

# Einige Betrachtungen zum Problem des Gleichwellenrundfunks.

Von F. Gerth und W. Hahnemann.

Bei dem Betrieb von mehreren Sendern auf ein und derselben Trägerwelle ergeben sich bekanntlich Interferenzgebiete, in denen der Empfang mehr oder weniger verzerrt erscheint. In einer neueren Arbeit von Eckersley bei der British Broadcasting Corporation, die sich mit Gleichwellenrundfunk befaßt<sup>1)</sup>, werden diese sogenannten gestörten Gebiete behandelt und auf experimentellem und theoretischem Wege gewisse Gesetze über die Ausdehnung dieser Gebiete aufgestellt. Auf experimenteller Basis hatten auch frühere Untersuchungen des Telegraphentechnischen Reichsamtes, Berlin, die Grenzen des gestörten Gebietes beim Betrieb von zwei Sendern auf einer Welle in Abhängigkeit von der Entfernung der beiden Sender voneinander ermittelt. Im folgenden soll nun der Versuch gemacht werden, auf Grund neuerer experimenteller Feststellungen das gestörte Gebiet des Gleichwellenrundfunks zu behandeln.

Die verschiedenen, bisher angegebenen Verfahren zum Betrieb zweier Sender auf gleicher Wellenlänge lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: die Gruppe der synchronisierten und diejenige der nicht synchronisierten Verfahren.

Bei dem synchronisierten Gleichwellenrundfunk wird mittels einer gemeinsamen Steuerfrequenz die Trägerwelle der beiden Sender zwangsläufig gleich gehalten. Man nahm bisher an, daß dabei lediglich Phasenunterschiede der Hochfrequenzschwingungen auftreten können.

Bei dem nicht synchronisierten Gleichwellenrundfunk werden die Sender unabhängig voneinander hochfrequent gesteuert, wobei die Steuerfrequenz so konstant gehalten werden muß, daß der Frequenzunterschied zwischen den einzelnen Trägerwellen noch keinen hörbaren Überlagerungston ergeben darf, also weniger als 30 Hz betragen muß. Diese beiden Methoden des Gleichwellen-

rundfunks sollen zunächst gesondert näher untersucht werden.

## I. Das synchronisierte System.

Wir wollen zwei Sender betrachten, die eine bestimmte Entfernung voneinander haben sollen und von einer gemeinsamen Grundfrequenz zwangsläufig gesteuert werden. Wird diese Steuerfrequenz absolut bzw. genügend konstant gehalten und werden keine Veränderungen an dem Übertragungsmittel der Steuerfrequenz vorgenommen, so gibt es im Zwischengebiet zwischen den beiden Sendern die bekannten Interferenzstreifen, die in diesem Fall ihre Lage unveränderlich behalten, wobei Streifen maximaler und minimaler Feldstärke im Abständen von  $\lambda/4$  miteinander abwechseln. Bei gleichen Feldstärken der beiden Sender wird im Minimum — also bei  $180^\circ$  Phasendifferenz — die Trägerwelle vollkommen ausgelöscht. Wie verhält sich nun die modulierte Schwingung in diesem Interferenzgebiet? Wir wollen zunächst nur die Zweiseitenband-Modulation betrachten, wobei noch vorausgesetzt sein soll, daß beide Seitenbänder gleiche Amplitude und gleiche Größe des Phasenwinkels gegenüber der Trägerwelle haben sollen. Da die Schwingungszahlen der Seitenbänder verschieden von denen der Trägerwellen sind, werden ihre Interferenzstreifen normalerweise nicht mit denjenigen der Trägerwelle zusammenfallen. Es werden vielmehr Maxima der Trägerwelle mit Minima von gewissen Modulationsfrequenzen zusammentreffen, wodurch diese im Tonbild geschwächt werden bzw. im Bereich gleicher Feldstärke vollkommen verschwinden. Wir wollen einen Punkt im Interferenzgebiet betrachten, an dem die Feldstärke der Trägerfrequenz im Maximum sein soll, und werfen die Frage auf, welche Tonfrequenzen an diesem Punkte im Minimum sind. Aus der Rechnung ergibt sich, daß die beiden Seitenbänder einer modulierten Schwingung nicht genau an derselben Stelle ihr Minimum haben, daß aber die Abweichungen der Minima voneinander bei

<sup>1)</sup> Eckersley. The Operation of several Broadcasting Stations on the same Wavelength. Wireless Section of the Institution of Electrical Engineers, 25. 2. 1929.

den in Betracht kommenden Wellen und Entfernungen verhältnismäßig gering sind, so daß man praktisch mit dem Zusammenfallen der Minima der beiden symmetrisch zur Trägerwelle liegenden Seitenbänder für einen oben definierten Punkt des Interferenzgebietes rechnen kann.

