Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung

Band: 1 (1923)

Heft: 4

Artikel: Pupinkabel [Schluss]

Autor: Keller, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-873082

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

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

Pupinkabel.

Von Dr. H. Keller, Bern.

(Schluss.)

Wir wollen nun im folgenden die Wellenausbreitung von Telephonströmen auf einer Kabelleitung besprechen. Gleich den Wasserwellen, die mit einer bestimmten Fortpflanzungsgeschwindigkeit einen Störungsimpuls in Wellenform an entfernte Orte übertragen, werden auch Wechselströme und Spannungen mit einer gewissen Geschwindigkeit von Ort zu Ort geleitet. Diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit v ist abhängig von der kilometrischen Kapazität C und der kilometrischen Induktion L der Leitung und beträgt allgemein

$$v = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \text{ km pro Sekunde.}$$

Als Beispiel wählen wir ein pupinisiertes Kabel mit 1,5 mm Kupferleitern; die Spulendistanz betrage 1,8 km, die Induktion pro Spule 0,18 Henry und die Kapazität der Doppeladern 0,04 MF pro km. Für die Rechnung müssen wir uns die Induktion stetig über die Kabeladern verteilt denken. Die kilometrische Induktion hat somit den Betrag von L = 0,1 Henry[1]), und wir erhalten in diesem Falle für v

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}1 \times 0{,}04 \times 10^{-6}}} = 15\,812 \text{ km pro Sekunde.}$$

Wird eine Wechselspannung von 800 Perioden an das eine Leitungsende angelegt, so kommen pro Sekunde 800 vollständige Schwingungen[2]) auf die Leitung, die als kontinuierliche Folge von anwachsenden und abnehmenden positiven und negativen Strömen, wie Wellenberge und -täler, mit der konstanten Geschwindigkeit von 15 812 km pro Sekunde über die Leitung eilen. In $\frac{1}{800}$ Sekunde wird sich daher der erste Wellenberg in einem Draht (maximaler positiver Strom) vom Anfang der Leitung um $\frac{v}{800}$ = 19,764 km verschoben haben. Im halben Abstand, also 9,882 km vom Leitungsanfang entfernt, wird zu dieser Zeit ein Wellental sein (maximaler negativer Strom), und am Anfang der Leitung selbst beginnt sich soeben die zweite Welle auszubreiten. Nach $\frac{2}{800}$ Sekunden befindet sich der höchste Punkt des ersten Wellenberges bereits im Abstand von 39,528 km, und die zweite Welle befindet sich in diesem Moment am selben Ort wie die erste nach $\frac{1}{800}$ Sekunden. So wären nach Ablauf von einer Sekunde alle 800 abgeschickten Schwingungen regelmässig als Wellen über die Strecke von 15 812 km verteilt. Der Sinn für den technischen Ausdruck „elektrische Wellenlänge" geht daraus deutlich hervor. Wellenlänge l_w ist gleich Fortpflanzungsgeschwindigkeit dividiert durch Periodenzahl, $l_w = \frac{v}{n}$ und bedeutet Abstand zweier Wellenberge (siehe Figur 3). Je grösser die Periodenzahl des Sprechstromes, desto kleiner die Wellenlänge.

Pupin hat nun in seinen Regeln für den Bau von Pupinkabeln auf Grund von Berechnungen Anhaltspunkte geliefert, wie Grösse und Distanz der Spulen bemessen werden müssen, damit die höchste Sprechfrequenz, die man noch gut zu hören wünscht, auch noch gut übertragen werde. Aus der Erfahrung ist bekannt, dass Schwingungen über 2200 Perioden keinen bedeutenden Einfluss auf die Qualität der übermittelten Sprache mehr ausüben. Wählen wir daher als höchste Periodenzahl, die in unserer Kabelleitung noch gut übertragen werden soll, die Zahl 2200, so sagt uns die Pupinsche Regel, dass auf die hiefür berechnete Wellenlänge $l_w = \frac{v}{n}$ = 7,187 km wenigstens 4 Pupinspulen kommen sollen. Der Spulenabstand für unsere Leitung dürfte daher im Maximum 1,797 km, also ziemlich genau 1,8 km betragen. Wir hätten die Spulenverteilung auch unmittelbar aus dem Pupinschen Gesetz für den Spulenabstand s finden können:

$$s = \frac{1}{8000\sqrt{L.C}} = \frac{1}{8000\sqrt{0{,}1 \times 0{,}04 \times 10^{-6}}} = 1{,}977 \text{ km im Maximum.}$$

