

Über die Schwebungen der Gleichwellensender.

(Mitteilung aus dem Laboratorium der C. Lorenz A. G.)

Von P. R. Arendt, Berlin.

DK 621. 396. 712

Grundsätzlich sind sehr verschiedene Verfahren zur Sicherung des Gleichlaufes von Rundfunk-Gleichwellensendern möglich¹⁾. Man kann z. B. die absolute Genauigkeit von quarzgesteuerten Sendern so weit steigern, daß die Versorgung kleiner Gebiete durch Gleichwellenbetrieb gesichert ist. Für größere Gebiete bzw. Sender und für Fernempfang muß diese Aufgabe aber noch gelöst werden. Man hat sich daher allgemein für Steuerung der Gleichwellensender von einer Zentralstelle aus entschieden, weil dann nicht die absolute, sondern nur die relative Genauigkeit der Trägerwellen der einzelnen Sender in Frage kommt. Dies Verfahren läßt sich in verschiedener Weise verwirklichen. Die drahtlose Ausstrahlung einer Steuerfrequenz kommt nicht in Frage, da hierdurch nur die bestehende Wellenknappheit vergrößert werden würde, die durch den Gleichwellenbetrieb ja gerade weniger

fühlbar gemacht werden soll. Ein anderes Verfahren für die Steuerung, bei dem eine irgendwie übertragene Steuerfrequenz zur Korrektur von an und für sich unabhängigen Sendern benutzt wird, ist zu Beginn der deutschen Gleichwellenentwicklung bereits von der C. Lorenz A. G. vorgeschlagen worden²⁾. Hierbei muß jedoch zuerst eine gegenseitige Frequenzabweichung vorhanden sein, ehe eine Regelung in Kraft treten kann. Man erhält also eine mehr oder weniger periodische Frequenzwanderung der Trägerwellen. Durch Steigerung des technischen Aufwandes könnte der Betrag dieser periodischen Frequenzwanderung zwar verhältnismäßig klein gemacht werden, sie bleibt aber ein grundsätzlicher Mangel dieses Verfahrens. Schließlich ist bei diesem Überwachungsverfahren zu beachten, daß das eigentliche Steuer- und Überwachungsglied keine Fehlerintegration herbeiführt; es muß also sehr empfindlich sein und auch auf kleine Frequenzänderungen ansprechen. Über eine einfache Anwendung dieses Verfahrens

¹⁾ Über die Entwicklung der Rundfunk-Gleichwellensender siehe Elektrisches Nachrichtenwesen **12**, 2, 49, 1934; über die Ausbreitung der Gleichwellensender siehe Hochfrequenztechnik u. Elektroakustik **43**, 4, 124, 1934, sowie A. Semm, Elektr. Nachrichtenwesen **12**, 1, 5, 1933.

²⁾ DRP 532 516 vom 23. 5. 26 und DRP angemeldet 11. 12. 26 = franz. Pat. 650 013.

in der amerikanischen Sendertechnik hat Gillet berichtet³⁾. Hierbei wird in der Mitte zwischen zwei Gleichwellensendern ein Empfänger aufgestellt, dieser mit einem Lautsprecher bei einem der Sender verbunden und die Senderfrequenz nach dem Gehör von Hand nachgestellt. Dieses Verfahren ist für Dauerbetrieb wenig geeignet und erfordert sehr geschicktes Bedienungspersonal. In dem von Gillet erwähnten Falle ließ sich zudem eine gegenseitige Frequenzübereinstimmung von nur etwa $3 \cdot 10^{-8}$ erreichen. Wenn man größere Gebiete mit Gleichwellen-Rundfunk versorgen will, wird man, wie diese Bemerkungen zeigen sollen, zwangsläufig auf eine Steuerung über Leitungen, und zwar als sicherstes Verfahren

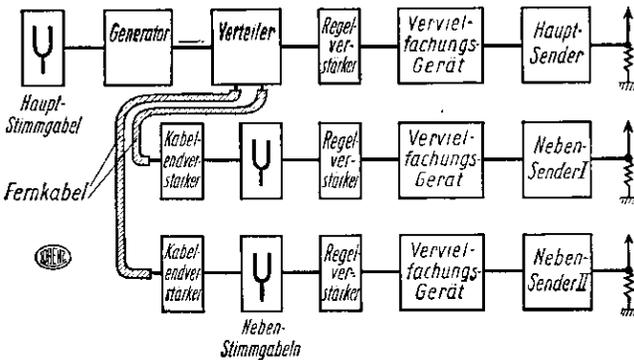


Abb. 1. Schema der Lorenz-Gleichwellen-Anlagen.

auf die Verbreitung einer Grundfrequenz geführt. Diese Grundfrequenz wird am Leitungsende in gewünschter Weise vervielfacht und sofort den Sendern zugeleitet. Die Frage, ob Freileitung oder Kabel, ist durch den Versuch bereits zugunsten des Kabels entschieden, da atmosphärische Störungen in zu großem Maße von den Freileitungen aufgenommen werden⁴⁾. Im folgenden wird das von der C. Lorenz A. G. entwickelte⁵⁾ und von der deutschen Reichspost eingeführte Gleichwellensystem einer Fernsteuerung über Fernsprechkabel zugrunde gelegt (Abb. 1).

Als Erzeuger der Grundfrequenz dient ein Stimmgabelsummer (Abb. 2); Schaltung und

³⁾ G. D. Gillet, Proc. IRE 19, 8, 1358, 1931.

⁴⁾ F. Eppen, ENT 4, 9, 385, 1927; O. Hahn, Funk 35, 247, 1928; die Versuche von Laub und Kirschstein, ENT 10, 12, 457, 1933, deuten darauf hin, daß bei Verwendung sehr hoher Frequenzen die Freileitung wieder Vorteile bringen kann.

