

# FUNK BASTLER

FACHBLATT DES DEUTSCHEN FUNKTECHNISCHEN VERBANDES E. V.

## Ätherwellenmusik

Von

W. Saraga und H. Wallor

Nachdem in Heft 48 des „Funk-Bastler“, 1931, die allgemeinen Grundlagen der elektrischen Tonerzeugung dargestellt worden sind, folgt nachstehend ein Aufsatz über ein spezielles Instrument, den Ätherwellenapparat von Theremin. Anleitungen zu Versuchen mit Ätherwellenanordnungen sind bereits mehrfach im „Funk-Bastler“ erschienen<sup>1)</sup>. Im nachfolgenden Aufsatz werden, über den Inhalt jener Aufsätze hinausgehend, alle Fragen, die mit dem Bau eines Ätherwellenapparates zusammenhängen, eingehend besprochen. Es wird dann in einem zweiten Aufsatz eine Bauanleitung gegeben werden.

Es ist in einem Aufsatz über elektrische Musik<sup>2)</sup> gezeigt worden, daß die Ersetzung der mechanischen Apparatur eines Musikinstrumentes durch eine elektrische eine Entwicklung des Instrumentenbaus in zwei verschiedenen Richtungen gestattet, einerseits in der Erzeugung neuer Klangfarben, andererseits in der Ermöglichung einer neuen Spieltechnik.

Eine der ersten, wenn nicht die allererste Erfindung, die sich auf eine grundsätzlich neue Art der Spieltechnik richtet, ist das „Ätherwellen-Musikinstrument“ von Theremin<sup>3)</sup>. Das Ziel dieser Erfindung besteht darin, die unmittelbare mechanische Berührung zwischen dem Spieler und dem Instrument überflüssig zu machen. Der Spieler soll imstande sein, durch Bewegung der Hand (oder auch eines anderen Körperteils) in freier Luft die von dem Instrument erzeugten Töne in ihrer Höhe und Lautstärke zu beeinflussen. Theremin nimmt an, daß sich der Spieler durch die körperliche Loslösung vom Instrument mehr auf den musikalischen Inhalt seines Spiels konzentrieren kann. Es ist selbstverständlich, daß für die alte mechanische<sup>4)</sup> Instrumententechnik dieses Ziel vollkommen unerreichbar ist. Nur durch Berührung der Tasten, Saiten oder anderer Teile des Instruments ist ein Spiel auf einem mechanischen Instrument möglich.

Wie löst nun Theremin diese Aufgabe? Betrachten wir zunächst die Regelung der Tonhöhe! Wir gehen von der Tatsache aus, daß die Frequenz eines Schwingungskreises von der Kapazität und der Induktivität seiner Schaltelemente abhängt. Die Kapazität eines Kondensators ist in erster Linie von der Oberfläche

und dem Abstand seiner beiden Belegungen (z. B. der Plattenpakete eines Drehkondensators) abhängig. Daneben besteht aber auch eine Kapazität zwischen den Belegungen und der Erde. Erden wir eine Belegung eines Kondensators (vgl. Abb. 1), so können wir unterscheiden zwischen der aus den Dimensionen des Kondensators berechenbaren Kapazität  $C_0$  zwischen den

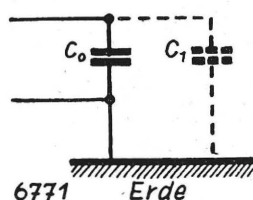


Abb. 1. Erdkapazität eines Kondensators.

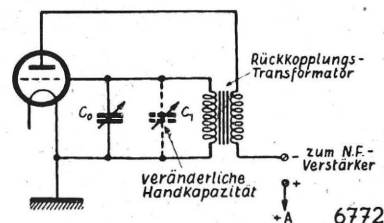


Abb. 2. Niederfrequenzgenerator.

beiden Belegungen, und der Kapazität  $C_1$  zwischen der ungeerdeten Belegung und der Erde. Die Erdkapazität  $C_1$  wirkt wie ein zum ursprünglichen Kondensator  $C_0$  parallelgeschalteter Kondensator, vergrößert also die wirksame Gesamtkapazität. Die Erdkapazität ist keine unveränderliche Größe, sondern hängt von der Aufstellung des Kondensators und der Nähe anderer Leiter ab. So einen Leiter stellt auch der menschliche Körper dar, so daß es möglich ist, durch Bewegung des Körpers die wirksame Kapazität eines Kondensators zu ändern, ohne diesen zu berühren. Durch die Änderung der Kapazität wird dann weiterhin die Frequenz des Schwingungskreises geändert.