Dass der Spulenabstand hier grösser ausfällt, ist in der Wahl der Zahl 8000 begründet. Der Wert 8000 ist eine Konstante, die auf empirischem Wege ermittelt wurde. Sie gilt als Norm für Deutschland. In andern Ländern liegen die Grenzen dieser Konstanten zwischen 7000 und 10 000. Die Spulendistanzen werden demnach nicht in allen Ländern gleich gross bemessen. Für unsere Telephonkabelanlagen wird gewöhnlich der Spulenabstand zu 1,8 km gewählt.

Es möge nun ein Wechselstrom von 2200 Perioden über unsere Doppelleitung geführt werden (siehe Figur 3). Wir denken uns dabei vorerst das Kabel unpupinisiert.[1]) Die Pupinspulen sind daher vorerst wegzudenken.

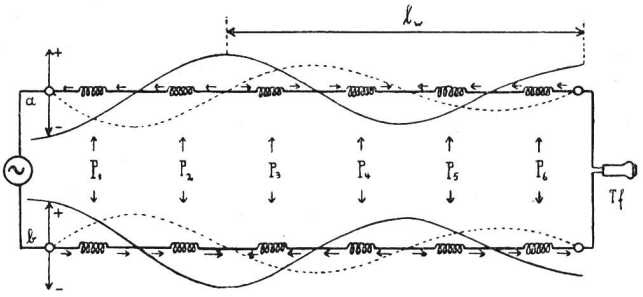

Fig. 3.

Wenn wir für einen bestimmten Zeitpunkt über jeder Stelle der Leitung a b, und zwar für jeden Leiter

[1]) Bei Vernachlässigung der eigenen, kleinen Induktion des Kabels.

[2]) Schwingungen wie aus dem Oszillogramm der letzten Abhandlung ersichtlich.

[1]) In der Figur ist dabei keine Rücksicht darauf genommen, dass infolge der bedeutend kleineren Induktion die Wellenlänge stark vergrössert wird.

gesondert, die augenblickliche Spannung als Ordinate auftragen, ergeben sich die ausgezogenen Kurven nach Figur 3. Es finden sich also infolge Wellenbildung zur selben Zeit Leitungsteile mit positiver und solche mit negativer Spannung. Wenn die treibende Spannung nachlässt, werden die einzelnen Teile der Leitung sich ineinander entladen. Die Wellenberge fliessen ab gegen beide benachbarten Täler. Dadurch treten Stromwellen auf, die diesen Transport der elektrischen Ladungen übernehmen. Sie werden durch die gestrichelten Kurven gezeigt. Es fliessen die Ausgleichströme in der Richtung der Pfeile und verzehren sich grösstenteils nutzlos. Die Ströme sind gleich Null, da wo die Spannung ein Maximum hat, und sie erreichen ihr Maximum, da wo die Spannung Null ist. Die Stromkurve ist der Spannungskurve in der Bewegungsrichtung um eine Viertelsperiode voraus. Wenn nun, wie angedeutet, an den Pupinpunkten P_1, P_2, P_3 usw. die Pupinspulen eingesetzt werden, so erreicht man, dass die Ausgleichströme, die nun durch die Spulenwicklungen fliessen, nutzbringend in magnetische Energie umgesetzt werden. Beim Anwachsen der Spannung in umgekehrtem Sinne dient nun diese magnetische Energie zur Speisung des neu entstehenden elektrischen Kabelfeldes. Die Stromquelle wird damit von den Verlusten befreit, die Dämpfung des Kabels dadurch verringert, infolgedessen die Reichweite der Sprechströme vergrössert.

Der Betrag der kilometrischen Dämpfung kann für die Pupinkabel nach folgender Formel berechnet werden:

$$\beta = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ pro km.}$$

Dabei bedeuten R, C, L und G kilometrische Werte, und zwar:

R = Leitungswiderstand der Schleife.
G = Wechselstrom-Ableitung.
L = Induktion.
C = Kapazität.