⁵⁾ Ausführliche Beschreibung siehe Heft 1 der „Technischen Berichte der C. Lorenz A. G.“ 1933; dort findet sich auch ein Literaturverzeichnis.

Leistung des Endverstärkers sind so bemessen, daß an die parallel angeschlossenen Kabel stets die gleiche Tonfrequenzspannung abgegeben wird. Am Kabelausgang befindet sich je eine fremdgesteuerte Stimmgabel (Abb. 3), die als Filter wirkt, sowie Regelverstärker. Anschließend folgt

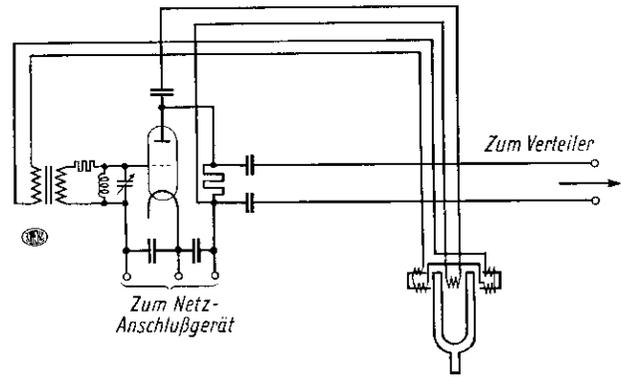


Abb. 2. Grundfrequenz-Stimmgabel-Generator (Hauptstimmgabel).

die Vervielfachungsschaltung⁶⁾ und der Sender. Für spätere Bemerkungen ist ein Hinweis auf die Arbeitsweise der Filterstimmgabel, der sogenannten Nebenstimmgabel, wichtig. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, dient die Spule zwischen den Zinken als Erreger der Stimmgabel. Durch die mechanische Bewegung entstehen in den außen befindlichen Spulen Wechselströme, die nach Verstärkung im Regelverstärker dem Vervielfachungsgerät zugeleitet werden⁷⁾.

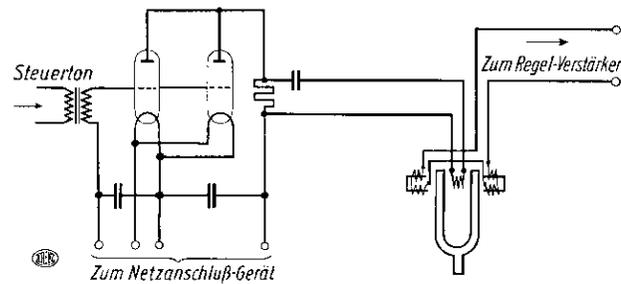


Abb. 3. Schaltung der fremderregten Stimmgabel (Nebenstimmgabel).

Es ist dafür Sorge getragen, daß Eingangs- und Ausgangsspulen der Nebenstimmgabel vollständig gegeneinander entkoppelt sind. Eine Übertragung der Steuerströme kann also nur über die mechanische Schwingung erfolgen. Die Stimmgabel ist infolge-

⁶⁾ E. Kramar, Zeitschr. f. techn. Phys. 10, 11, 525, 1929.

⁷⁾ Über eine andere Anordnung wird später berichtet.

dessen durch einen luftdicht verschlossenen Thermostaten von Änderungen der Temperatur unabhängig gemacht. Die Hauptstimmgabel ist ebenfalls in einen Thermostaten eingebaut, um die absoluten Frequenzänderungen der ganzen Gleichwellengruppe innerhalb der international vorgeschriebenen Grenzen zu halten.

Eine derartige Anordnung gestattet theoretisch einen vollkommenen Gleichlauf der angeschlossenen Sender, wenn die Voraussetzung erfüllt ist, daß alle Sender den gegebenenfalls auftretenden Frequenzschwankungen der Hauptstimmgabel unbedingt gleichzeitig folgen. Ist dies nicht der Fall, so müssen auf die im Empfangsgebiet befindlichen Rundfunkgeräte gleichzeitig zwei oder mehr von einander verschiedene Trägerwellen einwirken. Jede dieser Wellen entspricht dann einem zu einem anderen Zeitpunkt vorhanden gewesenen Schwingungszustand der Hauptstimmgabel. Der verschiedenen langen Lauf- und Einschwingzeit der angeschlossenen Leitungen, Vervielfachungen, Nebestimmgabeln usw. entsprechend folgen die Sender dem Grundgenerator in gewissen Zeitabständen, zu denen noch die Dauer des Strahlungsweges von den Sendern zum betreffenden Empfänger hinzukommt.

Einer Anregung von W. M. Hahnemann folgend läßt sich aus der Einschwingzeit und dem Frequenzgang des Grundgenerators die gegenseitige Frequenzübereinstimmung der Gleichwellensender berechnen⁸⁾.

Bevor diese kleine Rechnung ausgeführt wird, ist noch auf die Möglichkeit hinzuweisen, daß die Frequenzübereinstimmung durch die Anwendung des Phasenausgleichs und durch genau gleichartige Schaltungen und Apparate an den Sendern verbessert werden könnte. Hiervon ist bisher noch nicht Gebrauch gemacht worden, da die ohne diese Hilfsmittel erzielte gute Frequenzübereinstimmung für die praktischen Zwecke genügt. Die Bedeutung der Seitenbänder und ihrer Phasenbeziehungen wird hier nicht besonders hervorgehoben, darauf ist in der unten erwähnten Arbeit von Aiken und u. a. in den Lorenz-Berichten (Heft 1) eingegangen.

