

## AM Gleichwellen-Netz

Der Gedanke dabei ist zunächst schlüssig. Anstatt daß ein Funk-Kanal von mehreren Sendern mit unterschiedlichen Programmen belegt wird, die sich dann gegenseitig stören, soll ein Netzwerk von Sendern mit dem gleichen Programm gebildet werden um ein Land zu versorgen. Auch könnte man dann statt eines einzelnen sehr starken Senders mehrere kleinere Sender mit geringer Leistung einsetzen, was eine Ersparnis bei der Sendeleistung ergibt.

### 1 Einleitung

#### 1.1 Bedarf für Gleichwellen-Rundfunk

Das Mittelwellen-Band (heute 531KHz — 1602KHz, jeweils  $\pm 4,5$ KHz) hat eine Breite von nur 1080 KHz. Betrachtet man hier z.B. Europa mit seinen vielen Staaten und Ländern, von denen jeder möglichst viele Rundfunk-Kanäle für sich haben möchte, wird erkennbar, weshalb man sich schließlich auf eine Kanalbandbreite von 9 KHz geeinigt hat, die einer Audio-Bandbreite von 4,5 KHz<sup>\*1</sup> entspricht. Dadurch erhielt das MW-Band 120 Kanäle. In der Praxis sind alle Kanäle mehrfach belegt, woraus entsprechende gegenseitige Störungen resultieren. Die wenigen, damals nur einfach belegten Kanäle, wurden als „Exklusiv-Wellen“ bezeichnet.<sup>\*2</sup>

Da nicht jedes Land genügend „Exklusiv-Wellen“ im MW-Bereich zugewiesen<sup>\*3</sup> bekommen konnte, wurde zunächst versucht, mit „Gemeinschafts-Wellen“ und später durch Gleichwellen-Rundfunk das Problem zu lösen.

Gleichwellen-Netze für die Rundfunkversorgung (auf der Mittelwelle) wurde daher schon Ende der '20er Jahre errichtet bzw. getestet. Konkreter Anlaß waren die nun aufgetretenen gegenseitigen Störungen infolge der notwendigen Erhöhungen der Sendeleistungen einerseits und die Knappheit der zur Verfügung stehenden Wellen bzw. Frequenz-Kanäle andererseits.

Beim Gleichwellen-Funk arbeiten örtlich entfernte Sender auf der gleichen Frequenz und strahlen auch das gleiche Programm ab. Die Gleichwellen-Sender sollen sich also gegenseitig unterstützen. Hierfür ist es zwingend notwendig, daß die beteiligten Sender synchronisiert sind. Das bedeutet gleiche Frequenz und gleiche Phase der Trägerschwingung, aber auch gleiche Phase und gleiches Delay des Modulationssignals.

Die Schwierigkeiten, die sich dabei auf der Empfangsseite zeigten, resultieren aus den Eigenschaften des Funk-Kanals, da man mit der Amplituden-Modulation (AM) nicht in der Lage ist, die Probleme zu beheben, die durch die Funk-Ausbreitung entstehen.

Eine Analyse des früheren AM Gleichwellen-Rundfunks zeigt somit auch wesentliche Eigenschaften des Funk-Kanals, die aufgrund der Wellenausbreitung existieren und damit auch für die heute hierfür verwendeten digitalen Modulationen bestehen. Bei digitalen Modulationen gibt es jedoch Strategien, wie einige der damit verbundenen Störungen unwirksam gemacht werden können.

### 2 Gemeinschafts-Sender

Ein früher Versuch, einen Funk-Kanal mehrfach zu nutzen, sind die „Gemeinschafts-Sender“, wobei jeder davon sein eigenes Programm ausstrahlt. Idealerweise sind diese örtlich so weit von einander entfernt und haben eine so geringe Sendeleistung ( $< 500$ W), daß sie sich gegenseitig nicht (oder kaum) stören können. Die Koordination oblag dem „Weltfunkverein“, wodurch auch die Interessen all derjenigen Länder berücksichtigt werden sollten, die ihr Rundfunksystem noch nicht voll entwickelt hatten.<sup>†1</sup>

<sup>\*1</sup>Eine Audio-Bandbreite von 4,5 KHz ist bessere „Telefon-Qualität“. Gewünscht wurde mindestens 7,5 KHz. Im UKW-Rundfunk beträgt die Audio-Bandbreite 15 KHz.

<sup>\*2</sup>Mit Exklusiv-Wellen bzw. Exklusiv-Frequenzen werden diejenigen Kanäle bezeichnet, in denen im Empfangsgebiet auch bei schlechten Bedingungen (Nachtausbreitung) keine unzulässigen Störungen durch andere Sender auftreten. In sehr großer Entfernung (mehrere tausend Kilometer) gibt es demzufolge weitere Sender in diesem Kanal, aber dadurch kommt es zu keinen Störungen im Empfangsgebiet.

<sup>\*3</sup>Die Frequenzzuweisung erfolgt durch die ITU *International Telecommunications Union* mit Sitz in Genf.

<sup>†1</sup>Im Prinzip entspricht diese Leistungsbeschränkung etwa der Situation zu Beginn des Rundfunks, als die (relativ wenigen) Sender mit Strahlungsleistungen von 250W bis 750W arbeiteten und infolgedessen noch kaum Überreichweiten infolge ionosphärischer Reflexionen auftraten. Im weiteren Verlauf wurden jedoch sehr viele Sender errichtet und zusätzlich deren Leistungen erhöht, wodurch gegenseitige Störungen unvermeidlich waren, so daß Abhilfe geschaffen werden mußte.

## 2.1 Störungen durch Gemeinschafts-Sender

Die Störungen durch andere Sender mit anderen Programmen, die im gleichen Kanal arbeiten (Gemeinschafts-Sender), oder die aufgrund des damaligen Standes der Technik (selbsterregte ein- oder mehrstufige Sender mit geringer Konstanz der Frequenz) in der Praxis einen Frequenzversatz dazu haben, wurde bereits in den '30er Jahren vom Reichs-Post-Zentralamt (RPZ) untersucht, Bild 2.1 [1].

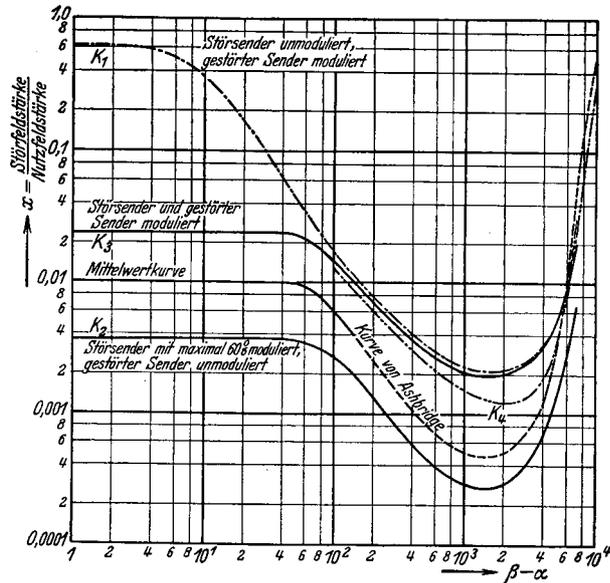


Bild 2.1: Maximal zulässiges Feldstärke-Verhältnis für kaum noch wahrnehmbare Störung für AM-Empfang in Abhängigkeit vom Frequenzabstand  $\beta - \alpha$  [Hz] des Störers; Nutz-Sender 60% moduliert.

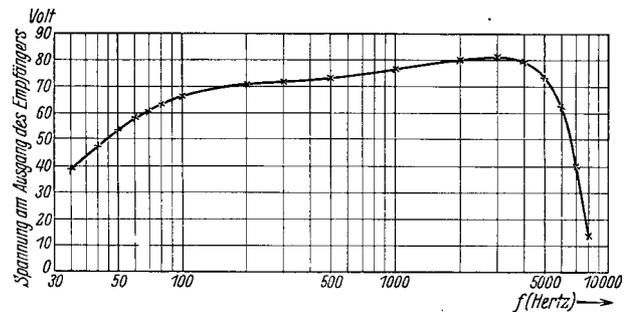


Bild 2.2: Durchlasskurve des vom Reichs-Post-Zentralamt (RPZ) benutzten Meßempfängers

Bei den Störungen durch fremde AM-Sender ist danach ein Frequenzversatz der Träger um bis zu ca. 400 Hz weniger kritisch als ein größerer Versatz von 1 KHz bis ca. 5 KHz, wo sich der Störträger durch Interferenz-Pfeifen bemerkbar macht. Um hierfür die Störungen erträglich zu halten, müssen die Gemeinschafts-Sender bei 100 KW Sendeleistung jedoch bis zu 1000 km von einander entfernt sein.[1] Diese Ergebnisse sind auch im Lichte der damaligen Empfängertechnik zu bewerten. Insbesondere der steile Anstieg der Kurven über 5 KHz resultiert aus den Übertragungseigenschaften des beim RPZ verwendeten AM Empfängers, Bild 2.2 [2].

Fällt in einem Gleichwellen-Netz ein Sender aus dem Synchronismus, entstehen dabei entsprechende Störungen wie bei den Gemeinschafts-Sendern. Da sich die Versorgungsgebiete der Gleichwellen-Sender gegenseitig überlappen, sind in einem solchen Fall die sich ergebenden Störungen größer als die bei Gemeinschafts-Sendern.

## 2.2 Die weitere Entwicklung

In späteren Jahren hat sich die Situation auf der Mittelwelle für den Hörer drastisch verschlechtert. Es fand ein allgemeines „Hochrüsten“ mit Sendern mit Strahlungsleistungen vereinzelt bis zu 2 MW statt. Nach dem Fall des Eisernen Vorhangs hat sich die Situation regional etwas gebessert, weil in einigen Ländern einige Sender ihre Leistung reduziert haben oder ganz abgeschaltet wurden.

Exklusiv-Wellen gibt es praktisch keine mehr. Alle Frequenzen sind mehrfach belegt. Mit Einbruch der Dämmerung, wenn die Fernausbreitung einsetzt, ist kaum noch ein Sender auf MW ungestört empfangbar.

### 3 Entwicklung der Sender-Technik bei der C. Lorenz A.G.

Die C. Lorenz A.G. befaßte sich ab 1905/06 auf Wunsch insbesondere des Reichs-Post-Ministeriums (RPM) mit der Funktechnik (zunächst drahtlose Telegraphie), da dort ein Konkurrent zu Telefunken gewünscht wurde. Infolge dessen setzte Lorenz andere Schwerpunkte als Telefunken und beschäftigte sich dann auch früher mit der Problemstellung der Gleichwellen-Netze, weshalb diese zunächst auch nur von Lorenz entwickelt wurden.

#### 3.1 Der Lichtbogen-Sender nach Poulsen

Die 1906 gegründete Abteilung für drahtlose Telegraphie entwickelte als erstes einen Poulsen-Sender<sup>‡1</sup> für das deutsche Militär.

Die Prinzipschaltung eines Poulsen-Senders ist in Bild 3.1 dargestellt.[7]

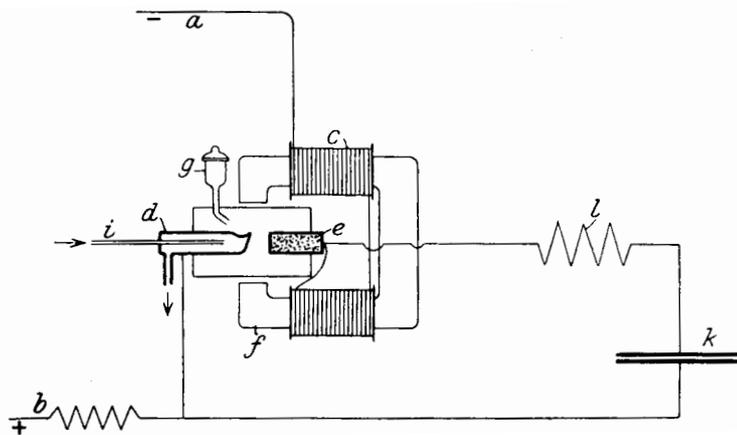


Bild 3.1: Prinzipschaltung eines Lichtbogen-Senders nach Poulsen. Der Gleich-Strom fließt von der Plus-Klemme  $b$  über einen Widerstand (nicht dargestellt) und eine Drossel zu einer Wasser gekühlten Cu-Elektrode  $d$  als Anode. Dann über einen Lichtbogen zu einer C-Elektrode  $e$  als Kathode. Von da über die Spulen  $c$  eines Elektromagneten  $f$  (Blas-Magnet) zur Minus-Klemme  $a$ . Der Lichtbogen brennt innerhalb eines luftdichten Gefäßes, in welches Spiritus aus einem Vorratsgefäß  $g$  tropft und so die  $H_2$  Atmosphäre erzeugt. Der Lichtbogen hat einen negativen differentiellen Widerstand, wodurch ein Serien-Kreis, bestehend aus Induktivität  $l$  und Kondensator  $k$  zu Eigenschwingungen angeregt wird. Auskopplung (nicht dargestellt) der HF-Schwingung induktiv aus der Schwingkreis-Spule  $l$  direkt in die Antenne.

Der Poulsen-Sender war zwar aufgrund seiner kontinuierlichen HF-Schwingungen im Prinzip zur Übertragung von Audio-Signalen geeignet, jedoch wegen der Eigenschaften des Lichtbogens schwierig zu modulieren oder gar zu tasten.

- Zur analogen Modulation verwendete man daher zunächst ein „Starkstrom-Kohle-Mikrofon“ in der Antennen-Leitung, wodurch die Telephonie-Leistung sehr beschränkt war. Dieses Mikrofon bestand aus mehreren parallel geschalteten Kohle-Mikrofonen mit gemeinsamem Schall-Trichter.[4]<sup>‡2</sup>
- Ab 1920 gab es dann praktische Versuche mit der 1913 von Pungs entwickelten „Modulations-Drossel“, [4] einer speziellen Art des magnetischen Verstärkers.[8] Die Pungs-Drossel wurde in Serie zum Fußpunkt einer Antenne geschaltet. Damit konnte sie nicht nur für Lichtbogen-Sender, sondern auch

<sup>‡1</sup>Der Poulsen-Sender ist ein Lichtbogen-Sender (Elektroden aus Kohle & Kupfer) für kontinuierliche HF-Schwingungen. Der Lichtbogen, der elektrisch einen negativen Widerstand darstellt und demzufolge zusammen mit einem (seriellen) Schwingkreis einen Oszillator bildet, brannte in einer Wasserstoff-Atmosphäre und wurde durch ein Magnetfeld stabilisiert.[6] Telefunken, aber auch Marconi hatten zu dieser Zeit nur „Funken-Sender“ (Löschfunken-Sender) für abklingende HF-Schwingungen. Mit diesen konnte man zwar morsen, jedoch keine Audio-Signale übertragen.

<sup>‡2</sup>Die Parallel-Schaltung von Kohle-Mikrofonen erfordert eine Ausgleichsbeschaltung, weil der Widerstand von Kohle mit steigendem Strom sinkt und deshalb der gesamte Strom nur über ein einziges Mikrofon fließen würde, wodurch dieses sofort verbrennen würde. Danach würde das nächste überlastet usw.

für Maschinen-Sender und selbst für frühe Röhren-Sender verwendet werden.<sup>†3</sup>

Als Beispiel für eine Anwendung eines Poulsen-Senders mit Pungs-Modulationsdrossel zeigt Bild 3.2 das Schaltbild der drahtlosen Telefonverbindung (auf Langwelle), die 1921 zwischen Kopenhagen und Bornholm eingerichtet wurde.<sup>†4</sup>[4] Die hierbei im NF-Bereich erforderlichen Vor-, Zwischen- und sonstigen Verstärker waren natürlich mit Röhren bestückt. Die Erzeugung der HF-Leistung erfolgte dagegen hier mit einem Lichtbogen-Sender (in Lyngby und Hammeren).

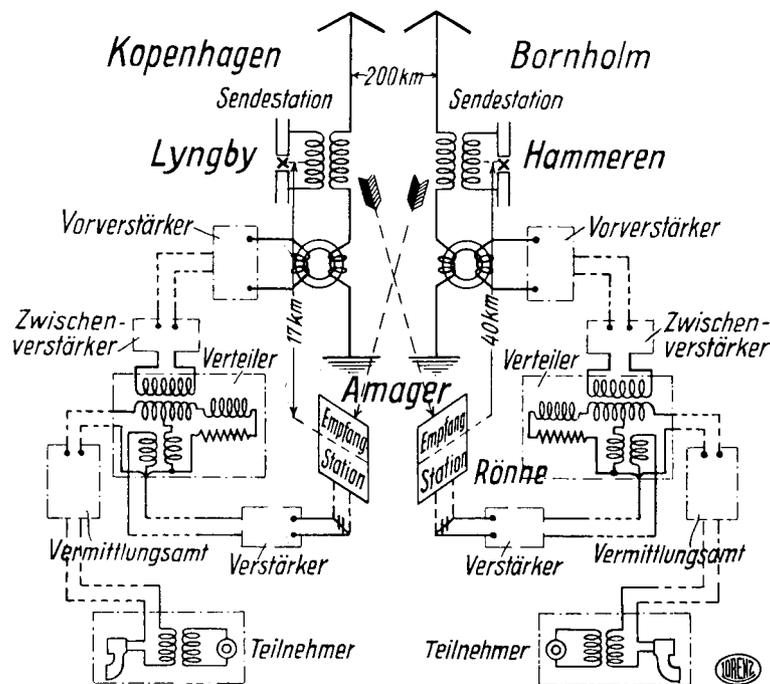


Bild 3.2: Prinzipschaltung der drahtlosen Gegensprechverbindung Kopenhagen — Bornholm. Poulsen Lichtbogen-Sender; Modulation mit Pungs-Drossel.

