Maschinensender.

Als man im Anfang der Entwicklung des Funkwesens dem damaligen Stande der Technik gemäß die langen Wellen bevorzugte, schien die brauchbarste Lösung zur Erzeugung der Sendeschwingungen die Hochfrequenzmaschine zu sein. Sie war sehr betriebssicher, frei von störender Modulation (bei langen Wellen!) und in der Leistung nahezu unbegrenzt. Die Maschinensender sind auch bis heute auf langen Wellen den Röhrensendern überlegen.

Die Hochfrequenzmaschinen sind im Grunde so gebaut wie Niederfrequenz -Synchronmaschinen, nur mit entsprechend vielen Polen. Die Frequenz ist bei beiden

gegeben durch die Gleichung $f = \frac{p \bullet n}{60}$, worin p die Polpaarzahl der Maschine und n die Umdrehungszahl in der Minute ist.

Man teilt die Hochfrequenzmaschinen in zwei Hauptgruppen ein, die Wechselpol- und die Gleichpoltypen.

Bei den Wechselpolmaschinen ist jeder Pol des Rotors bewickelt. Das Schema einer solchen Maschine zeigt Abb.191. Der Rotor trägt eine Reihe von Nord- und Südpolen s1 n1 s2 ..., denen die Statorwicklungen w_1 w_2 w_3 . . . gegenüber liegen. Zwei aufeinanderfolgende Statorwicklungen haben immer verschiedenen Wicklungssinn.

Die ersten Großstationen wurden mit diesen Wechselpolmaschinen ausgerüstet, auf denen Goldschmidts Maschinensenderschaltungen fußten. Da die Frequenz der Sender im allgemeinen höher lag, als die Maschinen hier liefern konnten, benutzte Goldschmidt die Wechselinduktion zwischen Rotor und Stator, um eine Frequenzsteigerung zu erzielen. Wird z. B.

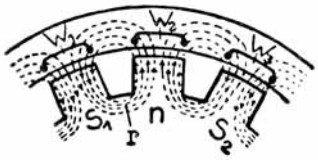

Abb. 191. Wechselpol-Hochfrequenzmaschine.

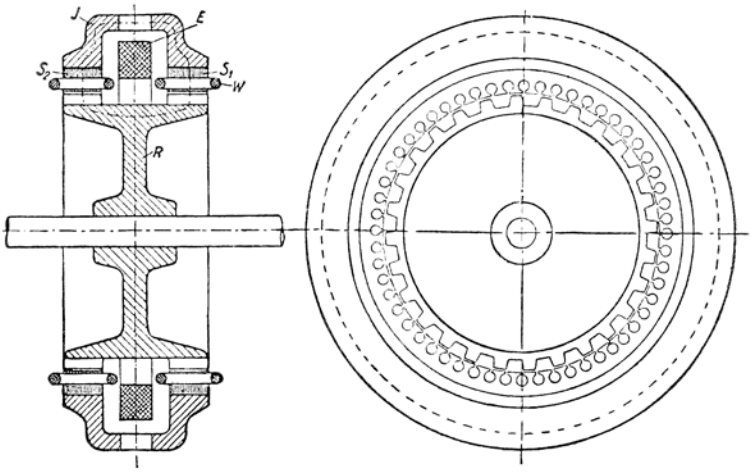

Abb. 192. Gleichpol-Hochfrequenzmaschine.

im Stator eine Frequenz f induziert, so ruft der entstehende Strom eine Frequenz $2 \bullet f$ in der Rotorwicklung hervor, der Strom dieser Frequenz im Stator die Frequenz $3 \bullet f$ usw. Es tritt immer eine neue Erhöhung um f ein. Die Wicklungen werden zur Erhöhung des Wirkungsgrades auf die betreffenden Frequenzen abgestimmt und die höchste Frequenz der Antenne zugeführt.

