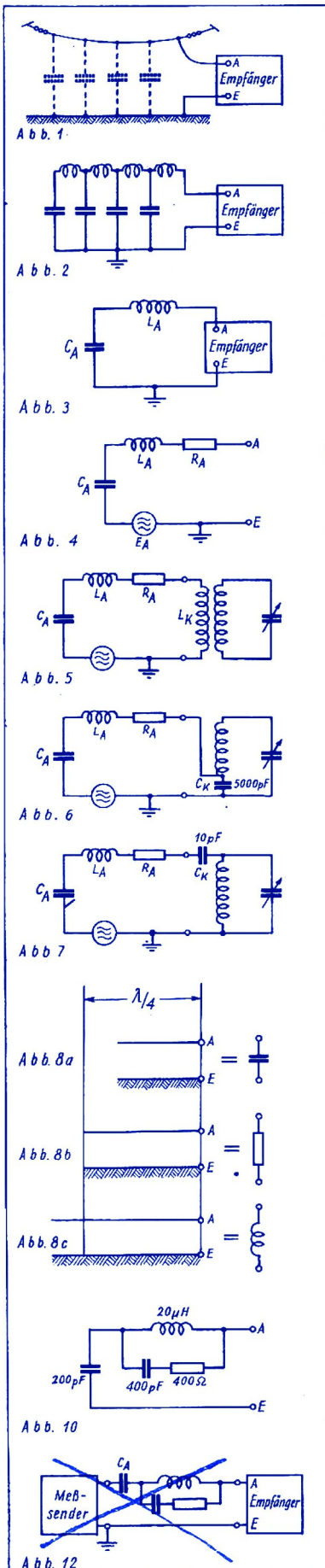


Antennenkreis und künstliche Antenne



Jede Antenne besitzt Induktivität, Kapazität und ohmschen Widerstand. Ein gerade ausgespannter Draht, also auch der Antennendraht in Abb. 1, hat eine bestimmte Selbstinduktion. Ferner besteht von jedem Punkt des Drahtes eine Kapazität nach Erde. Der Antennendraht kann daher zunächst nach Abb. 2 durch eine Leitung mit verteilten Induktivitäten und Kapazitäten ersetzt werden. Um ihre Wirkung auf den Empfängereingang darzustellen, werden sie dann nach Abb. 3 in eine Spule L_A und einen Kondensator C_A konzentriert angenommen.

Antenneneigenschaften

Der Widerstand der Antenne setzt sich zusammen aus dem ohmschen Verlustwiderstand R und dem Strahlungswiderstand R_S , der ihre Abstrahlungseigenschaften für Hochfrequenz kennzeichnet. Der Verlustwiderstand ist durch gute Isolation, einwandfreien Aufbau und niedrige Übergangswiderstände klein zu halten. Der Nutz- oder Strahlungswiderstand R_S soll zur Erzielung guter Empfangsleistungen möglichst groß sein und beträgt formelmäßig

$$R_S \approx 1600 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2$$

Darin ist h die elektrisch wirksame Antennenhöhe. Sie ist stets geringer als der tatsächliche Abstand vom Erdboden, weil benachbarte Gebäudeteile die wirksame Höhe stark herabsetzen. Nach der Formel ist der Nutzwiderstand um so größer, je höher die Antenne und je kürzer die Wellenlänge ist. Für Mittelwellen beträgt R_S nur wenige Ohm und steigt bei Kurzwellen auf mehrere 100 Ohm an. Dieser hohe Nutzwiderstand ist mitbestimmend für den guten Fernempfang von kurzen Wellen. R und R_S bilden zusammen den Antennenwiderstand R_A .

Die von der Antenne aufgenommene HF-Spannung wirkt wie ein ebenfalls in Reihe liegender Generator mit der Spannung E_A . Mit R_A und C_A ergibt sich das vollständige Antennen-Ersatzschaltbild (Abb. 4).

Antennenkreis und Antennenkopplung

Abb. 4 stellt nur das Schaltbild der Antenne selbst dar. Durch Anschluß des Empfängers wird erst der eigentliche Antennenkreis gebildet und dessen Spannung über die Antennenkopplung auf den folgenden Kreis übertragen. Praktisch werden heute drei Arten von Antennenkopplungen angewandt.