Unter Ableitung versteht man den reziproken Wert des Isolationswiderstandes. Die Einheit der Ableitung ist ein Mho (Umkehrung des Wortes Ohm). Mit dieser Einheit bezeichnet man die Ableitung zwischen zwei Stellen, zwischen denen ein Uebergangswiderstand von 1 Ohm besteht. Einem Uebergangswiderstand von 1 Megohm entspricht daher eine Ableitung von 1.10^{-6} Mho (Micromho). Der Widerstand bestimmt die Verluste des magnetischen Feldes, die Ableitung die Verluste bei der Bildung des elektrischen Feldes. Die Wechselstromableitung ist im allgemeinen bedeutend grösser als die Gleichstromableitung, und zwar infolge der dielektrischen Wechselstromverluste. Papierkabel ab Fabrik haben gewöhnlich Isolationswiderstände der Grössenordnung 30 000 Megohm pro km, was einer Gleichstromableitung von 0,000033 Mikromho entspricht. Die gemessenen Wechselstromableitungen betragen dagegen 0,1—1 Mikromho. Doch stellt bei guten Kabeln G stets eine kleine Zahl dar, so dass in der Formel für die Dämpfung das erste Glied $\frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$ überwiegt. Bei schlechter Isolation, oder wenn L zu gross gewählt würde, kommt das zweite Glied immer mehr zur Geltung. Wir wollen die Formel auf einige Beispiele anwenden:

1. Pupinkabel mit 1,5 mm Kupferdrähten bei kleiner Ableitung.

Konstanten: R = 20 Ohm [1]) G = 0,5 Mikromho
C = 0,04 MF L = 0,1 Henry

$$\beta_1 = \frac{20}{2}\times\sqrt{\frac{0{,}04\times10^{-6}}{0{,}1}} + \frac{0{,}5\times10^{-6}}{2}\times\sqrt{\frac{0{,}1}{0{,}04\times10^{-6}}}$$
$$= 0{,}006325 + 0{,}000395 = 0{,}00672.$$

2. Das gleiche Pupinkabel mit 1,5 mm Kupferdrähten bei grosser Ableitung.

Konstanten: R = 20 Ohm G = 5 Mikromho
C = 0,04 MF L = 0,1 Henry

$$\beta_2 = \frac{20}{2}\times\sqrt{\frac{0{,}04\times10^{-6}}{0{,}1}} + \frac{5\times10^{-6}}{2}\times\sqrt{\frac{0{,}1}{0{,}04\times10^{-6}}}$$
$$= 0{,}006325 + 0{,}003953 = 0{,}01028.$$

3. Das gleiche Kabel, nicht pupinisiert, mit kleiner Ableitung, für 800periodigen Wechselstrom.

Konstanten: R = 20 Ohm n = 800 Perioden
C = 0,04 MF $\omega = 2\pi \times n = 5000$
G = 0,5 Mikromho

Für nicht pupinisierte Kabel rechnet man nach folgender Näherungsformel:

$$\beta_3 = \sqrt{\frac{\omega\, CR}{2}} = \sqrt{\frac{5000\times0{,}04\times10^{-6}\times20}{2}} = 0{,}0447.$$

Die Dämpfungsformel für Pupinkabel gilt streng nur unter Voraussetzung stetig verteilter Induktion über die Kabelleitung. Da hier der Grossteil der Induktion in den Spulen konzentriert ist, hat man an den berechneten Dämpfungswerten noch eine Korrektur anzubringen, die auch wieder je nach Periodenzahl verschieden gross ist. Wir berechnen die Korrektur für 800periodigen Wechselstrom. Nach Pupin gilt: „Die Dämpfung einer Anordnung, bei der m Spulen auf die Wellenlänge kommen, verhält sich zu der Dämpfung einer Leitung, bei der dieselbe Gesamtinduktivität gleichmässig verteilt ist, wie $\frac{\pi}{m} : \sin\frac{\pi}{m}$." Wir müssen daher zuerst feststellen, wie viele Spulen auf die Wellenlänge des 800periodigen Wechselstromes kommen. Wir wissen von früher, dass für diesen Kabeltyp die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v = 15 812 km beträgt. Die Wellenlänge ist daher $l_w = \frac{v}{n} = 19{,}765$ km.

