Telephonische Uebertragung über lange Kabelleitungen : Fortsetzung der Abhandlungen über Telephonverstärker [Fortsetzung]

Autor(en): **Clark, A. B.**

Objekttyp: **Article**

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**

Band (Jahr): **3 (1925)**

Heft 6

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-873918

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Telephonische Uebertragung über lange Kabelleitungen. *

Von A. B. Clark.

(Fortsetzung der Abhandlungen über Telephonverstärker. Uebersetzung von A. S.)

Uebersicht.

Durch Anwendung von Telephonverstärkern ist die Abwicklung des Telephonverkehrs über dünnadrige Kabelleitungen auf lange Distanzen bis zu 1600 km und mehr möglich geworden.

In solchen Telephonkabeln können einzelne Sprechstromkreise in elektrischem Sinne eine derartige Längenausdehnung annehmen, dass gewisse Wirkungen, die in gewöhnlichen Telephonleitungen keine störende Rolle spielen, bedeutenden und manchmal ausschlaggebenden Einfluss auszuüben vermögen.

So kann beispielsweise die Zeit, die für die Fortpflanzung der Energie der Sprechlaute notwendig ist, sich so stark bemerkbar machen, dass allfällig zurückgeworfene Energien „Echo"-Wirkungen, ähnlich dem bekannten Schall-Echo, zur Folge haben. Das Auftreten von Ausgleichsvorgängen, selbst da wo kein Gegensprechbetrieb stattfindet, wo also „Echos" nicht wahrgenommen werden, ist von grosser Bedeutung. Um für den Bereich des Sprechstrom-Frequenzbandes die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Frequenz in sicheren Grenzen zu halten, sind besondere Gegenmassnahmen erforderlich. Durch die Verwendung von dünnen Leitern wird die Dämpfung bei langen Leitungen sehr gross. Es sind deshalb geeignete Vorkehren zu treffen, um die Qualität der Uebertragung aufrechtzuerhalten; darunter sind auch selbsttätige Mittel zur Kompensation der durch Temperaturwechsel hervorgerufenen Widerstandsänderungen und damit zusammenhängend zur Stabilisierung des Uebertragungsmasses (Restdämpfung) verstanden.

Einführung.

Zweck dieser Abhandlung ist, die Vorgänge bei der Uebertragung von Sprechströmen über lange Telephonkabelleitungen zu erklären. Wegen der Weitläufigkeit des angeschnittenen Gebietes ist davon abgesehen worden, eine lückenlose Darstellung der Einzelheiten zu bieten, oder zahlreiche Ergebnisse von praktischen und theoretischen Untersuchungen einzubeziehen, die zur Lösung des Problems beigetragen und die Mitarbeit einer grossen Zahl von Fachleuten notwendig gemacht haben. Diese Abhandlung ist bloss zur Einführung in das Gebiet bestimmt, in der Meinung, dass anschliessend daran weitere Abhandlungen vorgelegt werden, worin die Materie eingehender zu behandeln sein wird.

Zum besseren Verständnis werden die verschiedenen Schaltungstypen, welche für Telephonkabel in Betracht fallen, kurz erwähnt; ferner werden charakteristische Kurven über den Grad der induktiven Belastung gezeigt. Daran anschliessend sollen verschiedene wichtige Erscheinungen besprochen werden, die auf langen Kabelstromkreisen auftreten und die im Kabelbau zu berücksichtigen sind.

Mit Rücksicht auf die Ausführungen, die in der Abhandlung über Telephonverstärker von Gherardi-Jewett enthalten sind (siehe „Technische Mitteilungen" Nr. 5, Oktober 1925), ist angenommen worden, dass die Leser dieses Artikels mit den Haupt-Eigenschaften der verschiedenen Apparatentypen bekannt seien und dass somit von einer nochmaligen Beschreibung derselben Umgang genommen werden könne.

I. Verschiedene Schaltungstypen.

Die verschiedenen Schaltungstypen, die in Telephonkabeln zur Anwendung gelangen, sind schematisch in Fig. 1 dargestellt. Schaltung „b" veranschaulicht eine Zweidrahtschaltung mit einem Telephonverstärker Typ 21. Diese Schaltungsart findet dort Verwendung, wo in der Durchverbindung bloss ein Verstärker notwendig ist. Schaltung „c" stellt eine Zweidrahtschaltung mit den besser bekannten Verstärkern Typ 22 dar. Schaltung „d" endlich veranschaulicht den Typus der Vierdrahtschaltung, welche zwei Strombahnen aufweist, je eine nach jeder Richtung. Auf die Verwendung der Prüfdrahtschaltung „a" werden wir später zurückkommen.

Mit Ausnahme der Schaltung „b", die in ihrer Anwendung dadurch begrenzt ist, dass sie ohne Nachteil an keine andere, Verstärker enthaltende Schaltung angeschlossen werden kann, können die vorgeführten Schaltungen zur Herstellung von allerlei Fernverbindungen mit Schaltungen gleichen oder anderen Types, z. B. Freileitungen, durchverbunden werden. Im allgemeinen dienen Schaltungen nach „c" mit Verstärkern Typ 22 für Verbindungen mittlerer Länge, während die Vierdrahtschaltungen

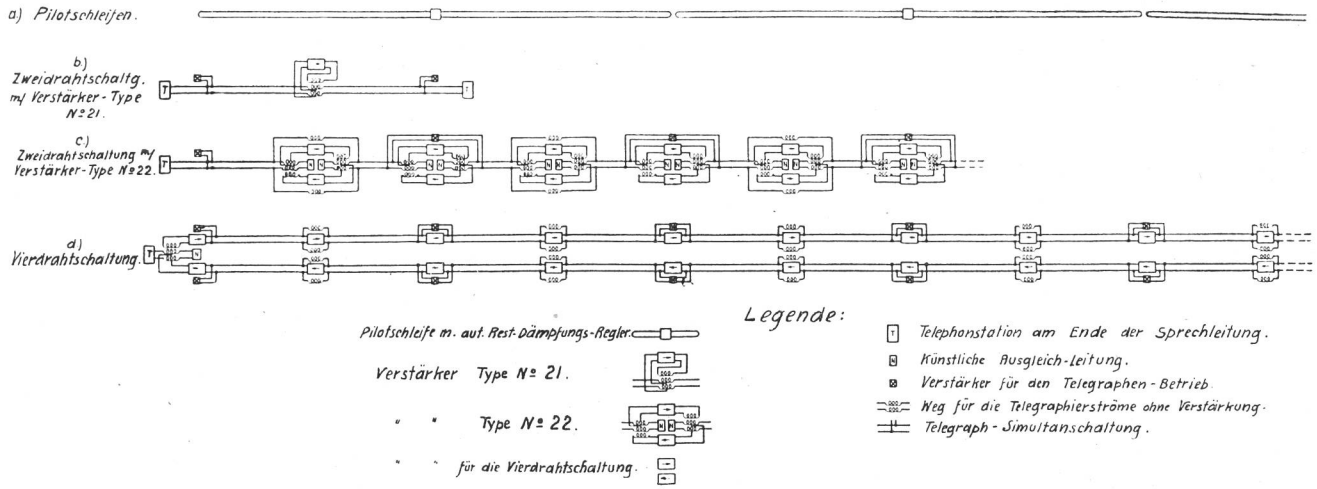


Fig. 1. Verschiedene Verstärkerschaltungen für Fernkabel.

*) Diese Abhandlung wurde der „American Institution of Electrical Engineers" im Februar 1923 in New-York von A. B. Clark, von der Laboratoriumsabteilung der „American Telephone and Telegraph Company", vorgelegt; sie ist seither an verschiedenen Stellen veröffentlicht worden.

nach „d“ für die längern Verbindungen verwendet werden, wo die Anforderungen an die Uebertragung höher sind. Die Kabelleitungen können ausser für Telephonzwecke auch zur Uebertragung von Gleichstrom-Telegraphierzeichen dienen. Die Apparatur für die Simultanschaltung, die also Ueberlagerung der Gleichstrom-Telegraphierzeichen zulässt, ist in der Figur angedeutet. Im allgemeinen werden die dünnadrigen Kabelleitungen nach derselben Methode simultan geschaltet wie Freileitungen. Jedoch bilden Telegraphenstromkreise auf Kabelleitungen reine Schleifen ohne Erdrückleitung; auch sind die verwendeten Ströme schwächer als auf Freileitungen. Die Telegraphierströme auf Kabelleitungen sind in bezug auf ihre Amplitude den Sprechströmen ähnlich.

Für Zweidrahtschaltungen über Fernkabel verwendet man 0,91 mm oder 1,291 mm Leiter, für Vierdrahtschaltungen dagegen in der Regel 0,91 mm Leiter. (Ein 0,91 mm Leiter wiegt 5,8 Kilogramm pro km und ein 1,291 mm Leiter doppelt so viel).

II. Eigenschaften der induktiven Belastung.

Zwei Grade der induktiven Belastung kommen in der Regel zur Anwendung. Sie sind bekannt als „mittelschwere“ und „extraleichte“ induktive Belastung oder kürzer als „mittlere“ und „leichte“ Belastung. Bei „mittlerer“ Belastung weisen die Spulen der Stammleitungen (auch Basisleitungen) eine Induktanz von ungefähr 0,175 Henry und Abstände von 1,8 km auf; bei „leichter“ Belastung dagegen weisen die Spulen 0,044 Henry für die Stammleitungen bei denselben Abständen auf. Die Kapazität für den Belastungsabschnitt beträgt annähernd 0,074 Mf. für die Stammleitungen.

Für Stammleitungen mit „mittlerer“ Belastung ist der Wellenwiderstand Z annähernd 1600 Ohm und die Grenzfrequenz ungefähr 2800 Per./Sec. Für Stammleitungen mit „leichter“ Belastung sind die entsprechenden Werte 800 Ohm und 5000 Per./Sec.

In Fig. 2 sind die Dämpfungs-Frequenzwerte von 0,91 mm und 1,291 mm Stammleitungen für beide Grade der induktiven Belastung in Kurvenform angegeben. Es ist daraus ersichtlich, dass die Leitungen mit „mittlerer“ Belastung bei Frequenzen bis ungefähr 2500 Per./Sec. niedrigere Dämpfungswerte (βl) aufweisen, als es die durch die Spulen eingeführte höhere Induktanz pro Meile hätte vermuten lassen. Andererseits zeigt sich, dass bei „leicht“ belasteten Leitungen die Dämpfungswerte für die verschiedenen Frequenzen sich in weiten Grenzen ungefähr gleich bleiben; ganz besonders trifft dies bei den höheren Frequenzlagen zu.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Sprechwellen stellt bei induktiv belasteten Leitungen, wo Verstärker zur Anwendung gelangen sollen, eine weitere wichtige Eigenschaft dar. Da die Induktanz der „leicht“ belasteten Leitungen pro Meile nur $\frac{1}{4}$ derjenigen von „mittel“ belasteten Leitungen beträgt, so wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für „leicht“ belastete Leitungen zweimal grösser; dies geht aus der bekannten Annäherungsformel

$$V = \frac{1}{\sqrt{L.\,C.}}$$

hervor, worin V die Geschwindigkeit in Längeneinheiten pro Sekunde, L die Induktanz in Henry pro Längeneinheit und C die Kapazität, bezogen auf dieselbe Längeneinheit (km), darstellt.