Auf Grund dieser Überlegungen ist zu erwarten, daß jeder Schwingungserzeuger, dessen Frequenz im Hörbereich<sup>5)</sup> liegt, als Ätherwelleninstrument benutzt werden kann, indem man durch Bewegung der Hand die Frequenz, d. h. die Tonhöhe, in der angegebenen Weise ändert (vgl. die entsprechende Schaltung in Abb. 2). Leider scheidet diese einfache Lösung an konstruktiven Schwierigkeiten. Zur Erkenntnis dieser Schwierigkeiten ist es notwendig, einige einfache Formeln zu betrachten. Die Frequenz  $f$  eines Rückkopplungs-generators wird bestimmt durch die Kapazität  $C$  und die Induktivität  $L$  des Schwingungskreises, und zwar ist

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{C \cdot L}}; \quad f^2 = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{C \cdot L} \quad (1)$$

<sup>5)</sup> Das menschliche Ohr empfindet nur Luftschwingungen mit Frequenzen von etwa 16 Schwingungen pro Sekunde bis zu etwa 20 000 Schwingungen pro Sekunde als Ton. Dieser Frequenzbereich wird als Hörbereich bezeichnet.

<sup>1)</sup> Vgl. „Funk-Bastler“ 1928, Heft 26, S. 402, „Ätherwellenmusik“, von W. Saraga, und „Funk-Bastler“ 1931, Heft 42, „Ätherwellenmusik und Quarzkristall“, von Dipl.-Ing. Keßler.

<sup>2)</sup> Vgl. „Funk-Bastler“ 1931, Heft 48, S. 761 ff.

<sup>3)</sup> Vgl. die Deutsche Patentschrift Nr. 443 536.

<sup>4)</sup> Man versteht manchmal unter „mechanischen“ Instrumenten automatisch spielende Instrumente, wie z. B. das Pianola. In diesem Aufsatz, ebenso wie in dem Aufsatz in Nr. 48 des „Funk“ 1931, wird das Wort „mechanisch“ immer im Gegensatz zu „elektrisch“ verwendet, zur Kennzeichnung der altbekannten Instrumente, wie Geige, Klavier, Flöte, im Gegensatz zu den neuen elektrischen Musikinstrumenten.

Je größer  $f$  ist, desto kleiner müssen  $C$  und  $L$  sein, und umgekehrt. Zur Erzeugung hörbarer Töne braucht man verhältnismäßig große Induktivitäten und Kapazitäten. Die durch Bewegung der Hand veränderliche Erdkapazität, die wir im folgenden besser Handkapazität nennen wollen, ist viel kleiner als die Kapazität des Schwingungskreises. Ändern wir die Handkapazität  $C_1$  um die Hälfte ihres Betrages, so ist die Änderung der wirksamen Gesamtkapazität

$$C = C_0 + C_1 \quad (2)$$

außerordentlich klein. Infolge der geringen Änderung der Kapazität ist auch die Frequenzänderung sehr gering. Daher kann man auf diese Weise die Höhe des

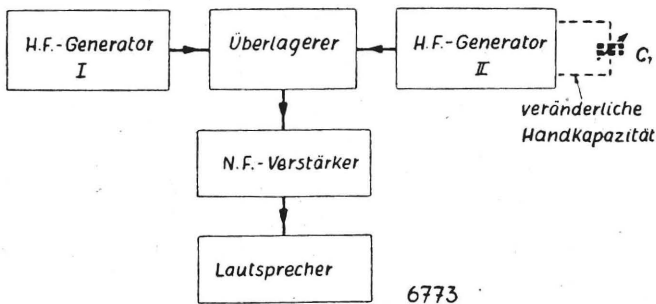


Abb. 3. Überlagerungsgenerator.

erzeugten Tones nur sehr wenig beeinflussen. Verkleinern wir  $C_0$ , so ändert sich, bei gleicher Änderung von  $C_1$ ,  $C = C_0 + C_1$  in viel größerem Maße. Das sei an einem Zahlenbeispiel näher erörtert: Es sei  $C_0 = 100 C_m$  (wenn wir unter  $C_m$  den Höchstwert der Handkapazität  $C_1$  bei größter Annäherung der Hand an den Kondensator verstehen). Dann ist  $C = C_0 + C_m = 100 C_m + C_m = 101 C_m$ . Machen wir durch Entfernen der Hand  $C_1 = 0$ , so ist  $C = C_0 = 100 C_m$ . Die Änderung von  $C$  beträgt also 1 v.H. Ist dagegen  $C_0 = 10\,000 C_m$ , so ist  $C = 10\,001 C_m$ , bzw.  $C = 10\,000 C_m$ . Die Änderung beträgt also nur 0,01 v.H.

Aus Gleichung 1 folgt, daß  $L$  desto größer sein muß, je kleiner  $C$  ist, damit der Röhrengenerator dieselbe Frequenz  $f$  erzeugt. Die Erfahrung zeigt nun, daß ebenso, wie ein Kondensator neben seiner Belegungs-kapazität noch eine Erdkapazität besitzt, auch eine Spule neben ihrer Induktivität eine unerwünschte Kapazität hat. Die einzelnen Spulenwindungen wirken sowohl gegeneinander als auch gegen Erde wie Belegungen eines Kondensators. Es ist konstruktiv zwar möglich, diese Spulenkapazität durch eine geeignete Wicklungsart zu verringern; ganz vermieden werden kann sie nicht. Sie wächst mit der Induktivität der Spule. Aus diesem Grunde müssen wir in Gleichung 1

$$C = C_0 + C_1 + C_2 \quad (3)$$

setzen, wenn wir mit  $C_2$  die Spulenkapazität bezeichnen. Wenn wir sogar  $C_0 = 0$  machen, so ist  $C = C_1 + C_2$  für hörbare Frequenzen aus dem obigen Grunde noch immer viel zu groß, als daß durch Änderung der Handkapazität eine genügend große Frequenzänderung erzielt werden könnte.