## 3.2 Die Maschinen-Sender

Ab 1908 entwickelt bei C. Lorenz A.G. Prof. R. Goldschmidt die nach ihm benannte Hochfrequenzmaschine. Aufgrund der realisierbaren Tourenzahlen kann eine solche Maschine höchstens Frequenzen von ca. 15 kHz erzeugen. Um auf Frequenzen zu kommen, die (zunächst) für Telegraphie und (später) für Rundfunk erforderlich sind, muß eine Frequenz-Vervielfachung erfolgen. Bei der Goldschmidt-Maschine wurde diese Vervielfachung innerhalb des Generators durch Reonanzbeschaltung von Rotor- und Stator-Wicklung erreicht. Ein besonderes Problem, war die Stabilisierung der Drehzahl, weil diese sich unmittelbar auf die erzeugte Frequenz auswirkt. Kurzzeitschwankungen der Drehzahl wirkten sich dabei als „Triller-Ton“ aus.

Später wurde die Frequenzvervielfachung außerhalb der Maschine mit Hilfe von Resonanz-Transformatoren ausgeführt. Hierbei wurde das Eisen bis in die Sättigung magnetisiert, so daß starke Verzerrungen der angelegten Sinus-Spannung entstehen, worin starke Oberschwingungen enthalten sind, die sich dann aussieben lassen.

### 3.2.1 Frequenz-Vervielfachung mit Eisen-Wandlern

Entsprechende Eisen-Frequenzvervielfacher kamen anfänglich auch beim Gleichwellen-Netz zur Anwendung, Bild 3.3.[5] Hierbei wurde die Spannung mit der niederen Frequenz über eine Telefon-Leitung dem

<sup>†3</sup>Die ersten Versuche mit einem Funk-Konzert aus Königs-Wusterhausen 1920 wurden von einem 4KW Poulsen Langwellen-Lichtbogen-Sender durchgeführt, der über eine Pungs-Drossel moduliert wurde. Ein Maschinen-Sender mit Pungs-Drossel war z.B. der Rundfunk-Sender, der 1925 in Berlin Magdeburger Platz getestet wurde.[11]

<sup>†4</sup>Anwendungen in dieser Art machen deutlich, weshalb die Postverwaltungen zu Beginn des „Unterhaltungs-Rundfunks“ ausschließlich Empfänger mit nur einem nicht veränderbaren Empfangsbereich zugelassen haben.

Gleichwellen-Sender angeliefert. Dies diente der Synchronisation der Gleichwellen-Sender. Die Frequenz mußte dann vor Ort auf die Sendefrequenz erhöht werden. Als Sender kamen jedoch hier ausschließlich Röhren-Sender zum Einsatz.

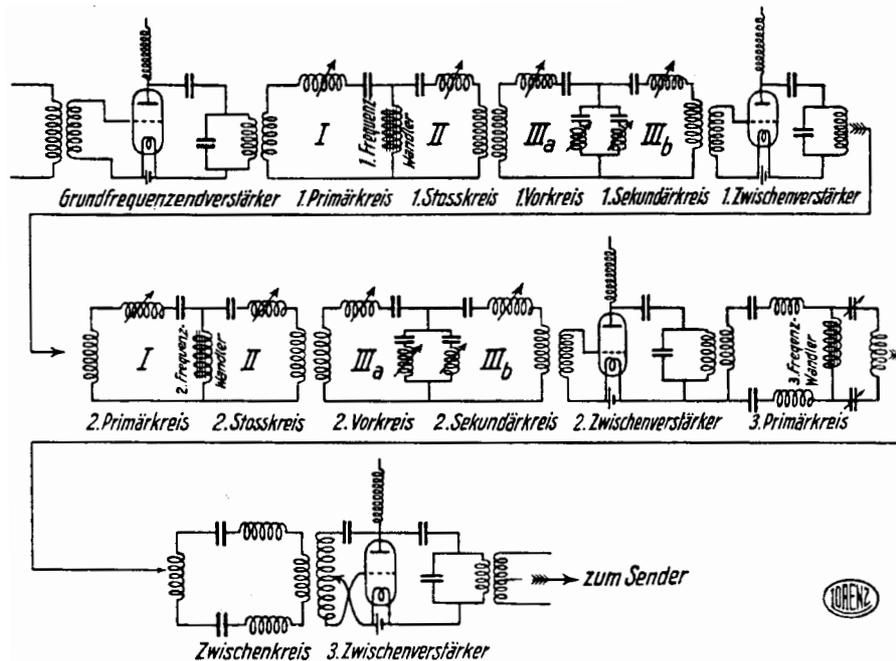


Bild 3.3: Schaltung einer Frequenzvervielfachung mit Eisenwandlern, wie sie beim Gleichwellen-Netz angewendet wurde. In den „Stoßkreisen“ erfolgte eine nichtlineare Verzerrung der Schwingung. In den darauf folgenden Filterschaltungen wird die vielfache Frequenz ausgesiebt. Die Zwischenverstärker (mit Röhre) erhöhen die Leistung, damit im folgenden Stoßkreis das Eisen wieder in die Sättigung getrieben werden kann.

### 3.3 Röhren-Sender

Lorenz hat 1918 einen ersten Röhren-Sender für die Marine entwickelt. Nach dem 1. Weltkrieg kam der jedoch nicht zum Einsatz, da die wesentlichen Kunden von Lorenz (Heer und Marine) verloren gingen.[4] Erst 1923 erhielt Lorenz dann einen Auftrag von der Deutschen Reichspost zum Bau eines Röhrensenders für den Rundfunk. Die ersten von Lorenz 1924 gelieferten Röhrensender waren Leipzig 1, Nürnberg 1 und Münster1 mit jeweils 300W Telephonieleistung. Eine Zusammenstellung der von Lorenz bis 1930 gelieferten Rundfunk-Sender ist in der Tabelle zu sehen.[4]

ZUSAMMENSTELLUNG DER GELIEFERTEN RUNDFUNKSENDER

Jahr	Sender	Telephonie-Leistung in kW	Jahr	Sender	Telephonie-Leistung in kW	
1924	Leipzig I	0,3	1928	Kaiserslautern	0,3/1,7	
	Nürnberg I	0,3		Münster III	0,6	
	Münster I	0,3		Aachen	0,3	
1925	Münster II	0,6	1929	Flensburg	0,6	
	Dortmund	0,3		Berlin-O } Gleich-	Stettin II } wellen-	Magdeburg } betrieb
	Elberfeld	0,3				
1926	München II	1,7	1930			
	Berlin-Witzleben II	1,7		Berlin-Witzleben III	1,7	
	Nürnberg II	1,7		Heilsberg (Ostpr.)	75	
1927	München III	1,7	Gleichwellenbetrieb der Sender Köln, Münster, Aachen			
	Nürnberg III	2,3				

Der erste Rundfunksender für Leipzig (01.03.1924) war zweistufig. Er hatte eine Oszillator-Röhre, die gemäß der Beschreibung [5] über die Anoden-Gitter-Kapazität und eine variable Gitterspule erregt wurde.<sup>‡5</sup> Die Modulation dieses Senders erfolgte „durch eine im Antennenkreis liegende Eisendrossel nach L. Pungs und F. Gerth, ein Modulationsverfahren, das bei der C. Lorenz A.G. schon früher entwickelt war.“ [5]<sup>‡6</sup>

Die Sender München und Berlin-Witzleben waren dagegen Maschinen-Sender (mit Modulation durch Pungs-Drossel) und „arbeiten seit vielen Monaten zur vollen Zufriedenheit der Rundfunkteilnehmer.“ [5]

In den Jahren 1926 — 1928 wurde die erste Generation der Sender durch solche mit ca. 6-facher Leistung (1,7 KW) ersetzt. Lorenz lieferte nach München, Nürnberg, Kaiserslautern, Berlin und Leipzig. Die Sender sind teils 2-stufig, teils 3-stufig. Zur Erzeugung der HF-Leistung mußten deshalb 6 bzw. 8 „Schwingungs-Röhren“ parallel geschaltet werden. Die Modulation dieser Sender geschieht immer noch mit Hilfe einer Eisendrossel, allerdings liegt diese jetzt im Gitterkreis der letzten Stufe.<sup>‡7</sup> [5]

Ein Bild des Rundfunk-Senders Nürnberg zeigt Bild 3.4. [5]

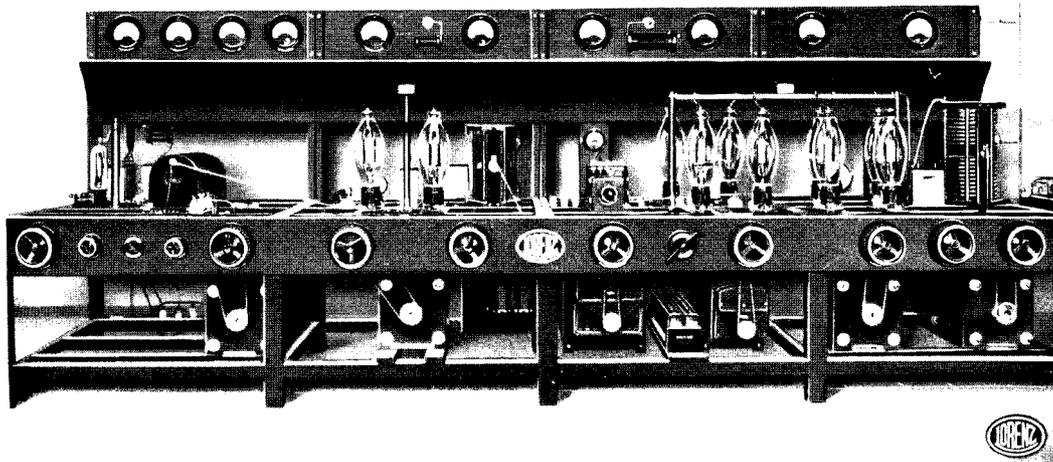


Bild 3.4: Ansicht des Rundfunk-Senders Nürnberg

Die Modulation der späteren Sender wurde als Heising-Modulation ausgeführt, bei welcher die Endstufe in der Anode moduliert wird. Ein Schaltbild eines Senders mit Heising-Modulation der ersten Generation (1923/24) zeigt Bild 3.5. [10]

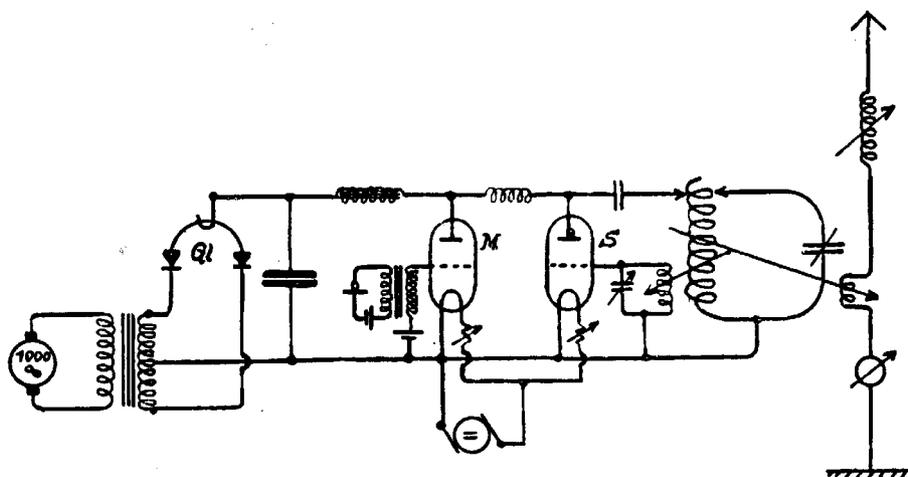


Bild 3.5: Schaltung eines einstufigen Senders mit Heising-Modulation. *M* ist die Modulations-Röhre und *S* ist die selbstschwingende Sende-Röhre.

<sup>‡5</sup>Zusammen mit dem nachfolgenden Schwingkreis handelt es sich somit offensichtlich um einen Oszillator in Huth-Kühn Schaltung.

<sup>‡6</sup>Im Unterschied zu Telefunken, wo die Modulation als Gitter-Modulation mit einer Absorbions-Röhre erfolgte.

<sup>‡7</sup>Es handelt sich somit um „Gitter-Modulation“. Die Beibehaltung der Eisendrossel (statt einer Röhre) dürfte patentrechtliche Gründe gehabt haben.

## 4 MW-Gleichwellen-Netze

Bei einem Gleichwellen-Netz werden zwei oder mehrere, örtlich getrennte, Sender auf der gleichen Frequenz betrieben und erhalten ein identisches Modulations-Signal. Ziel ist es hierbei, ein größeres Gebiet mit Hilfe von mehreren Sendern kleinerer Leistung zu versorgen, ohne daß dabei unzulässig hohe Störungen entstehen. Gleichzeitig erlaubt dieses Konzept, mit weniger verschiedenen Frequenzen zur Versorgung eines Landes auszukommen. Dies war notwendig geworden, nachdem die Anzahl der Rundfunksender und deren Leistung beständig zunahm, wodurch sich nicht mehr tolerierbare Störungen des Empfangs ergaben.

### 4.1 Die realisierten Gleichwellen-Netze

Das erste teilweise mit Hilfe von Frequenz-Vervielfachung durch Eisen-Drosseln betriebene Gleichwellen-Netz wurde 1929 aus den Sendern Berlin-Ost, Magdeburg und Stettin gebildet. Der Grundfrequenz-Generator stand in Berlin-O, während Magdeburg und Stettin über Kabel versorgt wurden. Die Frequenz-Vervielfachung erfolgte in Berlin-O und Magdeburg mit Röhren-Vervielfachern, aber in Stettin mit Eisen-drossel-Vervielfachern. Die Vervielfachungszahlen der drei Stufen waren 9 — 9 — 7.

Das „Deutsche Gleichwellen-Netz“ von 1933 ist in Bild 4.1 dargestellt.[5]



Bild 4.1: Das Gleichwellen-Netz für Mittelwelle 1932–33. Hinter der damaligen Karte von Deutschland ist das Gestell für die Frequenz-Vervielfachung zu erkennen.

Ein zweites Gleichwellen-Netz bildeten seit März 1930 die Sender Köln, Münster und Aachen. Allerdings wurde hierbei auf eine Synchronisation verzichtet. Man verwendete statt dessen temperaturstabilisierte Quarz-Generatoren, die die Senderfrequenzen auf „wenige Hertz“ konstant halten konnten.[4] Die Ergebnisse dieser im Prinzip „frei“ laufenden Sender waren jedoch unbefriedigend, weil in der „Verwirrungszone“ zwischen den Sendern, wo diese sich gegenseitig stören, zu große Störungen entstanden. Bereits Anfang 1933 war dieses Gleichwellen-Netz außer Betrieb.[5]

Die Planungen und Realisierungen von Gleichwellen-Netzen bis ca. 1941 sind in den Bildern 4.2 und 4.3 dargestellt.[1] Außer von Lorenz gab es nun auch Gleichwellen-Netze von Telefunken.

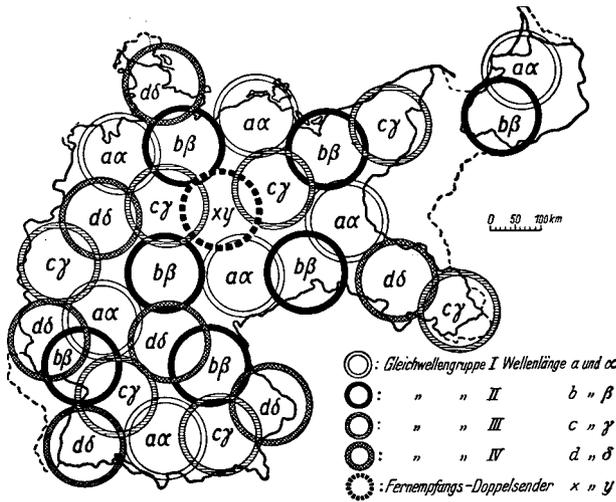


Bild 4.2: Die vom RPZ geplanten Gleichwellen-Rundfunksender 1939. (2 Programme für Ortsempfang & 2 Programme für Fernempfang)

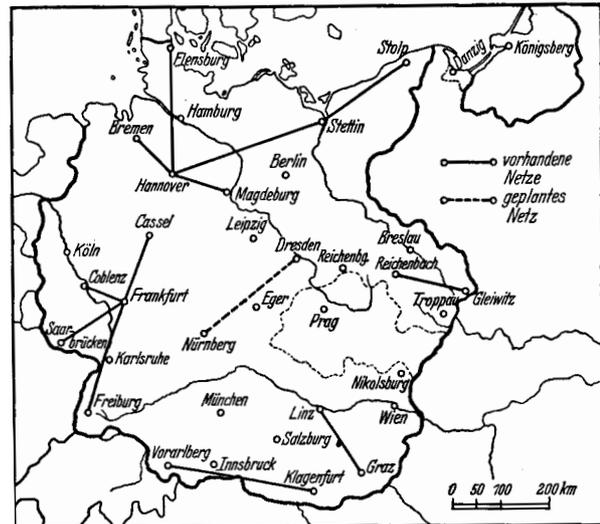


Bild 4.3: Die bis 1941 realisierten Gleichwellen-Netze für Rundfunksender

Wie bereits aus der Planung Bild 4.2 ersichtlich wird, funktioniert Gleichwellen-Empfang nur in der Nähe der Sender. Keinesfalls kann z.B. mit zwei Sendern ein Versorgungsgebiet vollständig bedient werden, denn genau zwischen den beiden Sendern gibt es ein „Verwirrungs-Gebiet“, wo kein störungsfreier Empfang möglich ist, Bild 4.4.[1]

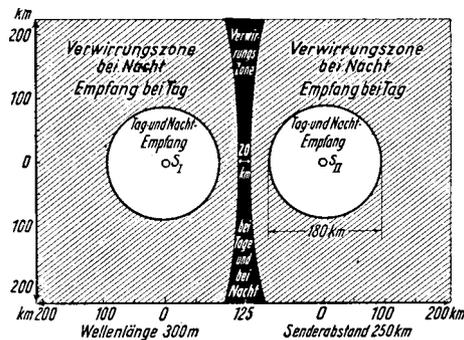


Bild 4.4: Verwirrungsgebiet zweier Gleichwellen-Sender (1 MHz, je 36 KW Strahlungsleistung) tags bzw. nachts, wo zusätzliche Störungen durch Raumwellen entstehen.