Die „leichte“ Belastungsart ist für die längeren Leitungen die beste, weil, wie aus Vorstehendem klar hervorgeht, die Dämpfungswerte der Sprechströme bei verschiedenen Frequenzen ungefähr die-

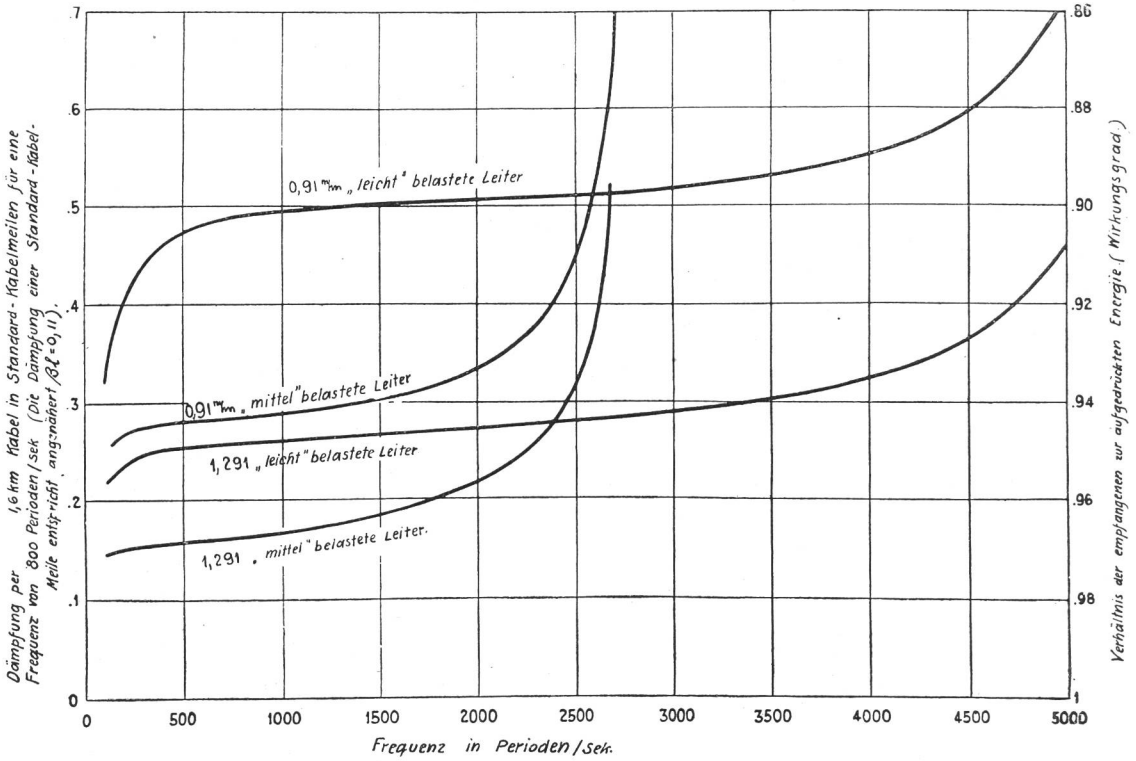


Fig. 2. Dämpfungs-Frequenzwerte für induktiv belastete Stammleitungen.

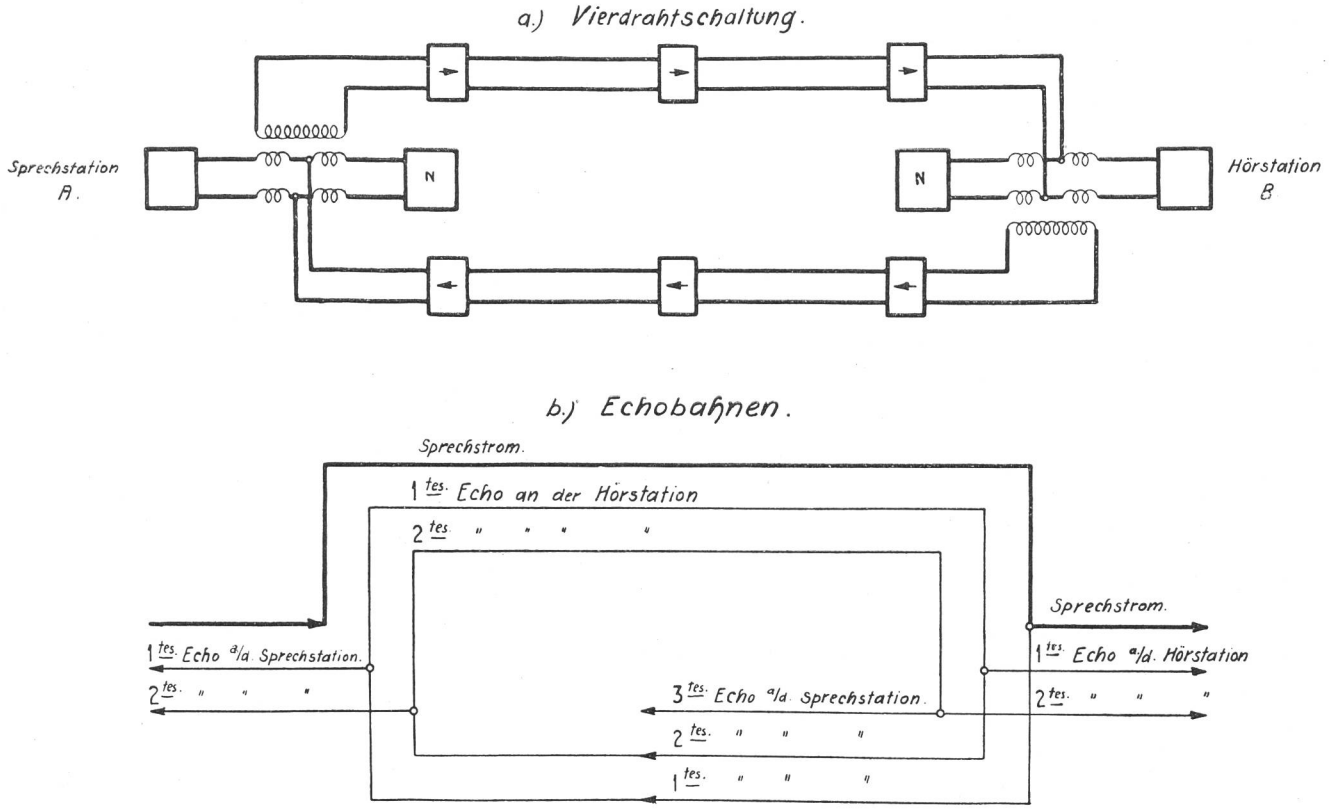


Fig. 3. Echobahnen in der Vierdrahtschaltung.

selben bleiben; weil ferner bei der höheren Fortpflanzungsgeschwindigkeit ein sicherer Telephonverstärkerbetrieb möglich ist, und weil endlich die Stromkreise, wie wir später sehen werden, verhältnismässig frei von Ausgleichserscheinungen bleiben. Die „mittlere" Belastungsart, für welche diese Auswirkungen nicht so stark in Betracht fallen, ist in elektrischem Sinne für kürzere Leitungen vorteilhaft, weil, infolge des niedrigeren Dämpfungsgrades, weniger Verstärker notwendig werden.

III. Das Echo.

Wo auf einer Telephonleitung eine Unregelmässigkeit oder Unausgeglichenheit auftritt, findet ein Zurückwerfen (Reflexion) von elektrischer Energie statt. Ist dabei der Stromkreis so lang, dass die Fortpflanzungszeit der von einem Leitungsende zum andern fliessenden elektrischen Sprechwellen einen gewissen Betrag überschreitet, und ist auch die Dämpfung der Leitung noch nicht so gross, dass die Reflexionswirkungen verschwinden, bevor sie das Ohr des abhörenden Teilnehmers erreichen, so kann dieser „Echo"-Wirkungen wahrnehmen. Im allgemeinen treten auf jeder Telephonleitung Reflexionswirkungen auf; sie sind aber nur dort als Echo hörbar, wo Telephonverstärker verwendet werden. Verstärkerleitungen haben in elektrischem Sinne gewöhnlich eine so grosse Länge, dass die Sprechwellen eine geraume Zeit brauchen, um bis zum Punkte einer Unregelmässigkeit oder Unausgeglichenheit zu gelangen und wieder zurückzufliessen; zudem sind die zurückgeworfenen Sprechwellen der Wirkung der Verstärker ausgesetzt.

Man beachte, dass die Echowirkungen auf langen Verstärkerleitungen denselben Störungen des Gleichgewichtes zuzuschreiben sind wie das auf kürzeren Leitungen auftretende „Singen" oder die Verzerrung der Sprechströme, die eine dem „Singen" verwandte Erscheinung darstellt. Auf elektrisch langen Stromkreisen, wo die zeitliche Verzögerung gross ist, fällt den Echowirkungen ausschlaggebende Bedeutung zu. Es ist deshalb notwendig, die Verstärkungsziffern der Verstärker auf solchen Leitungen in der Regel so niedrig zu halten, dass ein Zustand, welcher dem „Singen" nahe- oder gleichkommt, nicht auftreten kann.

Wir treten nun zunächst auf die Vierdrahtschaltung ein, da sie einfachere Echowirkungen aufweist als die Zweidrahtschaltung.

Die Fig. 3a zeigt das Schema der Vierdrahtschaltung, während Fig. 3b den Verlauf der Echoströme, verursacht durch die Unausgeglichenheiten an den Endpunkten, darstellen soll. Die in Fig. 3b stark ausgezogene Linie gibt den Verlauf des Sprechstromes für den Fall an, wo jemand von der Station A aus nach der Station B spricht, also über die obere Strombahn. Wenn dieser Strom den entfernten Endpunkt erreicht, so fliesst ein Teil davon nach der Hörstation B, während ein anderer Teil, infolge Ungenauigkeit in der Abgleichung zwischen wirklicher und künstlicher Leitung, über die untere Strombahn zum Endpunkte bei A zurückfliesst. Der Sprechende an der Station A hört diesen zurückfliessenden Strom als Echo, wenn die Vierdrahtleitung lang genug ist, um eine zeitliche Verzögerung zu verursachen. Bevor das erste Echo vom Sprechenden wahrgenommen wird, teilt es sich am Endpunkte A, in gleicher Weise wie bei B, in zwei Teile, wovon der eine über die obere Strombahn von Fig. 3a zum Hörenden zurückfliesst. Der Hörende

wird deshalb zuerst die ursprünglich übertragenen Sprechlaute und sehr kurz darauf ein Echo wahrnehmen. Dieser Vorgang wiederholt sich weiter und erzeugt eine Reihe von Echos, welche an den beiden Stationen A und B wahrgenommen werden.

Zur Veranschaulichung wurde eine Vierdrahtleitung von über 1600 Kilometer Länge hergestellt, bei der zur künstlichen Vergrösserung der Wirkungen die Abgleichungen an beiden Endpunkten absichtlich ungenau gestaltet wurden. Es konnten auf diese Weise über ein Dutzend aufeinanderfolgende Echos wahrgenommen werden, bevor die weiteren unhörbar wurden. Da die Sprechenergie bei jedem Echo 3200 Kilometer zurücklegen musste, so folgt daraus, dass sie insgesamt eine Strecke von der Länge des Erdumfangs durchlaufen musste, bevor sie unhörbar wurde.