Den Wechselpolmaschinen gegenüber stehen die Gleichpolmaschinen. Bei ihnen ist der Rotor ganz unbewickelt. Er besitzt die Form eines Zahnrades mit zwei Zahnkränzen, dessen Zähne die Pole bilden (Abb. 192). Der Stator trägt zwei Wicklungen, eine in Nuten untergebrachte Arbeitswicklung W und eine konzentrisch zur Achse liegende Erregerwicklung E. Die Erregerwicklung bildet einen großen Kraftlinienfluß, der vom Stator in den einen Zahnkranz ein- und aus dem anderen Zahnkranz zum Stator wieder austritt. Beim Rotieren des Ankers entstehen in dem den Zähnen zugewandten Teil des Stators örtliche Flußschwankungen, welche eine Wechselspannung in der Wicklung W induzieren. Der Gesamtfluß der Maschine im Joch J und im Rotor R bleibt dabei konstant. Um die Verluste in dem Teil des Stators, der den Flußschwankungen ausgesetzt ist, nicht zu groß werden zu lassen, hat man dort den Stator aus Hochfrequenzblechen (S_1S_2) zusammengesetzt, in die die Arbeitswicklung eingebettet ist. Die Nord- und Südpole werden bei den Gleichpolmaschinen durch die Zähne und Nuten gebildet. Da zur Erzielung der Induktion im Eisen nicht wie bei den Wechselpolmaschinen jeder Zahn die notwendigen Amperewindungen erhalten muß, sondern die magnetisierende Kraft für

alle Pole gemeinsam von der Erregerwicklung geliefert wird, läßt sich alles viel kleiner bauen und eine höhere Periodenzahl in der Maschine erreichen. Die Statornuten sind bis auf einen kleinen Spalt geschlossen und gewöhnlich nur mit einem Leiter je Nut in Zickzackform, also in wechselndem Wicklungssinn, bewickelt. Einer Rotornut entsprechen immer zwei Statornuten.

Im Ausland wurden noch andere Hochfrequenzmaschinen entwickelt, die aber zumeist Abarten der oben beschriebenen Gleichpolform darstellen. So baute z. B. in Amerika Alexan-derson, um mit höheren Drehzahlen arbeiten zu können, ohne daß durch die Fliehkräfte die Gefahr des Streifens zwischen Rotor und Stator eintrat, die Maschinen mit radial gerichteten Zähnen. Er erreichte so Periodenzahlen von 100000 Hz in der Maschine, was einer Welle von 3000 m entspricht.

Latour verdreifachte bei gleicher Statornutenzahl die Zähnezahl des Rotors und erhielt damit die dreifache Frequenz. Theoretisch wäre auch eine Verfünffachung, Versiebenfachung usw. möglich, aber bereits bei Verdreifachung sinken Wirkungsgrad und Leistung so stark ab, daß die Grenze der Wirtschaftlichkeit erreicht ist.

Guy läßt in der von ihm entwickelten Maschine den Gesamtfluß schwanken, indem er Rotor und Stator mit offenen Nuten versieht. Er erhält dadurch einen besonders einfachen Aufbau, da bei ihm Arbeits- und Erregerwicklung je nur aus einer ruhenden großen Spule bestehen, während die Nuten unbewickelt sind. Die Nuten sind gruppenweise so versetzt, daß die hochfrequenten Flußschwankungen in der Erregerwicklung sich aufheben, während sie für die Arbeitswicklung sich addieren.

Die Gleichpolhochfrequenzmaschinen liefern, mit Ausnahme der einen von Alexanderson erbauten, eine Frequenz, die für drahtlosen Verkehr viel zu niedrig ist. Sie wurden erst brauchbar, als es gelang, die Frequenz durch ruhende Frequenzwandler außerhalb der Maschine zu vervielfachen. Das Mittel dazu bieten stark gesättigte Eisendrosseln, die in die Hochfrequenzkreise eingeschaltet werden und in denen durch die Verzerrung des Stromes oder der Spannung höhere Harmonische der Grundfrequenz entstehen. Zunächst beschränkte man sich auf Verdopplung und Verdreifachung der Grundfrequenz und benutzte dazu Schaltungen, bei denen die Energiezufuhr zu dem Kreise höherer Frequenz in jeder Halbperiode erfolgte.