Gleichwellen-Betrieb funktioniert also nur dann vernünftig, wenn die Sender weit von einander entfernt liegen und wenn das Verwirrungs-Gebiet von anderen Sendern versorgt wird.

Auf diese Weise verwendet DeutschlandRadio die Sender Nordkirchen & Thurnau auf 549 kHz, sowie die Sender Braunschweig & Ravensburg auf 756 kHz für sein Programm Deutschlandfunk (DLF).

## 5 Synchronisation

Voraussetzung für das einwandfreie Funktionieren eines Gleichwellen-Netzes<sup>[1]</sup> ist die exakte Synchronisation der HF-Träger bezüglich Frequenz und Phase, sowie die Synchronisation der Modulations-Spannungen bezüglich Phase und Laufzeit.

<sup>[1]</sup> Gleichwellen-Netze werden heute für digitale Modulationen verwendet und mit SFN (single frequency network) bezeichnet. Beispiele sind DAB (digital audio broadcast), auch als Digital Radio bezeichnet und DVB-T (digital video broadcast terrestrial).

## 5.1 Synchronisation mit Frequenzvervielfachung

Die Erfüllung der Forderungen nach Synchronisation von HF-Träger und Modulations-Signal bedingt einen erheblichen Aufwand, der zu Beginn der '30er Jahre nur schwer zu erfüllen war.<sup>12</sup> Die (teilweise) mehrere hundert Kilometer entfernten Sender konnten nur mit Hilfe von Telefonleitungen der Post synchronisiert werden. Auf den damals noch weit verbreiteten oberirdischen Zweidraht-Leitungen konnten für diesen Zweck Steuer-Frequenzen bis zu 30 KHz übertragen werden. Wegen der Störanfälligkeit dieser offenen Leitungen ging man jedoch auf Telefon-Kabel über, weshalb die Steuer-Frequenzen für die Gleichwellen-Sender auf Werte im Bereich zwischen ca. 1,5 KHz bis 2,5 KHz erniedrigt werden mußte.

Aus der am Senderort angelieferten Spannung mit ca. 2 KHz mußte also mit Hilfe von Frequenz-Vervielfachung die HF-Spannung mit der vorgeschriebenen Frequenz erzeugt werden. Zunächst erfolgte dies mit Hilfe eines Vervielfachers mit Eisen-Wandlern, Bild 3.3 (Seite 5), da diese Technik von den Maschinensendern her bekannt und verfügbar war.

Allerdings gab es auch (seit September 1929) Frequenz-Vervielfacher mit Röhren, Bilder 5.1 und 5.2.

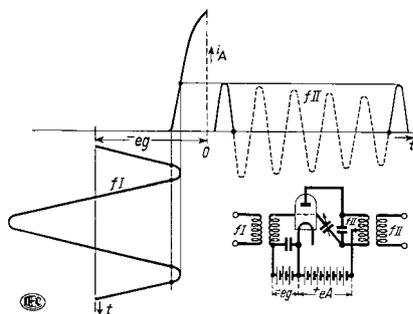


Abb. 9. Grundsätzliche Schaltung der Frequenzvervielfachung mit Röhren.

Bild 5.1: Prinzip der Frequenzvervielfachung mit Röhre.

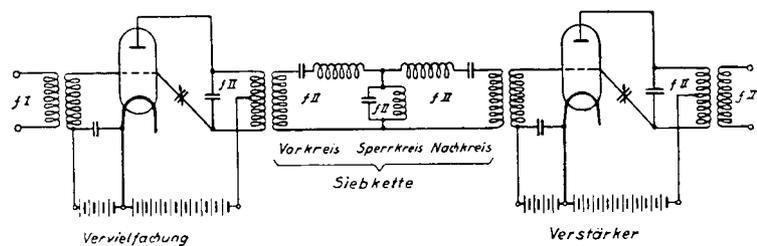


Bild 5.2: Vervielfacher-Stufe mit Filter (Siebkette) und Verstärker. Die verwendeten Trioden erforderten eine Neutralisation der Schaltung.

Bei der Synchronisation mit Frequenzvervielfachung (der ersten Generation) wird die im Vervielfacher erzeugte HF-Schwingung direkt als „Steuerspannung“ für den Sender verwendet. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß Störungen, die auf der Telefon-Leitung auftreten, direkt im ausgesendeten Signal wirksam werden können.

### 5.1.1 Stimmgabel-Oszillatoren

Die Steuerfrequenz von ca. 2 KHz muß sehr genau und frequenzstabil erzeugt werden. Als geeignete Resonatoren hierfür wurden Stimmgabeln verwendet. Die Schaltung eines Stimmgabel-Oszillators ist in Bild 5.3 gegeben. Die Anregung der Stimmgabel und die Auskopplung erfolgen induktiv.

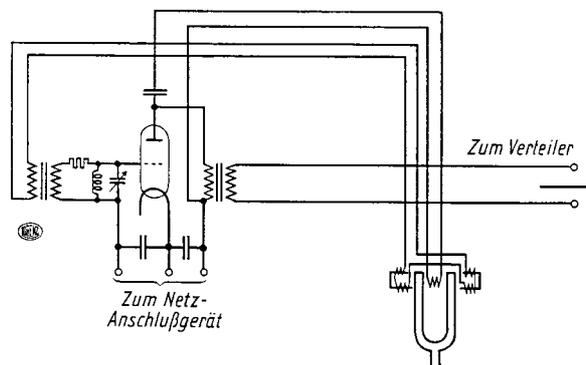


Bild 5.3: Prinzip-Schaltbild des Stimmgabel-Oszillators (Hauptstimmgabel: bestimmt die Senderfrequenz.)

<sup>12</sup>Heute greifen SFN Netze auf GPS (*global positioning system*) zurück um die Frequenzen zu synchronisieren.

Die Bilder 5.4, 5.5 und 5.6 zeigen die Form der Stimmgabel, deren Schwingungsformen und die damit erreichbare Resonanzkurve. Die Stimmgabel hatte eine Masse von ca. 3 kg.

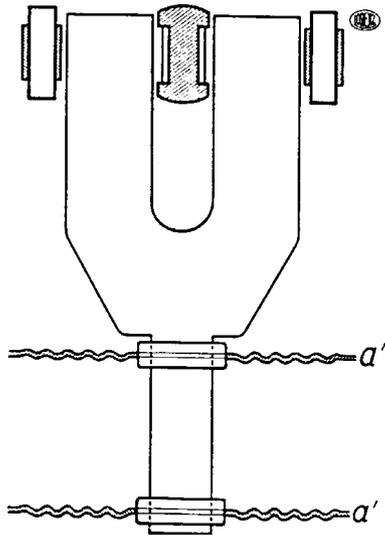


Bild 5.4: Stimmgabel-System für Gleichwellen-Sender.

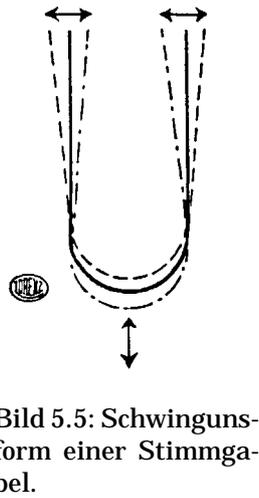


Bild 5.5: Schwingungsform einer Stimmgabel.

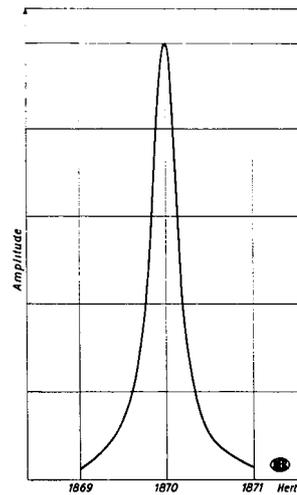


Bild 5.6: Resonanzkurve einer Stimmgabel für Gleichwellen-Sender.

Aufgrund ihrer großen Masse und der elastischen Befestigung der Stimmgabel ergab sich eine geringe Dämpfung der Schwingung und damit eine hohe Güte. Ebenfalls günstig in diesem Sinne ist die symmetrische Anregung der Gabel an beiden Zinken. Der Thermostat, in dem die Stimmgabel untergebracht war, wurde auf  $\pm 1/10$  °C konstant gehalten.

**5.1.2 Gleichwellen-Anlage mit Stimmgabel-Oszillator**

Der Oszillator mit der Haupt-Stimmgabel wurde am Ort des Haupt-Senders eines Gleichwellen-Netzes betrieben. Von da aus ging es direkt zum Frequenz-Vervielfacher, der zusammen mit dem Stimmgabel-Oszillator als Steuersender diente. Diese HF-Schwingung wurde weitergeleitet zur 1. Stufe des Senders, Bild 5.7.[5]

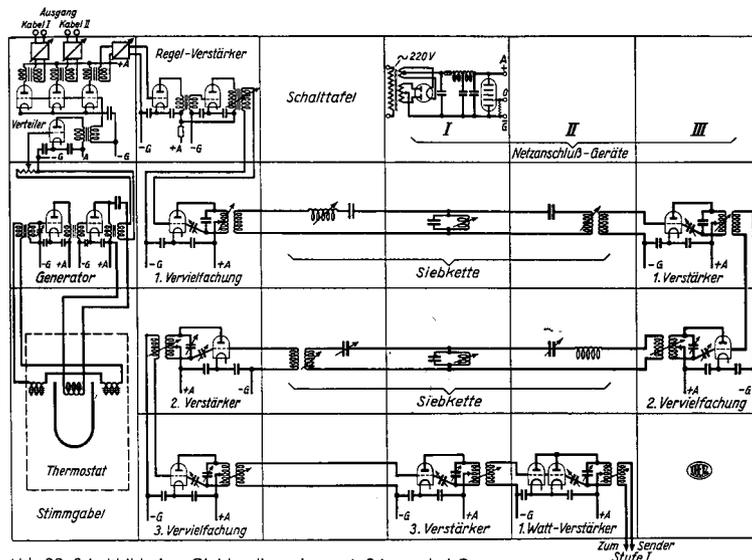


Abb. 29. Schaltbild einer Gleichwellenanlage mit Stimmgabel-Generator.

Bild 5.7: Schaltbild einer Gleichwellen-Anlage mit Stimmgabel-Generator; Stimmgabel-Steuersender.

Hinter dem Stimmgabel-Oszillator wurden auch die (sinusförmigen) Steuerspannungen mit der Frequenz des Stimmgabel-Oszillators für die anderen Sender des Gleichwellen-Netzes über Trennverstärker entnommen und über Kabel an die Tochter-Sender weitergeleitet.

### 5.1.3 Die fremdgesteuerte Stimmgabel

Am Ende der Telefon-Leitung, also am Ort der Tochttersender, mußte die übertragene Steuerspannung mit der Frequenz des Stimmgabel-Oszillators ebenfalls einen Frequenz-Vervielfacher durchlaufen, damit die gewünschte Sendefrequenz erreicht wurde.

Bei der Übertragung über Telefon-Leitungen ergeben sich jedoch folgende Probleme:

1. Das empfangene Signal enthält (zufällige) Schaltknacke oder allgemein Störgeräusche, wie z.B. Wählergeräusche oder Übersprechen aus anderen Telefonkanälen.
2. Der Pegel des ankommenden Signals ist nicht konstant.
3. Die Phase des Empfangssignals unterliegt Schwankungen.

Die Probleme wurden bei den ersten Gleichwellen-Netzen folgendermaßen bekämpft, aber nicht endgültig gelöst.

1. Die Störungen auf dem Signal wurden dadurch sehr stark reduziert, daß das Empfangs-Signal (Steuer-Ton) mit einer gleichartigen Stimmgabel gefiltert wurde, Bild 5.8.[5]

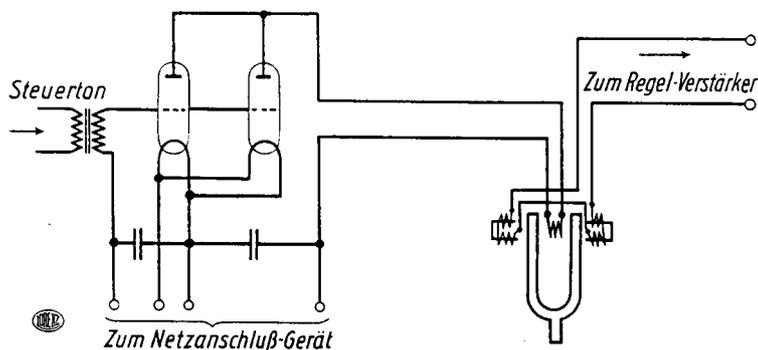


Bild 5.8: Schaltbild einer fremderregten Stimmgabel; Neben-Stimmgabel.

2. Der Pegel wurde mit Hilfe eines Regel-Verstärkers (Pegel-Regelung entsprechend zu Bild 5.7) auf konstantem Wert gehalten.
3. Phasen-Schwankungen  $\Delta\varphi$  bewirken auch Frequenz-Schwankungen  $\Delta\varphi/\Delta t$ . Die entsprechenden Linien im Spektrum der Steuerspannung lassen sich auch mit dem Stimmgabel-Filter nicht komplett beseitigen. Nach der Frequenz-Vervielfachung sind die nicht zu beseitigenden Schwankungen auch entsprechend vervielfacht.

Hier gab es bei den ersten Gleichwellen-Netzen keine befriedigende Lösung.

## 5.2 Synchronisation mit Phasen-Regelkreis

Die Schwierigkeiten, die sich bei der fremdgesteuerten Stimmgabel nicht beseitigen lassen, führten auf neue Lösungen, die auf gleichen Prinzipien wie die heute bekannten Phasen-Regelkreise PLL (*phase locked loop*) beruhen. Es besteht allerdings folgender Unterschied, der technologisch begründet ist.

- Bei PLL wird mit Frequenz-Teilern gearbeitet. Der Oszillator schwingt auf der Sollfrequenz. Verglichen wird auf der herunter geteilten Frequenz.

Frequenz-Teiler sind heute einfacher als Frequenz-Vervielfacher realisierbar.

- Bei Gleichwellen-Netzen wird mit Frequenz-Vervielfachern gearbeitet. Der Oszillator arbeitet auf niedriger Frequenz, auf welcher auch verglichen wird. Die Sollfrequenz entsteht durch Frequenz-Vervielfachung.

Frequenz-Teiler waren früher technisch sehr viel aufwändiger als Vervielfacher.

### 5.2.1 Das neuere Gleichwellen-System von Lorenz

Der Stimmgabel-Oszillator liefert wieder eine Sinusspannung mit ca. 2 KHz, deren genauer Wert wieder von der zu erreichenden Sende-Frequenz abhängt. An Haupt- und Neben-Sender befinden sich gleichartige Frequenz-Vervielfacher-Stufen. Die Siebkette  $K_1$  brauchte nur noch in schwierigen Fällen als Neben-Stimmgabel ausgeführt werden. I.a. genügte jetzt ein mehrgliedriger LC-Tiefpaß.[1]

Neu ist nun, daß jeder der Sender einen Quarz-Generator hat, der (nominell) auf der Sender-Frequenz schwingt. Die Frequenz und Phase dieser Schwingung wird nun in einer Phasenbrücke mit der Frequenz und Phase der vervielfachten Stimmgabel-Frequenz verglichen. Etwaige Unterschiede werden in einer Regelschleife ausgegelt, Bild 5.9.[1]

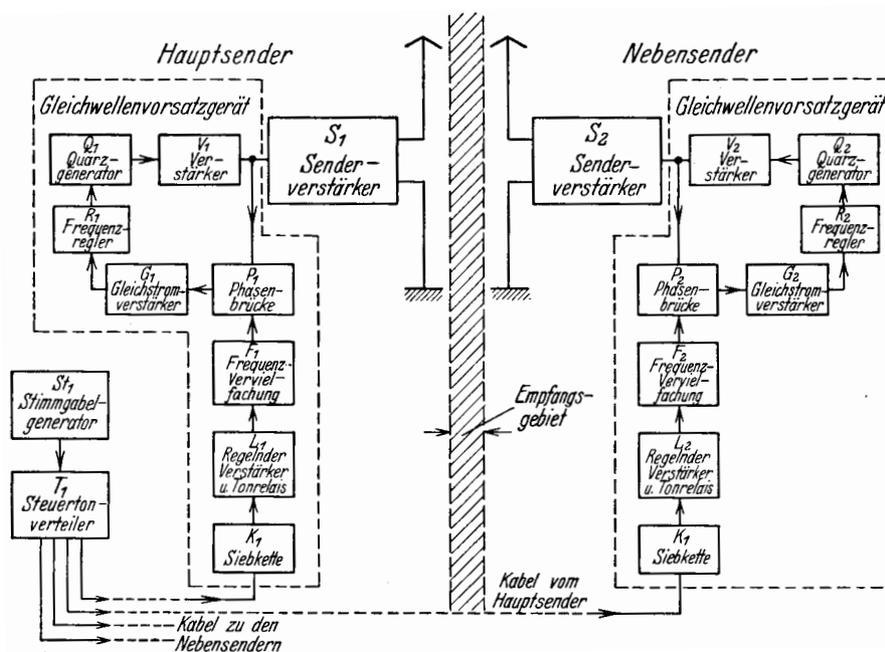


Bild 5.9: Block-Schaltbild des neuen Lorenz Gleichwellen-Systems: Prinzip einer PLL.

Im Blockschaltbild 5.9 sind alle Teile enthalten, die für einen Phasen-Regelkreis (PLL *phase locked loop*) notwendig sind, auch wenn die Bezeichnung „Phasen-Regelkreis“ damals nicht üblich war.