Es ist klar, dass ein befriedigender Telephonbetrieb nur dann möglich ist, wenn die Echos im Vergleich zu der ursprünglichen Uebertragung gering sind. Wenn die ersten Echos verhältnismässig unbedeutend sind, so werden die nachfolgenden selbstverständlich noch viel schwächer erscheinen. Beträgt also die Energie des ersten Echos $\frac{1}{10}$ der ursprünglich übertragenen Energie, so wird das zweite Echo bloss $\frac{1}{100}$, das dritte bloss mehr $\frac{1}{1000}$ derselben ausmachen usw.

Auf einer „leicht" belasteten Leitung beträgt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit annähernd 32,000 Kilometer per Sekunde, während sie auf „mittel" belasteten Leitungen bloss 16,000 Kilometer per Sekunde ausmacht. Daraus geht hervor, dass die Zeit, die für die Sprechenergie erforderlich ist, um eine „leicht" belastete Leitung von 1600 Kilometer Länge zu durchlaufen, 0,05 Sekunden beträgt. Ein Echo, das vom einen zum andern Ende der Leitung und wieder zurück verliefe, würde somit 0,1 Sekunden später eintreffen als der Stromstoss, welcher es auslöste. Bei „mittel" belasteten Leitungen verdoppeln sich diese Zeitwerte.

In Fig. 4 sind die entsprechenden Vorgänge bei einer Zweidrahtschaltung dargestellt. Der Einfachheit halber ist bloss der Verlauf der ersten Echos eingetragen worden; die späteren Echos, die, wie bereits bemerkt, verhältnismässig schwächer auftreten, sind von geringerer Bedeutung. Bei einer derartigen Schaltung entstehen Reflexionen nicht nur an den Endpunkten der Leitung, sondern auch an vielen Zwischenpunkten, und zwar deshalb, weil der Gleichgewichtszustand zwischen den künstlichen Leitungen der Verstärkerschaltung (Nachbildungen) und den entsprechenden wirklichen Leitungen schlechterdings unvollkommen ist. Diese Unvollkommenheit rührt zum Teil von der mangelhaften Abgeglichenheit der zu der eigentlichen Verstärkerschaltung gehörenden Apparatur her; zum Teil ist sie den kleinen Unregelmässigkeiten zuzuschreiben, die sich beim praktischen Aufbau einer induktiv belasteten Leitung einzustellen pflegen. Weitere Reflexionen treten als Folge von Unterschieden in den Impedanzen der Verstärkerschaltung und der Leitung auf.

Fig. 4 zeigt drei Gruppen von Echos, welche den Sprechenden erreichen. Diese Gruppen verlaufen über einen oder mehrere Verstärker. Ausserdem wird ein verhältnismässig geringer Energiebetrag von den verschiedenen Unregelmässigkeiten zwischen der Sprechstation und dem nächstgelegenen Verstärker zum Sprechenden zurückgeworfen; diese Reflexionen sind nicht eingetragen worden,

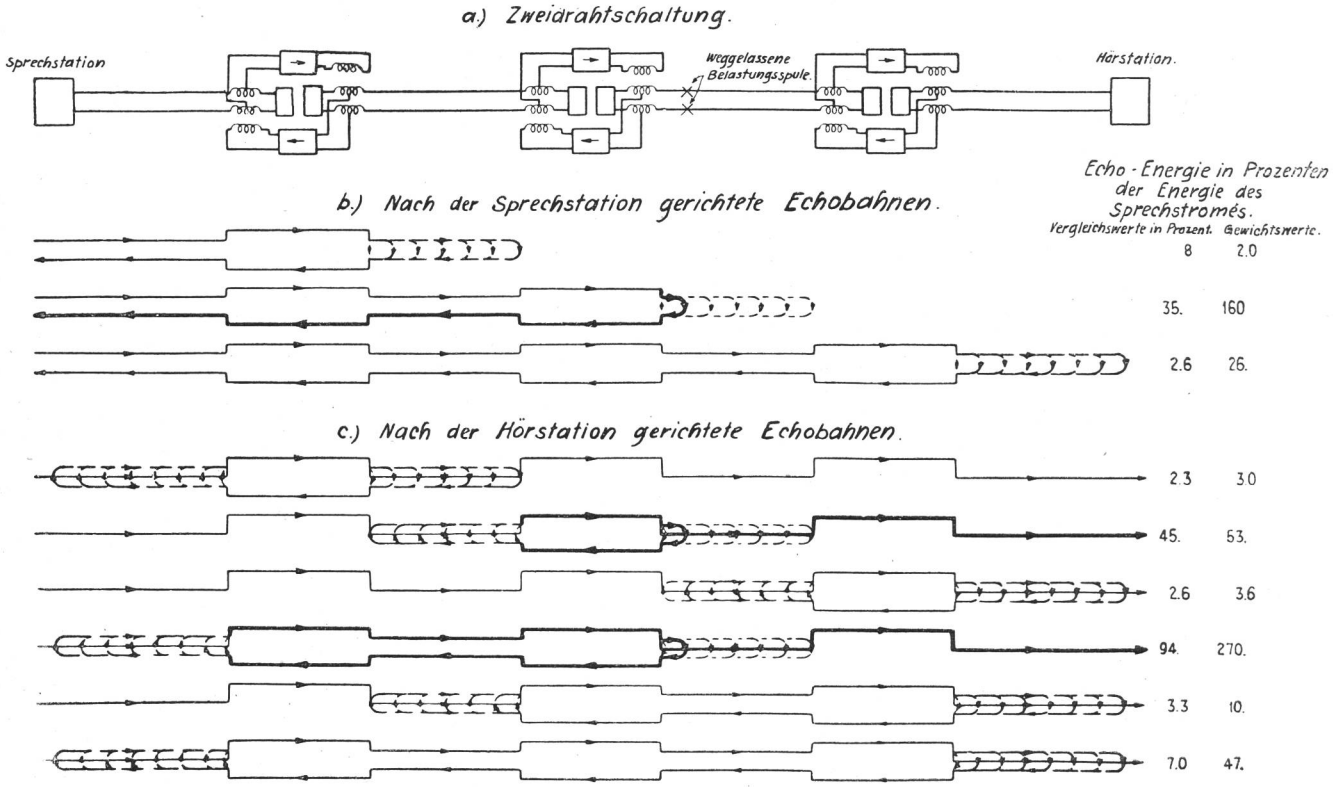


Fig. 4. Echobahnen bei Zweidrahtschaltung.

weil ihre Wirkungen vernachlässigt werden können. Sechs Gruppen von Echos erreichen den Hörenden. Für beide Gruppen von Echos sind die Reflexionen, die von den vielen, an verschiedenen Stellen auftretenden Unregelmässigkeiten herrühren, gestrichelt dargestellt.

Wenn die Zahl der Verstärker auf einer Leitung grösser ist, so wird die Zahl der Echogruppen sowohl mit Bezug auf den Sprechenden als auch mit Bezug auf den Hörenden grösser. Für den Sprechenden ist die Zahl der Gruppen von ersten Echos gleich der Zahl der Verstärker. Für den Hörenden beträgt sie $N\frac{(N+1)}{2}$, wo N die Anzahl der Verstärker bedeutet.

Es ist einleuchtend, dass die Sprechverständigung sowohl bei Vierdraht- als auch bei Zweidrahtschaltung durch die zurückfliessenden Energien beeinträchtigt wird, wenn sie gross genug sind. Nicht nur fühlt sich der Hörende im Empfang behindert, auch der Sprechende selbst wird stark verwirrt, besonders dann, wenn die Fortpflanzungszeit über die Leitung so gross ist, dass er ein deutliches Echo seiner eigenen Worte wahrnehmen kann.

Versuche haben gezeigt, dass die nachteiligen Echo-Wirkungen auf den Hörenden und den Sprechenden an Umfang zunehmen, wenn die Zeitverzögerung vergrössert wird. Das heisst nichts anderes, als dass es bei langen Telephonleitungen unerlässlich ist, entweder die Güte der Abgeglichenheiten zu verbessern, oder die Leitungen so zu bauen, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit grösser wird. Die Notwendigkeit, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf langen Leitungen gross zu machen, führte zur „leichten" induktiven Belastung für lange Leitungen.

Fig. 5 veranschaulicht, in welcher Weise ungefähr die Echo-Wirkungen mit der Zeit ihres Eintreffens variieren. Eine der Kurven stellt die Wirkung auf den Sprechenden, die andere diejenige auf den Hörenden dar. Die Kurvenwerte für die verschiedenen Zeitverzögerungen geben die den Echos entsprechenden, vergleichenden Dämpfungs- oder Energiewerte an, welche auf die gewöhnliche Sprechverständigung noch keinen beeinträchtigenden Einfluss auszuüben vermögen. Die Werte der „Hörer"-Kurve beziehen sich auf die durch den Hörer empfangene Energie, während diejenigen der Kurve für den Sprechenden auf die Energie bezogen sind, welche er der Leitung ursprünglich aufdrückt.

In Fig. 4, wo die Zustände bei Zweidrahtschaltung veranschaulicht sind, ist für jede Echoenergie unter der Annahme bestimmter Leitungsverhältnisse ein Vergleichswert angegeben. Für den Hörenden ist die Echoenergie in Prozenten der empfangenen Energie ausgedrückt, und für den Sprechenden in Prozenten der der Leitung ursprünglich verliehenen Energie. Ausserdem sind für diese Energien „Gewichtswerte" angegeben, die den „Gewichtsfaktor" enthalten. Im Gewichtsfaktor ist die Tatsache berücksichtigt, dass die Wirkungen gegebener Echoenergien um so nachteiliger werden, je grösser die Zeitverzögerung wird; Fig. 5 veranschaulicht dies deutlich. Aus Fig. 4 geht ferner hervor, dass die „Gewichtswerte" der Echoenergien für die langen

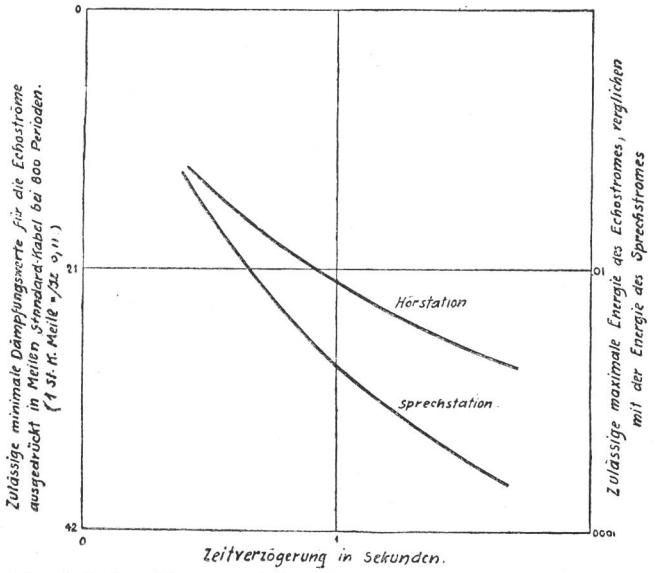


Fig. 5. Echowirkung auf die Sprech- und auf die Hörstation.

Echobahnen am grössten sind. Die angeführten Verhältnisse treten im allgemeinen bei den meisten Kabelleitungen mit Zweidrahtschaltung auf.