Induktive Antennenkopplung

Zwischen Antenne und Erde (Abb. 5) liegt eine induktiv mit dem nächsten Kreis gekoppelte Spule L_K . Der Antennenkreis wird aus $C_A-L_A-R_A-L_K$ gebildet. Bei den heutigen Empfängern wird die Eigenfrequenz dieses Kreises in Richtung auf langsame Frequenzen aus dem Empfangsbereich herausverlegt. Die Spule L_K wird dann ziemlich groß. Fällt die Antennenresonanz in den Abstimmbereich, so schlagen Sender dieser Frequenz auf einem großen Teil der

Skala durch. Trotz großer Spule L_K darf die Kopplung zum ersten Abstimmkreis nur lose sein, sonst wird die Antennenkapazität C_A in diesen Kreis hineintransformiert und verstimmt ihn beträchtlich.

Kapazität am Fußpunkt

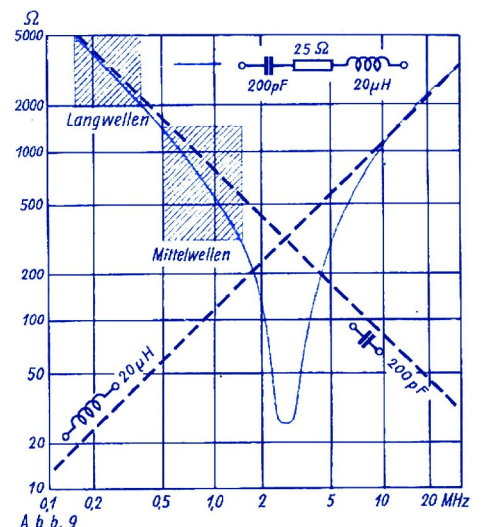
Der Antennenkreis ist kapazitiv (Abb. 6) über den zu beiden Kreisen gehörenden Kondensator C_K gekoppelt. C_K wirkt im Abstimmkreis als Verkürzungskondensator und muß deshalb groß gegenüber dem Drehkondensator sein (≥ 5000 pF), damit der Bereich nicht eingengt wird. Die Antenne liegt parallel zu diesem Kondensator und hat daher nur geringen Einfluß auf die Abstimmung. Die Verstimmung durch verschiedene große Antennen ist unbedeutend.

Kapazitive Kopplung am Scheitel

Die Antenne (Abb. 7) wird über den Kondensator C_K direkt mit dem Abstimmkreis gekoppelt. Um die Verstimmung gering zu halten, muß C_K klein sein (5 ... 20 pF). Der kapazitive Widerstand von C_K wird für hohe Frequenzen geringer. Sie werden deshalb besser auf den Kreis übertragen. Die Schaltung ist daher für Lang- und Mittelwellen ungünstig und wird vorwiegend für kurze Wellen angewendet. Der Einfluß des Antennenkreises auf den ersten Abstimmkreis muß durch lose Kopplung immer möglichst gering gehalten werden, damit verschiedene große Antennen die Abstimmung wenig beeinflussen und Gleichlauf und Skaleneichung erhalten bleiben.

Antennennachbildung

Bei Empfängeremessungen und Abgleicharbeiten muß das Antennenschaltbild 4 nachgebildet werden, damit sich die gleichen Verhältnisse wie beim Betrieb an einer wirklichen Antenne ergeben. Diese Antennennachbildung wird „Künstliche Antenne“ (KA) genannt. Natürlich streuen die Antennenwerte in der Praxis außerordentlich stark. So kann z. B. die Kapazität je nach Antennenart (Hoch-, Zimmer- oder Behelfsantenne) zwischen 50 und mehreren 1000 pF schwanken. Man muß sich daher auf eine



Normalantenne einigen. Anhaltswerte hierfür gibt nach Abb. 8 die grundsätzliche Beziehung zwischen Antennenlänge und Wellenlänge. Antennen, die kürzer als $\lambda/4$ sind, wirken als Kapazität, weil die Induktivität des kurzen Antennendrahtes keine Rolle spielt (Abb. 8a). Eine $\lambda/4$ -Antenne wirkt als Resonanzkreis und stellt einen Wirkwiderstand dar (Abb. 8b). Bei Antennen, die länger als $\lambda/4$ sind, überwiegt die Induktivität des Antennendrahtes; sie wirken als Selbstinduktion (Abb. 8c).