Als Ausweg aus diesen Schwierigkeiten wählt Therman eine für andere Zwecke in der Hochfrequenztechnik bereits bekannte Schaltung. Er erzeugt durch Überlagerung zweier Hochfrequenzschwingungen eine niederfrequente Schwingung. Die hochfrequente Schwingung wird durch Änderung der Handkapazität in ihrer Frequenz relativ viel mehr als eine niederfrequente Schwingung geändert, weil nach Gleichung 1 für größeres  $f$   $C$  und  $L$  viel kleiner als bei einer niederfrequenten Schwingung sein müssen. Infolgedessen ist

die Handkapazität  $C_1$  nicht mehr so klein im Vergleich zu  $C = C_0 + C_1 + C_2$ . Davon ganz abgesehen ist zur Erzielung einer gewünschten Änderung der Niederfrequenz eine viel kleinere Änderung der Hochfrequenz erforderlich; denn die Niederfrequenz  $f$  ist

$$f = F_1 - F_2, \quad (4)$$

wenn wir mit  $F_1$  und  $F_2$ , die beiden Hochfrequenzen bezeichnen (vgl. das Zahlenbeispiel im „Funk-Bastler“ 1931, Heft 42, Aufsatz von Keßler). Wir brauchen für unser Ätherwelleninstrument zwei Hochfrequenzgeneratoren, von denen einer so eingerichtet sein muß, daß seine Frequenz durch Bewegung der Hand geändert werden kann, außerdem einen Überlagerer oder Gleichrichter, in dem aus den beiden Hochfrequenzen eine Niederfrequenz gebildet wird, und dann anschließend einen Niederfrequenzverstärker und einen Lautsprecher (vgl. Abb. 3). Die Gleichrichtung oder Überlagerung kann auch in einem der beiden Hochfrequenzgeneratoren geschehen.

Es fragt sich nun, in welcher Weise sich die Tonhöhe des Instruments ändert, wenn man die Hand dem Schwingungskreiskondensator bzw. einem mit ihm verbundenen Metallteil, der „Antenne“, nähert. Diejenigen Leser dieses Aufsatzes, welche nach der Anleitung im Aufsatz von Keßler Versuche angestellt haben, werden in den meisten Fällen gemerkt haben, daß die Verteilung der verschiedenen Tönhöhen über den räumlichen Spielbereich außerordentlich ungleichmäßig ist. Es ist in diesem Zusammenhang notwendig, auf einige Eigenschaften unseres musikalischen Hörempfindens einzugehen. Unser musikalisches Empfinden ist so beschaffen, daß wir den Tönhöhenunterschied zweier Töne immer dann als gleich empfinden, wenn das Verhältnis der Schwingungszahlen das gleiche ist. Das sei an einem Zahlenbeispiel näher erläutert: Ein Ton habe eine Frequenz von 100 Hertz (d. h. er hat 100 Schwingungen je Sekunde), ein zweiter Ton habe eine Frequenz von 200 Hertz. Wir nennen dieses

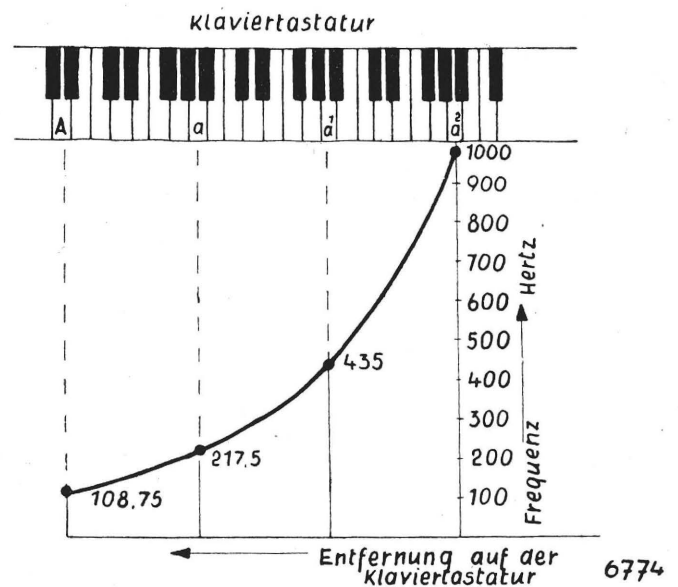


Abb. 4. Räumliche Tönhöhenverteilung beim Klavier.