Um das Verhalten von Vierdraht- und Zweidrahtschaltungen miteinander vergleichen zu können, sei auf die Figuren 3 und 4 verwiesen. Aus der Fig. 4, wo die Zweidrahtschaltung veranschaulicht ist, geht hervor, dass vom Sprechenden ein Echo wahrgenommen wird, welches vom einen Ende der Leitung zum andern verläuft. Mit Fig. 3 verglichen, entspricht dieses Echo dem mit „erstes Echo an der Sprechstation" bezeichneten. Dasselbe trifft zu in bezug auf die Echos an der Hörstation: das Echo, dessen Bahn am längsten ist bei Zweidrahtschaltung, entspricht einem ähnlich zustandegekommenen bei der Vierdrahtschaltung. Aus der Betrachtung der Echoverhältnisse geht hervor, dass bei Zweidrahtschaltungen viel mehr Echobahnen vorhanden sind als bei Vierdrahtschaltungen, und hieraus ergibt sich wiederum die Tatsache, dass unter sonst gleichen Verhältnissen die Resultate für die Uebertragung, im Gesamten genommen, bei Zweidrahtschaltung nicht so günstig gestaltet werden können wie bei Vierdrahtschaltung.

Es ist einleuchtend, dass bei Zweidrahtschaltung irgend ein Leitungsfehler, der eine bedeutende Unregelmässigkeit zur Folge hat, den Stromkreis beträchtlich in Mitleidenschaft ziehen muss. Fig. 6 zeigt die Verhältnisse, die entstehen, wenn in einem Punkte der Leitung eine Belastungsspule weggelassen wird; die übrigen Bedingungen sind wie in Fig. 4 dargestellt angenommen. Die weggelassene Spule verursacht eine bedeutende Unregelmässigkeit im Wellenwiderstand, so dass gewisse Echos stärker, d. h. ihre vergleichenden Energien viel grösser werden als angegeben. Wollte man in diesem Fall die Echowirkungen auf der Leitung soweit herabmindern, als für einen befriedigenden Sprechverkehr unerlässlich wäre, so müsste man die Verstärkungsziffern der Verstärker herabsetzen. Für diesen besondern Fall wäre es angezeigt, die Entdämpfung um 4 Standardmeilen herabzumindern (4 Standardkabelmeilen entsprechen einem Werte von

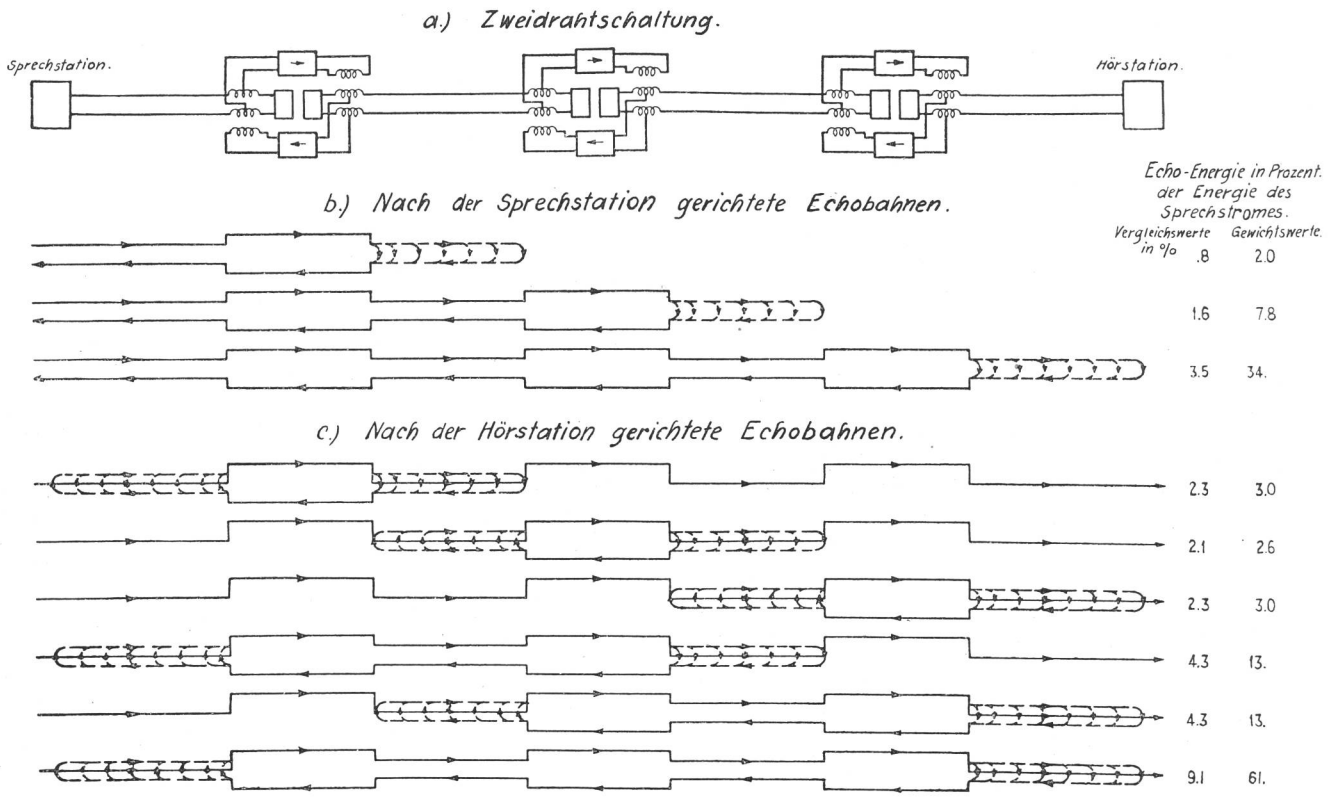


Fig. 6. Echobahnen auf Zweidrahtschaltung bei weggelassener Belastungsspule.

$\beta l = 0{,}44$); dies würde die Restdämpfung des Stromkreises von ungefähr 10 Standardmeilen auf ungefähr 14 Standardmeilen bei weggelassener Belastungsspule erhöhen.

Zum Schlusse dieses Abschnittes sei zusammenfassend auf einige wichtige Beziehungen zwischen zwei- und vierdrahtgeschalteten Leitungen mit Echowirkungen hingewiesen.

1. Die günstigste, d. h. die niedrigste erreichbare Restdämpfung einer vierdrahtgeschalteten Leitung (Gesamtdämpfung weniger die von den Verstärkern aufgebrachte Gesamt-Entdämpfung in einer Richtung) von gegebener Länge hängt einzig von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit und der Güte der Abgleichung an den Leitungsendpunkten ab. Liegen die Verhältnisse derart, dass die Güte der Abgleichung nicht mehr verbessert werden kann, so wird die Erhöhung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit noch eine günstigere (niedrigere) Restdämpfung zulassen.
2. Bei Zweidrahtschaltung mit Leitungen von genügender Regelmässigkeit haben die genaue Lage der Verstärker und die Grösse der Verstärkungsziffern der einzelnen Verstärker im gesamten genommen geringen Einfluss auf die Echowirkungen. Das ist der Tatsache zuzuschreiben, dass bei solchen Leitungen die von Ende zu Ende verlaufenden Echobahnen in der Regel stärker in Betracht fallen als die kürzeren Bahnen; die längsten Echobahnen werden aber durch das Verlegen von Verstärkern von einer Stelle zur andern oder durch das Verändern ihrer Verstärkungsziffern nicht betroffen, vorausgesetzt, dass die gesamthaft aufgebrachte Entdämpfung in jeder Richtung gleich bleibt.
3. Bei zweidrahtgeschalteter Leitung von gegebener Länge sind die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Regelmässigkeit der Teilstrecken von grösster Wichtigkeit für die Erzielung der im günstigsten Falle erreichbaren Restdämpfung; die Leitungsdämpfung ist von untergeordneter Bedeutung.

Obschon diese Abhandlung sich eigentlich auf Kabelleitungen bezieht, sei hier der Fall einer bekannten Freileitung angeführt, nämlich der Fall der transkontinentalen Freileitung New-York—San Franzisko, welcher als klarer Beweis für die obigen Ausführungen gelten darf. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit war derart, dass die Sprechwellen 0,07 Sekunden brauchten, um vom einen Ende der Leitung zum andern zu gelangen. Die Gesamtdämpfung betrug ungefähr 56 Standardkabelmeilen. Durch Anwendung von Verstärkern wurde es möglich, eine Restdämpfung von ungefähr 21 Standardmeilen zu erzielen. Die Beseitigung der Belastungsspulen erhöhte dann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, so dass die Zeit für die Sprachübertragung auf 0,02 Sekunden herabgemindert wurde; sie betrug also nur noch $^3/_{10}$ der Zeit, die beim belasteten Zustand nötig gewesen war. Die Dämpfung wurde dabei allerdings erhöht; die Gesamtdämpfung der Leitung ohne Verstärker betrug 120 Standardkabelmeilen, war also etwas mehr als doppelt so gross als beim belasteten Zustand. Als aber verbesserte Ver-

stärker verwendet wurden, die der erhöhten Dämpfung eine entsprechende höhere Entdämpfung entgegensetzen konnten, zeigte es sich, dass eine Restdämpfung von 12 Standardkabelmeilen, statt wie ursprünglich von 21 Meilen, übrig blieb. Das heisst also, dass bei gleicher, an einem Ende aufgedrückter Energie der Sprechströme die am andern Ende wahrgenommene Energie bei nicht belasteter Leitung 7 mal grösser war als bei belasteter Leitung. Die Beseitigung der Belastung hatte ferner eine bemerkenswerte Verbesserung in der Güte der Uebertragung zur Folge.

Bei dem besprochenen Beispiel der transkontinentalen Leitung drängt sich unwillkürlich die Frage auf, warum denn lange Kabelleitungen induktiv belastet werden müssen. Es geschieht dies aus zwei Gründen: Erstens ist es in der Regel billiger, Leitungsdämpfungen durch induktive Belastung herabzumindern als durch Verstärker. Zweitens wird durch die Induktivität die auf Kabelleitungen auftretende Verzerrung beseitigt, was mit Verstärkern nicht möglich ist. Bei Freileitungen ist infolge der kleinern Kapazität die Verzerrung viel geringer; die natürliche Induktivität genügt, um die Verzerrung niedrig zu halten.

IV. Verminderung der Dämpfung durch Verstärkung. Energie-Niveaulinien.

Die Dämpfung einer Kabelleitung ist bekanntlich um so grösser, je geringer die Induktivität gewählt wird; bei sehr „leicht" belasteten Leitungen ist sie also ausserordentlich gross. Eine „leicht" belastete 0,91 mm Leitung für Vierdrahtschaltung von 1600 Kilometer Länge weist die ungeheure Dämpfung von 500 Standardkabelmeilen auf. Die gesamte Energieverstärkung, welche zur Erzielung einer guten Sprechverständigung von den Verstärkern dieser Leitung aufzubringen wäre, müsste den 10^{47}-fachen Betrag des Endstromes erreichen. Dieser Grad der Verstärkung wäre so hoch, dass damit über eine Freileitung aus 4,19 mm Draht halbwegs um die Erde, am Aequator gemessen, gesprochen werden könnte. (Der 4,19 mm Draht wiegt 120 kg pro km; er wird allgemein für lange Telephon-Freileitungen verwendet).

Von dieser ungeheuren Verstärkung erhält man einen Begriff, wenn man sich die Aufgabe stellt, an einem Ende der Leitung eine so grosse Energie aufzubringen, dass am andern Ende — und zwar ohne Verstärkung — noch eine genügende Lautwirkung wahrnehmbar ist. In diesem Falle müsste die aufgebrachte Energie 50 Quadrillionen mal grösser sein als die schätzungsweise ermittelte Energie, welche die Sonne als Wärme in den Weltenraum abgibt.