Gewöhnliche Rundfunkantennen wirken daher für Mittel- und Langwellen als Kapazität, denn sie sind stets kürzer als ein Viertel der kleinsten Wellenlänge (bei $\lambda = 200$ m, Drahtlänge = 50 m). Man hat sich daher auf einen Normalwert $C_A = 200$ pF geeinigt [1]. Als Antennenwiderstand R_A werden 20 ... 30 Ohm und als Induktivität 20 μ H in diesem Gebiet vorgesehen. Zeichnet man die Scheinwiderstände der einzelnen Schaltelemente und ihrer Reihenschaltung auf, so ergibt sich Abb. 9. Der Schnittpunkt der L- und C-Linien verursacht eine Resonanzstelle bei 2,5 MHz, die mit dem Antennenwiderstand eine bis 25 Ohm herunterreichende Einsattelung ergibt. Mittel- und lange Wellen liegen auf dem kapazitiven Ast der Kurve. Das bestätigt, daß die Induktivität in diesem Gebiet keinen Einfluß hat und auch der Antennenwiderstand wenig ausmacht.

Im Kurzwellengebiet fällt die Antennenlänge meist mit der Viertelwellenlänge irgendeiner Empfangsfrequenz zusammen. Für höhere Frequenzen wirkt sie dann induktiv, für tiefere kapazitiv (Abb. 8).

Die Verhältnisse sind sehr unübersichtlich, da die Antennenlänge ungewiß ist und bei langen Antennen sich die Vorgänge jeweils bei einem Vielfachen von $\lambda/4$ wiederholen. Man nimmt deswegen, entsprechend dem größeren Strahlungswiderstand für kurze Wellen, als Mittelwert einen rein ohmschen Widerstand von 400 Ohm an.

Um das Auswechseln der künstlichen Antenne für die verschiedenen Wellenbereiche zu vermeiden, werden nach amerikanischen Vorschlägen (Abb. 10) 400 pF in Reihe mit 400 Ohm über die 20 μ H-Spule gelegt. Bei kurzen Wellen überbrücken die 400 Ω den viel höheren Spulenwiderstand und sind dort allein wirksam, denn die kapazitiven Widerstände sind auf bedeutungslose Werte abgesunken. Der 400- Ω -Widerstand dämpft

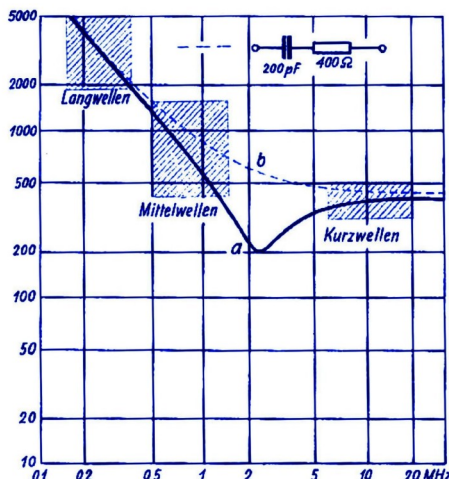


Abb. 11

außerdem die Resonanzstelle bei 2,5 MHz viel stärker als der ursprüngliche 25- Ω -Widerstand, der deshalb weggelassen wird. Kurve a in Abb. 11 ergibt den Scheinwiderstandsverlauf der Anordnung. Er entspricht in allen Bereichen den vereinbarten Werten. Diese künstliche Antenne ist für genaue labormäßige Empfänger-messungen bestimmt und in den USA hierfür genormt.

Für Serienmessungen und Abgleicharbeiten ist die Anordnung jedoch etwas schwerfällig. Der Einbau der vier Schaltelemente in enge Abschirmkabel ist unbequem, und die Spule fängt bei Undichtigkeiten leicht magnetische Störspannungen auf. Einfacher ist eine Reihenschaltung von 200 pF auf 400 Ω mit dem Kurvenverlauf b in Abb. 11. Die Widerstandsabweichungen bei Lang- und Mittelwellen sind gering. Die Schaltung wirkt im wesentlichen noch kapazitiv mit einer Grenzfrequenz von 2 MHz. (Eine noch bessere Angleichung für Mittelwellen läßt sich durch einen Widerstand von nur 300 Ohm erreichen.) Diese künstliche Antenne wurde vom Verfasser erstmals vorgeschlagen [2] und praktisch angewendet. Sie hat sich inzwischen verbreitet und wurde z. B. in den neuen Universal-Prüfsender SPV von Rohde & Schwarz übernommen.

Anwendung der künstlichen Antenne

Um die tatsächlichen Verhältnisse nachzubilden, muß die künstliche Antenne direkt zwischen Antennen- und Erdbuchse des Empfängers wirksam sein. Leider findet sich in der Literatur immer wieder die irreführende Darstellung Abb. 12, bei welcher die KA in die Verbindungsleitung zwischen Meßsender und Empfänger geschaltet ist. Diese Verallgemeinerung ist falsch. Zur künstlichen Antenne ist nach Abb. 13 stets der Innenwiderstand des Meßsenders hinzuzufügen, denn er liegt ebenfalls im Antennenkreis. Es ist sinnlos, die KA in die Zuleitung einzuschalten, wenn der Innenwiderstand des Senders groß oder überhaupt nicht bekannt ist.