Für die Berechnung des Frequenzganges der Trägerwelle sei vorausgesetzt, daß ein Sender (der

Sender I) ohne lange Leitungen oder Filter von langer Einschwingdauer an die Hauptstimmgabel angeschlossen sei. Der Sender II ist über eine Verbindung mit der Laufzeit τ angeschlossen. Die Frequenz der Hauptstimmgabel genüge der Gleichung:

$x_0 = A \sin \omega t$ (Niederfrequenz oder Steuerfrequenz). Der Nullpunkt der Zeitskala ist so gewählt, daß die Phase verschwindet. Am Ende des Kabels und nach der Vervielfachung werde vom Sender II eine Frequenz nach folgender Gleichung ausgestrahlt:

$$x_2 = A_2 \sin(\omega_2 t - \varphi_2) \text{ (Hochfrequenz),}$$

wobei $\omega_2 = v \omega$ für $t = t_0$ ist. v ist der Vervielfachungsfaktor. Zum gleichen Zeitpunkt wird der direkt von der Stimmgabel gesteuerte Sender I den Gleichungen:

$$x_1 = A_1 \sin(\omega_1 t - \varphi_1)$$

$$\omega_1 = v \omega \text{ für } t = t_0 + \tau$$

genügen. Zu beachten ist, daß die Erzeugung der Frequenzen ω_1 und ω_2 oder genauer gesagt ihrer durch den Vervielfachungsfaktor geteilten Werte nicht gleichzeitig geschieht, sondern zu Zeiten, die im Abstände τ (der gesamten Laufzeit) aufeinander folgen. Nimmt man innerhalb dieser Zeit τ eine Änderung der Hauptstimmgabel an, so unterscheiden sich x_1 und x_2 in Frequenz und Phase, ganz abgesehen von der durch die Kabelaufzeit bewirkten Phasendifferenz. Hierbei ist angenommen, daß die Vervielfachungsgeräte die Phase gar nicht bzw. nur um einen unveränderlichen Betrag drehen. Die beiden Schwingungen setzen sich nach der Ausstrahlung⁹⁾ additiv wie folgt zusammen:

$$x = x_1 + x_2 = A \sin(\omega_1 t - \varphi),$$

wobei gilt

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi_1 + \varphi_2]$$

und

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_2]}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_2]}.$$

Über die Deutung dieser Schwebungsfunktion bestehen in der Literatur verschiedene Auffassungen¹⁰⁾. Für unsere Zwecke genügt die Feststellung, daß Amplitude und Phase der neuen

⁹⁾ Der durch den Strahlungsweg entstehende Phasenunterschied soll vernachlässigt werden.

¹⁰⁾ E. Budde, *Physik. Zeitschr.* **18**, 13, 285, 1917. — E. Wätzmann, *Physik. Zeitschr.* **18**, 23, 560, 1917.

⁸⁾ Umgekehrt kann man auch durch Messung von Phasen und von der Einschwingzeit auf den Frequenzgang schließen.

Schwingung zeitlich und zwar wie $\omega_1 - \omega_2$ veränderlich sind, und daß man in Annäherung eine Schwingung der Frequenz ω_1 mit einer nach der Funktion $\cos(\omega_1 - \omega_2)t$ veränderlichen Amplitude A beobachten wird. Genau genommen kann man nicht von einer Schwebungsfrequenz $\omega_1 - \omega_2$ sprechen, da ja auch die Phase der resultierenden Schwingung zeitlich veränderlich ist. Dies gilt um so mehr, als sich ω_1 gegenüber ω_2 durch die Schwankungen der Stimmgabel zwar geringfügig, im allgemeinen aber willkürlich und unregelmäßig verändern wird.

Schon jetzt kann man feststellen, daß beim Betrieb von Gleichwellensendern keine stehenden Wellen zu erwarten sind; es sei denn, man erreichte absolute Konstanz oder wenigstens Konstanz innerhalb der Übertragungszeit vom Sender I zum Sender II. Am Beobachtungsorte müssen sich also — wie es auch den tatsächlichen Versuchen entspricht — die Verhältnisse durch eine langsam vorüberziehende Schwebungswelle beschreiben lassen¹¹⁾. Künstliche Annahmen zur Deutung des „Wanderns“ der Schwebungswelle, wie Änderungen des Ausbreitungsvorganges oder Phasensprünge auf der Verbindungsleitung sind nicht notwendig, um das Wesentliche der bisherigen Erfahrung zu beschreiben. Es genügt die viel näher liegende Bezugnahme auf die allerdings sehr kleine Unstetigkeit des Grundgenerators innerhalb der Übertragungszeit.

Im vorstehenden sind die Schwebungen in bezug auf die Laufzeit betrachtet. Streng genommen ist aber die Einschwingzeit des gesamten Übertragungssystems zu beachten, da man es nicht mit konstanten, sondern veränderlichen Frequenzen zu tun hat. Es braucht nämlich jeder neue Schwingungszustand eine gewisse Zeit, ehe er sich am Leitungsende bei der hochfrequenten Ausstrahlung voll auswirkt. Die Änderungen der Hauptstimmgabel innerhalb dieser Aufbauzeit sind daher ebenfalls zu berücksichtigen. Für die

¹¹⁾ In der nach der Niederschrift dieses Aufsatzes erschienenen Arbeit von C. B. Aiken, Proc. IRE **21**, 9, 1265, 1933, die die in einem Empfänger durch die Gleichwellensender entstehenden Unregelmäßigkeiten behandelt, ist auf diese Erscheinung nicht hingewiesen. Die Aikenschen Ableitungen behalten ihre Gültigkeit, wenn man sich vorstellt, daß die für verschiedene Phasen der Trägerwellen auftretenden Störungen sich alle nacheinander an demselben Empfangsorte ereignen.

reine Leitungsübertragung ist die Einschwingzeit vernachlässigbar klein, da es sich um Übertragung eines schmalen Frequenzbandes innerhalb eines breiten Durchlaßbereiches handelt. Die Einschwingdauer ist etwa 0,22 Millisek¹²⁾.