Wenn auch im allgemeinen die Gesamtverstärkung sehr gross ist, so sind doch naturgemäss die Verstärkungsbeträge (Verstärkungsziffern), die an den einzelnen Verstärkerstellen aufgebracht werden können, begrenzt, da sowohl die Leistungsfähigkeit der Verstärkerröhren als auch das Energie-Uebertragungsvermögen der Telephonleitung samt Belastungsspulen beschränkt sind. (Unter Energie-Uebertragungsvermögen ist hier die Eigenschaft verstanden, ohne starke Verzerrung Sprechwellen zu übermitteln). Die aufgebrachten Energien dürfen auch deswegen nicht zu gross bemessen sein, weil sonst zu starkes Uebersprechen auf andere Leitungen stattfände.

Im Anschluss an diese Ausführungen muss aber auch betont werden, dass die Energie an irgend einer Stelle der Leitung nicht zu klein werden darf, ansonst die Uebersprechenergien aus benachbarten Leitungen wegen zu geringer Energie der eigenen Sprechströme störend bemerkbar würden. Es ist selbstverständlich, dass das Verhältnis zwischen den Energien fremder Quellen (parallel verlaufende Telegraphen- oder Starkstromleitungen) und der Energie der Sprechströme einen möglichst kleinen Wert darstellen muss, wenn die Telephonleitungen geräuschfrei bleiben sollen.

In Fig. 7 ist bildlich dargestellt, wie auf einer langen Leitung die Energie der Sprechströme gedämpft und wiederum verstärkt erscheint. Die betreffende Leitung gleicht denjenigen, welche für die Strecke New-York—Chicago vorgeschlagen sind. Es ist eine „leicht" belastete Leitung in Vierdrahtschaltung aus 0,91 mm Draht; sie verläuft zur Hauptsache in Luftkabeln und enthält automatische Vorrichtungen gegen die Dämpfungsänderungen, die infolge der Einwirkung von Temperaturwechseln

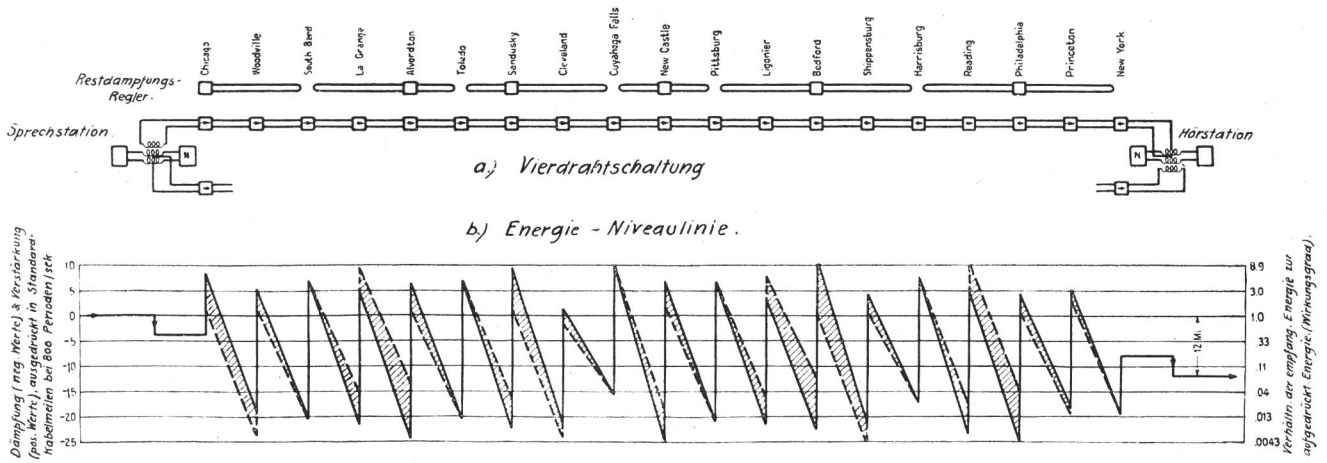


Fig. 7. Energie-Niveaulinien der „leicht" belasteten Vierdrahtschaltung New-York—Chicago.

auf den Widerstand der Leiter auftreten. (Eine Beschreibung dieser selbsttätigen Vorrichtungen, Restdämpfungsregler genannt, befindet sich an anderer Stelle dieser Abhandlung). Der Einfachheit halber sind die Energie-Niveaulinien nur für eine Sprechrichtung angegeben. Die stark ausgezogenen Linien stellen die Energie-Niveaux dar, wie sie erscheinen, wenn die Temperatur und daher auch die Dämpfung am höchsten sind; die punktierten Linien stellen die Niveaux bei niedrigster Temperatur dar, wenn auch die Dämpfungsverluste am geringsten sind. Die schraffierten Flächen ihrerseits veranschaulichen die Aenderungen im Verlauf eines Jahres.

Wenn eine Uebertragung nach beiden Richtungen (Gegensprechen) verwirklicht werden soll, so ist mit der Tatsache zu rechnen, dass an den selben Punkten der Schaltungen die nach einer Richtung fliessende Energie ein Maximum, die nach der andern Richtung fliessende Energie dagegen ein Minimum beträgt. Diese Tatsache begünstigt in hohem Masse das Uebersprechen von einer Vierdrahtschaltung auf eine andere. Um diese unerwünschte Wirkung zu verhüten, müssen die Leiter, welche hohe Sprechstromenergien aufweisen, von den Leitern mit geringen Sprechstromenergien elektrisch getrennt geführt oder abgeschirmt werden; dies ist in Fig. 8 schematisch dargestellt, wo die Leiter mit hohen Energien stark ausgezogen oder stark gestrichelt und diejenigen mit geringen Energien schwach ausgezogen oder schwach gestrichelt sind. Im Kabel selbst wird die Abschirmung dadurch erreicht, dass die Uebertragungsleitungen in zwei Bündel gruppiert werden, von denen das eine aus den Leitungen nach der einen und das andere aus den Leitungen nach der andern Richtung besteht; dabei ist Sorge getragen, dass die Bündel so gut wie möglich elektrisch getrennt liegen. In den Belastungsspulenkasten werden die Spulen für die Uebertragungsleitungen gleicherweise nach Richtungen abgeschirmt. In den Verstärkerstellen tritt an Stelle der Abschirmung eine entsprechende Anordnung der Verstärkersatzapparatur, wie sie in Fig. 8 dargestellt ist. Wie ersichtlich, genügt es, die den Ausgangsstromkreisen angehörenden Apparate und Kabel von denjenigen der Eingangsstromkreise getrennt zu halten.

V. Verzerrung der Sprechlaute.

Die Ursachen der Verzerrung verteilen sich in der Hauptsache:

1. auf Verstärkerelemente und zugehörige Schaltungsapparatur und
2. auf die Leitungen.

Was zunächst die durch die Verstärkerelemente verursachte Verzerrung anbetrifft, so darf gesagt werden, dass das Vakuumrohr mit drei Elektroden sozusagen vollständig verzerrungsfrei ist, wenigstens insoweit, als die praktische Telephonie in Frage steht. Als einmal zu Prüfzwecken 32 Vakuumröhren mit den zugehörigen Schaltungen in Reihe angeordnet wurden, wies diese Sprechleitung eine so geringe Verzerrung auf, dass es sehr schwierig war, bei Ein- oder bei Ausschaltung der 32 Röhren einen Unterschied in der Deutlichkeit und Klangfarbe der Sprechlaute festzustellen.

Es würde über den Rahmen dieser Abhandlung hinausgehen, wenn wir uns hier mit den Konstruktionsproblemen befassen wollten, die bei der Entwicklung von Verstärkerschaltungen auftraten. Für den Zweck dieser Besprechung, welche die Gesamtwirkungsweise von Verstärkerschaltungen auf Kabelleitungen zu beleuchten versucht, darf ganz wohl angenommen werden, dass die Verstärkerschaltungen den Anforderungen, wie sie von Gherardi-Jewett an eine vollkommene Verstärkereinrichtung gestellt werden, im ganzen genügen.

Untersucht man hier anschliessend die Verzerrungsursachen der Leitungen, so muss, wie schon angedeutet, die induktive Belastung möglichst regelmässig sein, da Fehler im Gleichgewichtszustand erhebliche Störungen auf Zweidrahtstromkreisen verursachen können. Regelmässigkeit in der Belastung ist ebenfalls ausschlaggebend, um Verzerrungen infolge ungenauer Uebertragung der verschiedenen Frequenzen zu vermeiden. Zur Erzielung dieser Regelmässigkeit in der Belastung ist es notwendig, die Abstände zwischen den Belastungsstellen möglichst gleich zu machen und das Kabel so herzustellen und zu verlegen, dass die Kapazitätsunterschiede der Adernpaare unter sich gewisse Werte nicht überschreiten. Die Belastungsspulen selbst müssen in ihren elektrischen Eigenschaften möglichst über-

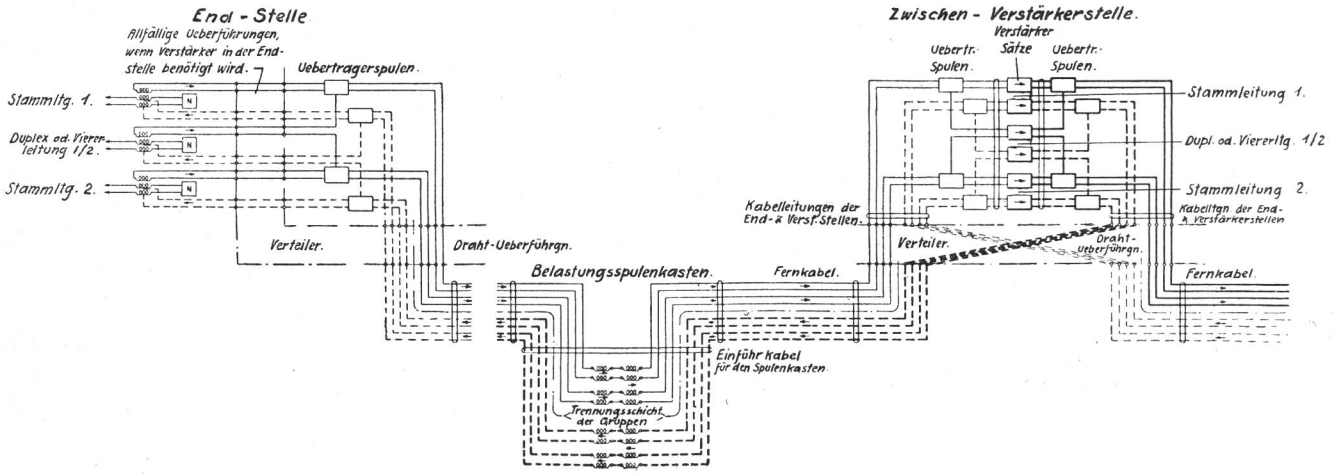


Fig. 8. Vierdrahtschaltung-Gruppierung der Leitungen zur Verminderung des Nebensprechens.

