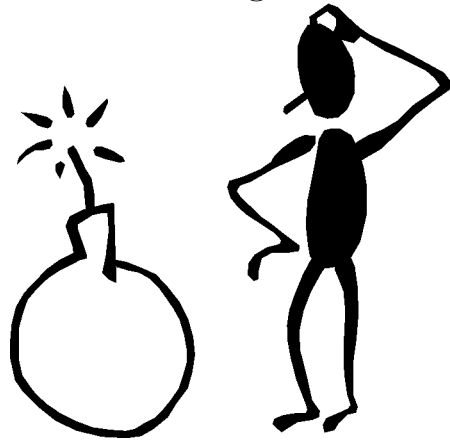


Facharbeit im Leistungskurs Physik
Hochfrequente elektromagnetische Wechselfelder



Manuel Hohmann

29. März 2000

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iv
1 Allgemeines	1
1.1 Hochfrequenz	1
1.2 Elektrische und magnetische Felder	1
2 Erzeugung	2
2.1 Schwingkreise	2
2.1.1 Grundlagen	2
2.1.2 Der geschlossene Schwingkreis	2
2.1.3 Der halboffene Schwingkreis	2
2.1.4 Der lineare Oszillator	3
2.1.5 Der Hohlraumoszillator	3
2.2 Schwingungserzeugung mit Elektronenröhren	3
2.2.1 Funktionsweise einer Elektronenröhre	3
2.2.2 LC-Generatoren	3
Versuch: Schwingungserzeugung bei 30 MHz	5
Versuch: Schwingungserzeugung bei 6 MHz	5
Versuch: Induktionswirkung bei Hochfrequenz	6
2.2.3 RC-Generatoren	6
2.2.4 Die Barkhausen-Kurz-Schaltung	8
2.3 Der Teslatransformator	8
2.4 Das Magnetron	8
2.5 Das Klystron	9
3 Transport	10
3.1 Drahtleitungen	10
3.1.1 Allgemeines	10
3.1.2 Die symmetrische Paralleldrahtleitung (Lecher-System)	10
3.1.3 Die kreiszylindrische Koaxialleitung	11
3.2 Hohlleiter	11
4 Praktische Anwendungen	12
4.1 NMR-Spektroskopie	12
4.1.1 Physikalische Grundlagen	12
4.1.2 Kernresonanz in Molekülen	12
4.1.3 Praktischer Aufbau	13
4.1.4 Kernspin-Tomographie	14
4.1.5 Ortung von Grundwasservorkommen	15
4.2 Der Mikrowellenherd	15
4.3 Anwendungen des Teslatransformators	15
4.3.1 Hochspannung	15
4.3.2 Hochstrom	16
4.4 Rundfunk	16

4.4.1	Grundlagen	16
4.4.2	Modulation	17
	Versuch: Amplitudenmodulation bei 6 MHz	17
4.4.3	Empfangsschaltungen	17
4.4.4	Demodulation	19
4.4.5	Andere Rundfunkanwendungen	20
4.5	Radar	20
A	Technische Daten zu den Versuchen	22
A.1	Schwingungserzeugung bei 30 MHz	22
A.2	Schwingungserzeugung bei 6 MHz	22
A.3	Induktionswirkung bei Hochfrequenz	23
A.4	Amplitudenmodulation	24

Vorwort

Ziel der Arbeit sollte es sein, anhand von Versuchen und Literatur die Praxis der Hochfrequenztechnik kennenzulernen. Ausschlaggebend für die Themenwahl war der Wunsch nach einem neuartigen Thema, das in dieser Form nicht vorgegeben war, insbesondere durch die Aussicht auf den Bau eines Teslatransformators, der jedoch nicht realisiert werden konnte. Dafür wurden Versuche mit Röhren durchgeführt, die im nachhinein sogar wesentlich interessanter sind. Darüber hinaus konnten Informationen aus zahlreichen privaten und geliehenen Büchern entnommen werden, wohingegen das Internet verschlossen blieb. Um nun direkt in das Thema einsteigen zu können, müssen zunächst einige Grundlagen vermittelt werden. Anschließend geht es um die Erzeugung hochfrequenter elektromagnetischer Wechselfelder, ihren Transport und schließlich ihre praktische Anwendung. Um Versuche rekonstruieren zu können, sind diese im Anhang näher erläutert.