Anders verhält es sich, wenn am Ende der Leitung Resonanzkreise oder Filter eingeschaltet sind, um Sprachschwingungen oder Störspannungen (z. B. infolge Übersprechens oder mehrfacher Leitungsausnutzung) zu vermeiden. In diesem Falle sind Einschwingzeit und Laufzeit dieser Kreise

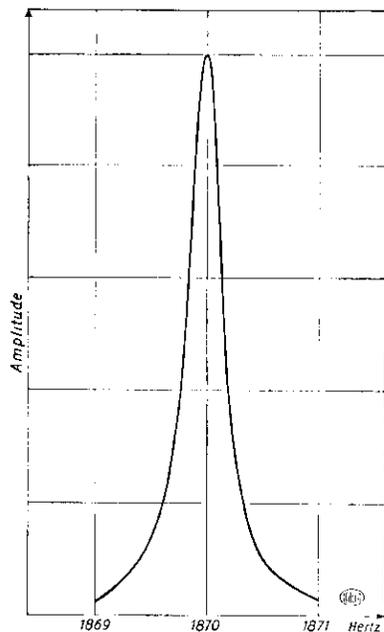


Abb. 4. Resonanzkurve einer Stimmgabel für Gleichwellensender.

in gleicher Weise wie die Kabellaufzeit in Rechnung zu stellen.

Das als Empfangskreis verwendete System der fremdgesteuerten Stimmgabel kann man in seiner Wirkung einem elektrischen Filter gleichsetzen. Die Laufzeit eines eingeschwingenen Zeichens über dieses Filter kann als verschwindend klein angenommen werden, da wenigstens für den Fall vollkommener Resonanz die Stimmgabelzinken mit der übertragenen Steuerspannung in Phase schwingen. Zur Beurteilung der Einschwingzeit muß man auf die Resonanzkurve der Stimmgabel zurückgreifen. Aus dieser läßt sich wie bei einem elektrischen Filter die Einschwingzeit nach der

¹²⁾ Gemäß der Gleichung $\tau = \frac{1}{2f_0}$; f_0 = Grenzfrequenz der Spulenleitung.

Formel¹³⁾:

$$\tau = \frac{1}{f_2 - f_1}$$

berechnen. Die Frequenzen der Durchlaßgrenzen f_1 und f_2 sind so zu bestimmen, daß die zugehörigen Amplituden 0,5 Neper vom Resonanzpunkt entfernt liegen. Dies ergibt auf Grund von Abb. 4:

$$\tau = 3,7 \text{ Sek.},$$

d. h. einen wesentlich höheren Betrag als die Lauf- bzw. Einschwingzeit des Kabels. Es ist also die Arbeitsweise der Nebenstimmgabel wesentlich maßgebend für die Übereinstimmung zweier Gleichwellensender, da die in Frage kommenden Laufzeiten für die eigentliche Kabelübertragung nur etwa 10 bis 15 Millisek. betragen.

Da man alle Frequenzänderungen der Hauptstimmgabel sich zusammengesetzt denken kann aus einem Dauerzeichen der alten Frequenz und zwei neu einsetzenden Zeichen entsprechender Frequenz und Phase, so muß die Änderung der Hauptstimmgabel innerhalb der Einschwingzeit der Nebenstimmgabel nach Multiplikation mit dem Vervielfachungsfaktor dem beobachteten Frequenzunterschied der Sender entsprechen.

Die Messungen ergeben nun folgendes: Der Frequenzgang der Hauptstimmgabel ist von dem Temperaturverlauf im Innern des Thermostaten (Abb. 5) und dem Temperaturkoeffizienten der Stimmgabel abhängig. Der Temperaturkoeffizient für die Frequenzabhängigkeit der benutzten Stimmgabel beträgt etwa $1 \cdot 10^{-4}$ je Grad; denn es ist im Gegensatz zu anderen Anordnungen¹⁴⁾ davon abgesehen, einen besonders temperaturinvarianten Stahl zu verwenden. Verschiedene Gründe sprechen für die Herstellung der Stimmgabeln aus normalem Stahl. Abgesehen von der schwereren Bearbeitung der Spezialstähle, müssen nämlich bei diesen ungünstige magnetische Eigenschaften und schlechtere Elastizitätskoeffizienten mit in Kauf genommen werden. Die magnetischen Eigenschaften sind aber im Hinblick auf die Erregung der Stimmgabel wichtig; eine Vermehrung der Dämpfung durch eine Veränderung der elastischen Eigen-

schaften ist ebenfalls zu vermeiden, da die Frequenz der Stimmgabel von der Amplitude abhängig ist. In diesem Zusammenhang ist auch die Tatsache zu beachten, daß eine geringe Beeinflussung der Stimmgabel-Amplituden und somit der Frequenz durch Schwankungen der Speisenspannungen möglich ist. Hiergegen ist zwar durch Verwendung der Stabilisator-Glimmröhre¹⁵⁾ im Netzanschlußgerät genügend Vorsorge getroffen, es kann aber diese Amplitudenabhängigkeit unter Umständen eine durch weitere Verbesserungen erreichte Verminderung des Temperatureinflusses wieder aufheben. Für die nachfolgenden Betrachtungen kann daher die an und für sich bestehende Möglichkeit der Verringerung des Temperatureinflusses außer Betracht bleiben¹⁶⁾.