### 5.2.2 Die Gleichwellen-Systeme von Telefunken

Anders als Lorenz führte Telefunken bei seinem älteren Gleichwellen-System den Phasenvergleich auf der heruntergeteilten Steuer-Frequenz durch. Eine weitere Besonderheit ist die angewendete diskontinuierliche Regelung, die man heute mit „getasteter“ Regelung bezeichnen würde. Der Regelkreis wurde also nur dann geschlossen, wenn die Abweichungen der Phase einen vorgegebenen Wert überstiegen. Dazwischen wurde die Frequenz und Phase der Trägerschwingung durch den Quarz-Oszillator bestimmt, der somit zwischen den Zeitpunkten des Eingriffes der Regelung interpolierte. Irgendwelche kleineren Phasenschwankungen auf der Telefon-Leitung für die Steuerfrequenz machten sich somit überhaupt nicht bemerkbar.

Das Blockschaltbild des älteren TFK Gleichwellen-Systems zeigt Bild 5.10.[1] In diesem Blockschaltbild sind im Prinzip bereits alle Teile enthalten, die man in modernen Phasen-Regelkreisen wieder finden kann. Allerdings war damals die Realisierung der einzelnen Blöcke teilweise sehr aufwändig, speziell der Frequenz-Teiler („Frequenz-Erniedrigungs-Gerät“), so daß im neueren TFK Gleichwellen-System ebenfalls mit Frequenz-Vervielfachung gearbeitet wurde.

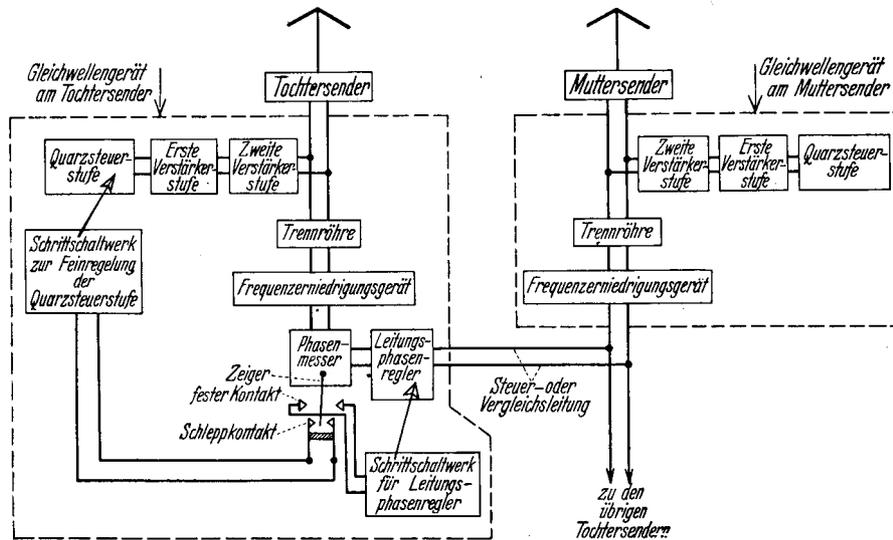


Bild 5.10: Block-Schaltbild des älteren Telefunken Gleichwellen-Systems: Prinzip einer getasteten PLL.

Die Frequenz-Vervielfachung erfolgte jedoch nur beim Neben-Sender, während beim Haupt-Sender nach wie vor eine Frequenz-Teilung erfolgte. In Bild 5.11 ist das Blockschaltbild des neueren TFK Gleichwellen-Systems dargestellt.[1] Der Phasen-Vergleich erfolgt beim Neben-Sender hier wieder auf der Sendefrequenz. Im Unterschied zu der Lösung von Lorenz wird die Frequenz des Hauptsenders durch einen Quarz bestimmt und nicht durch eine Stimmgabel.

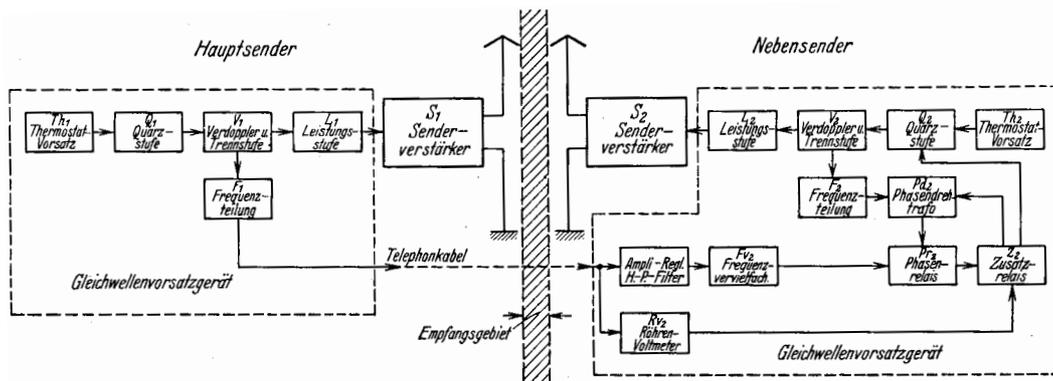


Bild 5.11: Block-Schaltbild des neueren Telefunken Gleichwellen-Systems.

## 6 Der MW-Funk-Kanal

Wie im Kapitel 4 MW-Gleichwellen-Netze (Seite 7) schon kurz angedeutet, entstehen im Empfangsgebiet von Gleichwellen-Sendern Interferenzen der von den einzelnen Sendern gesendeten Wellen, wodurch (selektive) Fadings im Empfangssignal entstehen.

Im Prinzip ist das vergleichbar mit dem bei MW (speziell in der Nacht) beobachtbaren Ausbreitungsverhalten (für einen Sender), wo beim Empfänger zum einen die Bodenwelle und zum anderen die Raumwelle eintrifft, wodurch ebenfalls Interferenzen entstehen.

Obwohl beide Ausbreitungs-Szenarien ähnlich sind und deshalb im Prinzip gleichartig modelliert werden können, bestehen doch folgende Unterschiede im Detail.

- Sind beim Gleichwellen-Funk die Frequenzen und die Phasen der HF-Schwingungen konstant, so entstehen ortsfeste Interferenzen, da die Sender ortsfest sind.

- Schwanken beim Gleichwellen-Funk Frequenzen und Phasen, so wandert das Interferenz-Bild räumlich. Beim Empfänger entstehen zeitlich schwankende Feldstärken des Empfangs-Signals. Ein gleichartiges Empfangsergebnis hätte es zur Folge, wenn z.B. ein Sender sich örtlich bewegen würde.
- Bei der ionosphärischen Wellenausbreitung ändert sich der Ort der reflektierenden Schicht in zufälliger Weise, wodurch beim Empfänger zeitliche Schwankungen des Empfangssignals entstehen.
- Im Modell kann die Reflexion an der Ionosphäre durch einen sich räumlich bewegenden Sender beschrieben werden. Im Umkehrschluß läßt sich auch ein Gleichwellen-System durch einen Sender und entsprechende Reflexionen beschreiben. Der Empfänger kann jedenfalls diese beiden Fälle nicht unterscheiden.

## 6.1 Messergebnisse

Im Empfänger überlagern sich die Auswirkungen beider Ursachen. Die ionosphärisch bedingten Schwankungen lassen sich nicht beeinflussen. Die Größe der Schwankungen durch Phasen- Ungenauigkeiten in einem Gleichwellen-Netz können jedoch beeinflußt werden und bestimmen somit die zu realisierende Frequenz-Genauigkeit eines Gleichwellen-Systems. Eine Messung an einem Gleichwellen-Sendermodell ergab folgende typischen Schwankungs-Verläufe, Bild 6.1.[1] Angenommen ist dabei ein Empfangsort, bei dem die Boden-Wellen der beiden Sender im Verhältnis 4:2 (= 2:1)<sup>||1</sup> ankommen und die Raum-Wellen im Verhältnis 1:1 eintreffen.

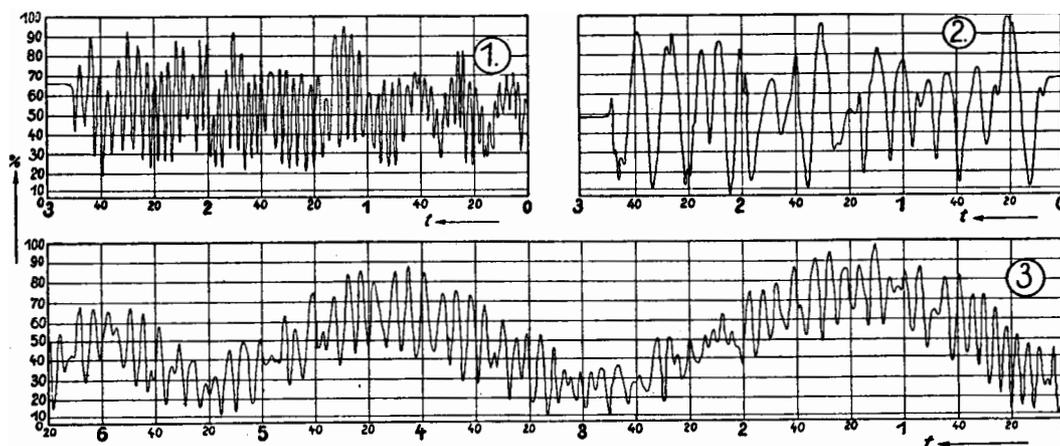


Bild 6.1: Schwankungen der Nachtempfangfeldstärken zweier Gleichwellen-Sender bei verschiedenen langen Schwebungs-Zeiten aufgrund von Frequenz-Schwankungen. (Da es sich um Aufzeichnungen mit Registrierstreifen handelt, geht der Zeit-Pfeil nach links:  $t \leftarrow$ )

Aus den Meßkurven lassen sich folgende Schlüsse ziehen.

1. Sind die Schwebungen der Gleichwellen-Sender rascher als die Änderungen der Raumwellen, gibt es rasche Lautstärke-Änderungen mit Verzerrungen.
2. Sind beide Arten der Änderungen etwa gleich rasch, gibt es zwar langsamere Lautstärke-Änderungen, aber ähnliche Verzerrungen.
3. Sind die Schwebungen der Gleichwellen-Sender langsamer als die der Raumwellen, gibt es längere Perioden mit brauchbarem Empfang und nur relativ kurze Perioden mit gestörtem Empfang (für Feldstärke  $\rightarrow 0$ ). Nur dieser Fall ist praktisch anwendbar.

Aufgrund derartiger Meßergebnisse konnte gefolgert werden, daß eine Frequenz-Schwankung länger als 10 Sekunden dauern sollte, d.h. für Gleichwellen-Sender bei 1 MHz die Frequenzdifferenz höchstens in der Größenordnung von  $10^{-9}$  sein sollte.[1] Dies bedingte einen entsprechenden Aufwand bei der Synchronisation der Sender.

Für die weitere Analyse des Gleichwellen-Netzes wird daher hier unterstellt, daß die Sender perfekt synchronisiert sind.

<sup>||1</sup>Das Verhältnis 2:1 entspricht der Grenze des als „gut“ bezeichneten Tages-Empfangs der Boden-Wellen.

## 6.2 Wellenausbreitung

Die Ausbreitung des elektro-magnetischen Feldes von einer (vertikalen) Antenne erfolgt in radialer Richtung mit Lichtgeschwindigkeit, wobei sich im gegenseitigen Abstand einer halben Wellenlänge  $\lambda/2$  jeweils Nullstellen der elektrischen Feldstärke ergeben, die gleichzeitig Maxima der magnetischen Feldstärke sind, Bild 6.2.[1]<sup>||2</sup>

Das Feld zweier räumlich entfernter Antennen mit gleicher Erregung ist dagegen nicht mehr kreisförmig, sondern hat die Form von Ellipsen, die sich vom Mittelpunkt zwischen beiden Antennen aus mit Lichtgeschwindigkeit wegbewegen. Da jedoch auch noch eine Interferenz zwischen den Wellen der beiden Antennen entsteht, gibt es nun auch noch zusätzlich ortsfeste Linien, wo sich die Entfernungen von den einzelnen Antennen exakt um  $\lambda/2$  oder Vielfache davon unterscheiden und es daher zu Löschungen kommt. Aufgrund der Konstruktion in Bild 6.3 erkennt man, daß es sich bei diesen ortsfesten Linien um Hyperbeln handelt.[1]

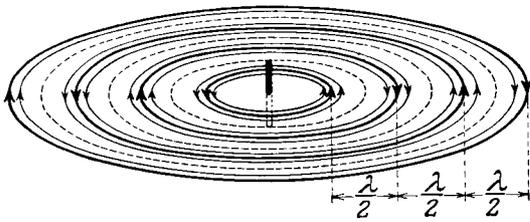


Bild 6.2: Magnetisches Feld einer Dipolantenne (perspektivisch). Dieses kreisförmige Feld dehnt sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die dick gezeichneten Magnetlinien sind die Orte der Knoten (Nullstellen) der elektrischen Feldstärke.

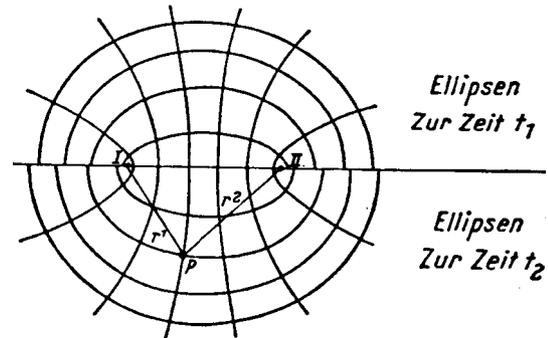


Bild 6.3: Kurven der Knotenlinien der elektrischen Feldstärke zweier gleicher Dipolantennen. Das sich mit Lichtgeschwindigkeit ausdehnende Feld ist hier Ellipsen-förmig. Die Linien der Interferenz beider Felder sind feststehende Hyperbeln.

Die totale Löschung der Feldstärke entsteht nur, wenn zusätzlich zur Phasenbedingung auch noch die Amplituden gleich groß sind. Das ist jedoch nur in einem schmalen Bereich zwischen beiden Sendern der Fall, welcher mit „Verwirrungszone“ bezeichnet wird. Der prinzipielle Verlauf der Feldstärke ist in Bild 6.4 gezeigt.[1]

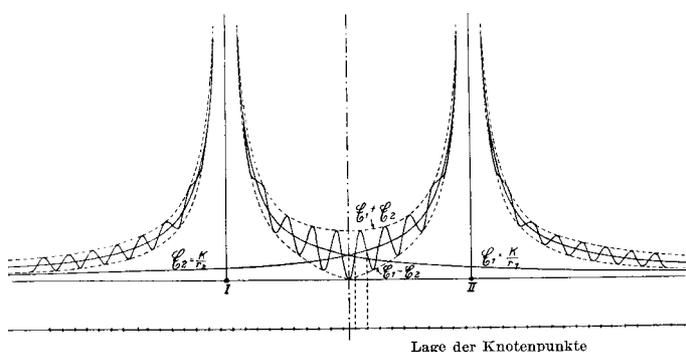


Bild 6.4: Feldstärke-Verteilung auf der Verbindungsline zweier Gleichwellen-Sender

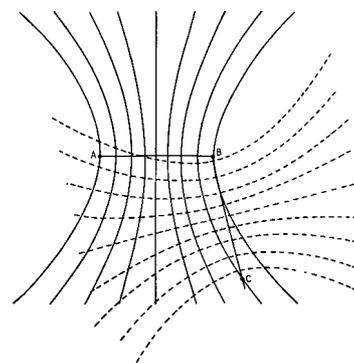


Bild 6.5: Die Knotenlinien bilden Hyperbeln. Diese Eigenschaft diente u.a. zur Funk-Navigation.

In der Fläche gesehen werden aus den Knotenpunkten in Bild 6.4 nun hyperbelförmige Knotenlinien, die

<sup>||2</sup>Das Modell dazu sind die Wasserwellen im See, wenn ein Stein geworfen wurde.

für Funk-Navigations-Verfahren ausgewertet wurden, Bild 6.5.<sup>||3</sup>[3]

### 6.3 Das Zwei-Wege-Modell

Das Zwei-Wege-Modell für die Funkausbreitung ist der einfachste Fall, der aber bereits alle typischen Eigenschaften zeigt. Hierfür wird vereinfachend angenommen, daß die Sender nur einen Impuls aussenden. Sei  $t_0$  die Laufzeit des zuerst eintreffenden Impulses und  $t_0 + \Delta t$  die Laufzeit des späteren Impulses, so erhält man die empfangenen Impulse gemäß folgendem Diagramm, das auch als Impulsantwort  $c(t)$  des Zweiwege-Modells für den Funk-Kanal bezeichnet wird, Bild 6.6 und Bild 6.7.[17]

Im Falle eines Gleichwellen-Netzes sei der Empfänger innerhalb dieser Verwirrungszone stationiert, aber nicht exakt in der Mitte zwischen beiden Sendern. (Für den Empfänger ist es unerheblich, ob die empfangenen Impulse von 2 synchronisierten Sendern stammen oder ob es sich dabei um ein Echo von einem Sender handelt.)

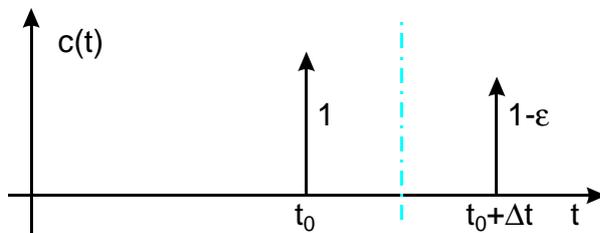


Bild 6.6: Impulsantwort des Zwei-Wege-Modells; der 2. Impuls ist als kleiner angenommen.