In Abb. 1 ist die Frequenzkurve für ein bestimmtes Beispiel dargestellt. Die Entfernung der beiden Gleichwellensender voneinander beträgt in diesem Beispiel 100 km, die Wellenlänge 200 m; ferner soll die Empfangsstelle auf der Verbindungslinie zwischen den beiden

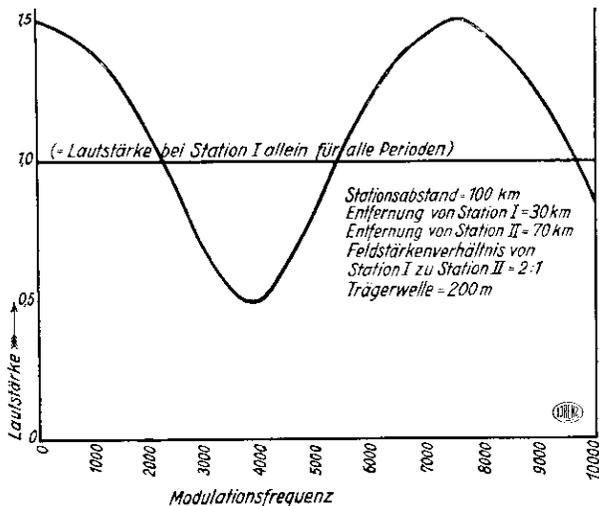


Abb. 1. Lineare Frequenzverzerrung im gestörten Gebiet zweier Gleichwellensender bei mittlerem Stationsabstand.

Sendern in 30 km Entfernung von einem der beiden Sender liegen, wobei unter normalen Absorptions-Verhältnissen am Tage ein Feldstärkenverhältnis von 1 : 2 sich ergibt. Außerdem ist vorausgesetzt, daß an den betrachteten Punkten die Trägerfrequenz durch Interferenz maximal verstärkt wird. Die bei Vorhandensein nur eines Senders als ideal geradlinig angenommene Kurve, die die Abhängigkeit der Lautstärke von der Modulationsfrequenz darstellt, wird durch das Hinzutreten des anderen Senders in eine sinusähnliche Kurve verwandelt, die bei 3750 Hertz ein Minimum und bei 7500 Hertz ein Maximum aufweist. In Abb. 2 ist ein Fall dargestellt, der sich von dem der Abb. 1 dadurch unterscheidet, daß die gesamte Weglänge 250 km beträgt, wobei z. B. angenommen werden kann, daß von dem einen Sender im wesentlichen nur der direkte, vom anderen Sender nur der indirekte Strahl vorhanden ist und zur Interferenz kommt. Aus den beiden

Abbildungen ist ersichtlich, wie bestimmte Tonbereiche nach einer sinusähnlichen Kurve geschwächt und verstärkt werden. Immerhin wird man im Vergleich zu den Frequenzkurven mancher Lautsprecher annehmen dürfen, daß die hier sich ergebende Frequenzverzerrung noch erträglich ist.

Wesentlich anders erscheint das Empfangsbild an den Stellen, an denen die Trägerwelle durch Interferenz geschwächt bzw. bei gleicher Feldstärke vollkommen aufgehoben wird. Um diesen Fall näher zu untersuchen, soll zunächst das

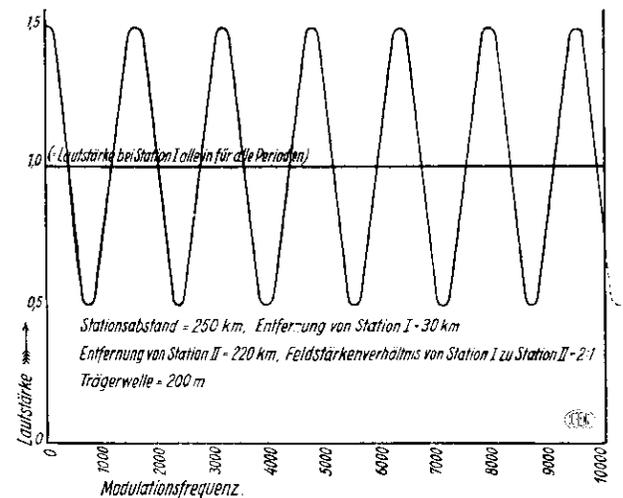


Abb. 2. Lineare Frequenzverzerrung im gestörten Gebiet zweier Gleichwellensender bei größerem Stationsabstand.