Die Abb. 5 zeigt, daß die Schwankungen der Innentemperatur des Thermostaten in der Größen-

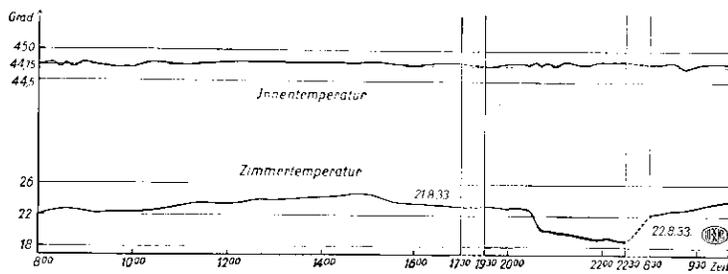


Abb. 5. Temperaturverlauf im Stimmgabel-Thermostat.

ordnung von $\pm 0,1$ Grad liegen¹⁷⁾. Die hieraus und aus dem Temperaturkoeffizienten errechnete absolute Frequenzabweichung von 10^{-5} kann für die Beurteilung der gegenseitigen Frequenzunterschiede nicht herangezogen werden. Aus den oben angeführten Betrachtungen geht hervor, daß immer diejenigen Stimmgabelzustände (der Hauptstimmgabel) miteinander wirken, die um die Einschwingzeit von 3,7 Sek. der Nebenstimmgabel nacheinander entstehen. Schneidet man sich aus Abb. 5 dasjenige Zeitintervall T heraus, das den stärksten Temperaturänderungen Δt entspricht, so findet man

¹⁵⁾ L. Körös u. L. Seidelbach, Archiv f. Elektrot. **26**, 8, 539, 1932.

¹⁶⁾ Eine abschließende Stellungnahme zu diesem Punkt ist erst dann möglich, wenn die z. Z. betriebenen Untersuchungen der verschiedenen Thermostatsysteme beendet sind.

¹⁷⁾ Inzwischen sind weitere Verbesserungen auf diesem Gebiete gelungen.

¹³⁾ K. Küpfmüller, ENT **1**, 5, 148, 1924.

¹⁴⁾ W. Hensel, Physik. Zeitschrift **30**, 9, 274, 1929.

$$\frac{\Delta t_{\max}}{T} = \frac{0,075^\circ}{600 \text{ Sek.}} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ Grad sec}^{-1}.$$

Die Temperaturzeitkurve kann man für kleine Zeitabschnitte als geradlinig ansehen, und so erhält man — unter Voraussetzung des obigen Wertes für die Neigung dieser Geraden — den Temperaturgang während der Einschwingzeit τ :

$$\tau \cdot \frac{\Delta t_{\max}}{T} = 3,7 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ Grad.}$$

Mit Hilfe des Temperaturkoeffizienten der Hauptstimmgabel ergibt sich hieraus:

$$\frac{\Delta f}{f} = 4,6 \cdot 10^{-8}$$

als die im ungünstigsten Falle auftretende Frequenzübereinstimmung. Aus dem lange Zeit bestehenden horizontalen Verlauf der Temperaturkurve (Abb. 5) sieht man, daß im allgemeinen noch bessere Übereinstimmung erzielbar ist. Z. B. ergibt sich für die Zeit von 12^h bis 14,30^h bei diesem Versuch eine Temperaturabweichung von $4,7 \cdot 10^{-6}$ Grad Sek.⁻¹, was eine Frequenzübereinstimmung von $1,7 \cdot 10^{-9}$ bedeutet.

Die im Betriebe von Gleichwellensendern und im Laboratorium gemessene gegenseitige Frequenzübereinstimmung ist von der Größenordnung 10^{-8} bis 10^{-10} . In Abb. 6 ist die hochfrequente Schwe-

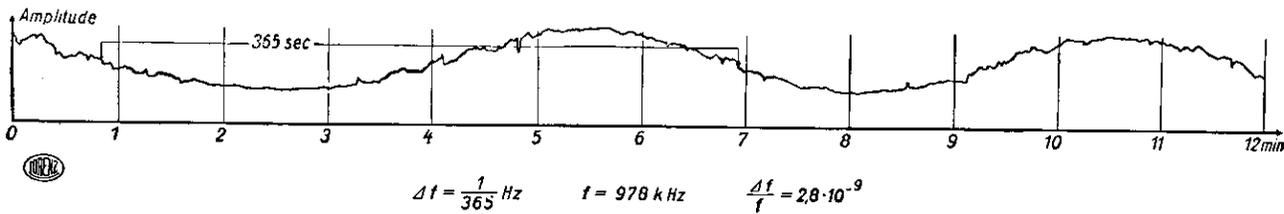


Abb. 6. Schwebungsfrequenz zweier Gleichwellensender.

bung¹⁸⁾ der Wellen eines Hauptsenders und des zugehörigen Nebensenders aufgezeichnet ($2,8 \cdot 10^{-9}$). Der etwas unruhige Verlauf der Schwebungskurve ist auf Spannungsschwankungen der aus dem Netz betriebenen Anlagen zurückzuführen. Die im praktischen Betriebe von P. Eppen (Reichspostzentralamt) gemessenen Schwebungen zeigen einen ähnlichen Verlauf und Übereinstimmungsgrad. Im Laboratorium wurden sogar relative Abweichungen bis zu $3 \cdot 10^{-10}$ gemessen. Im Falle der Sender Frankfurt a. M. und Trier wurde im Betriebe eine

¹⁸⁾ Für die Herstellung dieser Aufnahmen schuldet der Verfasser Herrn Dr. Kramar und Herrn Zwingert besonderen Dank.