Tonintervall, d. h. diesen Abstand der Tönhöhen, eine Oktave. Wenn wir eine Tonleiter mit dem Ton 100 Hertz beginnen, so endet sie beim Ton 200 Hertz, d. h. bei der Oktave des Grundtons, mit dem wir begonnen haben. Man könnte nun auf den Gedanken kommen, daß eine Tonleiter, die wir beim Ton 1000 Hertz beginnen, beim Ton 1100 Hertz = (1000 + 100) Hertz endet. In diesem Fall würde die Differenz der Schwingungszahlen:  $1100 - 1000 = 200 - 100 = 100$  für unser

Tonintervallempfinden entscheidend sein. Tatsächlich zeigt aber eine Messung der Schwingungszahlen, daß der Ton, mit dem wir die mit 1000 Hertz begonnene Tonleiter beenden, die Frequenz 2000 Hertz hat. Man erkennt daraus, daß das Verhältnis der Schwingungszahlen, ihr Quotient, für unser Tonempfinden maßgebend ist:

$$\frac{2000}{1000} = \frac{200}{100} = 2.$$

Was hier für den ersten und letzten Ton einer Tonleiter, für eine Oktave, näher auseinandergesetzt worden ist, gilt ebenso für Intervalle zwischen beliebigen anderen Tönen. Es ist nun für den Spieler am bequemsten, wenn gleiche musikalische Intervalle gleiche räumliche Abstände auf seinem Instrument haben. Das ist beim Klavier vollkommen und bei vielen anderen Instrumenten annähernd durchgeführt. Abb. 4 zeigt die Anordnung der Klaviertasten sowie einige zugehörige Schwingungszahlen. Darunter ist die Tonhöhe in Abhängigkeit von der Entfernung von einem Ende der Tastatur als Kurve dargestellt. Es ist wünschenswert, daß auch bei dem Ätherwelleninstrument die Tonhöhe in Abhängigkeit von der Entfernung der Hand von der

Wie ändern sich nun die Verhältnisse, wenn wir die Kapazität des einen Generators nicht mehr am Kondensator, sondern durch Bewegung der Hand ändern? Man kann für die Änderung der Kapazität in Abhängigkeit von der Handstellung kein genaues Gesetz angeben, da dieses, wie schon bei Erklärung des Begriffs „Erdkapazität“ auseinandergesetzt wurde, von den

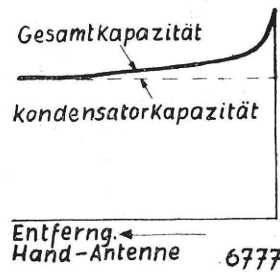


Abb. 7. Kapazität in Abhängigkeit von der Handstellung.

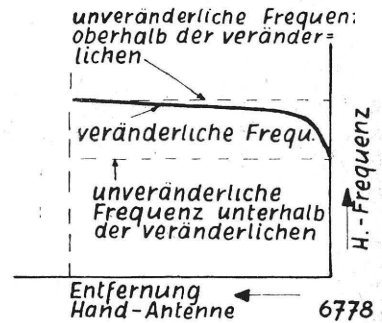


Abb. 8. Hochfrequenz in Abhängigkeit von der Handstellung.

Verhältnissen in der Umgebung des Kondensators, z. B. von der Anwesenheit von Leitern und Isolatoren in seiner Nähe, abhängt. Allgemein kann man aber sagen, daß die Änderung der Kapazität durch Bewegung der Hand viel größer in der Nähe der Antenne als in größerer Entfernung von ihr ist. Die Abhängigkeit der Handkapazität von der Handstellung wird also ungefähr durch die in Abb. 7 bezeichnete Kurve wiedergegeben. In Abb. 8 ist der entsprechende Teil der Frequenzkurve gezeichnet. Durch die Ausbildung der Antenne als Platte, Stab oder Ring läßt sich die Kurve im einzelnen abändern; ihr allgemeiner Charakter bleibt derselbe.

In Abb. 9 sind die durch Differenzbildung entstehenden Niederfrequenzkurven dargestellt. Man erkennt, daß die eine der Kurven, diejenige, bei der der höchste Ton mit der Annäherung der Hand an die Antenne zusammenfällt (vgl. Abb. 9 b), in ihrem Verlauf der gewünschten Kurve in Abb. 4 schon ziemlich nahe kommt. Das Experiment zeigt aber, daß die Kurve in der Nähe steiler, in der Entfernung flacher als die gewünschte Kurve ist. Man kann mit Hilfe entsprechend geformter Antennen (die Versuche darüber sind noch nicht abgeschlossen) die tatsächliche Kurve so ausgleichen, daß sie mit der gewünschten zusammenfällt. Wir wollen hier einen anderen Weg benutzen, der auch in der Patentschrift vom Erfinder angegeben worden ist: Wir ändern durch Bewegung der Hand nicht direkt die Frequenz des Generatorschwingungskreises, sondern die Frequenz eines an den Generatorkreis angekoppelten Sekundärkreises (vgl. Abb. 10). Auf die Theorie der dabei auftretenden Vorgänge soll hier nicht näher eingegangen werden. Es genügt uns, wenn wir das Ergebnis eines Versuches betrachten, der im folgenden näher beschrieben wird.