Amplitudenverhältnis zwischen Trägerwelle und Seitenbändern bei den verschiedenen Modulationstiefen betrachtet werden. Bei 100 prozentiger Modulation ist dieses Verhältnis 1 : 0,5, d. h. die Amplitude der Trägerwelle ist doppelt so groß wie diejenige von jedem der beiden Seitenbänder. Bei 50 prozentiger Modulation beträgt dieses Verhältnis 1 : 0,25, bei 25 prozentiger 1 : 0,125 usw. Tritt nun der Fall ein, daß die Amplitude des einen Seitenbandes durch selektive Verstärkung desselben bzw. Schwächung der Trägerwelle oder durch Zusammenwirken beider Vorgänge über das 0,5 fache derjenigen der Trägerwelle steigt, so erhält man den Fall der Übermodulation, der sich durch das Entstehen höherer Harmonischer der Modulationsfrequenz, also nichtlinearer Verzerrungen, bemerkbar macht. Diese Erscheinung ist am stärksten an den Stellen ausgeprägt, an denen die Feldstärke der Trägerfrequenz ihren minimalen Wert hat. Das Ampli-

tudenverhältnis der beiden Sender, das an diesen Stellen zugelassen werden darf, bis Übermodulation eintritt, ist nun in bestimmter Weise abhängig von dem Grade der Aussteuerung der beiden Sender. Werden die Sender 100 prozentig ausgesteuert, so wird an allen Interferenzminima der Trägerfrequenz sofort Übermodulation auftreten, d. h. es wird das ganze Gebiet um die Sender als Störgebiet angesprochen werden müssen. Bei sehr geringer Aussteuerung der beiden Sender erhält man dagegen nur eine schmale Zone zwischen den Sendern, in denen die Streifen der Übermodulation sich bemerkbar machen. Unter der Annahme des ungünstigsten Falles, daß bei einer Phasendifferenz der Trägerwellen von  $180^\circ$  gleichzeitig beide Seitenbänder oder eines derselben mit den Seitenbändern des anderen Senders in Phase sind, also maximal verstärkt werden, läßt sich das noch zulässige Amplitudenverhältnis der beiden Sender, ohne daß an dem Empfangsort Übermodulation entsteht, nach folgender Formel berechnen, wobei mit  $k$  der Modulationsgrad und mit  $\alpha$  das Amplitudenverhältnis bezeichnet wird:

$$\alpha = \frac{100 + k}{100 - k};$$

Es ergeben sich folgende Werte für  $\alpha$ :

$k$	$\alpha$
100	$\infty$
70	5,1
60	4,0
50	3,0
40	2,3
30	1,9
20	1,5

Man ersieht aus dieser Betrachtung, daß man bei Verringerung des Aussteuerungsgrades der beiden Sender das gestörte Gebiet wenigstens bezüglich der Vermeidung von nichtlinearen Verzerrungen beliebig einengen kann. Die Phase der Modulationsfrequenz an den Sendern und am Empfangsort ist dabei ohne Belang, solange nicht durch allzu große Weglängendifferenz „Nachhall-effekt“ eintritt (je 100 km Weglängendifferenz bei den Modulationskabeln ungefähr 5 ms).

Eine Verzerrungsmöglichkeit besteht dabei allerdings in dem Demodulator des Empfängers, da voraussetzungsgemäß in allen diesen Fällen durch Schwächung der Trägerfrequenz und gleich-

zeitige Verstärkung der Seitenbänder 100 prozentige Modulation für bestimmte Frequenzen entsteht. Bei quadratisch arbeitender Gleichrichtung, wie sie noch in den meisten Empfängern angewendet wird, hat eine derartige Modulation starke nichtlineare Verzerrungen zur Folge. Außer den geschilderten nichtlinearen Verzerrungen sind natürlich auch noch die oben behandelten linearen Verzerrungen vorhanden.