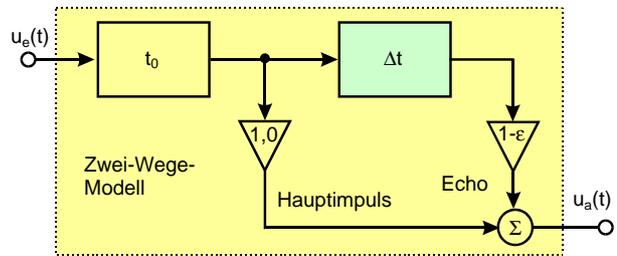


Bild 6.7: Das Zwei-Wege-Modell des Funk-Kanals

Aus der Impulsantwort kann der Betrag des Feldstärkeverlaufes innerhalb der Verwirrungszone bestimmt werden, Bilder 6.8 und 6.9.[17]

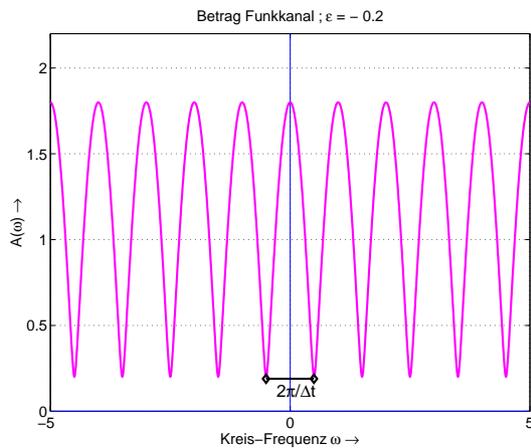


Bild 6.8: Betrag der Kanal-Übertragungsfunktion für  $\epsilon = 0,2$ ; lineare Darstellung; Die hier gezeichnete Frequenz  $\omega = 0$  entspricht der Mittenfrequenz (Trägerfrequenz  $\Omega_C$ ) des Funk-Kanals.

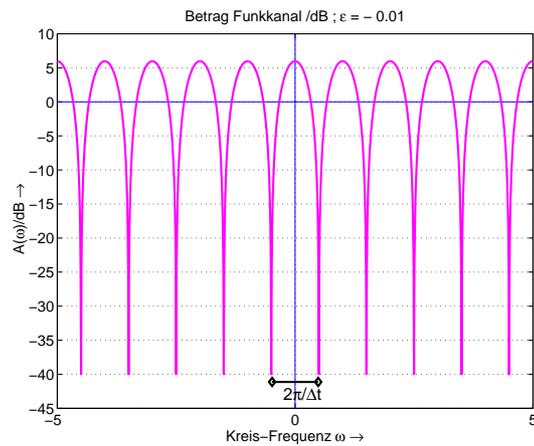


Bild 6.9: Betrag der Kanal-Übertragungsfunktion für  $\epsilon = 0,01$ ; logarithmische Darstellung in dB

<sup>||3</sup>Diese Knotenlinien bildeten die Grundlage für (mittlerweile durch GPS überholte und deshalb abgeschaltete) Funkortungsverfahren (Funk-Navigation), wie z.B. DECCA oder GEE. Die 3 Sender einer Kette arbeiteten hierbei allerdings nicht auf identischen Frequenzen, sondern auf unterschiedlichen ganzzahligen Vielfachen einer Zwischenfrequenz. Erst auf dieser Zwischenfrequenz ergaben sich dann diese Knotenlinien. Der Vorteil dieses Konzeptes war, daß Pegelschwankungen bei der Übertragung der verschiedenen Träger individuell ausgeregelt werden konnten, bevor die heruntergeteilten Signale gemeinsam auf den ZF-Verstärker gegeben wurden. Aus den Schnittpunkten der Hyperbel-Scharen konnte die Position z.B. von Schiffen ermittelt werden. Als Sende-Frequenzen wurden Langwellen unterhalb 150 KHz verwendet, weil hier keine Reflexionen an der Ionosphäre auftreten und daher die Bodenwellen-Ausbreitung sehr stabil ist.[3]

Man erkennt aus diesen Bildern, daß der Funk-Kanal nun keinesfalls alle Frequenzen gleichmäßig überträgt, sondern, daß es bei Frequenzen im Abstand  $\omega_p = \frac{2\pi}{\Delta t}$  (Kreis-Frequenz) bzw.  $f_p = \frac{1}{\Delta t}$  (Frequenz) ausgeprägte Schwund-Einbrüche (*notches*) gibt. Je kleiner  $\epsilon$  ist, um so tiefer werden die Notches.

Mit der Änderung der Phase der Impulse, die einer Änderung der Phase der Trägerschwingungen entspricht, verschiebt sich der Ort der Notches auf der Frequenzachse, so daß andere Teile des Empfangsspektrums davon betroffen sind, Bild 6.10.

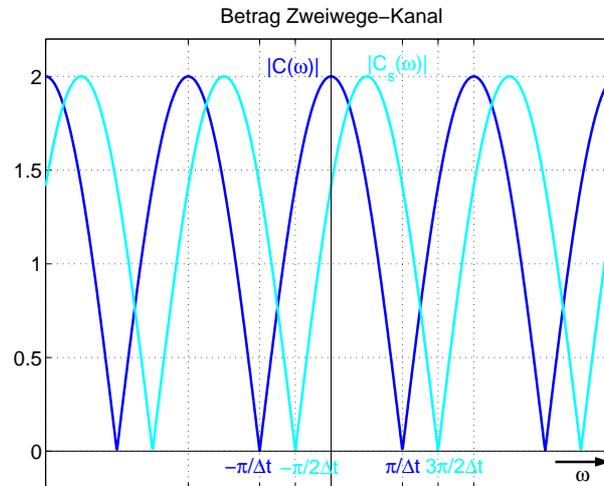


Bild 6.10: Betrag der Übertragungsfunktion des Zweiwege-Modells. Hauptimpuls und Echo gleich groß. Blau: ohne Phasenverschiebung; Cyan: mit  $90^\circ$  Phasenverschiebung der Echos. Die Phasendrehung der Kanal-Impulsantwort führt auf eine Frequenzverschiebung der Kanal-Übertragungsfunktion.

### 6.3.1 Anwendung auf den AM Gleichwellen-Funk

Die theoretischen Ergebnisse werden nun zahlenmäßig betrachtet. Es wird das Zweiwege-Modell Bild 6.7 angenommen. Die wichtige Größe hierbei ist die Zeitverschiebung  $\Delta t$ .

Die Verwirrungszone liegt genau zwischen den beiden Sendern. Im Beispiel nach Bild 4.4 (Seite 8) hat sie eine Breite  $B_v$  von ca. 20 bis 30 km. Da es sich mit 30 km bequemer rechnet, wird dieser Wert  $B_v = 30 \text{ km}$  verwendet. Es soll ein Punkt an der (linken) Grenze des Verwirrungsgebietes betrachtet werden. Der sei demzufolge 15 km von der Mitte zwischen beiden Sendern entfernt. Damit hat der erste Impuls 15 km weniger und der 2. Impuls 15 km mehr zurückgelegt, wodurch sich eine Differenz von  $\Delta x = 30 \text{ km}$  ergibt.

Hierfür ergibt sich ein Wert  $\Delta t = \Delta x/c = 0,1 \text{ ms}$ , wenn  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  die Lichtgeschwindigkeit ist. Hieraus folgt ein Notch-Abstand von  $f_p = 10 \text{ KHz}$ .

Theoretisch könnten die störenden Notches genau außerhalb des 9 KHz breiten AM-Kanals zu liegen kommen und damit nicht stören. Jedoch wandern die Notches infolge der Phasenschwankungen über den Kanal hinweg, wie Bild 6.10 das an einem Beispiel zeigt.

Die größte Störung bei AM tritt dann auf, wenn das Notch auf den Träger fällt. In diesem Fall wird praktisch nur der Träger sehr stark reduziert (Trägerschwund), während die Seitenbänder (betragsmäßig) fast unverändert bleiben. Dann erhöht sich aber der Modulationsgrad  $m$  so weit, daß es zur Übermodulation  $m > 1$  kommt. Dies ergibt unangenehme Verzerrungen, die auch noch besonders laut wiedergegeben werden, weil die Schwundregelung (AGC *automatic gain control*) der AM-Empfänger auf die Größe des Trägers reagiert. Wird der Träger kleiner, erhöht sich die Verstärkung des Empfängers<sup>||4</sup> und in diesem Fall die Lautstärke der verzerrten Wiedergabe. Zusätzlichen Einfluß auf die Verzerrungen bei Trägerschwund übt auch die Phasendrehung der Trägerschwingung aus, die bei Maximalschwund gerade  $90^\circ$  gegenüber den Seitenbändern beträgt. In diesem Fall wird aus der Amplituden-Modulation (AM) eine Phasen-Modulation (PM). Das ist der Grund, weshalb das demodulierte Signal dann nicht nur verzerrt, sondern (im Falle einer Modulation mit Sprache) auch unverständlich wird.

<sup>||4</sup>Dies ist im „Normalfall“ sinnvoll: ein schwächerer Sender hat auch schwächere Seitenbänder und die AGC sorgt dafür, daß das demodulierte Signal praktisch genau so laut wird wie bei einem starken Sender.

Während ein Notch, das die Größe des Trägers schwächt zu starken Verzerrungen führt, äußert sich ein Notch in den Seitenbändern i.w. nur in einer Klangverfärbung des demodulierten Signals, während die auch hier auftretenden nichtlinearen Verzerrungen nur relativ gering sind und i.a. kaum auffallen.

### 6.3.2 Nachschwund-Zone

Da im Kanal-Modell Bild 6.7 (Seite 16) die Empfangs-Signale betrachtet werden, spielt es keine Rolle, ob diese von verschiedenen Sendern stammen oder ob sie durch Echos (z.B. Reflexionen an der Ionosphäre) entstanden sind. Daher kann dieses Modell auch dazu dienen, die Auswirkungen der Mehrwege-Ausbreitung zu veranschaulichen. Bild 6.11 zeigt schematisch die Ausbreitungsverhältnisse für Mittelwelle am Tag und in der Nacht.[9]

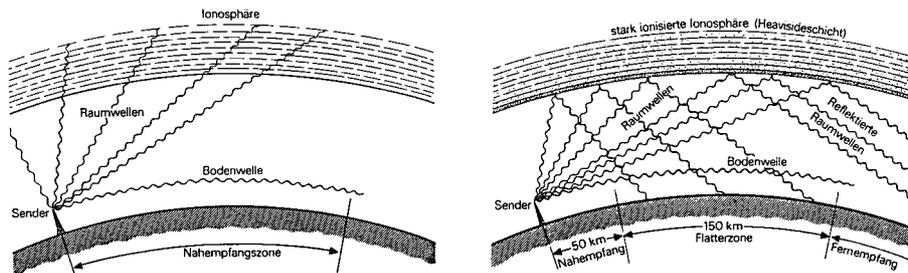


Bild 6.11: Mittelwellen-Ausbreitung am Tage und in der Nacht (schematisch)

Am Tage gilt für die Mittelwelle, daß die Ionosphäre nicht reflektiert, sondern nur dämpft. Die gegen die Ionosphäre gerichtete Strahlungs-Leistung geht für die Übertragung verloren. Für die Rundfunkversorgung existiert nur die Bodenwelle, die sich entlang der Erdoberfläche ausbreitet und (bei gleicher Strahlungsleistung) um so geringer gedämpft wird (und deshalb um so weiter reicht), je niedriger die Trägerfrequenz ist. Dies führt zu einer stabilen und konstanten Versorgung am Tage.

Bei Nacht ändert die Ionosphäre ihre Eigenschaft und reflektiert nun die gegen sie gerichtete Mittelwellen-Strahlung. Diese bildet dann die „Raum-Welle“. Nachts gibt es in der Nachschwund-Zone (Flutter-Zone) daher Interferenzen zwischen der Boden-Welle und der Raum-Welle. Die Raum-Welle hat einen längeren Weg zurückgelegt und trifft größenordnungsmäßig um  $\Delta t_1 \approx 1 \dots 2$  ms später ein.

Die Reflexion der eingestrahlten Leistung ist nahezu vollständig, so daß dadurch auch in großer Entfernung vom Sender erhebliche Empfangsfeldstärken entstehen. Man darf sich die Ionosphäre jedoch nicht als glatten Spiegel vorstellen, vielmehr sind die reflektierenden Ladungs-Wolken — wie „normale“ Wolken auch — nicht glatt und in ständiger Bewegung. Daher ändert sich der Empfang in dieser Zone ständig und meist auch rasch<sup>||5</sup>, weshalb die Nachschwund-Zone auch Flutter-Zone heißt.

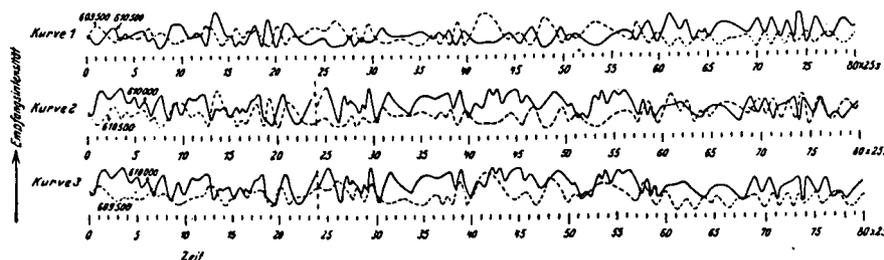


Bild 6.12: Beispiel für die zeitlichen Änderungen der Amplituden der Linien einer AM-Schwingung ( $f_C = 610$  KHz,  $f_N = 500$  Hz, selektive Messung); 1: obere —, untere -- Seitenlinie; 2: — Träger, -- untere Seitenlinie; 3: — Träger, -- obere Seitenlinie

Ein Beispiel für die raschen zeitlichen Änderungen zeigt eine Messung der Amplituden der Trägerschwingung  $f_C = 610$  KHz und der beiden Seitenlinien eines AM-Senders, der mit  $f_N = 500$  Hz sinusförmig

<sup>||5</sup>Schnelle zeitliche Änderungen führen zusätzlich auf Doppler-Spread.

moduliert wurde, Bild 6.12. Es ist beeindruckend, wie sehr sich in diesem Beispiel in nur 500 Hz Abstand das Fadingverhalten unterscheidet. [1] Selektive Löschnungen (ausschließlich) in den Seitenbändern werden i.a. als Tonhöhen-Schwankungen empfunden.

## 6.4 Das Verwirrungs-Gebiet

Es ist dieser Einfluß der Ionosphäre bei Nacht, wodurch das Verwirrungs-Gebiet bei Gleichwellen-Sendern nachts sehr stark vergrößert wird, Bilder 6.13 und 6.14. [5] (S. auch Bild 4.4, Seite 8)

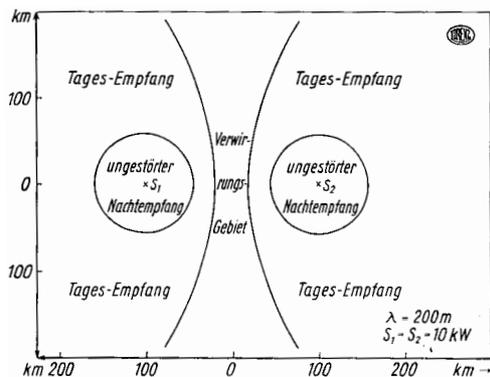


Bild 6.13: Tag- und Nacht-Empfangsgebiet (schematisch) für zwei Gleichwellensender

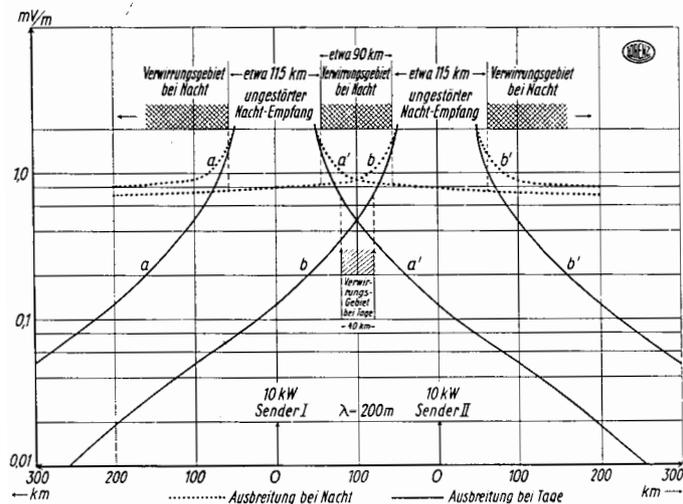


Bild 6.14: Empfangs-Feldstärke zweier Gleichwellensender tags und nachts

Die momentane Feldstärke im Verwirrungs-Gebiet sieht dabei in etwa ähnlich aus, wie das Modell in Bild 6.15 (Seite 20) es zeigt.

Die Grenzen des Verwirrungs-Gebietes sind theoretisch kreisförmig. In der Praxis sind sie aber nur statistisch zu bestimmen.

Dann gibt es weitere Faktoren, die für die Größe dieses Verwirrungs-Gebietes maßgeblich sind.

- Die Genauigkeit der Synchronisation der Trägerfrequenzen.
- Das Größenverhältnis der Empfangsspannungen von den einzelnen Sendern (Feldstärke-Verhältnis) des Gleichwellen-Netzes.
- Die Genauigkeit der Synchronisation der Modulations-Spannungen.
- Die Größe des gewählten Modulations-Grades.

Die zulässigen Größenwerte dieser Faktoren hängen von einander gegenseitig ab, so daß ein niedriger Modulations-Grad gewählt werden muß, wenn z.B. die Synchronisation nicht optimal gelingt.

### 6.4.1 Der zulässige Modulationsgrad

Da im Verwirrungsgebiet der Träger durch Interferenz sehr stark geschwächt werden kann, Bilder 6.8 und 6.9 (Seite 16), ist die Gefahr der Übermodulation umso größer, je größer der Modulationsgrad ist.