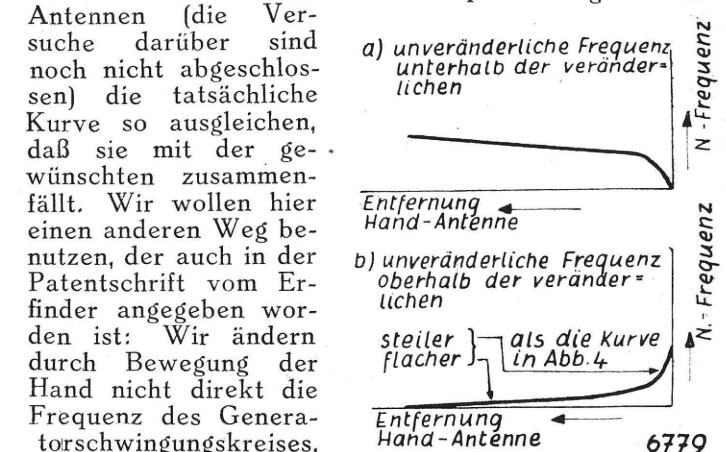


Abb. 9. Niederfrequenz in Abhängigkeit von der Handstellung.

Wir stimmen zunächst den Sekundärkreis auf die Frequenz des Röhrgenerators ab (die Meßmethoden

Wir stimmen zunächst den Sekundärkreis auf die Frequenz des Röhrgenerators ab (die Meßmethoden

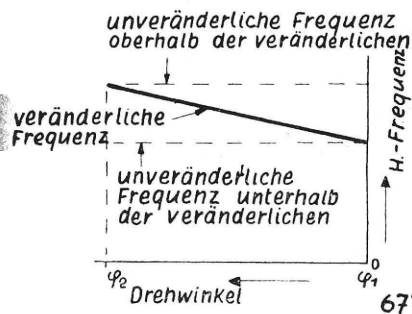
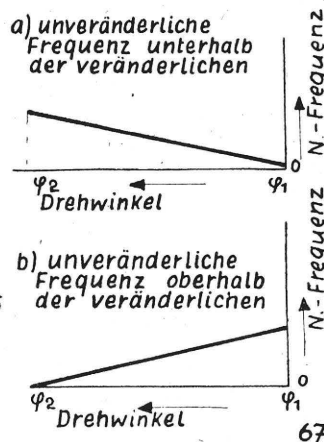


Abb. 5. Hochfrequenz in Abhängigkeit von der Kondensatorstellung.



Nebstehend: Abb. 6. Niederfrequenz in Abhängigkeit von der Kondensatorstellung.

„Antenne“ sich nach einer solchen Kurve ändert. Wir wollen uns zunächst vorstellen, daß die Frequenzänderung des einen Hochfrequenzgenerators nicht durch Bewegung der Hand, sondern durch Drehung an der Feineinstellung des Kondensators des Schwingungskreises vorgenommen wird. Wenn wir auf diese Weise nur den Bereich der hörbaren Töne überstreichen, so ist die Kapazitätsänderung trotz der hohen Frequenz noch so klein gegen die Gesamtkapazität, daß man ohne wesentlichen Fehler die Frequenzänderung proportional der Kapazitätsänderung annehmen darf. Diese wiederum ist in dem betrachteten kleinen Bereich dem Drehwinkel proportional.

Eine graphische Darstellung der Hochfrequenz in Abhängigkeit vom Drehwinkel würde also eine Kurve nach Art der in Abb. 5 bezeichneten ergeben. Die Niederfrequenz, die uns in erster Linie interessiert, ist, wie bereits gesagt, gleich der Differenz der beiden Hochfrequenzen, von denen die eine unverändert bleibt. Es ist also leicht, aus der Kurve in Abb. 5 eine andere Kurve zu konstruieren, die die Niederfrequenz in Abhängigkeit von der Kondensatorstellung zeigt. Wir erhalten zwei verschiedene Fälle, je nachdem die veränderliche Hochfrequenz oberhalb oder unterhalb der festen Hochfrequenz liegt (vgl. Abb. 6). Der Fall, daß die veränderliche Hochfrequenz symmetrisch zur festen Hochfrequenz liegt, interessiert uns hier nicht.

selbst sollen hier nicht erörtert werden). Wir entfernen dann den Generator und stellen die Abhängigkeit der Frequenz des Sekundärkreises von der Kondensatorstellung in der Umgebung des Resonanzpunktes durch Messung oder Rechnung fest. Darauf koppeln wir den Sekundärkreis wieder mit dem Generator, verstimmen den Sekundärkreis und messen die

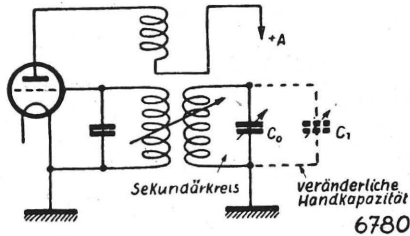


Abb. 10. Hochfrequenzgenerator mit angekoppeltem Sekundärkreis.