Schwebungsdauer der Trägerwellen von 30 Min. beobachtet, was einer Übereinstimmung von $5 \cdot 10^{-10}$ entspricht. Diese Angaben bestätigen also die Erklärung der Schwebungen der Gleichwellensender durch das Zusammenwirken des Frequenzganges des Grundgenerators und der Laufzeit.

Die Versuche zeigen jedoch noch mehr. Sie beweisen, daß die Resonanzfrequenz eines Stimmgabelfilters von der Dämpfung $\mathfrak{D} = 3,7 \cdot 10^{-1}$ (errechnet aus Abb. 4) bzw. von der Breite $\frac{\mathfrak{D}}{2\pi} = 5,9 \cdot 10^{-5}$ der Resonanzkurve nicht nur mit der Steuerfrequenz in Übereinstimmung gehalten werden kann, sondern daß mit dieser Resonanzkurve auch eine Frequenzübereinstimmung von 10^{-8} bis 10^{-9} erreicht wird. Zur Lösung dieser Aufgabe ist also das Steuerkabel keinesfalls unnötig, wie früher vermutet wurde¹⁹⁾.

Aus dem vorhergehenden ergibt sich, daß für die Bemessung der Nebenstimmgabel zwei Gesichtspunkte maßgebend sind. Um die möglichst genaue Übereinstimmung der Wellen beider Sender zu erreichen, ist eine kurze Einschwingzeit erforderlich. Diesem steht entgegen, daß eine möglichst schmale Resonanzkurve und damit zwangsläufig eine große Einschwingzeit an-

gestrebt werden muß, um die Wirkung etwaiger Schaltstöße usw. abzuschwächen. Die Erfahrung allein kann hier den richtigen Mittelwert für die Einschwingzeit ergeben.

Die vorliegenden Ausführungen bedürfen noch einer Ergänzung durch Eingehen auf den wichtigen Einwand, daß nämlich alle Anstrengungen, die Frequenzgenauigkeit zentralgesteuerter Gleichwellensender zu erhöhen, nutzlos seien, so lange durch Änderungen der Übertragungseigenschaften der Verbindungsleitung willkürliche Beeinflussungen der Steuerfrequenz möglich sind. Es kommen

¹⁹⁾ W. Runge, Telefunken-Ztg. 13, 62, 5, 1932.

hierfür Änderungen des Dämpfungsmaßes und des Phasenmaßes der Kabelleitung in Frage. Die Schwankungen der Kabeldämpfung werden in dem Lorenz-System weitgehend durch die erwähnten Regelverstärker ausgeglichen, so daß auch bei kurzzeitigen Amplitudenänderungen keine Beeinflussung des angeschlossenen Senders zu erwarten ist.

Bei Betrachtung der möglichen Störungen durch Phasenänderungen sind verschiedene Fälle zu unterscheiden:

1. Ein plötzlicher Übergang von einem konstanten Phasenmaß zu einem anderen ebenfalls konstanten Wert;
2. gleichförmige, aber andauernde Zunahme der Phasendifferenz;
3. ungleichförmige, aber stetige und andauernde Phasenänderung.

Außerdem ist zu unterscheiden, ob sich die Steuerfrequenz während der Dauer der betrachteten Laufzeitstörung ändert oder den gleichen Wert beibehält.

Ein plötzlicher Übergang von einem bisher konstant innegehaltenen Phasenmaß zu einem andern bedeutet nur eine Änderung der Laufzeit der Steuerfrequenz vom Hauptsender zum Nebensender. Bleibt innerhalb dieser Zeit die Grundfrequenzstimmgabel konstant, so sind keine Empfangsstörungen zu erwarten. Am Rundfunkempfänger wird nur eine Veränderung des Lautstärkepegels zu beobachten sein, weil jetzt die beiden Senderwellen eine andere Phasenlage zueinander einnehmen als vor der Störung. Dies ist aber nur in den Gebieten bemerkbar, in denen auch bei normaler Übertragung die langsamen Schwebungen auftreten. Der Phasensprung wirkt sich also nur so aus, daß das „Schwebungsfading“ nicht einen glatten sinusförmigen Verlauf nimmt, sondern an einer Stelle unterbrochen wird, um dann mit anderer Phase die gleiche Schwebung fortzusetzen. Infolge der Wirkung der Nebenstimmgabel wird die hochfrequente Schwebung nicht plötzlich, sondern nur langsam und unmerklich in ihrer Phase verändert. Außerdem wird ein mit einem Schwundausgleich versehener Empfänger dieses künstliche Fading unter den gleichen Bedingungen²⁰⁾ ausgleichen, unter denen

auch ein natürliches Fading von demselben Empfänger unhörbar gemacht werden würde. Phasensprünge dieser Art können sich also — wenn man vorläufig von dem sich während des eigentlichen Sprunges abspielenden Vorgang absieht — nur dann unangenehm bemerkbar machen, wenn sie so oft auftreten, daß ihre Häufigkeit ein beständiges Tremolieren des Empfanges verursacht. Dies ist aber bisher noch nicht beobachtet worden. Die absolute Größe dieser Art von Phasensprüngen ist weniger von Bedeutung, da auch im ungünstigsten Falle ($\Delta\varphi = 180^\circ$) eine Änderung entsteht, wie sie auch bei natürlichen Schwunderscheinungen zustande kommen kann. Die Phasensprünge erster Art sind also für die im Verwirrungsgebiet erzielbare Empfangsgüte unerheblich. Hierbei ist sinngemäß die Voraussetzung eingeschlossen, daß die gegenseitige Frequenzübereinstimmung gut genug bzw. daß die Wellenlänge des periodischen Schwebungsfadings lang genug ist, um die Häufigkeit der künstlich erzeugten Schwunderscheinungen eine oder mehr Größenordnungen unter der Häufigkeit der natürlichen Lautstärkeschwankungen zu halten²¹⁾.