Die Löschnungen durch Interferenz auf der Trägerfrequenz  $f_C$  entstehen ja dadurch, daß die elektromagnetischen Wellen um  $\lambda_C/2$  gegen einander verschoben ankommen und sich dadurch subtrahieren. Die Nachrichten in den Seitenbändern haben jedoch andere Frequenzen, nämlich  $f_C \pm f_N$ , wenn  $f_N$  die Frequenz der Nachricht sein soll. Andere Frequenzen haben jedoch auch andere Wellen-Längen, so daß hierfür die Bedingung des Unterschiedes von  $1/2$  Wellenlänge nicht erfüllt ist und deshalb auch keine gleichzeitige Löschung entsteht. Vergleiche hierzu auch Bild 6.12.

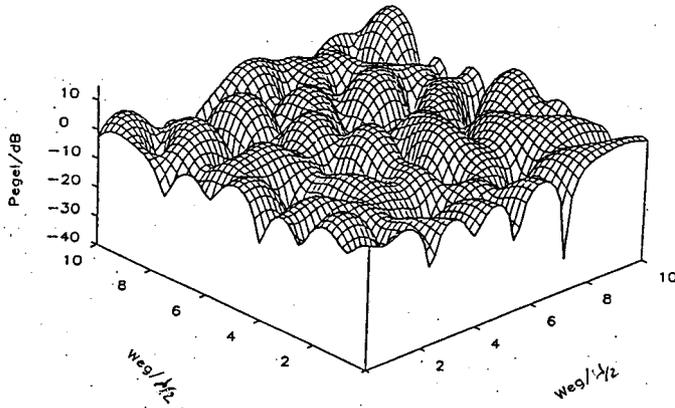


Bild 6.15: Modell der Empfangsfeldstärke (des Trägers) im Verwirrungsgebiet. In der Praxis ist das keine feststehende Situation, sondern wandert hin und her und „wabert“ dabei.

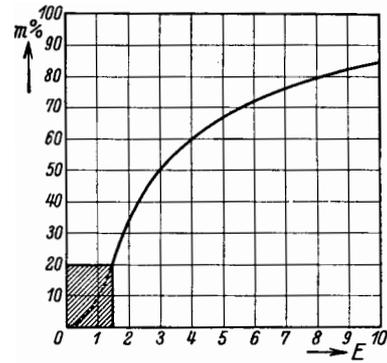


Bild 6.16: Experimentell ermittelter Zusammenhang zwischen Feldstärke-Verhältnis  $E$  und zulässigem Modulations-Grad. Die schraffierte Ecke ist technisch uninteressant.

Will man das Verwirrungs-Gebiet verkleinern, muß dafür gesorgt werden, daß auch noch bei Feldstärke-Verhältnissen  $E$  von 3:1 bis 2:1 noch brauchbarer Empfang möglich ist und noch keine Übermodulation durch Träger-Schwund entsteht. Bild 6.16 zeigt die für die verschiedenen Feldstärke-Verhältnisse als zulässig ermittelten Modulationsgrade.[1]

Die Gleichwellen-Netze wurden mit Modulations-Graden zwischen 30% und 50% betrieben, wodurch sich ein Feldstärke-Verhältnis  $E$  zwischen 1:2 und 1:3 als Grenze für das Verwirrungsgebiet ergab.

#### 6.4.2 Phasenlage des Modulations-Signals

In der Praxis kann es vorkommen, daß bei exakt übereinstimmenden Laufzeiten für das Modulations-Signal an einem der Sender die Polarität dieser Spannung vertauscht wird, wodurch hierfür eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$  entsteht. In einem solchen Fall treffen die Minima des Trägers mit Maxima der Modulations-Spannung zusammen, wie in Bild 6.17 rechts zu erkennen ist.[1]

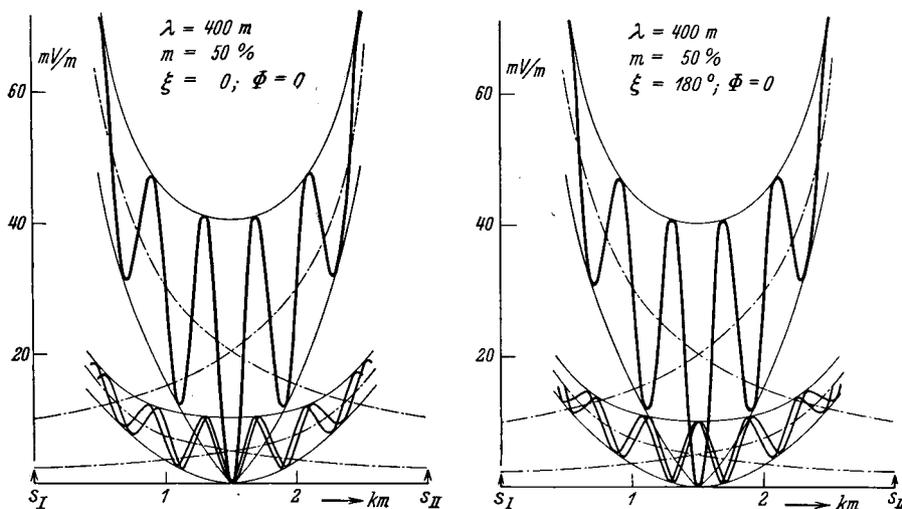


Bild 6.17: Interferenz von Träger- und Seitenfrequenzen. Das Modulations-Signal ist hier eine Sinus-Spannung. Links ist die Phasenlage der Modulations-Signale  $\xi = 0^\circ$ . Rechts ist die Phasenlage  $\xi = 180^\circ$ . Hier fallen Minima des Trägers mit Maxima der Seiten-Schwingungen (in etwa) zusammen, wodurch starke Übersteuerung entsteht. Die Phasenlage der Träger ist mit  $\Phi = 0^\circ$  angenommen.

Bei einem Modulationsgrad von  $m = 50\%$  ist somit nur dann ein Feldstärke-Verhältnis  $E = 3$  zulässig, wenn die Phasenlage der Modulations-Signale  $\xi = 0^\circ$  beträgt.

## 6.5 Kleinst-Gleichwellen-Netz

Die extremen Feldstärke-Schwankungen, die sich bei 2 Gleichwellen-Sendern im Verwirrungsgebiet ergeben, treten nicht mehr auf, wenn mehr als 2 Sender beteiligt sind. Wo sich die Feldstärken von 2 Sendern noch exakt löschen können, passiert das nicht mehr (so häufig), wenn mehr Sender beteiligt sind. Entsprechende Untersuchungen wurden im RPZ durchgeführt.[2]

Es wurde ein Fall untersucht, bei dem 16 Gleichwellen-Sender angenommen wurden. Hierbei wurde der kleinste Abstand zu 4,25 km angenommen, Bilder 6.18 und 6.19.

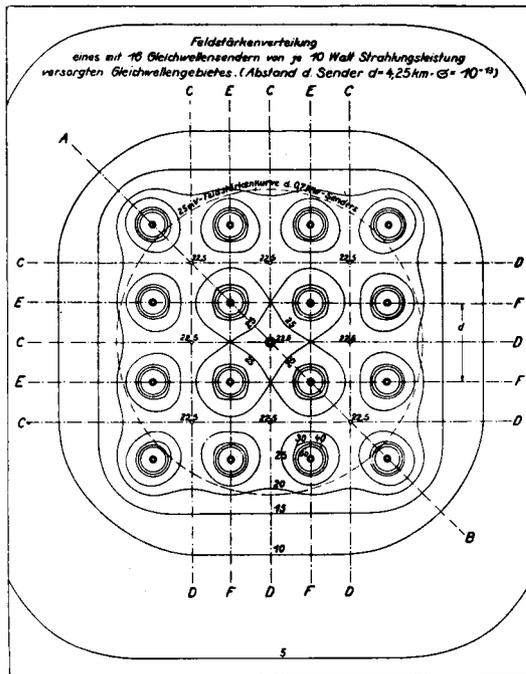


Bild 6.18: Modell eines Gleichwellen-Netzes aus 16 Sendern kleiner Leistung (je 10 W)

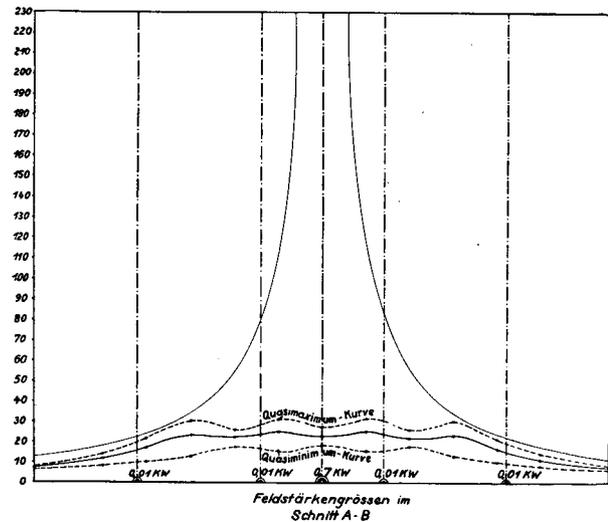


Bild 6.19: Quasi-Maximum und Quasi-Minimum der Feldstärke entlang der Schnittlinie A — B und Vergleich mit der Feldstärke eines 700 W Senders, der ersatzweise das gleiche Gebiet versorgen könnte.

Es ergeben sich dabei folgende Vorteile.

- Die Abnahme der Feldstärke ist wegen der kurzen Entfernung zwischen Sender und Empfänger nicht so stark, so daß man mit Sendern kleiner Leistung auskommt.
- Bei kleiner Leistung genügt auch eine einfache Sende-Antenne.
- Die Laufzeit-Unterschiede der einzelnen Signale sind nur sehr klein, weshalb dann dafür die Übertragungsfunktion des Funk-Kanals innerhalb der Kanal-Bandbreite kein Minimum hat, siehe Bilder 6.8 und 6.9 (Seite 16).
- Die (mittleren) Schwankungen der Feldstärke (Quasi-Maximum bzw. Quasi-Minimum) sind sehr viel geringer geworden. Es kann dann ein höherer Modulationsgrad verwendet werden.

Die Nachteile zur damaligen Zeit waren jedoch erheblich, da jeder Sender eine Programm-Zuführung und eine Leitung zur Synchronisation benötigt.<sup>||6</sup>

In Berlin wurde in der Zeit nach 1937 ein solches Klein-Gleichwellen-Netz mit 5 Sendern erprobt. Bild 6.20 zeigt den (damaligen) Stadtplan mit den Senderstandorten und den gemessenen Kurven konstanter Feldstärke der einzelnen Sender (D, W, B, K, J).

<sup>||6</sup>Mit heutiger Technik könnte das Programm über Satellit zugeführt werden, was die Rundfunkanstalten tatsächlich auch tun. Die Synchronisation könnte über GPS erfolgen, was bei DAB und DVB-T Gleichwellen-Netzen auch so erfolgt.

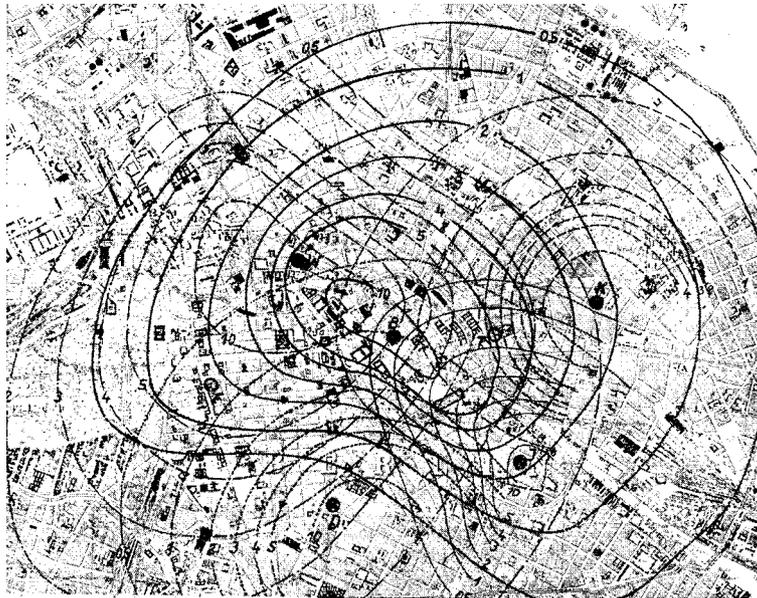


Bild 6.20: Das Versuchs-Gleichwellen-Netz Berlin mit 5 Sendern der Leistung 0,5 W bis 3 W; Dargestellt ist ein Ausschnitt des Stadtplans worauf Berlin-Mitte zu erkennen ist.

„Wie durch zahlreiche Versuchsfahrten mittels Empfangswagen festgestellt wurde, ergab sich im Versorgungsgebiet der Sender überall ein sehr guter Empfang.“ [1]

## 7 Die Situation bei FM

Bei UKW-FM gibt es keine Single-Frequency-Netze. Dies ist begründet mit der Eigenschaft der Frequenz-Modulation (FM), die mit Schwellen-Effekt (Capture-Effekt) bezeichnet wird. Danach wird die FM-Schwingung mit der geringeren Amplitude (auf der gleichen Frequenz) gegenüber der FM-Schwingung mit der größeren Amplitude unterdrückt. Das Maß dafür ist das Capture-Ratio  $CR$ , das insbesondere von den Begrenzer-Eigenschaften des ZF-Verstärkers und des Diskriminators des Empfängers abhängt. Werte von  $CR < 0,5$  dB sind erreichbar, was bedeutet, daß der um 0,5 dB schwächere FM-Sender im demodulierten Signal um 30 dB schwächer erscheint.[17]

In bergigen Gegenden tritt häufig die Situation auf, daß nicht nur ein Sender, sondern auch noch starke Echos von diesem Sender empfangen werden. (Dies entspricht im Prinzip der Situation in einem Gleichwellen-Netz.) Die Störungen die dadurch im demodulierten Signal entstehen, sind meist recht unangenehm und können bezogen auf Musik etwa mit „Papier im Klavier“ beschrieben werden. Das ist der Grund dafür, daß es keine FM Gleichwellen-Netze gibt.

Das Capture-Ratio der FM ist aber auch der Grund, weshalb FM-Sendungen praktisch kaum gestört werden können. Ist das FM-Signal stärker als der Störer, wird dieser unterdrückt. Ist allerdings der Störer stärker, wird das FM-Signal unterdrückt. Je nach Empfangs-Situation kann der Empfang so zwischen verschiedenen Programmen hin und her springen.

## 8 Digitales Gleichwellen-Netz

Heute nutzen das Digital-Radio (DAB (*digital audio broadcast*), DVB-T (*digital video broadcast terrestrial*), DRM (*digital radio mondiale*)), sowie auch WLAN usw. Gleichwellen-Netze, genannt SFN (*single frequency network*).

Wenn auch die Frequenzen dabei i.a. höher sind und die Senderabstände kleiner, gibt es physikalisch gesehen auch hier die „Verwirrungs-Gebiete“, denn die Physik ändert sich nicht dadurch, daß digital übertragen wird.

Aber bei digitalen Übertragungen kann man — im Unterschied zu analogen Übertragungen — den störenden Effekt eines „Verwirrungs-Gebietes“ kompensieren und damit unschädlich machen.

### 8.1 Digital-Übertragung

Um zu verstehen, weshalb eine Digitalübertragung weniger stör anfällig ist, sollen hier einige Prinzipien dargestellt werden, die hierbei eine Rolle spielen.

In Bild 8.1 ist zunächst die grundsätzliche Struktur einer Digitalübertragung dargestellt.

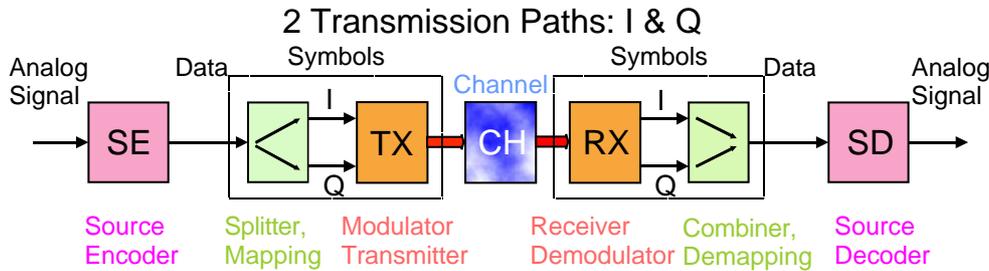


Bild 8.1: Blockschaltbild einer Digital-Übertragung.

Das analoge Signal durchläuft als erstes einen Quell-Codierer (*source encoder*), wo es digitalisiert wird. Im einfachsten Fall ist das für ein Audio-Signal nur ein Analog/Digital-Wandler, wo es mit 44,1 KHz Abtastrate und 16 Bit Auflösung (32768 Amplitudenstufen) aufgelöst wird. Enthält der Quell-Codierer auch noch die Reduktion von Redundanz und Irrelevanz, d.h. werden die Teile aus dem Signal entfernt, die der Normal-Hörer (ohne die „goldenen Ohren“) nicht wahrnimmt, reduziert sich der Datenstrom je nach Audio-Codierung (MP3, AAC, CELP usw.) um bis zu einem Faktor von ca. 100.

Diesen Netto-Datenbits werden nun zum Zwecke der Fehlerschutz-Codierung und der Anpassung an die (physikalischen) Eigenschaften des Übertragungs-Kanals mit Hilfe mathematischer Algorithmen Kontroll-Bits hinzugefügt. Die daraus entstandenen Brutto-Datenbits werden dann in zwei gleiche Datenströme aufgespalten, wobei jeweils mehrere Bits zu Symbolen zusammengefaßt (abgebildet, *mapping*) werden. Wie viele Bits jeweils zu Symbolen zusammengefaßt werden können, hängt davon ab, wie „schwierig“ der Übertragungs-Kanal ist. Es entstehen die Symbol-Ströme *I* und *Q*. Die Form der Symbole ist hier noch rechteckförmig.

Anschließend werden die Symbole durch (digitale) Filterung verrundet, damit die notwendige Übertragungs-Bandbreite minimiert wird. Als Beispiel für solche Symbolformen zeigt Bild 8.2 die bei GSM und bei DECT verwendeten Symbolformen. Aus dem ursprünglich rechteckförmigen Datenimpuls werden verrundete Symbole. Je geringer die Bandbreite wird, um so breiter wird das Symbol.