Frequenz des Generators. Ist die Kopplung sehr lose, so ist die Frequenz des Generators, wie man auch erwartet, unabhängig von der Verstimmung des Sekundärkreises. Sie bleibt also unverändert, wenn wir den Kondensator des Sekundärkreises aus der ursprünglichen Resonanzstellung verdrehen. Je fester man die Kopplung macht, einen desto größeren Einfluß hat die Einstellung des Sekundärkreises auf die Frequenz des Röhrgenerators. Die Ursache dafür liegt darin, daß infolge der Kopplung die Schaltelemente des Sekundärkreises als frequenzbestimmende Elemente des Generatorkreises wirken können. Mißt man die Änderung der Senderfrequenz in Abhängigkeit von der Verstimmung des Sekundärkreises, so erhält man die in Abb. 11 dargestellten Kurven, die „Ziehkurven“. Überschreitet die Kopplung eine „kritische Kopplung“, so tritt ein plötzliches Springen der Generatorfrequenz ein. Man erkennt aus der Abbildung, daß bei einer Kopplung dicht unterhalb der kritischen Kopplung die Änderung der Generatorfrequenz viel größer als die Änderung der Sekundärkreisfrequenz ist (vgl. Kurve 11 b). Das gilt aber nur für den Teil der Kurve, die durch den Resonanzpunkt geht. Links und rechts davon biegt die Kurve um, wird flach und dann in der umgekehrten Richtung wieder steiler. Ändern wir also die Stellung des Sekundärkondensators, so erhalten wir dicht am Resonanzpunkt eine starke Änderung, links und rechts davon eine schwächere, dann wieder eine stärkere Änderung der Generatorfrequenz. Mit Hilfe dieser Erscheinung

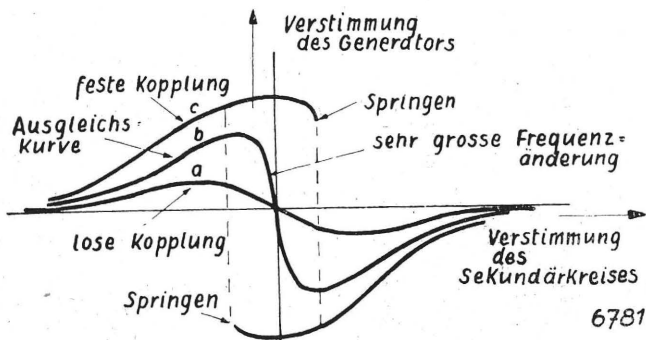


Abb. 11. Ziehkurven.

können wir die in Abb. 9 dargestellte Kurve ausgleichen. Das ist in Abb. 12 näher erläutert. Wir müssen den veränderlichen Generator so abstimmen, daß der zu steile Teil der Handabstimmungskurve mit einem flachen Teil der Ziehkurve, der zu flache Teil der Handabstimmungskurve mit einem steilen Teil der

Ziehkurve zur Deckung kommt. Wie das praktisch ausgeführt wird, wird in der Bauanleitung erklärt werden.

Wir haben mit Hilfe der Überlagerungsschaltung die gewünschte Empfindlichkeit des Apparates erreicht, mit Hilfe des fest gekoppelten Sekundärkreises die richtige räumliche Tonhöhenverteilung. Trotzdem hat ein auf Grund dieser Überlegungen gebautes Instrument noch einen großen Fehler, der auch in dem Aufsatz von Keßler erwähnt wird. Es ist in den meisten Fällen unmöglich, mit diesem Instrument sehr tiefe Töne zu spielen. Die Kurven in Abb. 6, die wir als Differenz aus den beiden Hochfrequenzkurven konstruiert haben, stellen den wirklichen Tatbestand nicht

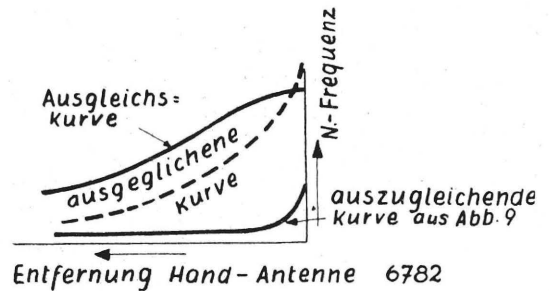


Abb. 12. Ausgleich der Handabstimmungskurve.

ganz richtig dar. Wir erhalten vielmehr für die Tonfrequenz in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Kondensators die Kurven in Abb. 13, d. h. die Tonhöhe nimmt von den höchsten hörbaren Tönen an stetig ab bis zu einem tiefen Ton, bei dem plötzlich jeder hörbare Ton verschwindet. Dreht man den Kondensator weiter, so ist, nachdem man einen stillen Bereich durchlaufen hat, wieder ein Ton zu hören, dessen Tonhöhe stetig bis zur Hörgrenze zunimmt.