Bei großen Vervielfachungen erweist sich ein anderes, heute allgemein angewandtes Verfahren als rationeller, das der Stoßerregung, bei welcher ein Schwingkreis ähnlich wie bei den Funkensendern, nach jedem Spannungsstoß mehrere Perioden ausschwingt, ehe eine neue Energiezufuhr stattfindet. Die äußere Ansicht eines Frequenzwandlers neuerer Bauart für Stoßerregung zeigt Abb. 193. Das dabei verwendete Eisen hat eine Dicke von einigen tausendstel Millimeter, und sein Preis übersteigt den des Goldes um ein Vielfaches. Das Prinzipschaltbild eines Maschinensenders mit Stoßerregung zeigt Abb. 194.

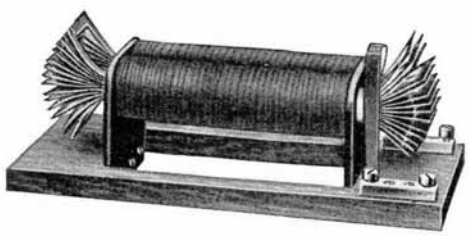

Abb. 193. Frequenzwandler (Lorenz).

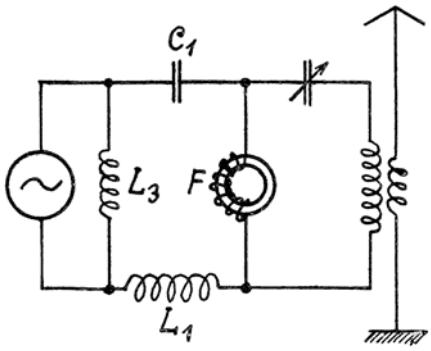

Abb.194
Schaltung eines Maschinensenders.

Die Maschine liefert die Grundfrequenz und ist mit dem Primärkreis $L_1F\ C_1L_3$ galvanisch-induktiv gekoppelt. Der Kopplungsgrad ist so gewählt, daß die Maschine nahezu mit reinem Wirkstrom belastet wird. Der Primärkreis wird auf Resonanz abgestimmt, so daß sein Strom praktisch sinusförmig ist. In diesem Falle tritt beim Nulldurchgang des Stromes an der Wicklung des Frequenzwandlers eine scharfe Spannungsspitze auf. Je ausgeprägter diese Spannungsspitze ist, um so größer ist die Amplitude der höheren Harmonischen der Grundfrequenz. Der Verlauf von Primärstrom I, magnetischem Fluß F und Spannung E am Frequenzwandler ist aus Abbildung 195 ersichtlich. Ist der Sekundärkreis auf Resonanz mit einer ungeraden Oberwelle der Grundfrequenz abgestimmt, so fließt in ihr ein starker Strom der betreffenden höheren Harmonischen. In einem einzigen Frequenzwandler läßt sich mit gutem Wirkungsgrad noch die 31. Harmonische erzeugen. Bei so hoher Vervielfachung ist es aber nicht möglich, die Nutzwelle völlig rein zu erhalten, immer treten eine Reihe anderer Harmonischer, besonders die 29. und 33., die 27. und 35., im Sekundärkreis mit auf.

Das Vorhandensein dieser dicht neben der Nutzwelle liegenden Störwellen ist eine Eigenart der Maschinensender und zwingt zu außerordentlichen Selektionsmaßnahmen. Daß es trotzdem gelungen ist, mit Maschinensendern Wellen bis herab zum Rundfunkbereich zu erzielen, ist ein Beweis für die große Entwicklungsarbeit an dieser Senderart, die hauptsächlich von der Firma C. Lorenz A.-G. geleistet wurde.

Das Schaltschema eines neuzeitlichen Rundfunkmaschinensenders ist in Abb. 196 wiedergegeben.