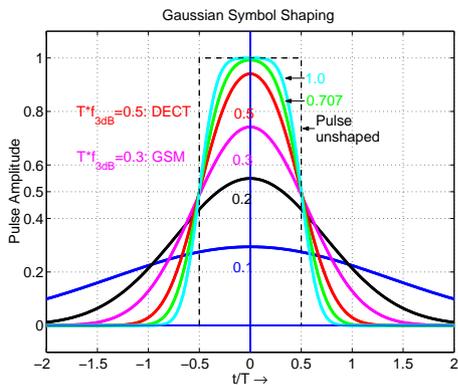


Bild 8.2: GSM Symbolformen

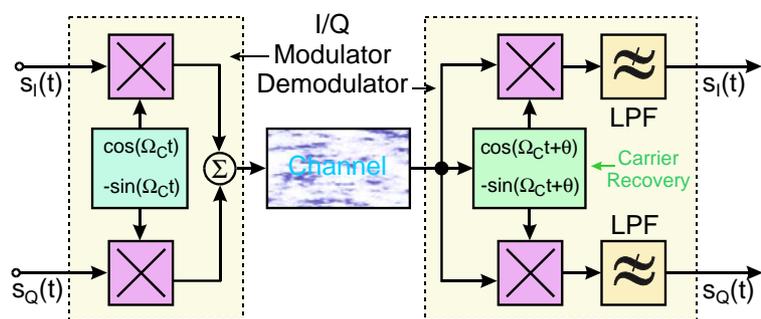


Bild 8.3: Blockschaltbild des I - Q Modulators und Demodulators

Danach modulieren die verrundeten Symbole je einen Cosinus- und einen Sinus-Generator im Sender (I/Q Modulator), Bild 8.3, womit sie zum HF-Signal werden und über den Kanal übertragen werden können. Welche Modulations-Art hier gewählt werden kann, bestimmen u.a. die (physikalischen) Eigenschaften von Übertragungs-Kanal und Sender-Hardware.

Auf der Empfänger-Seite wird eine entsprechende Kette von der anderen Seite her durchlaufen bis am Ende wieder ein analoges Signal erscheint. Allerdings hat der digitale Empfänger folgende zusätzlichen Probleme zu lösen, die hier nur pauschal angedeutet werden können.

- Frequenz und Phasen der im Sender zur Modulation verwendeten HF-Träger muß aus dem Empfangssignal extrahiert werden (*carrier recovery*).
- Die übertragenen Symbole müssen trotz der Störungen, die im Übertragungs-Kanal entstehen, korrekt erkannt werden.
- Die Rahmenstruktur der Daten muß erkannt werden, woraus der Takt für die Symbole und die Daten gewonnen werden muß.

Diese zusätzlichen Aufgaben des digitalen Empfängers bedingen einen Mehraufwand, der mit dem eigentlichen Prozeß von Demodulation und Decodierung vergleichbar ist.<sup>††1</sup>

## 8.2 Digital-Übertragung auf dem Funk-Kanal

Der Funk-Kanal hat als Übertragungs-Strecke die unangenehme Eigenschaft, daß er sich beständig in zufälliger Weise ändert. Zusätzlich bietet er keinen Schutz gegen Störungen (Fremdstörungen, Echos usw.). Im Blockschaltbild, Bild 8.4, ist dies hervorgehoben.

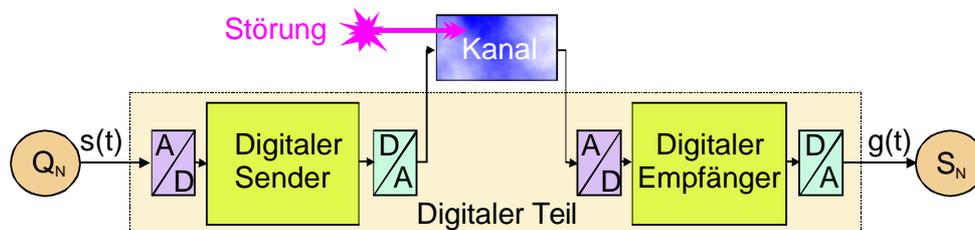


Bild 8.4: Blockschaltbild einer Digital-Übertragung mit Hervorhebung der Störung auf dem Übertragungsweg.

Bei Blockschaltbildern wird stets der Teil des Systems hervorgehoben, dessen Eigenschaften diskutiert werden sollen. Hier also sind es die Störungen auf dem Funk-Kanal. Folgendes ist zu beachten.

- Die moduliert übertragenen Symbole stellen ein analoges Zeitsignal dar, denn jede band-begrenzte Zeitfunktion ist ein analoges Signal.
- Die Störungen verändern bzw. verzerren die Form der Symbole. Die Aufgabe des Empfängers besteht darin, trotz der Verzerrungen die richtigen Symbole zu erkennen.

Besonders kritisch sind die Echos, die im Funk-Kanal entstehen. Es gibt hierfür 2 Strategien, wie die Wirkung dieser Echos kompensiert werden kann, Bild 8.5.

1. Entzerrung der Symbole bei „Einträger-Verfahren“ durch Einfügen von Test-Sequenzen.  
Dies ist das modernere Verfahren und wird z.B. beim GSM Mobilfunk angewendet.
2. Unterdrückung des durch Echos gestörten Teils beim „Mehrträger-Verfahren“ (OFDM bzw. COFDM *coded orthogonal frequency division multiplex*).  
Dies ist das historisch älteste Verfahren<sup>††2</sup> und findet z.B. bei DAB, DVB-T, DRM, WLAN Anwendung.

<sup>††1</sup>Bei der Definition und Normung eines digitalen Übertragungs-Systems durch die ITU wird daher i.a. nur die Senderseite beschrieben. Auf der Empfänger-Seite herrscht daher „freies Spiel“ der Ideen (und Patente).

<sup>††2</sup>Langsam morsen und warten bis (halbwegs) der eingeschwingene Zustand erreicht ist, wurde bereits beim ersten Transatlantik-Kabel 1858 angewendet. „Viel-Träger“ entspräche mehreren (parallelen) Transatlantik-Kabeln.

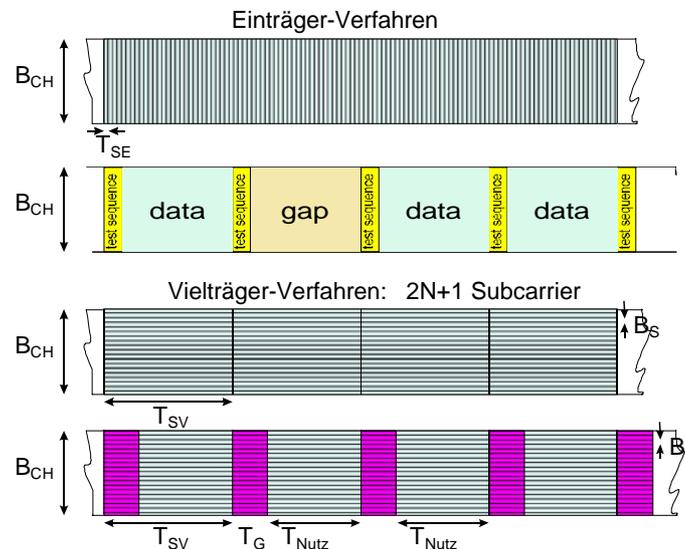


Bild 8.5: Struktur des Symbolstromes auf dem Funkweg. **Oben:** Einträger-Verfahren; Die Symbole belegen die gesamte Kanalbandbreite  $B_{CH}$  und sind zeitlich kurz  $T_{SE}$ . Zur „Vermessung“ des Funkkanals sind periodische „Testsequenzen“ eingefügt. In der Lücke (*gap*) der regulären Daten werden Informationen zur Synchronisation des Empfängers für alternative Frequenzen übertragen. **Unten:** Mehrträgerverfahren; Die Symbole sind viel länger als die Echos und haben nur eine geringe Bandbreite  $B_S$ . Frequenzmäßig werden viele Symbole auf Unterträgern (*subcarrier*) parallel übertragen. An der Grenze zwischen den Symbolen ist ein „Schutzintervall“ (*guard interval*)  $T_G$  vorgesehen, das so lange sein muß, wie das längste Echo dauert. Dieser Teil wird im Empfänger nicht ausgewertet.

In den Jahren 1997/98 wurde bei der Telekom ein eigenes System für DRM entwickelt und an einem Sender in Berlin Köpenick (810 KHz, 400 W) praktisch erprobt. Als Antenne diente einer der damals noch vorhandenen Masten des ehemaligen MW-Senders. Dieses DRM-System arbeitete mit einem Einträgerverfahren. Im Rahmen der internationalen Koordinierung für DRM konnte sich das Einträgerverfahren aus diversen Gründen nicht durchsetzen, u.a. weil nach dem Stand der damaligen Digitaltechnik der Aufwand für die notwendige Entzerrung als zu hoch betrachtet wurde. Die Mehrheit wollte lieber COFDM, obwohl wie am Beispiel DAB bereits erkennbar war, die Anforderungen an die Linearität des Senders beim Mehrträgerverfahren besonders hoch sind.

In Bild 8.6 ist die Datenstruktur der Symbole des Einträgerverfahrens noch etwas verdeutlicht.

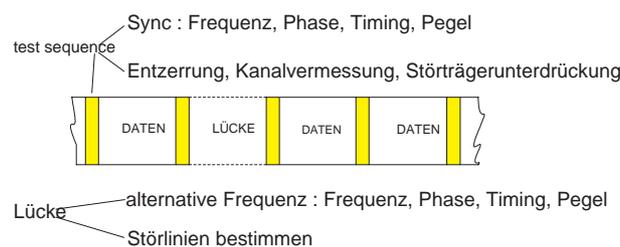


Bild 8.6: Struktur des Symbolstroms beim Einträgerverfahren für DRM.

Ein besonderes Feature ist die im Datenstrom vorgesehene „Lücke“. In dieser Zeit kann sich der Empfänger auf eine der alternativen Frequenzen kurzzeitig abstimmen und alle notwendigen Parameterwerte messen. Damit ist es möglich, ohne Unterbrechung der Audio-Wiedergabe auf eine alternative Frequenz auszuweichen, wenn die Übertragung auf der bisherigen Frequenz zu stark gestört ist. Damit sollte dem (grundsätzlichen) Problem aller Digitalübertragungen vorgebeugt werden, nämlich, daß die Wiedergabe entweder perfekt ist oder aber aussetzt, wenn die Störungen zu groß werden. Dieses Feature ist speziell für die Kurzwelle, wo Gleichwellen-Sender nicht üblich sind, und für Mittelwelle bei Nachtausbreitung von Interesse.

Beim Mehrträgerverfahren ist eine solche Lücke nicht vorgesehen. Speziell bei DRM macht sich dies

dann durch Aussetzer bemerkbar. Dies ist eine „neue Art“ von Störungen der Wiedergabe, an die sich die Hörer noch nicht gewöhnt haben.

Bei DAB und bei DVB-T existieren Gleichwellen-Netze (SFN, *single frequency network*). Die Störungen durch Echos bzw. durch die anderen Sender dieses SFN fallen zeitlich gesehen jeweils in die Guard-Intervalle und werden damit unwirksam. Deshalb gibt es hier praktisch gesehen kein „Verwirrungs-Gebiet“ im klassischen Sinne wie bei den früheren AM Gleichwellen-Netzen.

## 9 Störsender und Einsprechen

Bis zum Ende des „eisernen Vorhangs“ wurden Sendungen auf Mittel- und Kurzwelle im Ostblock gestört. Hier interessiert aber nur die Technik des Störens, die allerdings auch schon im 2. Weltkrieg angewendet wurde. Als Beispiele werden die Störmaßnahmen der DDR gegen den RIAS betrachtet.[12]

Eine spezielle Form des Störens war das (verständliche) Einsprechen, wo in Sprechpausen von Nachrichtensendungen durch Einsprechen von „Feind-Sendern“ Kommentare wie „alles Lüge“ zu hören waren.[13] [14] Diese im 2. Weltkrieg angewendete Methode ist heute nur noch von technischem Interesse.

### 9.1 Leistungsbilanz

Der Störsender will die Informationsübertragung eines AM-Rundfunksenders auf der Empfangsseite unkenntlich machen. Da die Information bei AM in den Seitenbändern übertragen wird, muß die Störleistung hier maximal werden.

#### 9.1.1 Leistungs der AM

Zunächst wird die Leistung eines AM-Rundfunksenders betrachtet.[17]

Für Cos-förmiges Nachrichtensignal ergeben sich im Zeit- und Frequenz-Bereich die Verhältnisse gemäß Bild 9.1. Man muß dabei unterscheiden zwischen der *momentanen* Leistung und der *mittleren* Leistung. Beide Werte sind bei der Dimensionierung der Senderendstufe zu berücksichtigen.

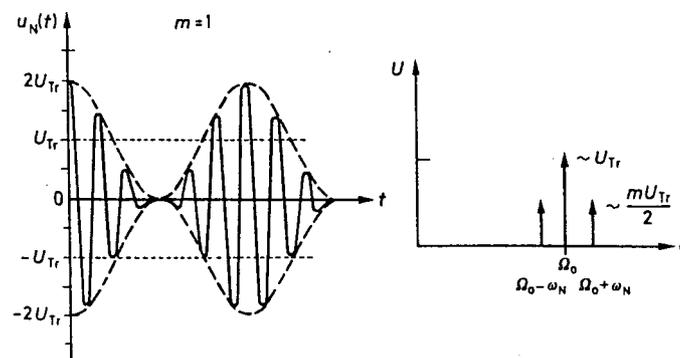


Bild 9.1: Zur momentanen und mittleren Leistung der AM

Die momentane Leistung entnimmt man dem Zeitverlauf der AM. Sie schwankt zwischen einem maximalen und einem minimalen Wert, der vom Modulationsgrad  $m$  abhängt. Für die Dimensionierung ist der maximale Wert der Leistung maßgeblich.

$$P_{\max}(m) \sim [(1 + m)\hat{U}_C]^2 \quad (9.1)$$

Für  $m = 1$  ergibt sich die Spitzen-Leistung  $P_{sp}$

$$P_{sp} = P_{\max}(1) \sim 4 \cdot \hat{U}_C^2 \quad \text{AM Spitzen-Leistung} \quad (9.2)$$

Würde die Spitzenleistung überschritten, könnte der Sender beschädigt werden. Daher besteht auch senderseitig ein wichtiger Grund um Übermodulation  $m > 1$  zu vermeiden.

Die mittlere Leistung  $\bar{P}$  kann man nach dem *Parseval'schen Theorem* der Spektralverteilung entnehmen.

$$\bar{P}(m) \sim \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \frac{\hat{U}_C^2}{2} \quad (9.3)$$

Für  $m = 1$  ergibt sich ein Maximalwert der mittleren Leistung zu

$$\bar{P}_{\max} \sim \frac{3}{4} \hat{U}_C^2 \quad \text{maximale mittlere Leistung der AM} \quad (9.4)$$

Damit wird das Verhältnis von Spitzenleistung zu maximaler mittlerer Leistung

$$\frac{P_{\text{sp}}}{\bar{P}_{\max}} = \frac{16}{3} = 5,333 \dots \quad (9.5)$$

Dies bedeutet einen maximalen Crestfaktor  $C_{F_{\max}}$  der AM, definiert als das Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert der Spannung, von

$$C_{F_{\max}} = \frac{\sqrt{P_{\text{sp}}}}{\sqrt{\bar{P}_{\max}}} = \frac{2 \cdot \hat{U}_C \sqrt{2}}{\sqrt{3/2} \cdot \hat{U}_C} = \sqrt{\frac{16}{3}} = 2,309 \rightsquigarrow 7,269 \text{dB} \quad \text{Crestfaktor der AM (m = 1)} \quad (9.6)$$

Aus der Spektralverteilung sieht man zudem, wie sich die mittlere Leistung auf die Träger-Leistung und die Seitenband-Leistung aufteilt.

In den Seitenbändern steckt die Information. Die betreffende Leistung ( $P_{\text{SB}} \sim (m\hat{U}_C)^2/2$ ) muß vom Modulations-Verstärker aufgebracht und der Senderendstufe (dem eigentlichen Modulator im engeren Sinne) zur Verfügung gestellt werden.

Im Träger steckt eine viel größere Leistung ( $P_C \sim \hat{U}_C^2$ ) als in den Seitenbändern. Für das Verhältnis von Träger-Leistung zu Seitenband-Leistung folgt in Abhängigkeit vom Modulationsgrad:

$$\frac{\bar{P}_C}{\bar{P}_{\text{SB}}} = \frac{2}{m^2} \geq 2 \rightsquigarrow \frac{\text{Träger-Leistung}}{\text{Seitenband-Leistung}} \geq 2 \quad (9.7)$$

Die maximale Seitenband-Leistung ist bei AM gleich der halben Träger-Leistung.