Wir wollen jetzt den Fall betrachten, daß die Sendefrequenz mit der Modulation sich ändert, ein Fall, der zunächst bei zwangsläufig gesteuerten und gut neutralisierten Sendern unwahrscheinlich erscheint, dessen Möglichkeit aber durch die Untersuchungen von Herrn A. Heilmann<sup>2)</sup> bewiesen und sowohl bei dem Maschinensender als auch bei dem Röhrensender experimentell festgestellt worden ist. Bei dieser Betrachtung ist von wesentlicher Bedeutung die Phase der Modulationsfrequenz der beiden Sender am Empfangsort und der Betrag, um welchen die Frequenzmodulation der beiden Sender voneinander abweicht.

Fall 1. Kein Phasenunterschied der Modulationsfrequenz bei beiden Sendern, also Besprechungsleitung nach den Sendern von gleicher Länge oder Phasenausgleich auf den Leitungen und Gleichheit der hochfrequenten Phasenmodulation bei beiden Sendern, ein Fall, der sich allerdings technisch nur sehr schwierig verwirklichen läßt.

Hierbei werden keine Unterschiede gegenüber Sendern ohne Phasenmodulation bemerkbar sein, solange am Empfangsort kein erheblicher Weglängenunterschied zu den Sendern besteht. Ein solcher Unterschied kann jedoch dann eintreten, wenn am Empfangsort von dem einen Sender im wesentlichen der direkte, vom anderen Sender der indirekte Strahl zur Interferenz gelangt. Dieser Fall tritt auch beim Einzelsender auf, wenn zwei Strahlen auf verschiedenen Wegen am Empfangsort ankommen. Da die hierbei vorhandenen Weglängenunterschiede einige 100 km betragen können, entstehen Phasenunterschiede der Modulationsfrequenz und dadurch bedingte nichtlineare Verzerrungen bei hochfrequenter Phasenmodulation, wie sie in Abb. 3, allerdings für den extremen Fall von  $90^\circ$  Phasendifferenz der Modulationsfrequenz am Empfangsort, dargestellt sind. Die

<sup>2)</sup> Vgl. dieses Heft S. 217.

durch die Phasenmodulation bedingte Frequenzmodulation kann jedoch im vorliegenden Falle verhältnismäßig große Werte annehmen (bis zu 50 Hertz), ohne daß wesentliche Verzerrungen entstehen, da bei tiefen Modulationsfrequenzen der Phasenunterschied auch bei Weglängendifferenzen von einigen 100 km nur klein bleiben kann und bei hohen Frequenzen, bei denen die Phasenabweichung größer wird, eine Frequenzmodulation obiger Größe (50 Hertz) keine Rolle mehr spielt.

Fall 2. Es bestehen Phasenunterschiede in der Modulationsfrequenz bei beiden Sendern. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei pupinisierten Modulationskabeln nur ungefähr 18000 km/s beträgt, erhält man beispielsweise bei einem Wegunterschied von 100 km schon bei 45 Hz Modulationsfrequenz eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$ , bei den höheren Modulationsfrequenzen entsprechend mehr. In Abb. 3 ist

welle im Maximum ist. Somit sind auch diejenigen Stellen des Empfangsgebietes in die Verzerrung mit einbegriffen, an denen gemäß den vorhergehenden Betrachtungen bei vollkommener Synchronisation Verzerrungsfreiheit bestand. Man kann aus den vorhergehenden Überlegungen leicht erkennen, daß hierbei schon bei sehr geringer Phasenmodulation der Hochfrequenz starke nichtlineare Verzerrungen auftreten müssen. In dem oben genannten Beispiel würde schon eine durch Phasenverschiebung bedingte Frequenzmodulation von 10 Hertz als störend empfunden werden.

Fall 3. Es bestehen zwar keine Phasenunterschiede der Modulationsfrequenz, jedoch ist die hochfrequente Phasenmodulation der beiden Sender ungleich. Im Grenzfall besitzt nur einer der beiden Sender Frequenzmodulation. Dieser Fall läßt sich auf Fall 2 zurückführen. Je nach der Ungleichheit der Frequenzänderung mit der Modulation können auch hier schon bei sehr geringer