Das Verständnis für die andern oben erwähnten Möglichkeiten der Phasenänderung wird erleichtert, wenn man sich an die Definition der Frequenz ω als Winkelgeschwindigkeit erinnert:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

Wird die aus allen Schwankungsursachen resultierende Frequenz mit Ω bezeichnet²²⁾, so kann man setzen

$$\Omega = \omega + \omega',$$

wo ω' den durch Phasenänderungen hervorgerufenen Anteil bedeutet, ω bezieht sich auf die Grundfrequenz, also:

$$\Omega = \omega + \frac{d\varphi}{dt}$$

Für die zeitlichen Änderungen ergibt sich:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} + \frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

da die Änderungen der Grundfrequenz von den Verhältnissen auf dem Kabel unabhängig sind.

²⁰⁾ Siehe die oben erwähnte Untersuchung von F. Gerth.

²²⁾ Die folgenden Überlegungen gelten in gleicher Weise für die Grundfrequenz wie für die mit dem Vervielfachungsfaktor multiplizierte und ausgestrahlte Frequenz.

²⁰⁾ Näheres über die im Empfänger selbst entstehenden Störungen und die Bedeutung des Schwundausgleichs siehe bei C. B. Aiken, loc. cit., und in einer demnächst erscheinenden Arbeit von F. Gerth.

Man erkennt aus dieser Schreibweise sofort, daß ein Phasensprung erster Art keinen Einfluß haben kann. Da vor und nach dem „Sprung“ $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0$ ist, bleibt Ω konstant, die Schwebungsfrequenz ändert sich nicht bzw. bleibt von den bereits besprochenen Änderungen von ω , d. h. von der Hauptstimmgabel abhängig. (Der Vorgang während des Sprunges selbst wird weiter unten betrachtet.)

Die Phasensprünge zweiter Art sind durch

$$\frac{d\varphi}{dt} = \text{const}$$

gekennzeichnet, sie bringen, so lange diese Phasengeschwindigkeit besteht, eine Erhöhung oder Verminderung der Frequenz Ω um einen konstanten Betrag. Die praktischen Untersuchungen müssen nun zeigen, ob Sprünge zweiter Art lange genug andauern, um sich bemerkbar zu machen. Eine beständige oder fortlaufende Veränderung von Ω durch diese Sprünge kommt nicht in Betracht, da $\frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0$. Der Betrag von $\frac{d\varphi}{dt}$ hat erst dann eine Bedeutung, wenn durch diese Verschiebung der Grundfrequenz auf einen andern konstanten Betrag die Dauer des Schwebungsfadings wesentlich, d. h. um etwa eine Größenordnung, verändert wird. Man darf also den Ansatz $\frac{d\varphi}{dt} < 10 \cdot \Delta\omega$ machen; um ungünstig zu rechnen, sei im folgenden aber angesetzt:

$$\frac{d\varphi}{dt} < \Delta\omega,$$

oder

$$1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} < \frac{\Delta\omega}{\omega} = 5 \cdot 10^{-9}.$$

Für $\omega = 2\pi \cdot 10^6$ ist also ein Wert von

$$\frac{d\varphi}{dt} < \pi \cdot 10^{-2}$$

noch zugelassen; für den niederfrequenten Teil, die Übertragung der Steuerfrequenz ($\omega = 4\pi \cdot 10^3$), gilt entsprechend

$$\frac{d\varphi}{dt} < 2\pi \cdot 10^{-5}.$$

Im praktischen Betrieb darf dieser Wert, wie oben angedeutet, noch etwa zehnmal größer sein, ehe sich Störungen bemerkbar machen. Es kommt also jetzt darauf an, festzustellen, ob unter den

Betriebsbedingungen derartige Werte von $\frac{d\varphi}{dt}$ vorkommen und ob diese Phasengeschwindigkeit etwa ebensolange wie das Schwebungsfading (15 Min.) bestehen bleibt. An Kabelmessungen liegt z. Z. noch sehr wenig Material an derartigen Phasenbestimmungen vor, am wichtigsten sind die Messungen von Pohontsch²³⁾. Diese Messungen sind zwar unter verhältnismäßig ungünstigen²⁴⁾ Bedingungen aufgenommen, sollen aber doch dem Folgenden zugrunde gelegt werden. In dem veröffentlichten Meßprotokoll kommen die stärksten Phasensprünge in der Zeit nach 13 Uhr vor. In Abb. 7 ist daher der Verlauf dieser Phasenmessungen eingetragen und die entsprechende Kurve für $\frac{d\varphi}{dt}$ gezeichnet. Die Kurven geben den Gang der tatsächlichen Sprünge nicht vollständig wieder,

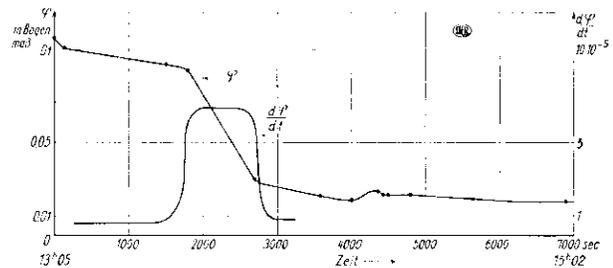


Abb. 7. Kabelmessungen nach Pohontsch.

da ein stetiger Verlauf angenommen wurde und in Wahrheit sich sicherlich zahlreiche sehr unstetige Sprünge ereignet haben, die nur kurze Zeit dauerten, so daß es nicht möglich war, die Anfangs- und Endwerte jedes Sprunges genau zu messen. Wenngleich man für die Zukunft eine oszillographische Aufnahme der Phasen anstreben sollte, so stört diese Ungenauigkeit hier nur wenig, da die schnell verlaufenden Sprünge auf die an und für sich sehr lange Schwebungsdauer ohne Einfluß sind. Eine Ausnahme bildet nur der Fall, daß sie sehr häufig und kurz nacheinander auftreten. Dies ist aber im praktischen Gleichwellenbetrieb

²³⁾ siehe Runge, loc. cit.