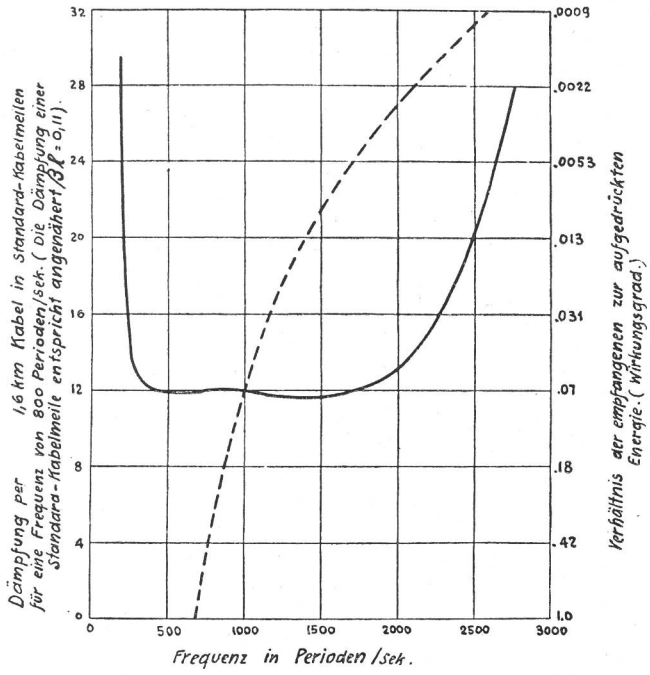


Fig. 9. Restdämpfungskurven für verschiedene Frequenzwerte bei „leicht" belasteter langer Vierdrahtleitung.

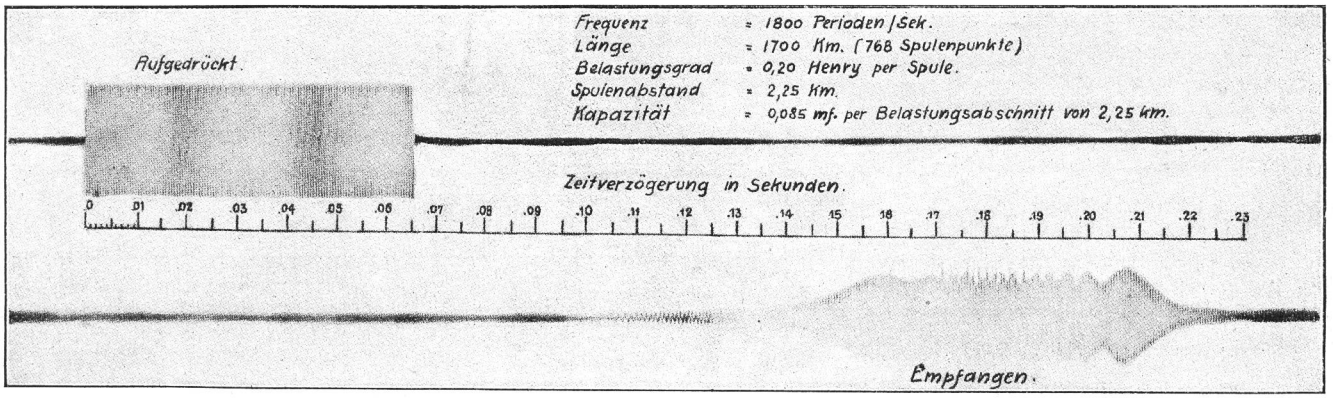
einstimmen; ferner müssen sie von hoher Stabilität sein, d. h. ihre elektrischen Eigenschaften dürfen sich beim Durchgang von Sprechströmen oder andern beim Kabelbetrieb auftretenden Strömen nicht erheblich verändern.

Ausserdem müssen die Verstärkerelemente und die zugehörigen Schaltungsapparate für längere Leitungen, im besondern für Vierdrahtstromkreise, so gebaut sein, dass bei verschiedenen Frequenzlagen verschiedene Entdämpfungsgrade erzielt werden; dies ist notwendig, weil die Restdämpfung annähernd unveränderlich bleiben muss, obschon die von der Leitung verursachte Dämpfung für die verschiedenen Frequenzlagen nicht die gleiche ist. In Fig. 9 ist die Restdämpfung (Gesamtübertragungsmass) dargestellt als Funktion der Frequenz für einen zu Prüfzwecken aufgebauten, „leicht" belasteten Vierdrahtstromkreis von 1750 Kilometer Länge. Die stark ausgezogene Linie entspricht den Restdämpfungswerten, die mit Verstärkerelementen und für veränderliche Entdämpfung geeigneten Schaltungsapparaten tatsächlich verwirklicht worden sind. Aus dem Verlauf der punktierten Linie, welche die Restdämpfungswerte bei denselben Frequenzen, aber bei gleichbleibender Entdämpfung veranschaulicht, kann der Umfang der vermiedenen Verzerrung ermessen werden.

VI. Ausgleichsvorgänge.

Auf verhältnismässig kurzen Telephonleitungen kann in der Regel eine gute Sprechverständigung erreicht werden, wenn darauf gesehen wird, dass das Uebertragungsmass bei den verschiedenen Einzelfrequenzen aus dem Frequenzband der Sprechwellen sich nahezu gleich bleibt. Bei „elektrisch" langen Stromkreisen genügt dies jedoch nicht mehr. Hier müssen nicht bloss die „Echo-"Wirkungen in ihrem Auftreten begrenzt, sondern es muss auch die Tatsache berücksichtigt werden, dass sich beim Senden von elektrischen Stromstössen über derartige Leitungen eigentümliche, rasch vorübergehende Vorgänge abspielen. Sie erfolgen in gleicher Stärke sowohl in beidseitig wirkenden Schaltungen als auch in Schaltungen, die bloss zur Uebertragung nach einer Richtung dienen; es ergibt sich daraus, dass diese flüchtigen Vorgänge den „Echo"-Wirkungen nicht verwandt sind.

Die Figuren 10, 11, 12 und 13 zeigen einige Oszillogramme, mit deren Hilfe man sich einen Begriff von den Vorgängen machen kann, die hiernach als Ausgleichsvorgänge bezeichnet werden. Fig. 10 veranschaulicht einen Strom von 1800 Perioden/Sec. am Anfang und am Ende seines Verlaufes über eine Kabelleitung älterer Bauart von 1700 km Länge. Diese Leitung bestand aus 1,82 mm Leitern im Gewicht von 23 kg per Kilometer, war mit Spulen von 0,2 Henry in Abständen von 2,25 Kilometern belastet und enthielt 6 Einrohr-Verstärker. Wie ersichtlich, war das erste Anzeichen vom Eintreffen eines Stromes am Empfangsende ungefähr 0,1 Sekunde nach dem Augenblicke festzustellen, wo die Welle am Sendeort abgegeben worden war. Diese Zeit stimmt mit der oben angegebenen Formel über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit überein. Die Zeit, die nach dem Auftreten des ersten Anzeichens bei „a" zum Einschwingen der Welle erforderlich ist, bis sich bei „b" ein eigentlicher Dauerzustand ausgebildet hat, beträgt ungefähr 0,055 Sekunden. Der Dauerzustand setzt bei „c", d. h. beim Beginn einer weiteren Phase des Ausgleichsvorganges, infolge



a b c d

Fig. 10. Ausgleichvorgänge in einer 1,82 mm Kabelleitung mit „mittlerer" Belastung.

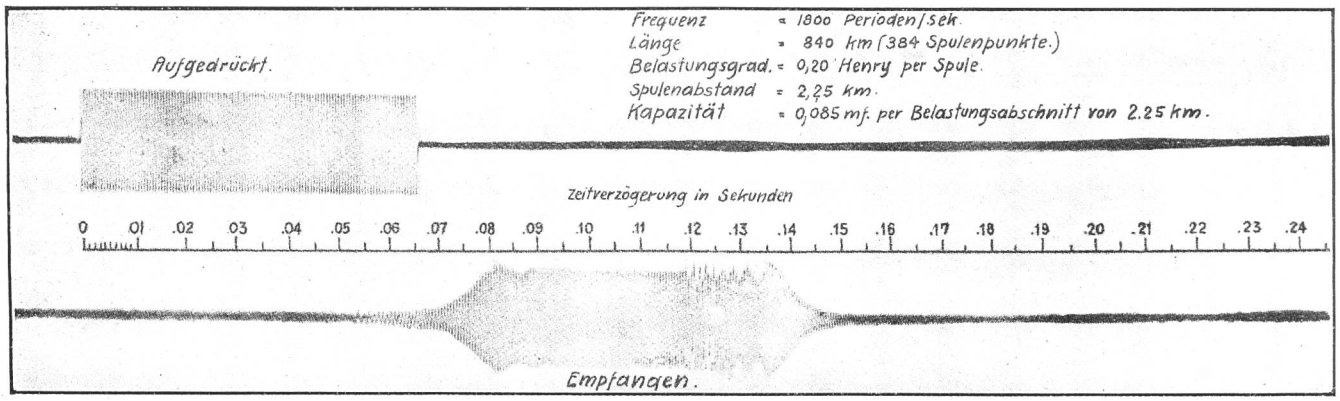


Fig. 11. Ausgleichvorgänge in einer 1,82 mm Kabelleitung mit „mittlerer" Belastung.

Unterbrechung des Stromes aus; der Zeitraum von „b" bis „c", wo der Dauerzustand anhält, beträgt bloss 0,01 Sekunde. Die Welle benötigte ungefähr 0,055 Sekunden zum Ausschwingen, nämlich den Zeitraum „c—d".

Man beachte genau das Verhalten des Stromes in den Zeiträumen des Ein- und Ausschwingens. Während des Einschwingvorganges wächst die Frequenz des Empfangsstromes von einem sehr niedrigen Werte bei „a", bis sie bei „b" den Frequenzwert des Ursprungsstromes erreicht. Die Stärke des Empfangsstromes nimmt ebenfalls zu, bis sie bei „b" auf einen Wert steigt, der vom dauernden Uebertragungsvermögen der Leitung abhängig ist. Der Zeitraum zwischen „a" und „b" wird ausschliesslich von der Leitungsbeschaffenheit bestimmt und hat mit der Zeitdauer des am Anfange der Leitung abgegebenen Stromes nichts zu schaffen.

Als Ursache des Ausschwingvorganges kann man einen zweiten, in der Phase entgegengesetzt gerichteten Strom von derselben Stärke voraussetzen, der beim Unterbrechen des ursprünglichen Stromes seinen Anfang nahm; die beiden Ströme werden sich dann gegenseitig aufheben. Unter dieser Voraussetzung kann erwartet werden, dass der Empfangsstrom erst verschwinden wird, nachdem ein Ausgleichsvorgang stattgefunden hat, der dem Einschwingvorgang im Zeitraum „a—b" ähnlich ist. Wie das Verhalten im Zeitraume „c—d" beweist, trifft dies in Wirklichkeit zu. Anfänglich verursacht die geringere Frequenz des Stromes während des Ausgleichsvorganges beim Unterbrechen eine Achsenverschiebung des Dauerstromes. Sobald sich aber die Frequenz einem gleichbleibenden Werte nähert, macht sich ein Schwebungsvorgang bemerkbar, welcher an Stärke abnimmt, bis die Phasen vollkommen entgegengesetzt gerichtet sind und der Empfangsstrom verschwindet.

Die aus Fig. 10 ersichtlichen Vorgänge dürften es verständlich machen, dass ein Sprechstromstoss, dessen Frequenz ungefähr 1800 Per./Sec. betrüge, stark verzerrt würde, auch wenn er im richtigen Stärkeverhältnis am Empfangsende einträfe.

Wenn über eine Leitung wie die vorbeschriebene telephoniert werden soll, so wird die Sprechverständigung infolge der Verzerrung schwierig; es sind eigentümliche, metallisch klingende Töne hörbar.