Die Grenze der Maschinen - Grundfrequenz liegt praktisch bei 8000, höchstens 10000 Hz, aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, sowie wegen der Drehzahlregelung und des sogenannten Trillerns, wovon später die Rede ist. Um in den Rundfunkwellenbereich (200 bis 600 m) zu kommen, muß die Maschinenfrequenz

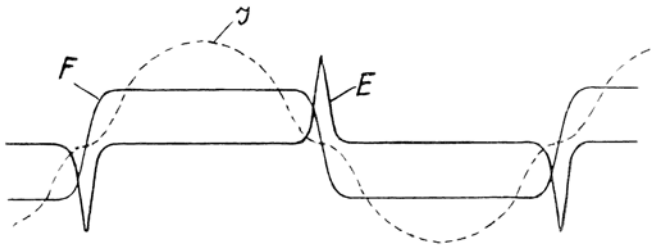

Abb. 195. Liniendiagramm eines Frequenzwandlers.

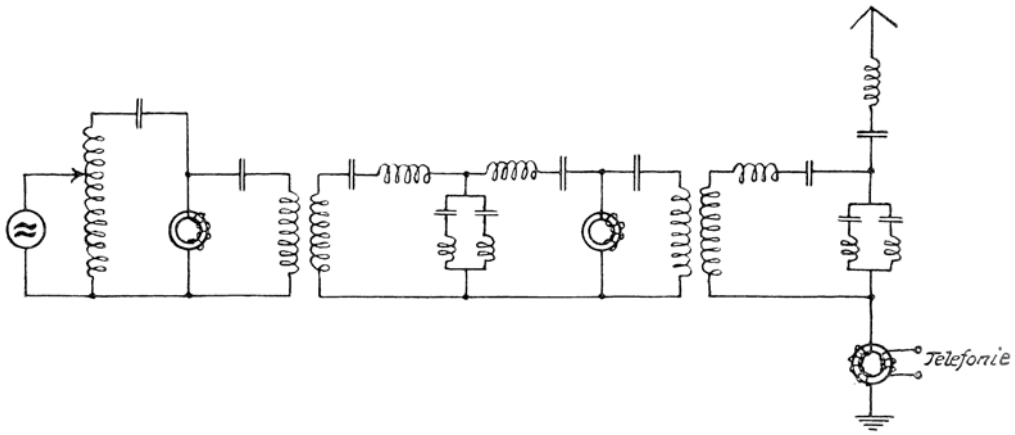

Abb. 196. Schaltbild eines Rundfunk-Maschinensenders.

etwa verhundertfacht werden. Dies ist mit einem einzigen Frequenzwandler nicht möglich. Man schaltet deren zwei hintereinander und wählt beispielsweise für die erste Stufe die Verneunfachung, für die zweite Stufe die Verelffachung, im ganzen also eine Erhöhung auf das 99 fache. Die genaue Sendewelle wird dann mit Hilfe der Drehzahl der Maschine eingestellt.

Wichtig ist, daß der der zweiten Wandlerstufe zugeführte Strom möglichst rein sinusförmig, vor allem ohne Nebenwellen (7te, 11te usw.) ist. Alle nicht gewünschten Frequenzen werden nämlich auch mit vervielfacht und bilden unter sich und mit der Nutzwelle Kombinationsfrequenzen, deren Beseitigung im Antennenkreis unmöglich ist.

Die Säuberung von Nebenwellen geschieht mit einer sehr sinnreichen Kombination von Sperr- und Schluckkreisen, wie es in Abb. 197 gesondert dargestellt ist. In dieser Anordnung müssen eine ganze Reihe von Resonanzbedingungen erfüllt sein. Der äußere Kreis $L_1C_1L_2L_3C_2F_2$ muß auf die erste Stoßwelle (Nutzwelle) abgestimmt sein, die dem zweiten Frequenzwandler F_2 zugeführt werden soll. C_3L_4 ist ein Kurzschlußkreis für die nächst tiefer-liegende Nebenwelle (7te), C_4L_5 für die nächst höherliegende. Der Gesamtkreis $C_3L_4C_4L5$ soll als Sperrkreis für die Stoßfrequenz wirken. Die Punkte P_1P_2 sollen ferner Punkte gleichen Potentials für die Nutzwelle sein, so daß diese ihren Weg vollständig über den Frequenzwandler F nimmt, während alle Störfrequenzen über den Sperrschluckkreis $C_3L_4C_3L_5$ abgeleitet werden. Zur Erhöhung dieser Wirkung werden hier extrem große Kapazitäten, mehrere Mikrofarad, und entsprechend kleine Selbstinduktionen bei möglichst geringer Dämpfung benutzt. Die verwendeten