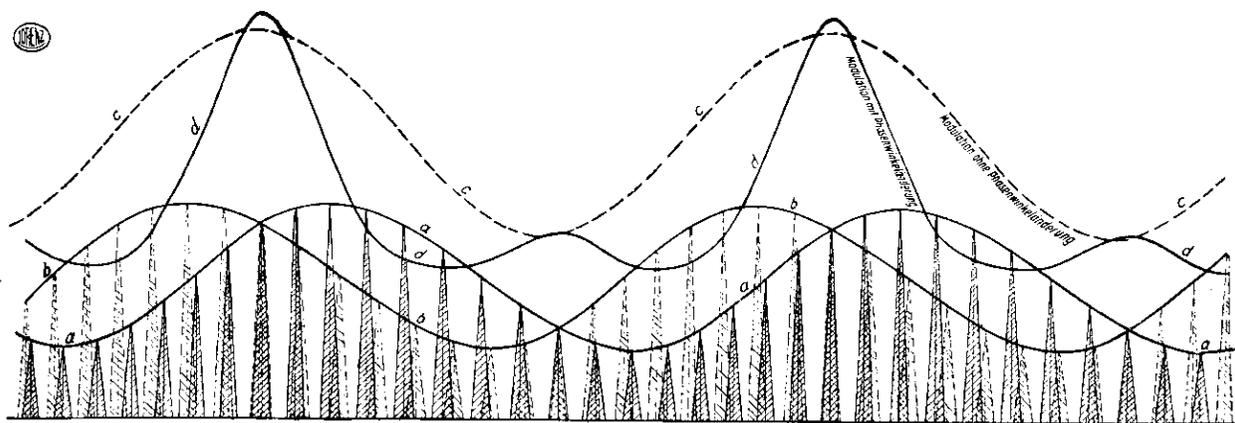


Abb. 3. Nichtgeradlinige Verzerrung bei Phasenmodulation.

ein derartiger Fall wiedergegeben. Es seien  $a$  und  $b$  die mit  $90^\circ$  Phasendifferenz am Empfangsort vorhandenen Begrenzungskurven der beiden sinusförmig modulierten Hochfrequenzschwingungen. Durch die Modulation soll weiterhin eine Phasenänderung von maximal  $180^\circ$  entstehen. Ohne diese Phasenmodulation würde man als resultierende Begrenzungskurve die Kurve  $c$  erhalten, während durch die angenommene Phasenmodulation die Kurve  $d$  als neue Begrenzungskurve entsteht, die, wie man leicht erkennt, starke Harmonische enthält. Es ist für den angenommenen Fall charakteristisch, daß diese Amplitudenverzerrungen auch an den Stellen eintreten, an denen die Amplitude der Träger-

Frequenzänderung starke Harmonische der Modulationsfrequenz auftreten.

Fall 4. Es bestehen am Empfangsort gleichzeitig Phasenunterschiede der Modulationsfrequenz und Unterschiede in der Stärke der Frequenzmodulation der Sender. Die Bedingungen für das Entstehen von nichtlinearen Verzerrungen sind in diesem Fall in noch höherem Maße als in den vorhergehenden Fällen vorhanden.

Aus den vorstehenden Betrachtungen ist ersichtlich, daß der synchronisierte Gleichwellenrundfunk samt den mit ihm notwendigerweise verknüpften Komplikationen, wie Frequenzvervielfachung, Steuerleitung usw., nur dann die Vorteile der geringeren Ausdehnung des gestörten

Gebietes besitzt, wenn einerseits die Sender nicht zu stark ausgesteuert werden und andererseits die Phasenmodulation und die damit verbundene Frequenzmodulation der Sender mit Sicherheit auf einen sehr geringen Betrag gebracht werden kann. Werden diese Forderungen nicht erfüllt, so wird kein wesentlicher Unterschied zwischen synchronisiertem und nicht synchronisiertem System festzustellen sein. Vielleicht sind die zum Teil erheblich voneinander abweichenden Berichte der einzelnen Beobachter in bezug auf die Ausdehnung des gestörten Gebietes auf derartige Ursachen zurückzuführen. Solange insbesondere die Beseitigung der Phasenmodulation nicht gewährleistet ist, wird man unter Umständen dem im nächsten Abschnitt behandelten nicht synchronisierten System wegen seiner größeren Einfachheit den Vorzug geben müssen.

Eine Möglichkeit wäre allerdings noch vorhanden, daß auch der streng synchronisierte Gleichwellenrundfunk die Eigenschaften des nicht synchronisierten annehmen kann. Wenn am Empfangsort einfallende indirekte Strahlen Dopplereffekt aufweisen<sup>3)</sup>, können wirkliche Frequenzunterschiede von bestimmter Dauer auftreten, ähnlich wie sie beim nicht synchronisierten System vorhanden sind. Die bisherigen Beobachtungen lassen allerdings für den Rundfunkwellenbereich und für die hierbei in Betracht kommenden Entfernungen nicht auf das Vorhandensein von häufigen und raschen zeitlichen Verschiebungen der Kennelly-Heavisideschicht schließen, wie sie der Dopplereffekt erfordern würde.