Anschliessend sei eine Leitung vom selben Charakter untersucht, die aber um die Hälfte kürzer ist. Die Wirkung einer solchen Leitung auf Stromwellen von 1800 Per./Sec. ist aus dem Oszillogramm der Fig. 11 ersichtlich. Die Fortpflanzungszeit erscheint nur halb so gross, und die Einschwing- wie auch die Ausschwingzeit sind ebenfalls entsprechend geringer. Das stimmt genau mit den theoretischen Erwägungen, welche darauf hindeuten, dass die beeinträchtigenden Wirkungen von Ausgleichsvorgängen der Länge der Leitungen direkt proportional sind. Dies ist der Grund dafür, dass eine kürzere Leitung annehmbare, eine längere aber unbefriedigende Resultate ergibt.

Fig. 12 zeigt, was geschieht, wenn am Sendeende der Leitung ein Strom von so hoher Frequenz abgegeben wird, dass kein Dauerstrom auf der Leitung

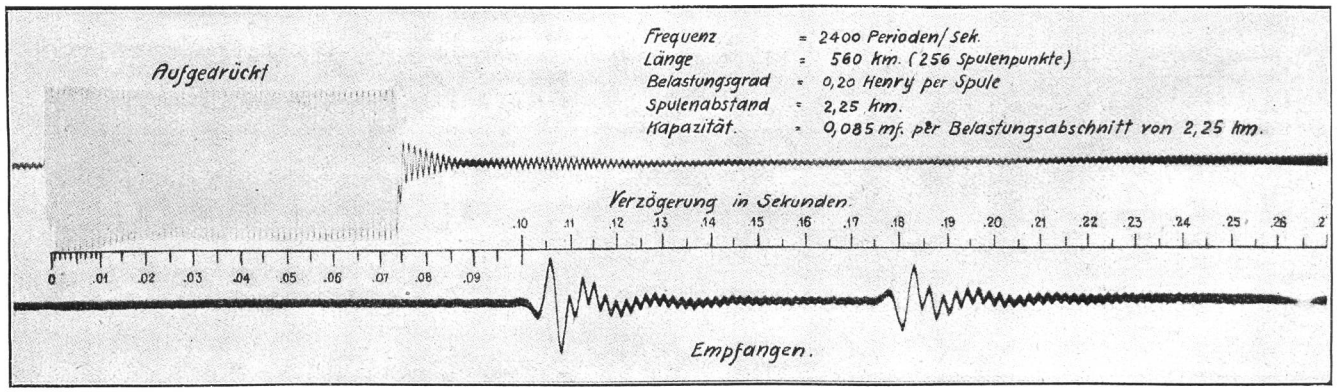


Fig. 12. Ausgleichvorgänge in einer 1,82 mm Kabelleitung mit „mittlerer" Belastung.

wahrnehmbar ist. In diesem Falle treten nur Ausgleichsschwingungen am Empfangsende in Erscheinung. Die zu diesem Versuche benützte Leitung war vom selben Charakter wie die vorher erwähnte; ihre Länge betrug aber nur 570 km.

In Verbindung mit dem Studium der Wirkungen von Ausgleichsvorgängen sind eine grosse Zahl Oszillogramme aufgenommen worden. Aus diesen Unterlagen und aus den theoretischen Betrachtungen* ging hervor, dass die Wirkungen auf ein und derselben Leitung bei hohen Frequenzen viel nachteiliger sind als bei niedrigen Frequenzen; der Grad der Beeinträchtigung erwies sich innert gewisser Grenzen als eine Funktion des Verhältnisses aus der übertragenen Frequenz und der Grenzfrequenz der induktiv belasteten Leitung. Der Querschnitt der Leiter übt praktisch keinen Einfluss aus.

Gute Sprechverständigung erheischt eine ziemlich gute Uebertragung aller Frequenzen bis hinauf zu mindestens 2000 Per./Sec. Wenn also die Wirkungen der Ausgleichsvorgänge gering sein sollen, so muss die Grenzfrequenz hoch sein. Letzteres wird erzielt durch Belastungsspulen von sehr niedriger Induktanz oder durch starke Verminderung ihrer Abstände. Dies ist also ein weiterer Grund dafür, dass für lange Kabelstromkreise „leichte" Belastung gewählt wurde. (Wie angeführt, beträgt die Induktanz der Belastungsspulen für Stammleitungen 0,044 Henry, während die Abstände 1,8 km betragen).

Die Wirkung einer leichteren Belastung in bezug auf die Ausgleichsvorgänge ist in Fig. 13 dargestellt, aus welcher ersichtlich ist, wie eine 2000-periodige Stromwelle über eine „leicht" belastete Leitung von ungefähr 1700 km Länge übertragen wird. Der Stromkreis enthielt 23 Einrohr-Verstärker. Sowohl die Dauer der Einschwing- als auch diejenige der Ausschwingvorgänge wurden sehr stark verringert, was heissen will, dass alle Telephonstromstösse bis hinauf zu 2000 Perioden/Sec. die Leitung mit sehr geringer Verzerrung durchflossen.

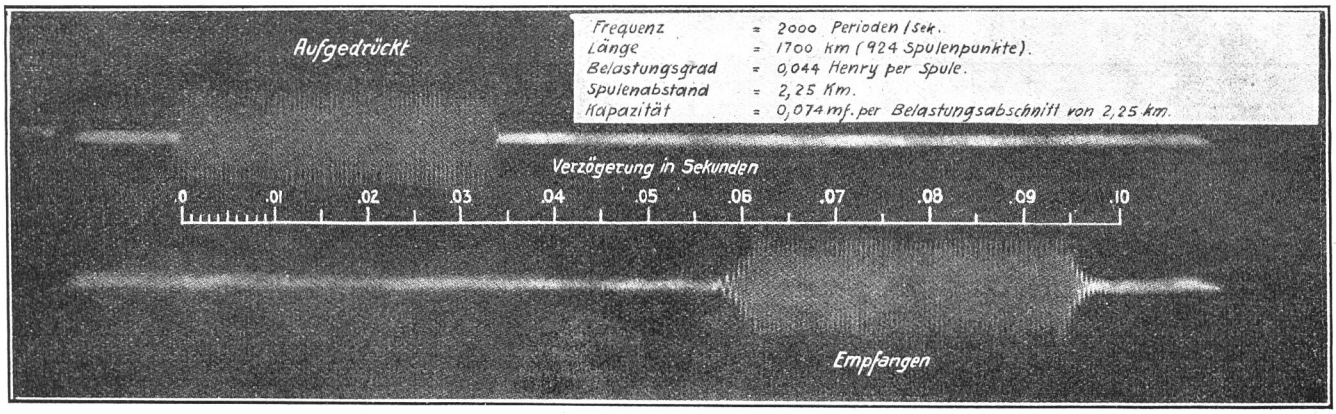


Fig. 13. Ausgleichvorgänge in einer 0,91 mm Kabelleitung mit „leichter" Belastung.

VII. Stabilität.

Wie bereits gesagt, ist die Grösse der Gesamtleitungsdämpfung bei einem mit Verstärkern ausgerüsteten Stromkreis von verhältnismässig geringer Bedeutung zur Bestimmung der erreichbaren Restdämpfung, handle es sich nun um eine Zweidraht- oder eine Vierdrahtschaltung. Grösste Wichtigkeit kommt jedoch der Einstellung der Verstärkungsziffern zu, da der Unterschied zwischen Gesamtdämpfung und Gesamtentdämpfung, welcher der Restdämpfung des Stromkreises entspricht, stabil bleiben muss.

Für gewisse lange Leitungen wird dieser Unterschied im Vergleich zu den subtrahierten Grössen sehr klein. So beträgt die Gesamtdämpfung einer 1600 km langen Leitung in Vierdrahtschaltung aus 0,9 mm „leicht" belasteten Leitern ungefähr 500 Standardkabelmeilen. Andererseits beläuft sich die Gesamtentdämpfung auf 488 Standardkabelmeilen und der Unterschied oder die Restdämpfung somit auf 12 Meilen, wenn der für die Verluste in der Schaltungsapparatur und der Kabelführung der Verstärkerstellen aufzubringende Entdämpfungsbetrag vernachlässigt wird. Es ist einleuchtend, dass eine geringe prozentuale Aenderung, sei es in der Gesamtdämpfung oder -Entdämpfung, einen grossen Einfluss auf den Restbetrag ausüben muss. Während dieses Beispiel beinahe den ungünstigsten Fall darstellt, zeigen die nachfolgenden Beispiele etwas günstigere Verhältnisse:

2-Drahtschaltung: 0,9 mm, „mittel" belastete, 320 km lange Leitung. Gesamtdämpfung 58 Meilen. Gesamtentdämpfung, ausschliesslich des Equivalentes für die Verluste in der Apparatur und Kabelführung der Verstärkerstellen, 46 Meilen. Restdämpfung 12 Meilen.

4-Drahtschaltung: 0,9 mm, „mittel" belastete, 800 km lange Leitung. Gesamtdämpfung 145 Meilen. Gesamtentdämpfung ausschliesslich des Equivalentes für die Verluste in der Apparatur und Kabelführung der Verstärkerstellen, 133 Meilen. Restdämpfung 12 Meilen.

Zur Stabilisierung der Restdämpfung auf langen, mit Verstärkern ausgerüsteten Kabelleitungen ist es vor allem notwendig, die Verstärkungsziffern der einzelnen Verstärker so konstant als möglich zu halten. Ausserdem sind von Zeit zu Zeit Dämpfungsmessungen an den Gesamtstromkreisen vorzunehmen, und es ist durch Neueinstellung der Verstärkungsziffern einzelner Verstärker dafür zu sorgen, dass die Restdämpfung innerhalb der vorgeschrie-

*) John R. Carson — „Theory of the Transient Oscillations of Electrical Networks and Transmission Systems". Transactions of A. I. E. E. Vol. XXXVIII, page 407.

benen Grenzen bleibt. Ferner treten auf sehr langen, dünndrähtigen Leitungen Dämpfungsunterschiede auf, die von Temperaturwechseln und in der Folge von Widerstandsänderungen herrühren und die so gross werden können, dass die Anwendung automatischer Reguliervorrichtungen unerlässlich wird.

Im nachstehenden werden wir nun zunächst die gebräuchlichsten Methoden zur Stabilisierung der Verstärkungsziffern einzelner Verstärker und zur Konstanthaltung der Restdämpfungen auseinandersetzen und daran anschliessend die automatischen Restdämpfungsregler beschreiben.

VIII. Wichtige Prüfungen und Einstellungen.

Um einen möglichst stabilen Verstärkungsgrad der Vakuumröhren zu erzielen, muss schon bei der Fabrikation durch fortgesetzte scharfe Kontrolle für Gleichförmigkeit sowohl in der Ausführung als auch in der Wirkungsweise gesorgt werden. Beim Betriebe müssen die vorgeschriebenen Stromstärken und Spannungen konstant gehalten werden. Beispielsweise sind für einen der gebräuchlichen Verstärker-Typen die Betriebsgrenzwerte für Spannungen, Stromstärke und entsprechende Verstärkungsziffer-schwankungen wie folgt vorgeschrieben:

Elektr. Grösse, variabel	Vorgeschriebene Werte	Zulässige Schwankungen der Verstärkungsziffer
Plattenpotential:	130 ($\pm$ 5) Volt	$\pm\beta l$ 0,022 oder $\pm$ 0,2 Standardmeilen
Gitterpotential:	9 ($\pm$ 1) Volt	$\pm\beta l$ 0,033 oder $\pm$ 0,3 Standardmeilen
Heizstrom:	1,25 ($\pm$ 0,05) Amp.	Für neue Röhren sind die Werte viel geringer. Grenzwert für Röhren vor Auswechslung βl = — 0,11 oder — 1 Standardmeile.