Der Innenwiderstand des Senders hängt vom Widerstand des Ausgangsspannungsteilers ab. Gebräuchlich sind kapazitive und ohmsche Spannungsteiler. Verschiedene industriemäßige HF-Meßsender besitzen einen kapazitiven Spannungsteiler mit 250 pF Ausgangswiderstand (z. B. SMP und SMF von Rohde & Schwarz, Rel send 7a von Siemens & Halske). Diese 250 pF stellen dann bereits die Kapazität der künstlichen Antenne dar, und es brauchen nach Abb. 14 nur noch die L_A - und R_A -Nachbildungen hinzugefügt zu werden. Einige Telefunken-Meßsender (mit „Meßtute“) haben kapazitive Spannungsteiler mit 2000 pF Innenwiderstand. In diesem Fall ist durch einen Serienkondensator nach Abb. 13 die Kapazität auf den Normalwert der künstlichen Antenne zu bringen.

Meßsender mit ohmschem Spannungsteiler haben meistens 70 Ohm Ausgangswiderstand. Für Mittel- und lange Wellen spielt das bei der Normalantenne nach Abb. 10 keine große Rolle. Es wird dann nur die Resonanzstelle bei 2,5 MHz noch weiter verflacht. Für kurze Wellen müßte jedoch korrekterweise der 400- Ω -Widerstand auf 330 Ω erniedrigt werden. — Bei noch

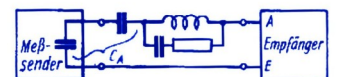


Abb. 13

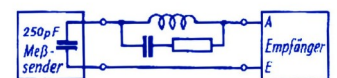


Abb. 14

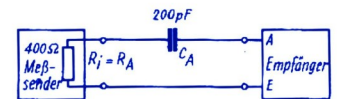


Abb. 15

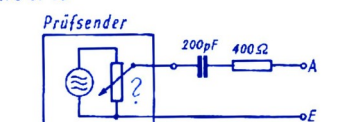


Abb. 16

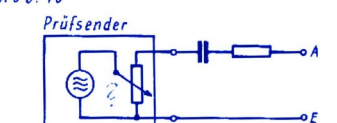


Abb. 17

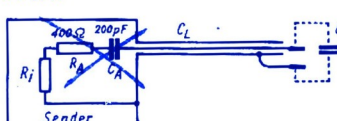


Abb. 18

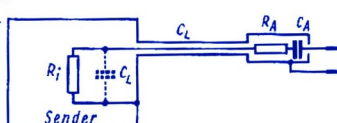


Abb. 19

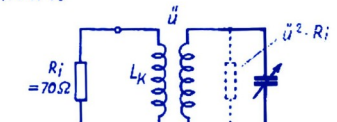


Abb. 20

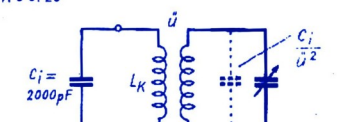


Abb. 21

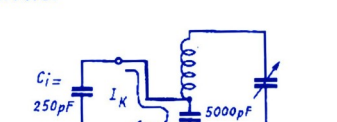


Abb. 22

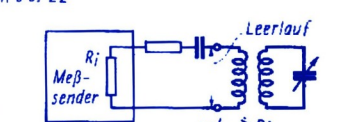


Abb. 23

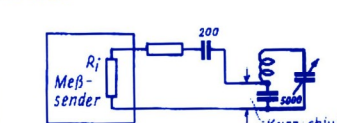


Abb. 24

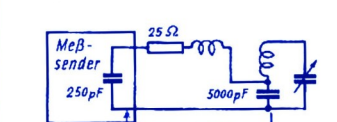


Abb. 25

größeren Innenwiderständen ist dies unbedingt zu beachten. Macht man den Innenwiderstand genau $400\ \Omega$ groß, so braucht für die vereinfachte künstliche Antenne nur ein 200-pF-Kondensator zugeschaltet zu werden (Abb. 15).