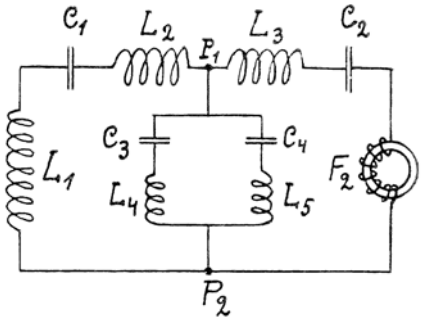

Abb. 197. Säuberung von Nebenwellen.

Spulen L_4 und L_5 bestehen aus lauterparallel geschalteten Drähten großen Querschnitts, bilden also je nur eine einzige Windung. Die Abstimmung erfolgt mit einem Handrad durch Zusammenschieben der Spule.

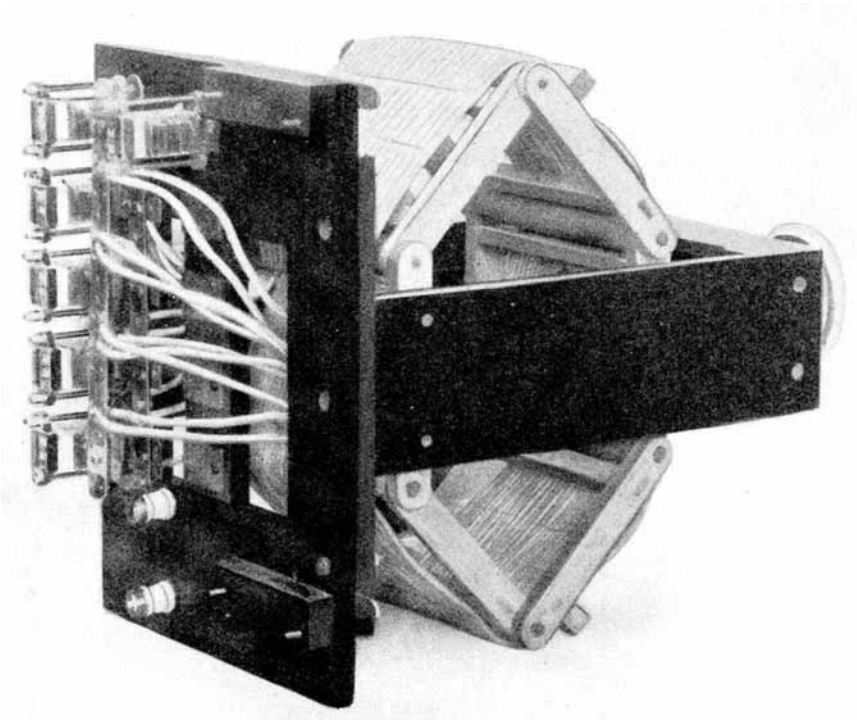

Abb. 198. Rückansicht eines Saugkreises (Lorenz).

Die Wirkung der Sperr- und Schluckkreise, die zweimal — vor der zweiten Vervielfachung und im Antennenkreis — angewendet werden, ist außerordentlich. Es gelingt, die Nebenwellen, die ohne die Schutzeinrichtung fast genau so groß sind wie die Nutzwelle, bis auf $^1/_{1000}$ der Nutzwellenamplitude herabzudrücken.