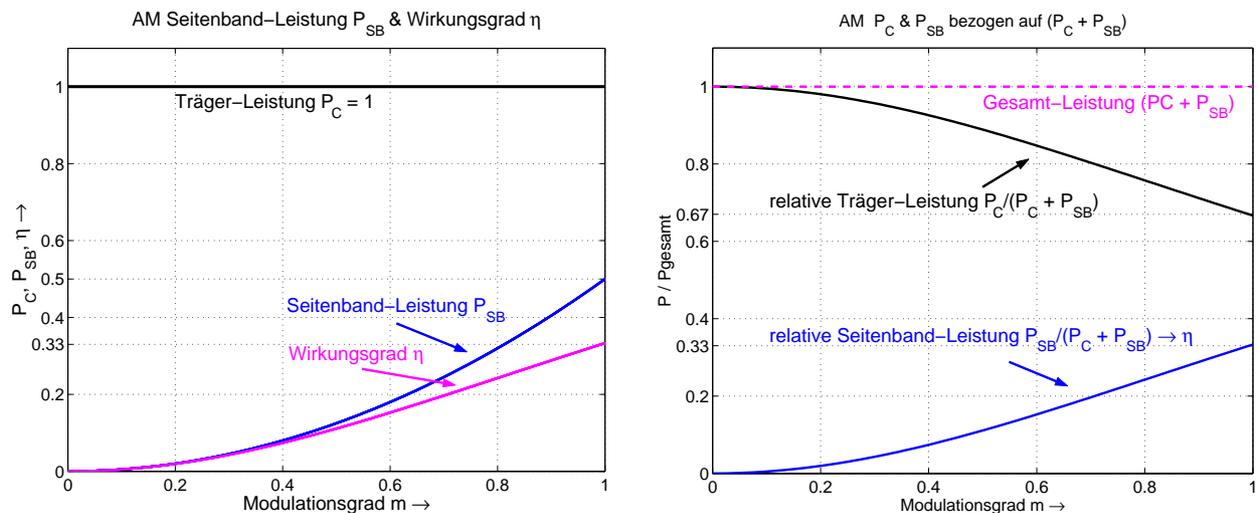


Bild 9.2: Seitenband-, Träger-Leistung und Wirkungsgrad der AM, absolut und bezogen auf die (gesamte) abgestrahlte Leistung als Funktion des Modulationsgrades  $m$  (normierte Darstellung)

Bei AM steckt somit **maximal 1/3 der gesamten abgestrahlten Leistung in den Seitenbändern**, Bild 9.2 (rechts). Bei einem mittleren Modulationsgrad  $\bar{m} = 30\%$  beträgt die Seitenband-Leistung nur weni-

ge % der Träger-Leistung. Auch aus diesem Grunde wird senderseitig das NF-Signal komprimiert, so daß größere Werte des mittleren Modulationsgrades  $\bar{m}$  möglich sind.<sup>††1</sup>

Die abgestrahlte Trägerleistung trägt nichts zur Informationsübertragung bei. Für die *Informationsübertragung* ist diese Leistung nutzlos. Die Trägerleistung muß jedoch für AM zur Verfügung gestellt werden, da man bei der AM (aus Gründen der Kompatibilität) die Hüllkurven-Demodulation anwendet. Der Betrieb von AM-Sendern ist daher unnötig teuer. Im AM-Empfänger wird jedoch die Größe des Trägers für eine Verstärkungsregelung (*Schwund-Regelung*) und zur „Feldstärke-Anzeige“ genutzt<sup>††2</sup>.

## 9.2 Optimierung der Störwirkung

Die Gesichtspunkte, die dabei zu beachten sind, können mit den folgenden Stichpunkten beschrieben werden.

- Die gesamte Störleistung soll sich auf die Seitenbänder konzentrieren.

Da im Träger keine Information übertragen wird, sollte der Störsender nur Seitenbänder ausstrahlen. Technisch heißt das, daß ein Doppel-Seitenband-Sender (DSB-Sender) zu verwenden ist. Ein Prinzipschaltbild für eine solche Sender-Endstufe, bei der die Modulation im Gegentakt und die hochfrequente Trägerschwingung im Eintakt zugeführt wird, zeigt Bild 9.3.[1]

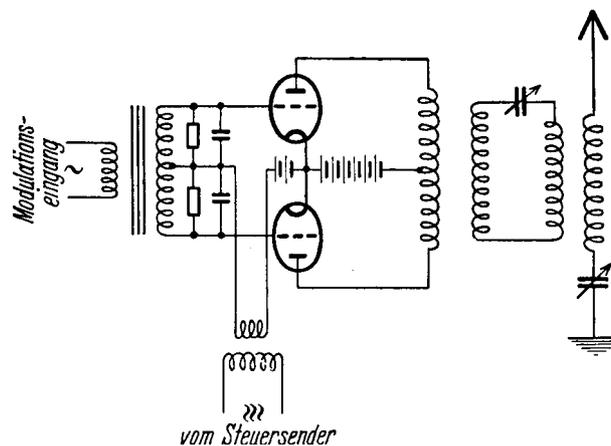


Bild 9.3: Erzeugung von Doppel-Seitenband (DSB) Modulation mit einer Gegentaktschaltung mit Röhren

Dieser Gegentakt-DSB-Modulator ist kein üblicher AM-Sender, sondern erfordert eine Spezialanfertigung. Aufgrund des notwendigen Arbeitspunktes kann nur ein relativ geringer Wirkungsgrad erreicht werden.

In moderner Technik mit Hilfe der *envelope elimination and restoration* (EER) Technik könnte jedoch auch ein „normaler“ AM-Sender verwendet werden, wenn dieser zur Digitalübertragung nach dem DRM (*Digital Radio Mondiale*) Standard geeignet ist, Bild 9.4. Hiermit lassen sich dann Wirkungsgrade von ca. 94% erreichen.

Bei den Störsendern gegen den RIAS handelte es sich dagegen „nur“ um AM-Sender einfacher Bauart (ohne Quarz) mit kleinerer Leistung (100 W bis 2 KW).[12]

- Die Stör-Modulation muß so beschaffen sein, daß Sprache total verdeckt wird.

Von Partys her ist der Effekt bekannt, daß man einem Gespräch folgen kann, auch wenn rings herum lautstark andere Gespräche geführt werden. Das „Ohr“ bzw. das Gehirn ist in der Lage, auch trotz „Gebrabbel“ ringsumher die gewünschte Information herauszufiltern.

Hierfür ein geeignetes Stör-Modulations-Signal zu finden, ist eine der schwierigeren Aufgaben.[13] [14]

<sup>††1</sup>Der mittlere (bzw. effektive) Modulationsgrad ist stets kleiner als  $\bar{m} < 1/C_{F_{NF-Signal}}$ , weil Übermodulation ( $m > 1$ ) vermieden werden muß.  $C_{F_{NF-Signal}}$  ist der Crest-Faktor des NF-Signals, der mit Hilfe des OPTIMOD-Verfahrens stark reduziert werden kann.

<sup>††2</sup>Bei Röhrenempfängern erfolgte diese Anzeige mit Hilfe eines (grün leuchtenden) *magischen Auges*.

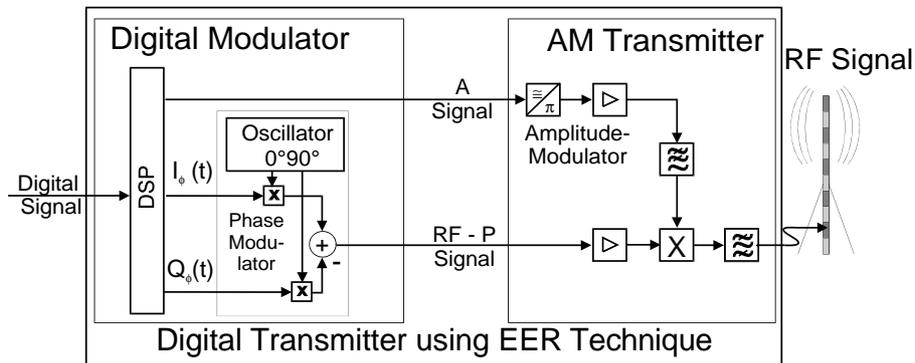


Bild 9.4: Erzeugung von Doppel-Seitenband (DSB) Modulation mit einem EER-Sender

Andererseits entnimmt man Bild 2.1 (Seite 2) daß die Störwirkung bei 1 bis 2 KHz ein Maximum erreicht, während Frequenzen unterhalb 1 KHz sehr viel weniger stören.

Die Störsender der DDR verwendeten einen Glimmlampen-Generator, der eine sägezahnförmige und damit oberwellenreiche Störmodulation erzeugte. Zusätzlich wurden sie auch noch mit dem Programm des „Berliner Rundfunks“ verzerrt moduliert.

- Die Feldstärke des Störsenders muß am Empfangsort ausreichend groß sein.

Diese Forderung ist nur sehr schwer und nur mit großem Aufwand zu erfüllen, da das gesamte Empfangsgebiet erfaßt werden muß.

Zur Lösung dieses „Problems“ wurden eine Vielzahl von Störsendern kleinerer Leistung eingesetzt, die speziell Gebiete mit größeren Hörerzahlen „versorgen“. Aufgrund des Viermächte-Status für Berlin waren die Störsender außerhalb Berlins aufgestellt.

### 9.2.1 Gegenmaßnahmen des RIAS

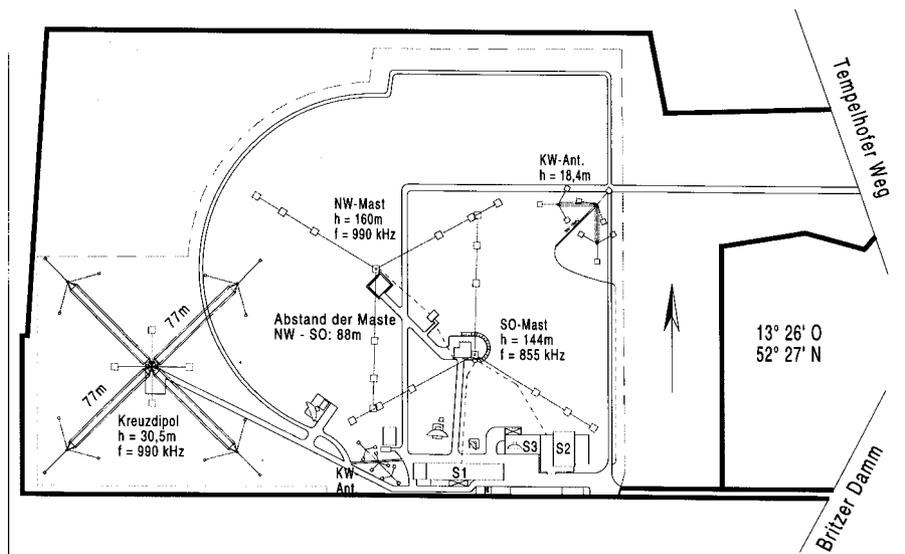


Bild 9.5: Lageplan der RIAS Sendestelle Berlin Britz; Die Turnstyle-Antenne ist hier mit Kreuz-Dipol bezeichnet. Zwischenzeitlich wurde sie abgebaut.

Im Zuge der „Helsinki-Vereinbarungen“ stellte die DDR zum 23.11.1978 die Störsendungen ein. Zum selben Zeitpunkt hatte der RIAS als Gegenmaßnahme eine Turnstyle-Antenne (Steilstrahler) für die Fre-

quenz 990 KHz (RIAS 1) errichtet, Bild 9.5.[12] Diese wurde nachts in Betrieb genommen und konnte mittels Reflexion an der Ionosphäre eine so große Feldstärke erzeugen, daß die Störsender wirkungslos wurden.

### 9.3 Einsprechen auf Mittelwelle

Unter „Einsprechen“ versteht man das verständliche Einsprechen in (Nachrichten-) Sendungen eines Rundfunk-Programms. Dieses war eine Propaganda-Maßnahme im 2. Weltkrieg. Der zum Einsprechen verwendete Störsender durfte dabei keine andersartigen Störungen erzeugen. Daher konnte hierfür kein AM-Sender verwendet werden. Aber auch ein DSB-Sender war hierfür nicht möglich. Aus Bild 9.6 wird ersichtlich, daß DSB zum Einsprechen nur dann möglich wäre, wenn sichergestellt werden könnte, daß die gegenseitigen Phasenlagen der Träger des zu störenden AM-Senders und eines DSB-Einsprech-Senders  $0^\circ$  sind. Bei  $90^\circ$  Phasendrehung zwischen beiden Trägern ergibt sich keine AM, sondern eine PM, womit ein Einsprechen unverständlich würde. Eine starre Phasenbeziehung ist zudem nur möglich, wenn die Frequenzen exakt übereinstimmen.

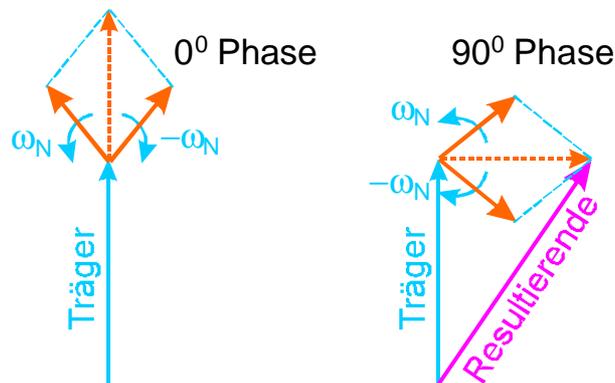


Bild 9.6: Wird ein DSB-Signal (orange Zeiger) zu einem Träger (blauer Zeiger) hinzugefügt, muß dies unter  $0^\circ$  Phase erfolgen, damit eine AM entsteht.

Da aber die Phasenlage der Träger zufällig ist, kann ein DSB-Sender hier nicht verwendet werden.

Wie aus dem Zeiger-Diagramm Bild 9.7 zu erkennen ist, ist zum Einsprechen ein Einseitenband-Sender (SSB, *single side band*) erforderlich.

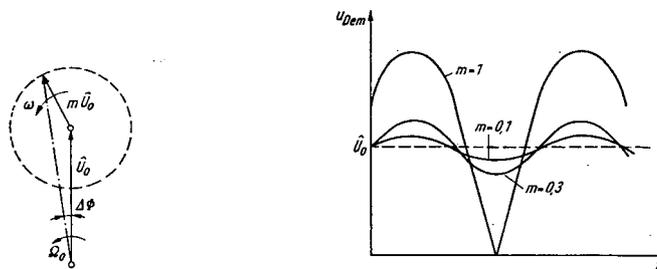


Bild 9.7: Wird ein SSB-Signal zu einem Träger hinzugefügt, entsteht näherungsweise eine AM, die um so geringere nichtlineare Verzerrungen aufweist, je kleiner der resultierende Modulationsgrad wird.

Das demodulierte Einsprechsignal hat einen gewissen Klirrgrad, wie aus Bild 9.7 zu sehen ist. Das spielt jedoch für diese Anwendung keine Rolle. Selbst eine Frequenzabweichung der Trägerfrequenz des Einsprechsenders bis zu 100 Hz macht die eingeprochene Nachricht noch nicht unverständlich.

Als Abwehrmaßnahme gegen Einsprechen wurde die Trägerfrequenz des Rundfunk-Senders mit ca. 10 Hz um ca.  $\pm 500$  Hz gewobelt, wodurch das Einsprechen unverständlich wurde. Das konnte nun aber dadurch wieder umgangen werden, daß der Rundfunk-Sender mit einem abgesetzten Spezial-Empfänger empfangen wurde, der eine automatische Frequenzregelung für seinen Umsetzozillator hatte, wodurch dessen

Frequenz nachgeführt wurde. Durch Mischen der nachgeführten Oszillatorfrequenz mit einem quartzgenauen Signal auf der Zwischenfrequenz des Spezial-Empfängers wurde die gewobbelte Frequenz des Rundfunk-Senders zurückgewonnen und dem Einsprech-Sender als Trägerfrequenz zugeführt.[13] [14]

## Literatur

- [1] Vilbig, F.: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*, Bd.1 & 2, 3.A., Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, 1942 (ebenfalls: 4.A., Leipzig, 1945 & 5./6.A, Frankfurt, 1958/1960)
- [2] Vilbig, F.: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*, 1.A., Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, 1937
- [3] Haigh, J.D.: *Radio Location Techniques*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1960
- [4] C. Lorenz A.G. (Hrsg.): *50 Jahre Lorenz*, Festschrift, 1930
- [5] C. Lorenz A.G. (Hrsg.): *Gleichwellen-Rundfunk*, Technischer Bericht, 1933
- [6] Rein, H; Wirtz, K.: *Radiotelegraphisches Praktikum*, Springer, 1922
- [7] Nesper, E.: *Handbuch der Drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, Springer, 1921
- [8] Hund, A.: *Hochfrequenz-Meßtechnik*, Springer, 1928
- [9] Bahr, H.: *Philips Lehrbriefe* Bd.1, Hüthig, 1982
- [10] *Rundfunk Jahrbuch 1930*, Herausgegeben von der Reichs-Rundfunk-Gesellschaft Berlin, S. 43 — 52, Union Deutsche Verlagsgesellschaft
- [11] Klawitter, G. (Hrsg.): *100 Jahre Funktechnik in Deutschland*, Bd.2 - *Funkstationen und Meßplätze rund um Berlin*, Wissenschaft und Technik, 2002
- [12] Klawitter, G. (Hrsg.): *100 Jahre Funktechnik in Deutschland*, Bd.1 - *Funksendestellen rund um Berlin*, Funkverlag Hein, 2004
- [13] Meinel, E.: *Einige Sonderfälle der deutschen Funkpeiltechnik im Rundfunkkrieg des 2. Weltkrieges*, aus Horstmann, B. (Hrsg.): „Funkpeilen, gestern — heute — morgen; Maximilian Wächtler 80 Jahre“, Schrift der Dr. Wächtler GmbH, Hamburg,1980“, pp. 109 — 117
- [14] Trenkle, F.: *Die deutschen Funkstörverfahren bis 1945*, AEG-Telefunken, Ulm, o.J. (ca. 1981)
- [15] Reimers, U.: *Digitale Fernsehtechnik*, Springer, 1995
- [16] Carlson, O.: *Frequency and Network Planning for Terrestrial Digital Sound and Television Broadcasting*, WRAP International AB, Växjö Sweden, 2000
- [17] [www.diru-beze.de](http://www.diru-beze.de) Hier die Vorlesungsskripte zu: „Fourier-Transformation“, „Amplituden-Modulation“, „Einseitenband- und Restseitenband-Modulation“, „Modulation und Rauschen“, „Einführung in Digitale Funksysteme“, „Funk-Kanal“, „Basisband-Signale“, „Vielträger-Modulation“, „Faltungscodes“, „EER-Technik“. Weitere Literaturangaben sind bei den einzelnen Skripten zu finden.