$$m = \frac{l_w}{s} = \frac{19{,}765}{1{,}8} = 11.$$

[1]) 20 Ohm entsprechen dem kilometrischen Schleifenwiderstand eines Kabels mit 1,5 mm Kupferleitern. Für wirkliche Verhältnisse wird dieser Widerstand vergrössert durch das Einfügen der Pupinspulen, welche bei Induktionswerten von 0,18 Henry pro Spule Gleichstromwiderstände von zirka 5 Ohm und Verlustwiderstände von zirka 4 Ohm besitzen. Der Effektivwiderstand pro Spule beträgt daher zirka 9 Ohm. Da die Spulendistanz zu 1,8 km angenommen ist, beträgt die Widerstandsvergrösserung durch Einschalten der Pupinspulen 5 Ohm pro km. Statt R = 20 Ohm wäre somit zu setzen R = 25 Ohm, d. h. 25% mehr. Das erste Glied in der Dämpfungsformel müsste daher bei Berücksichtigung der Spulenwiderstände ebenfalls mit 25% höherem Betrage notiert werden. Das Beispiel gilt daher als Idealfall widerstands- und verlustfreier Pupinspulen.

Somit wird der Korrektionsfaktor:

$$\frac{\frac{\pi}{m}}{\sin\frac{\pi}{m}} = \frac{0{,}28611}{\sin 16^0\ 21'} = 1{,}0163$$

Mit diesem Wert sind obige Dämpfungswerte β_1 für die Pupinkabel zu multiplizieren, um die exakten Werte für ß bei 800 Perioden zu erhalten. Folglich wird:

1. $\beta'_1 = \beta_1 \times 1{,}0163 = 0{,}00683$
2. $\beta'_2 = \beta_2 \times 1{,}0163 = 0{,}01045$

Wenn wir wiederum als Höchstwert der zulässigen Dämpfung für Sprechströme ßl = 3 festsetzen, so betragen die Reichweiten der Kabel in den drei besprochenen Fällen:

1. Pupinisiert, kleine Ableitung: Reichweite = $\frac{\beta l}{\beta'_1}$ = 439,3 km
2. Pupinisiert, grosse Ableitung: „ = 287,2 „ [1])
3. Nicht pupinisiert, kleine Ableit.: „ = 67,1 „

Neben der Wellenlänge und der Dämpfungskonstante ist noch eine dritte Grösse für die Fortpflanzung der Wellen von Bedeutung, die man als Charakteristik Z oder Wellenwiderstand der Leitung bezeichnet. Sie gibt das Verhältnis des Mittelwertes der Spannung auf der Leitung zum Mittelwert der Stromstärke. Für lange Leitungen tritt nämlich der Einfluss des Widerstandes der Endapparate gegenüber der Charakteristik zurück. Das heisst, dass das Verhältnis von Strom zu Spannung in Fernsprechleitungen nicht in erster Linie durch die Art des Stromverbrauchers am Ende der Leitung bestimmt wird, sondern sich im wesentlichen aus dem Aufbau der Leitung ergibt. Der Wellenwiderstand ist daher kein eigentlicher Widerstand, sondern ergibt in Analogie mit dem Ohmschen Gesetz lediglich das Verhältnis von Strom zu Spannung.

Ohm'sches Gesetz: $J = \frac{V}{R}$ od. $R = \frac{V}{J}$, analog Charakteristik $Z = \frac{V}{J}$

Wenn daher eine Leitung aus Teilen verschiedener Charakteristik zusammengesetzt ist, muss sich an den Uebergangsstellen der verschiedenen Leitungen das Verhältnis der Spannung zur Stromstärke plötzlich ändern. Bei dieser Aenderung wird immer ein Teil der Wellen wie ein Echo zurückgeworfen, was für die Uebertragung einer Vergrösserung der Dämpfung gleichkommt. Diese Reflexionen werden um so grösser, je verschiedener die Charakteristiken der zusammengefügten Leitungen sind. Man muss daher bestrebt sein, nur Leitungen mit wenig verschiedener Charakteristik, d. h. gleichartige Leitungen, zusammenzuschalten. Dies ist aber nicht immer ausführbar. (Kabel und Freileitung.) Die Charakteristik berechnet sich aus der Formel:

$$Z = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 L^2 + R^2}{\omega^2 C^2 + G^2}}$$