²⁴⁾ Die Kabellänge betrug 750 km statt der sonst für Gleichwellenbetrieb in Frage kommenden 200 km; da die Phasensprünge lt. Runge u. a. wesentlich von den Anodenspannungen der Leitungsverstärker abhängen, müßten die Messungen auf die Zahl der üblichen Verstärker korrigiert werden. Eine Unabhängigkeit von den Anodenspannungen ließe sich übrigens durch Verwendung des Glimmteiler-Stabilisators System Lorenz-Körös erzielen.

bisher noch nicht beobachtet worden. Der größte Wert von $\frac{d\varphi}{dt}$ in Abb. 7 ist $6,8 \cdot 10^{-3}$, liegt also in der Größe des oben erwähnten kritischen Wertes, ist jedoch noch etwa zehnmal kleiner als der wirklich störende Betrag. Alle andern beobachteten Phasenwanderungen sind so gering, daß sie ganz unbeachtet bleiben können.

Die Phasensprünge dritter Art sind die allgemeinste Form der auftretenden Störungen; für sie gilt

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 0.$$

Eine solche Phasenbeschleunigung bewirkt eine fortlaufende Änderung der resultierenden Frequenz. Die obige Bedingung gilt im wesentlichen für den Verlauf der Frequenz während eines eigentlichen Sprunges. Man muß bei Abschätzung dieser Störquelle vor allem die Wirkung der Filterstimmgabel in Betracht ziehen. Bleibt die Dauer eines Sprunges kleiner als die Einschwingzeit der Nebenstimmgabel (3,7 Sek.), so ist die Störwirkung vernachlässigbar, weil dann nicht Zeit genug ist, daß sich die Frequenzänderung voll auswirkt. Nimmt man an, daß der eben erwähnte große Sprung im besprochenen Meßprotokoll ein Maß für die Größe der überhaupt auftretenden Sprünge ist, dann kann man die Sprungdauer berechnen, bei der ein störender Einfluß zu erwarten ist. Diese Annahme erscheint mehr als berechtigt, da ein Sprung dieser Größe sich nur ein einziges Mal während des ganzen Beobachtungstages ereignet hat. Aus der Gleichung für $\frac{d\Omega}{dt}$ geht hervor, daß

$\frac{d\omega}{dt}$ und $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ von gleicher Größenordnung sein müssen, ehe ein Einfluß des Phasensprunges erwartet werden kann. Für $\frac{d\omega}{dt}$ ergibt sich aus der oben besprochenen 15 Min.-Dauer des Schwebungsfadings:

$$\frac{d\omega}{dt} = 2\pi \frac{1}{15 \cdot 60} \approx 7 \cdot 10^{-3}$$

also

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} < 7 \cdot 10^{-3}.$$

Diese Bedingung wird befriedigt, wenn sich der

in Abb. 7 verzeichnete große Phasensprung in etwa 10 Sek. abspielt. Ist die Größe des Phasensprunges nur ein Drittel der Größe dieses besonders großen Sprunges, so müßte dieser in 5 bis 6 Sek. beendigt sein, wenn er Wirkung haben soll. Man sieht, daß die kleineren Sprünge eine immer kürzere Dauer haben müssen; es ist bald die Einschwingzeit der Nebenstimmgabel erreicht, so daß auch diese Sprünge unwirksam werden, weil sich der entsprechende Schwingungsvorgang dann nicht mehr von der Leitung auf das Vervielfachungsgerät übertragen kann. Die großen und an und für sich wirksamen Sprünge sind, wie die bisherige Erfahrung gezeigt hat, so selten, daß der praktische Betrieb der Gleichwellensender hierdurch nicht gestört wird.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden: Den Phasendrehungen auf dem Verbindungskabel kommt, sofern Stimmgabelfilter verwendet werden, kein schädlicher Einfluß auf die Genauigkeit der Trägerwellen von kabelgesteuerten Gleichwellensendern zu; es sei denn, daß der nur selten zu erwartende ungünstige Fall eintritt, in dem sehr schnell verlaufende aber längere Zeit hindurch andauernde Phasendrehungen stattfinden. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen sind diese Störungen im Gleichwellenbetrieb noch nicht hervorgetreten. Hiermit ist zugleich die Bestätigung erbracht, daß das für die Nebenstimmgabel gewählte Verhältnis von Einschwingzeit und Resonanzschärfe günstig ist.

Zusammenfassung.

Die Übertragung einer Grundfrequenz über Kabelleitungen mit anschließender Vervielfachung ist ein sicheres Verfahren für den Betrieb mehrerer Rundfunksender auf gleicher Welle. Die beobachtete Frequenzübereinstimmung läßt sich aus der Einschwingzeit der Nebenstimmgabel und dem Gang der Hauptstimmgabel berechnen. Die Bedeutung der auf der Kabelleitung auftretenden Phasensprünge darf nicht überschätzt werden. Im praktischen Betrieb haben sich Phasensprünge bei der Verwendung von Stimmgabelfiltern noch nicht als Störung bemerkbar gemacht.

(Eingegangen am 12. Februar 1934.)