Das Fehlen der tiefen Töne ist eine Folge der gegenseitigen Beeinflussung der beiden Generatoren. Zur

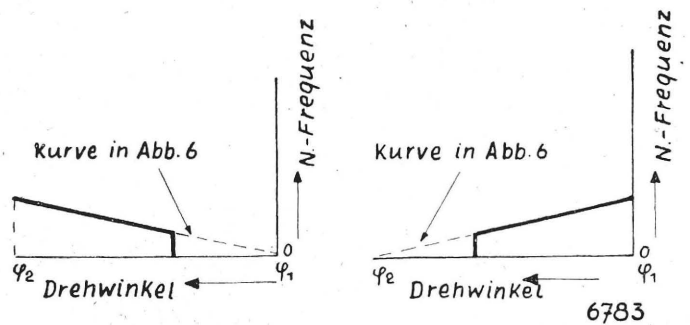


Abb. 13. Niederfrequenz in Abhängigkeit von der Kondensatorstellung bei gegenseitiger Beeinflussung der H.-F.-Generatoren.

Beseitigung bzw. zur Verkleinerung des stillen Bereichs ist eine Verminderung der gegenseitigen Beeinflussung notwendig. Die gegenseitige Beeinflussung findet sowohl durch leitende Verbindung der beiden Generatoren als auch durch induktive und kapazitive Kopplung, also frei durch die Luft, statt. Eine Verbindung der beiden Generatoren läßt sich nicht vollkommen vermeiden, da ja eine Mischung der beiden Hochfrequenzen zur Erzeugung der Niederfrequenz unbedingt notwendig ist. Es ist aber vorteilhafter, diese Mischung in einer besonderen Röhre vorzunehmen, als einen der beiden Generatoren gleichzeitig als Überlagerer zu verwenden. Außerdem muß man die Leitung, die die beiden Hochfrequenzen an das Gitter des Überlagerers bringt, sehr lose an die beiden Generatoren ankoppeln. Zur Vermeidung der induktiven und

kapazitiven Kopplung der beiden Generatoren werden beide, getrennt voneinander, abgeschirmt. Dadurch kann man erreichen, daß die Hochfrequenzen tatsächlich nur in der einen gemeinsamen Leitung gemischt werden.

Die Abschirmung ist nur dann wirksam, wenn auch die Anoden- und Heizbatterien in den Abschirmkästen aufgestellt sind. Sonst wird die unerwünschte Verbindung über die Batterieleitungen wieder hergestellt. Will man aus Sparsamkeitsgründen gemeinsame Batterien verwenden, so muß man den Austritt der Hochfrequenz aus den Abschirmkästen durch Drosseln, Widerstände und Ableitkondensatoren verhindern. In der Hochfrequenzmeßtechnik, in der der Überlagerungsgenerator viel gebraucht wird, ist eine möglichst vollkommene Vermeidung jeder gegenseitigen Beeinflussung notwendig. Zu diesem Zweck verhindert man jede Verbindung zwischen den beiden Generatoren, indem man sie als Steuergeneratoren für zwei fremderregte Generatoren verwendet. Die Ausgangsleitungen dieser beiden Generatoren führen zum Überlagerer. Da fremderregte Generatoren eigentlich nur Verstärker der ihrem Gitter vom Steuergenerator aufgedrückten Frequenz sind, kann eine gegenseitige Beeinflussung der fremderregten Generatoren in viel geringerem Maße auf die Steuergeneratoren zurückwirken. Es ist nun für musikalische Zwecke nicht unbedingt notwendig, den stillen Bereich vollkommen zu unterdrücken. Abgesehen davon, daß unser Ohr erst Schwingungen von einer Frequenz von mehr als 16 Hertz als Töne empfindet, können wir auch einen Teil der tiefsten hörbaren Töne entbehren; denn auch die heute gebräuchlichen Musikinstrumente umfassen nicht den ganzen Hörbereich. Daher können wir im allgemeinen auf einige der im Prinzip notwendigen Vorsichtsmaßnahmen verzichten. In den meisten Fällen wird die Verwendung fremderregter Generatoren nicht notwendig sein. Auch eine Abschirmung kann in manchen Fällen, wenn auf einen gedrängten Aufbau der Apparatur kein Wert gelegt wird, entbehrt werden. Die große Entfernung der beiden Generatoren ersetzt dann ihre Abschirmung. Dagegen ist eine sorgfältige Drosselung und Ableitung der Batterieleitungen bei Verwendung gemeinsamer Batterien kaum zu umgehen.