Eine zweite wichtige Frage ist beim Maschinensender die Erzielung genügender Frequenzkonstanz. Die Frequenz ist durch die Drehzahl der Maschine gegeben. Die Aufgabe besteht also in einer automatischen Drehzahlregelung. Sie wird bei den Rundfunksendern in einfacher und sehr empfindlicher Weise durch eine mit dem Anker rotierende Kontaktfeder bewirkt (Abb. 199; es sind dort zwei, eine Haupt- und eine Reservefeder zu sehen), die bei Überschreiten der gewünschten Drehzahl einen im Feldkreis des Antriebsmotors liegenden Widerstand kurzschließt, bei Unterschreiten der Drehzahl ihn wieder öffnet. Unter dem Einfluß der Schwerkraft auf das Kontaktgewicht geschieht das Öffnen und Schließen tirillartig bei jeder Umdrehung einmal. Bereits eine beginnende Drehzahländerung verändert das Verhältnis von Öffnungs- und Schließungsdauer der Kontakte und ruft sofort, ehe noch die Drehzahländerung sich voll auswirken kann, die Gegenwirkung durch Vergrößern oder Verkleinern des Feldstromes hervor. Bei neueren Sendern ist man noch einen Schritt weiter gegangen durch Anordnen einer Feinregulierung (nämlich der tirillartigen) und einer Grobregulierung (eines zusätzlichen Schiebewiderstandes im Erregerstromkreis). Letztere wird von jener so gesteuert, daß der Arbeitspunkt der Kontaktfedern, der ja zwischen völligem Anliegen der Feder (bei geringer Belastung) und völligem Öffnen (starke Belastung) variieren kann, automatisch immer wieder in die Mitte des Regulierbereichs verschoben wird. Die Regelung wird durch die natürliche Massenträgheit der rotierenden Maschine günstig beeinflußt. Die erzielte Drehzahlkonstanz beträgt rund 1/10 bis 1/100 $^0/_{00}$, bei einer

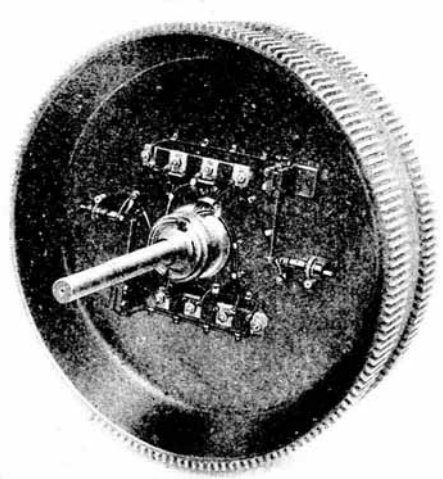

Abb. 199. Läufer einer Hochfrequenzmaschine mit Drehzahlregler (Lorenz).

300-m-Welle würde dies eine Schwankung von 100 bis 10 Hz ausmachen. Da die Änderungen im langsamen Rhythmus erfolgen, so sind sie praktisch nicht zu bemerken. Immerhin würde für noch kürzere Wellen die Konstanz nicht mehr ausreichen.

Die dritte Schwierigkeit bei Maschinensendern ist das Auftreten sogenannter Triller- bzw. Brummtöne, eine Erscheinung, die lange Zeit nicht geklärt und noch weniger behoben werden konnte. Sie äußert sich im Empfänger als störende Modulation, auch wenn der Sender nicht besprochen wird. Man neigt heute der Ansicht zu, daß es sich um gleichzeitige Frequenz- und Amplitudenschwankungen der Grundwelle handelt, und daß ihre Ursache in Vibrationen des Maschinengehäuses und in der ungenauen Teilung der Maschinenwicklung liegt. Sie werden durch die Frequenzvervielfachung sehr verstärkt. Das einzige Mittel zu ihrer Beseitigung ist vollkommen ruhiger Lauf der Maschine und eine sehr genaue Teilung der Hochfrequenzwicklung und der Ankerzähne. Trotzdem gelingt dies nicht immer in genügendem Maße. Gewöhnlich werden für Sender mit hoher Vervielfachung aus einer Serie von Maschinen die besten ausgewählt.

Nebenwellen, Drehzahlregelung und Trillerton ziehen dem Maschinensender eine Grenze etwa bei 350 bis 400 m Wellenlänge. Oberhalb dieser Grenze aber ist er in letzter Zeit mit dem Röhrensender in erfolgreiche Konkurrenz getreten. Der Münchener Sender (λ=534 m) und ein in Witzleben in Bau befindlicher Sender (λ=418m) sind Rundfunkmaschinensender.

Aus ‚Die Rundfunktechnik', herausgegeben von Dipl.-Ing. W.Lehmann (ca. 1930)
Digitalisiert von Georg Richter für http://www.radiomuseum.org