Einfache Prüfsender, besonders Selbstbauten, haben oft nach Abb. 16 nur einen Drehregler mit $1 \dots 5\text{-k}\Omega$ -Gesamtwiderstand als Spannungsteiler. Der Ausgangswiderstand ändert sich dann stark mit der Spannung. Da diese Sender meist nicht für qualitative Messungen, sondern nur zum Abgleichen dienen, wird man dafür die vereinfachte KA aus $200\ \Omega$ und $400\ \text{pF}$ anwenden. Bei großen Ausgangsspannungen ist dann der Gesamtwiderstand des Antennenkreises zu hoch. Es ist also darauf zu achten, daß der Schlußabgleich mit ganz heruntergeregeltem Spannungsteiler erfolgt, damit der im Antennenkreis liegende Teilwiderstand zu vernachlässigen ist. — Sehr bedenklich ist dagegen eine Spannungsteileranordnung nach Abb. 17. Hier liegt stets der gesamte Reglerwiderstand im Antennenkreis. Das ist nur bei kleinen Widerständen zulässig, oder es muß ein Parallelwiderstand über die Ausgangsklemmen gelegt werden.

Einbau der künstlichen Antenne

Die Bestandteile der künstlichen Antenne sind stets abgeschirmt am empfängerseitigen Ende des Prüfkabels einzubauen.

Die Kabelkapazität C_L , die recht beträchtlich sein kann, legt sich sonst parallel zum Empfängereingang und schließt die künstliche Antenne kurz (Abb. 18). Wird sie dagegen im Kabelende untergebracht (Abb. 19), dann liegt die Leitungskapazität C_L parallel zum Senderwiderstand. Bei kleinen Innenwiderständen stört das überhaupt nicht, und bei kapazitiven Spannungsteilern geht sie in die Eichung ein. Derartige Meßsender sind daher immer mit dem zugehörigen Abschirmkabel zu betreiben.

Empfindlichkeitsmessungen mit der künstlichen Antenne

Zunächst seien kurz einige Fehler dargestellt, die bei Messungen ohne KA auftreten können.

Niederohmiger Sender bei hochinduktiver Antennenkopplung

Der geringe Senderwiderstand wird in den ersten Abstimmkreis transformiert und bedämpft ihn. Die Kreisgüte wird stark herabgesetzt (Abb. 20).

Sender mit 2000 pF Ausgangswiderstand bei hochinduktiver Antennenkopplung

Die Ausgangskapazität wird in den ersten Abstimmkreis transformiert und verstimmt ihn, der Gleichlauf wird gestört (Abb. 21).

Sender mit 250 pF Ausgangswiderstand bei kapazitiver Antennenkopplung im Fußpunkt

Über den großen Kopplungskondensator fließt ein Kurzschlußstrom I_K , die Senderspannung bricht zusammen, und

es ergeben sich vollkommen falsche Meßwerte (Abb. 22).

Selbst bei ordnungsgemäßer Anwendung einer KA können sich noch Unterschiede bemerkbar machen. Innenwiderstand des Senders, künstliche Antenne und Eingangswiderstand des Empfängers ergeben nämlich sehr verschiedenartige Spannungsverteilungen.

Hochinduktive Antennenkopplung

Die große Kopplungsspule L_K bedeutet keine Belastung. Der Spannungsteiler arbeitet im Leerlauf, die eingestellte Spannung liegt tatsächlich an den Eingangsklemmen des Empfängers (Abbildung 23).

Kapazitive Kopplung am Fußpunkt

Der 5000 - pF - Kopplungskondensator schließt praktisch die künstliche Antenne kurz. Bei niederohmigen Sendern bleibt zwar die Spannung am Senderausgang erhalten, die Teilspannung am Kopplungskondensator bricht aber zusammen.

Das entspricht jedoch auch den Verhältnissen an einer wirklichen Antenne (Abb. 24).

Sender mit großem kapazitivem Innenwiderstand

Wird ein Gerät mit einem 5000-pF-Kopplungskondensator an einen Sender mit 250 pF Ausgangswiderstand angeschlossen (Abb. 26), der zugleich nach Abb. 14 als Antennenkapazität dient, dann bricht durch die kapazitive Belastung die Spannung am Sender selbst zusammen. Der gleiche Empfänger von Abb. 24 ergibt dann einen ganz anderen Empfindlichkeitswert.

Beim Vergleichen von Meßwerten sind daher nicht nur die Werte der künstlichen Antenne, sondern auch der Innenwiderstand des Meßsenders zu beachten.

[1] Qualitätsbestimmung an Rundfunkgeräten von H. Fröhlich, FUNK-TECHNIK Band 3 (1948), H. 21, S. 532.

[2] Prüffeldmeßtechnik von O. Limann, 3. Auflage, Funkschau-Verlag, Stuttgart.