Die Verstärkungsziffern der Röhren sind im Betriebe nur dann neu einzustellen, wenn die für den normalen Betrieb vorgeschriebenen Grenzen überschritten werden. Aendert bei diesem Röhrentyp mit der zulässigen Aenderung des Heizstromes die thermionische Wirkung derart, dass die Verstärkungsziffer um mehr als βl = 0,11 (1 M. S. C.) abnimmt, so ist die betreffende Röhre durch eine bessere zu ersetzen.

In Fig. 14 ist die Schaltung einer Einrichtung dargestellt, die zur Feststellung der Verstärkungsziffer von Vakuumröhren dient. Die Feststellung erfolgt durch Vergleichung der von einem Wechselstrom-Generator AC an den Widerständen R und R' erzeugten Klemmenspannungen. R' überbrückt den Verstärker-Stromkreis, R den Vergleichs-Stromkreis. Die Drehschalter A und B, an deren Kontakten genau geeichte Widerstände angeschlossen sind, dienen zum Einstellen der Klemmenspannungen bei R und R'. Die rechte Hälfte der Fig. 14 zeigt die zur Messung und Vergleichung dieser Spannungen geeignete, sehr empfindliche Einrichtung, welche mit Hilfe eines zweipoligen Umschalters mit R oder mit R' verbunden werden kann. Sie besteht aus einer Verstärker- und einer Gleichrichterschaltung und aus einem sehr empfindlichen Gleichstrom-Galvanometer zur Messung der erwähnten verstärkten und gleichgerichteten Klemmenspannungen. Reguliert man mit Hilfe der Drehschalter A und B die Spannungen bei R und R' so, dass sie einander genau gleich sind, so lässt sich aus den Schalterstellungen A und B die Verstärkungsziffer eines Verstärkersatzes und damit der Vakuumröhre im besondern bis auf einige Zehntel genau in βl-Einheiten oder in Standardmeilen ermitteln. Da sämtliche im Prüfstromkreis eingeschalteten Widerstände induktionsfrei sind, so sind die Prüfungsresultate für alle in der Telephonie wichtigen Frequenzen (bis 2000 Perioden) unbedingt richtig.

Wie schon betont, müssen zur dauernden Aufrechterhaltung eines konstanten Uebertragungsniveaus bei Verstärkerstromkreisen periodische Prüfungen der vollständigen Stromkreise durchgeführt werden. Bei dieser Gelegenheit lassen sich dann auch noch leicht andere als die bisher genannten Ursachen von Dämpfungsänderungen ermitteln, z. B. zeitlich zufällig zusammenfallende Aenderungen einzelner Verstärkungsziffern, geringe, trotz automatischen Restdämpfungsreglern noch vorkommende Dämpfungsänderungen, oder durch Feuchtigkeit verursachte Aenderungen des Isolationszustandes der Drähte in Verstärker- und andern Betriebsstellen. Die regelmässigen periodischen Prüfungen werden

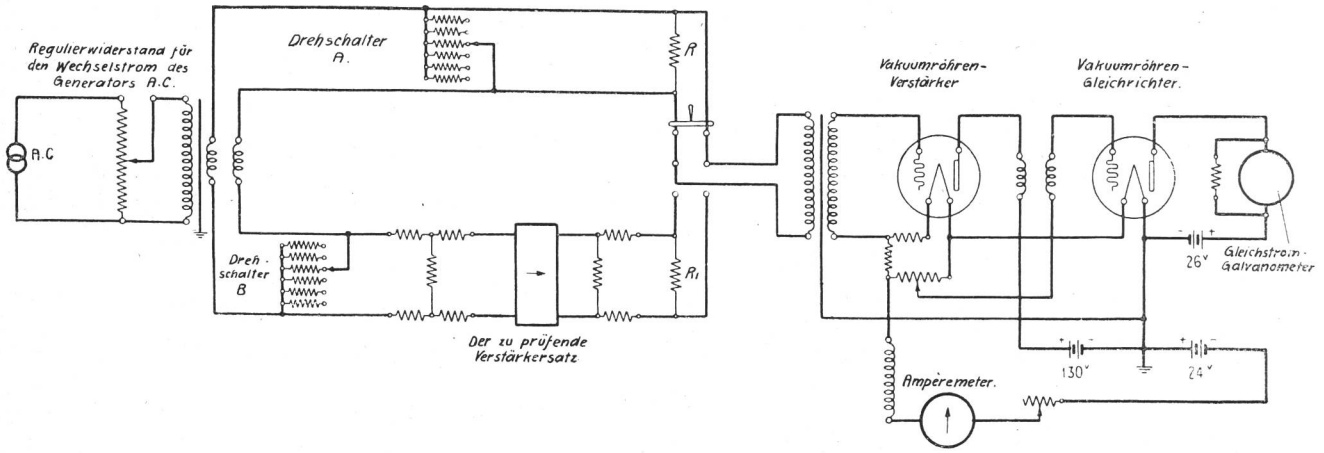


Fig. 14. Einrichtung zur Prüfung der Verstärkungsziffern von Vakuumröhren.

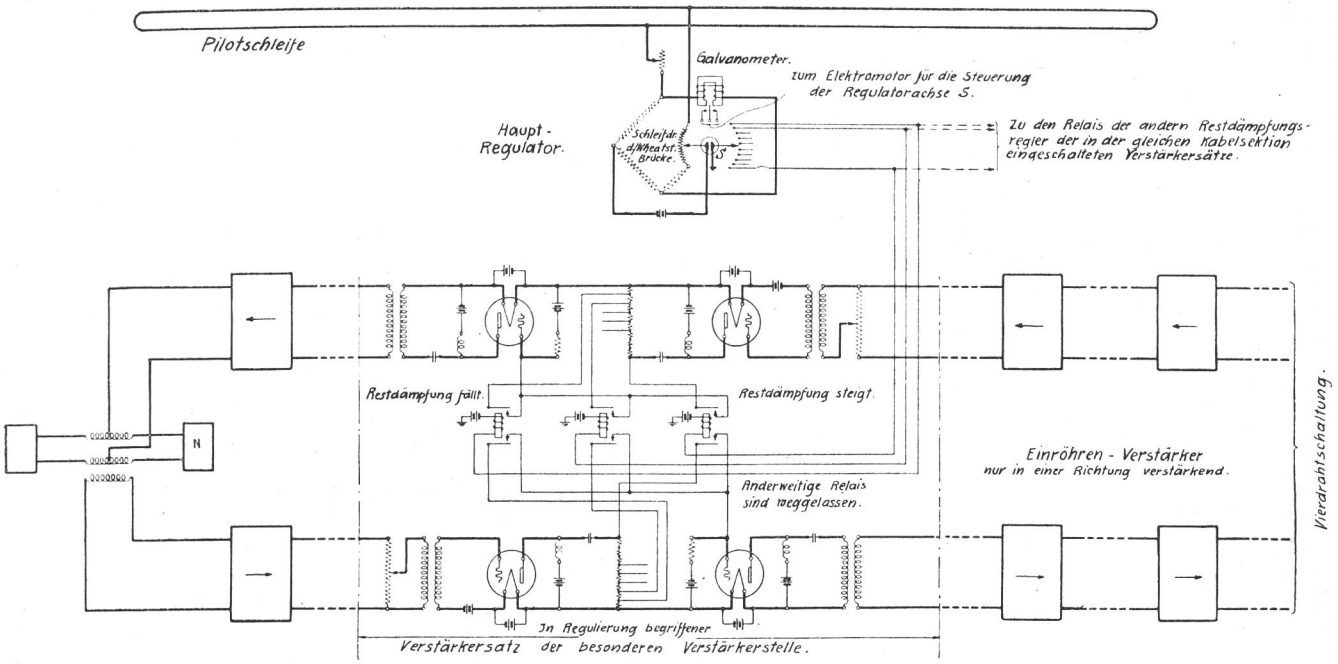


Fig. 15. Automatischer Restdämpfungsregler mit Pilotschleifen.

gewöhnlich derart ausgeführt, dass man an einem Ende eines Stromkreises einen Wechselstrom bekannter Spannung und Frequenz über einen bekannten induktionsfreien Widerstand mit dem Stromkreise verbindet und dann auf der anderen Endstation den ankommenden Strom mit Hilfe einer geeigneten Prüfapparatur mit genau geeichtem Messinstrument misst. Da solche Prüfungen in ähnlicher Weise durchgeführt werden, wie die Prüfungen des Verstärkungsgrades der Vakuumröhren (siehe Fig. 14), so darf von einer Beschreibung der Prüfmethode abgesehen werden.

IX. Restdämpfungsregler.

Auf langen Kabelleitungen aus dünnen Leitern wird der elektrische Widerstand der Leiter selbstverständlich an und für sich gross, und um so mehr werden Temperaturwechsel, die über die lange Kabelstrecke hin sich einstellen, Widerstandsänderungen der Leiter zur Folge haben, welche ihrerseits die telephonische Uebertragung erheblich beeinträchtigen können. So verschiebt sich beispielsweise im Verlaufe eines Jahres die Gesamtdämpfung für eine „leicht" belastete, 1600 Kilometer lange 0,91 mm Luftkabelleitung um 110 Standardkabelmeilen ($\beta l = 12$) und mehr. Das entspricht einer Veränderlichkeit in der empfangenen Energie um das 10^{10}- oder das 10-Billionenfache.

Es ist also unerlässlich, auf besondere Mittel zu greifen, um diese Wirkungen auszugleichen. Weil ferner die Widerstandsänderungen infolge der Temperaturwechsel auf Luftkabeln sehr schnell verlaufen, so erweist es sich praktisch als notwendig, die Mittel automatisch zu gestalten. Bei 0,91 mm „leicht" belasteten Leitungen ist die Veränderlichkeit am grössten; es müssen gewöhnlich, wie aus Fig. 1a ersichtlich ist, automatische Restdämpfungsregler in jeder 3ten oder 4ten Verstärkerstelle vorhanden sein, um das Uebertragungsniveau genügend stabil zu erhalten. In der genannten Figur sind die Restdämpfungsregler durch Quadrate und ihr Wirkungsbereich durch Schleifen angedeutet.

Die Fig. 15 zeigt das Schaltungsschema eines automatischen Restdämpfungsreglers. Zu oberst sieht man die Schaltung der Wheatstone'schen Brücke, deren eine Seite durch die parallel geschalteten Hälften der „Pilotschleife" gebildet wird. Im weitern steht die Brücke mit verschiedenen Apparaten, welche hier nicht im einzelnen beschrieben sind, in Verbindung. Diese arbeiten derart, dass das Gleichgewicht der Brücke automatisch aufrecht erhalten wird. Beim Herstellen des Gleichgewichtszustandes durch die Brücken-Apparatur wird eine Achse mit Kontaktarmen um ein mit den Widerstandsänderungen der Kabelschleifen proportionales Winkelmass gedreht. Durch die Drehbewegung der Achse werden verschiedene Kontakte hergestellt; der rechte Kontakthebel setzt je eines der in der untern Hälfte der Fig. 15 angedeuteten Relais für die Einstellung des Verstärkungsgrades unter Strom. Die Verstärkungsziffern der in der betreffenden Verstärkerstelle untergebrachten Schaltungen stellen sich auf diese Weise automatisch höher oder niedriger ein, gleichen die infolge der Temperaturwechsel auftretenden Dämpfungsunterschiede aus und erhalten die Restdämpfung auf einem stabilen Wert.