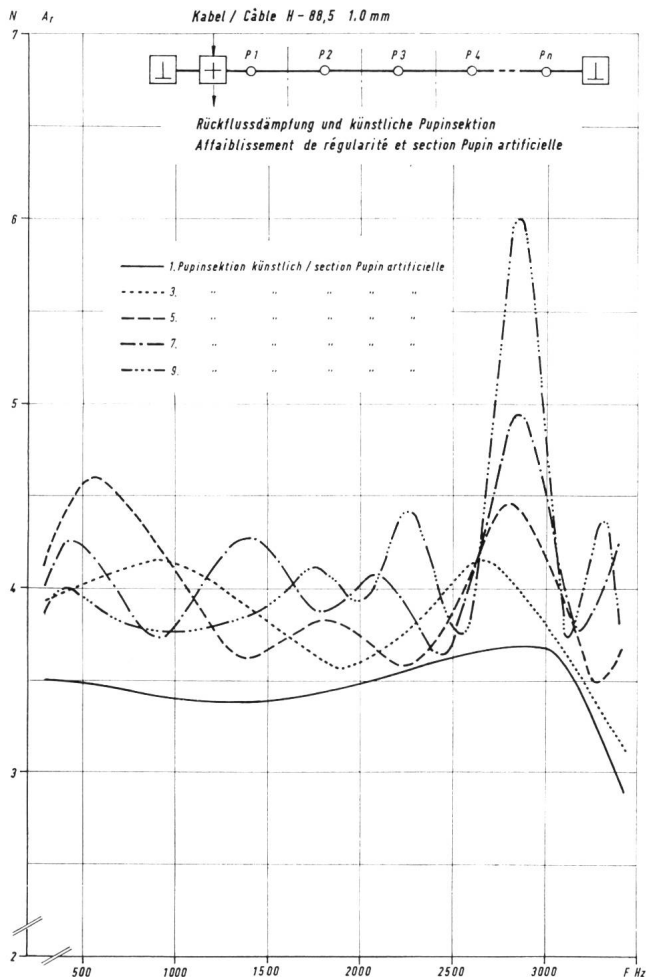


Fig. 7. Rückflussdämpfung und künstliche Pupinsektion
Affaiblissement de régularité et section Pupin artificielle

künstliche Sektion verhältnismässig gut in ein Kabel einzupassen. Bedingung ist jedoch, dass die Kapazitäten durch Abgleich auf geringen Rückfluss bestimmt werden. Das erste Glied künstlich aufgebaut, ergibt die niedrigste Rückflussdämpfung, die Reflexion trifft praktisch ungedämpft ein. Die Anpassung verschlechtert sich besonders von 3000 Hz an aufwärts, offenbar fehlt dem Schwingkreis des künstlichen Gliedes der Widerstand. Immerhin ist dies noch nicht derart, dass der Einbau von Widerständen notwendig wird. Dadurch ginge gerade ein Vorteil der künstlichen Verlängerung – verlustlos zu sein – verloren.

Diese Ergebnisse sollen den unbeschränkten Einbau von künstlichen Ergänzungen nicht befürworten. Sie sind, wie der Name sagt, etwas Künstliches und sollen nur bei nachgewiesenem Bedarf eingefügt werden.

8. Wellenwiderstand und Anlaufänge

Die H-Pupinisierung beginnt mit einer Anlaufänge entsprechend einer halben Pupinsektion. Dies ist auch eine Voraussetzung, dass am Anfang der Leitung der richtige Wellenwiderstand erscheint. Was sich abspielt, wenn die Anlaufänge zu lang oder zu

a été tirée au clair par une mesure. Dans une installation pupinisée, nous avons introduit à différents intervalles un élément Pupin artificiel et mesuré l'affaiblissement de régularité. Les résultats (fig. 7) montrent qu'il est possible d'incorporer assez facilement une section artificielle dans un câble. La condition à respecter est que les capacités soient déterminées lors de la mesure de l'affaiblissement de régularité. Le premier élément constitué artificiellement donne l'affaiblissement de régularité le plus bas, la réflexion n'étant pratiquement pas amortie. L'adaptation se détériore particulièrement à partir de 3000 Hz, la résistance ohmique pure manquant probablement dans le circuit oscillant formé avec les éléments artificiels. Toutefois, ce défaut d'adaptation n'est pas suffisamment important pour que l'adjonction de résistances se justifie. En effet, on perdrait alors l'avantage de l'allongement artificiel, qui est de n'entraîner aucune perte.

Ces résultats ne doivent pas pousser à l'introduction systématique d'éléments artificiels. Comme leur nom l'indique, il s'agit de montages artificiels qui ne doivent être intercalés qu'en cas d'absolue nécessité.