In diesem Zusammenhang sei auch noch eine andere Methode zur Beseitigung des stillen Bereichs erwähnt, die allerdings dafür andere Nachteile hat. Übersteuert man durch die Gitterspannung eines Generators den geradlinigen Teil der Röhrencharakteristik, sei es durch entsprechende Wahl der Gittervorspannung, sei es durch entsprechend große Gitterwechselspannungen, so erhält man im Ausgang des Generators eckige, nicht-sinusförmige Wechselspannungen. Solche eckigen Spannungen enthalten außer der Grundschwingung Oberschwingungen, d. h. Schwingungen der doppelten, dreifachen usw. Frequenz<sup>6)</sup>. Stellt man die Frequenz dieses Generators so ein, daß eine seiner Oberschwingungen eine Frequenz von der ungefähren Größe der Frequenz des anderen Generators hat, so wird bei der Überlagerung von der Grundschwingung des einen und der Oberschwingung des anderen Generators ein hörbarer Ton erzeugt. Eine gegenseitige Beeinflussung tritt nicht ein, da die Grundfrequenzen der beiden Generatoren weit voneinander entfernt sind. Am einfachsten kann man eckige Schwingungen durch festes Anziehen der Rückkopplung, d. h. durch Erhöhung der Gitterwechselspannung, erzeugen. Da aber die Oberschwingungen kleiner als die Grundschwingung sind,

erkauft man die Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung durch eine Verringerung der Lautstärke. Trotzdem ist es in manchen Fällen einfacher, diese Verringerung durch Vergrößerung des Niederfrequenzverstärkers auszugleichen, als bei Verwendung der Grundschwingungen die anderen Verfahren anzuwenden.

Es ist noch notwendig, auf eine Betriebsschwierigkeit des Gerätes näher einzugehen. In Gleichung 1 wurde gesagt, daß die Frequenz eines Generators von der Kapazität und der Induktivität seines Schwingungskreises abhängig ist. Diese Angabe ist nicht ganz vollständig. In einem geringen Maße ist die Frequenz auch von dem Ohmschen Widerstand des Schwingungskreises abhängig. So einen Ohmschen Widerstand stellt auch die Röhre selbst dar. Ihr Widerstand ändert sich stark bei Schwankungen der Batteriespannungen. Bei einem Niederfrequenzgenerator ist diese Abhängigkeit natürlich auch vorhanden, schadet aber nicht viel, da, wie gesagt, die Frequenz sich nur wenig mit dem Widerstand ändert. Wir haben aber gerade deswegen einen Überlagerungsgenerator benutzt, um mit Hilfe einer kleinen Frequenzänderung eine große Änderung der Tonfrequenz zu erzielen. Daher bewirkt bei einem Überlagerungsgenerator die Widerstandsschwankung eine viel größere Frequenzänderung. Zur Vermeidung dieser Änderungen ist die Verwendung sehr guter und frischer Batterien erforderlich. Ebenso ist es notwendig, die Apparatur sehr stabil aufzubauen, da die kleinsten Kontaktänderungen Widerstandsschwankungen und dadurch Änderungen der Tonhöhe bewirken.

Bei dem Ätherwelleninstrument von Theremin wird nicht nur die Tonhöhe, sondern auch die Lautstärke durch Bewegung der Hand in der Luft, und zwar der anderen Hand, bewirkt. Es ist notwendig, das Problem der Lautstärkenregelung durch Bewegung der Hand ganz getrennt zu untersuchen. Das soll in einem der folgenden Aufsätze geschehen. Trotzdem ist es vorteilhaft, für das in diesem Aufsatz besprochene Instrument eine Anordnung zur Lautstärkenregelung vorzusehen, weil aus musikalischen Gründen auf eine Regelung der Lautstärke nicht verzichtet werden kann. Man kann nun, wenn man die Anwendung des Ätherwellenprinzips bei der Lautstärke einstweilen zurückstellt, eine Regelung in einfachster Weise vornehmen, indem man parallel zum Eingang oder zum Ausgang des Niederfrequenzverstärkers einen veränderlichen Widerstand oder ein Potentiometer schaltet. Diesen Widerstand bedient man mit der einen Hand oder mit dem Fuß, während man mit der anderen Hand durch Bewegung in der Luft die Tonhöhe einstellt. Der Widerstand kann beliebig ausgebildet werden, z. B. als Drehwiderstand oder als Schiebewiderstand. Außerdem ist noch eine Vorrichtung zur plötzlichen Ein- und Ausschaltung des Tones erforderlich, damit ein nichtgleitender Übergang zwischen verschiedenen Tonhöhen möglich ist. Auch diesen Schalter kann man in Serie mit dem Lautsprecher oder parallel zu ihm, d. h. in den Ausgang des Verstärkers oder in seinen Eingang, legen.

Zur Klangfarbe des Gerätes ist zu sagen, daß es an sich keine charakteristische Klangfarbe des Ätherwelleninstrumentes geben muß, da Theremins Erfindung ein spieltechnisches Ziel hat. Das Instrument kann also mit Apparaten verbunden werden, die zur Erzeugung oder Nachahmung besonderer Klangfarben dienen. Tut man das nicht, so gibt das Instrument reine Sinustöne, die in der verwendeten Überlagerungsschaltung, solange keine Übersteuerung auftritt, entstehen.

<sup>6)</sup> Vgl. den Aufsatz im „Funk-Bastler“ 1931, Nr. 48, „Elektrische Musik“, von W. Saraga, Abschnitt 1.