## II. Das nichtsynchronisierte System.

Bei dieser Art des Gleichwellenrundfunks, die einen Frequenzunterschied von maximal 30 Hz zwischen den beiden Sendern zuläßt, werden im Interferenzgebiet sowohl Trägerfrequenz als auch Seitenbänder im Rhythmus der Senderwellendifferenz in ihren Amplituden schwanken, was sich bei geringerer Differenz durch An- und Abschwellen der Lautstärke, bei größerer durch das sogenannte „Wubbeln“ und bei noch stärkerer Abweichung als „Trillern“ bemerkbar macht. Da das menschliche Ohr für schnell aufeinanderfolgende Unterschiede in der Amplitude sehr empfindlich ist, wird im allgemeinen schon ein

Amplitudenunterschied von 10 vH sich als „Tremolieren“ bemerkbar machen. Wenn somit am Empfangsort das Amplitudenverhältnis der Trägerfrequenzen zweier nichtsynchronisierter Gleichwellensender unter 1:10 ist, wird die so charakterisierte Störung, wie auch Eckerley in seiner Abhandlung angibt, schon deutlich empfunden. Das bedeutet, daß infolgedessen das störungsfreie Gebiet auf die unmittelbare Umgebung von jedem der beiden Sender beschränkt ist. Die in dem gesamten übrigen Gebiet vorherrschenden Verzerrungen werden nur dann verringert, wenn die beiden Sender zufällig einige Zeit synchron laufen.

### Zusammenfassung.

Es werden die Eigenschaften des synchronisierten und nichtsynchronisierten Gleichwellenrundfunks behandelt, die erhebliche Verschiedenheiten aufweisen.

Bei dem streng synchronisierten Gleichwellenrundfunk ergeben sich sowohl lineare als auch nichtlineare Verzerrungen, die vom Feldstärkenverhältnis der Gleichwellensender an dem betrachteten Empfangsort und von dem Modulationsgrad abhängen. In bezug auf die linearen Verzerrungen kann ein Feldstärkenverhältnis von 1:2 noch als zulässig angesehen werden, während das noch erträgliche Feldstärkenverhältnis in bezug auf die nichtlinearen Verzerrungen für diejenigen ungünstigen Stellen des Interferenzgebietes, an denen die Feldstärke der Trägerwelle im Minimum ist, lediglich vom Modulationsgrad abhängt und z. B. bei 30 prozentiger Modulation ebenfalls 1:2 betragen kann.

Tritt dagegen beim synchronisierten System hochfrequente Phasen- und damit Frequenzänderung in Abhängigkeit von der Modulation auf, so wird das gestörte Gebiet infolge auftretender nichtlinearer Verzerrungen einmal erheblich weiter ausgedehnt, außerdem treten die nichtlinearen Verzerrungen auch an den günstigen Stellen des Interferenzgebietes, an denen die Trägerwelle im Maximum ist, auf.

Beim nichtsynchronisierten System wird das nicht gestörte Gebiet dadurch sehr eingengt, daß durch die im Rhythmus des Frequenzunterschiedes der Sender erfolgenden Verschiebungen der Interferenzlinien am Empfangsort ein

<sup>3)</sup> Mesny, Les ondes électriques courtes, 1927, Seite 25.

„Wubbeln“ oder „Trillern“ entsteht, das erst dann in erträglichem Maße zurücktritt, wenn die Feldstärke des einen Senders diejenige des anderen um mindestens das 10fache überwiegt.

Aus den angestellten Betrachtungen ist zu schließen, daß das System des synchronisierten Gleichwellenrundfunks bei den mit ihm notwendig verbundenen Komplikationen erst dann

mit voller Berechtigung anzuwenden ist, wenn es gelingt, die hochfrequente Phasenmodulation der Sender soweit herabzudrücken, daß die daraus resultierende Frequenzmodulation zum mindesten ebenso klein ist, wie die bei nichtsynchronisiertem Betrieb zuzulassende Frequenzinkonstanz.

(Eingegangen am 29. Januar 1930.)