8. Impédance caractéristique et longueur initiale

La pupinisation H débute avec une section correspondant à une demi-section Pupin. C'est également une condition pour qu'à l'origine de la ligne l'impédance caractéristique ait bien la longueur désirée. Les

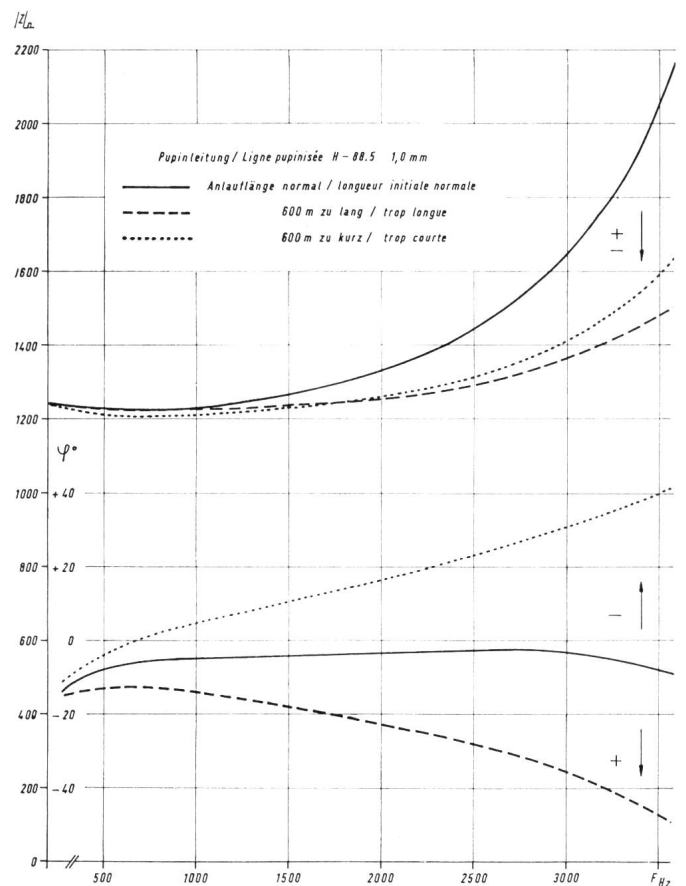


Fig. 8. Wellenwiderstand und Anlaufänge
Impédance caractéristique et longueur d'attaque

kurz ist, zeigen die Kurven in *Figur 8*. Interessanterweise fällt die Impedanz für die oberen Frequenzen für eine Mehr- oder Minderlänge in gleicher Weise ab, die Phasenwinkel jedoch gehen auseinander. Die Impedanzen an einem beliebigen Punkt in einer Pupinsektion verhalten sich somit angenähert konjugiert komplex zueinander. Der entstehende Reflexionsfaktor (vgl. *Figur 3*) wird also in erster Linie durch die Abweichung der Winkel verursacht. Diese Tatsache ist für die Anpassung der Leitung am Zweidrahteingang der Verstärker von Bedeutung. Erwünscht wäre somit eine kurze Kablage mit niedrigem Kapazitätsbelag. Auch der Einschaltort der Linienübertrager wirkt sich übertragungstechnisch aus. Für die Stammleitungen wird die Impedanz heruntertransformiert, was zur Folge hat, dass sich mit der niederen Impedanz die Kapazität der Kablage weniger stark bemerkbar macht. Somit sollten sich die Linienübertrager möglichst nahe dem Endverschluss befinden, damit nur eine kurze Kablage auf der Linienseite notwendig wird.

9. Schlussfolgerung

Die künstliche Belastung der Kabeladern mit Pupinspulen und die Verstärkertechnik, haben das Fernsprechen auf grosse Entfernungen ermöglicht. Diese Technik wird heute mehr und mehr durch die Trägerfrequenztelefonie abgelöst, die unbelastete Kabel verwendet. Mit den heute immer zahlreicher werden den Kabelumlegungen laufen wir Gefahr, dass man der Einhaltung der Pupinlängen nicht mehr die notwendige Beachtung schenkt und die strengen Vorschriften als unnötige Einschränkung empfindet. Die bestehenden Pupinkabel müssen aber noch auf lange Zeit dienen, und dies können sie nur, wenn man ihrer Eigenart Rechnung trägt.

courbes de la *figure 8* illustrent ce qui se passe lorsque la section de départ diffère de la valeur prescrite. Il est intéressant de constater que l'impédance aux fréquences élevées se modifie de la même manière que pour une diminution ou une augmentation de la longueur initiale. Les angles de déphasage par contre ne varient pas dans le même sens. Les impédances en un point quelconque d'une section Pupin s'expriment approximativement par une expression conjuguée complexe. Le facteur de réflexion résultant (voir fig. 3) provient avant tout de la différence de phase. Ce fait est significatif pour l'adaptation de la ligne à l'entrée de l'amplificateur 2 fils. Il serait souhaitable d'avoir un câblage court à faible capacité. L'emplacement des translateurs a également une influence sur la transmission. L'impédance des circuits de base est abaissée, ce qui fait que la capacité du câblage se manifeste moins. Logiquement, on devrait loger les translateurs le plus près possible des têtes de câbles afin de réduire au minimum le câblage côté ligne.

9. Conclusions

La charge artificielle des câbles à l'aide de bobines Pupin ainsi que la technique des répéteurs ont permis la transmission à grande distance. A l'heure actuelle, cette technique est de plus en plus remplacée par la téléphonie à courants porteurs utilisant les câbles non chargés. Le nombre toujours plus considérable des travaux demandant des détournements de câbles nous fait courir le danger de ne plus pouvoir vouer toute notre attention au respect des longueurs Pupin, si bien que des prescriptions sévères ne seraient qu'une restriction inutile. Cependant les câbles pupinisés existants devront être utilisés encore longtemps, si bien qu'il y a lieu de tenir compte de leurs particularités.