Zur Erläuterung mögen einige Angaben dienen:

Freileitungen:	Z	zirka	600—700
Gewöhnliche Kabel:	Z	„	200—400
Pupinisierte Kabel:	Z	„	700—2000
Krarup-Kabel:	Z	„	400—600

Neben den Vorteilen für den Fernsprechbetrieb haben die Pupinkabel auch ihre Schattenseiten. Sie funktionieren nur so lange einwandfrei, als an dem Kunstgebilde alles harmoniert und sich nichts verändert. Verschiedenheiten in den Spulendistanzen, Ungleichheiten der Induktionswerte vereinzelter Spulen oder der Kabelkapazitäten der einzelnen Spulenfelder, schon in Grössenordnungen von 2% für alle diese Fälle, geben zu störenden Reflexionen Anlass, was namentlich für Leitungsnachbildungen in Verstärkeranlagen sehr lästig ist und die wirksame Verstärkung stört. Nun haben gerade die Pupinspulen die lästige Eigenschaft, dass ihre Kerne durch verhältnismässig kleine Ströme magnetisiert werden können (mehr oder weniger, je nach Fabrikat), was eine Abnahme der wirksamen Induktion mit sich bringt. Durch induzierte Stromstösse von benachbarten Starkstromleitungen, ja sogar durch fehlerhaft ausgeführte Isolationsmessungen (Kurzschlüsse) können die Induktionswerte der Spulen sich ändern.

Zum Schlusse möchte ich der vielerorts noch herrschenden Meinung entgegentreten, dass die störenden Nebengeräusche auf den Leitungen (Ueber- und Mitsprechen auf Stamm- und Viererleitungen) durch die Pupinisierung geschwächt würden. Die Pupinisierung an und für sich hat damit nichts zu tun. Das Ueber- und Mitsprechen, das durch ungleiche kapazitive Koppelung der verschiedenen Leitungen hervorgerufen wird, kann nur durch einen speziellen Kapazitätsausgleich unter den Leitungen korrigiert werden.

[1]) Berechnet für widerstandslose und verlustfreie Pupinspulen.

Verschiedenes. — Divers.

Angaben über schweizerische Radiostationen.

I. Flugplatz-Station Genf-Cointrin. Diese Station gehört der Marconi-Radio-Station A.-G. in Bern und wird von ihr für Rechnung des Kantons Genf betrieben. Sie wurde im Jahre 1922 durch die Marconi's Wireless Telegraph Co. Ltd. in London erstellt und ist für die Zwecke der Aviatik besonders ausgerüstet. Ihr Rufzeichen ist H B 1, die geographische Lage N 46° 13' 45" O 6° 06' 04". Dem Sender, vom Typ der Röhrensender, wird eine Primär-Energie von 1½ KW zugeführt. Die Station besitzt getrennte Sende- und Empfangsantennen.

Die Sende-Antenne ist eine L-Antenne von 30 m Höhe und 75 m Länge mit isoliertem Gegengewicht. Die Antennen-Stromstärke beträgt 4—11 Ampère. Die Empfangs-Antenne ist ein Freiluft-Rahmen, System Bellini-Tosi, welcher auch zur radiogoniometrischen Richtungsbestimmung dient.

Der Sender kann von der Empfangsstation aus gesteuert werden. Er ist für Telegraphie mit reinen und modulierten ungedämpften Wellen und für Telephonie eingerichtet und arbeitet telegraphisch mit den Wellen 1400 und 1600 (Reserve) und telephonisch mit den Wellen 900 und 1100 Meter. Die Welle von 1100 m wird hauptsächlich für Broadcasting benutzt.

II. Station Lausanne Champs-de-l'Air. Dem gleichen Zweck wie die Genfer Station dient die von der Société Indépendante Française de T. S. F. erstellte und am 30. September 1922 eingeweihte Station Champs-de-l'Air in Lausanne. Sie ist Eigentum der Stadt Lausanne und annähernd von der gleichen Stärke wie die Genfer Station. Ihr Rufzeichen ist H B 2, die geographische Lage N 46° 31' 25" O 6° 38' 26" (Gebäude des Institut Agricole). Die gemeinsam zum Senden und Empfangen benützte