Kapitel 1

Allgemeines

1.1 Hochfrequenz

Der Hochfrequenzbereich liegt etwa zwischen $10^4 - 10^5$ und $10^{11} - 10^{12}$ Hz. Die Übergänge sind fließend. Die unteren fünf Dekaden bezeichnet man als Längst-, Lang-, Mittel-, Kurz- und Ultrakurzwellen. Die oberen drei Dekaden werden gemäß ihrer Wellenlänge als Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeterwellen bezeichnet.[1]

1.2 Elektrische und magnetische Felder

Beide Feldtypen lassen sich sowohl durch ihre Feldstärke als auch durch ihre Flußdichte beschreiben. Im materiegefüllten Raum ergibt sich: $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$; $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$. Dabei bedeuten: \vec{D} : elektrische Flußdichte, \vec{E} : elektrische Feldstärke, \vec{B} : magnetische Flußdichte, \vec{H} : magnetische Feldstärke, ϵ_0 : elektrische Feldkonstante $8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$, ϵ_r : Dielektrizitätszahl, μ_0 : magnetische Feldkonstante $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$, μ_r : Permeabilitätszahl. Die Gleichung für das Magnetfeld gilt nur sehr eingeschränkt, da die Permeabilität von der magnetischen Feldstärke und der Vorbehandlung des Materials abhängt. Sie gilt nicht in Permanentmagneten, da die Feldlinien von \vec{B} und \vec{H} hier nicht parallel sind. Elektrische und magnetische Felder hängen eng zusammen. Ein Beobachter, der sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} relativ zu einem Magnetfeld \vec{B} bewegt, mißt ein elektrisches Feld $\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$. Das heißt, das elektrische Feld ist senkrecht zum magnetischen Feld und zur Bewegungsrichtung. Bei einer Bewegung parallel zum magnetischen Feld ist kein elektrisches Feld feststellbar. Ähnlich ist es bei einer Bewegung relativ zum elektrischen Feld. Das magnetische Feld beträgt hier $\vec{B} = -\frac{1}{c^2} \cdot \vec{v} \times \vec{E}$. Das Vorzeichen ist durch die entgegengesetzte Richtung des Magnetfeldes bedingt. Aber auch ohne Bewegung zeigt sich die Äquivalenz beider Felder, sofern diese zeitlich veränderlich sind. Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld senkrecht dazu und andersherum. Ändern sich beide Felder dabei periodisch, sodass das eine das andere erzeugt, so spricht man von einem Wechselfeld. Dabei wird stets Energie übertragen. Die Energiestromdichte wird durch den Poynting-Vektor $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ angegeben.[2]

Kapitel 2

Erzeugung

2.1 Schwingkreise

2.1.1 Grundlagen

In einem Schwingkreis wird laufend Energie zwischen einem elektrischen und einem magnetischen Feld übertragen, wobei stets ein Teil verloren geht. Daher wird die elektromagnetische Schwingung im Folgenden mit der (gedämpften) mechanischen Schwingung verglichen.

2.1.2 Der geschlossene Schwingkreis

Der geschlossene Schwingkreis besteht aus einem Kondensator der Kapazität C und einer Spule der Induktivität L , deren ohmscher Widerstand zunächst vernachlässigt werden soll. Zu Beginn der Schwingungsperiode ist der Kondensator auf die Spannung U aufgeladen, es fließt kein Strom. Der Kondensator entlädt sich durch die Spule, in der sich ein Magnetfeld aufbaut. Nach $\frac{1}{4}$ Periodendauer ist der Kondensator entladen. Die gesamte in ihm gespeicherte Energie $W_e = \frac{1}{2}CU^2$ ist nun im Magnetfeld der Spule enthalten, dessen Energie $W_m = \frac{1}{2}LI^2$ beträgt. Gleichsetzen und Umstellen ergibt für die Stromstärke, die nun maximal ist, $I = U\sqrt{\frac{C}{L}}$. Dieses Magnetfeld wird abgebaut, wodurch in der Spule eine Spannung induziert wird. Dies bewirkt ein erneutes Aufladen des Kondensators, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen. Nach $\frac{1}{2}$ Periodendauer ist die Spannung am Kondensator erneut auf den Wert U angewachsen, die Stromstärke und damit auch die magnetische Energie ist null. Nun wiederholt sich der Vorgang, bis nach einer Periodendauer der Ausgangszustand erreicht ist. Die Periodendauer T läßt sich analog zur mechanischen Schwingung berechnen. Durch Betrachten der Gleichungen lassen sich folgende Entsprechungen feststellen: $W_e \leftrightarrow W_{pot}$; $W_m \leftrightarrow W_{kin}$; $L \leftrightarrow m$; $C \leftrightarrow \frac{1}{D}$; $Q \leftrightarrow s$; $I \leftrightarrow v$; $U \leftrightarrow F_R$. Die Periodendauer ergibt sich damit durch $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Einem realen Schwingkreis gibt es jedoch auch einen ohmschen Widerstand, der eine Dämpfung bewirkt. Dadurch steigt auch die Periodendauer auf $T = 2\pi\sqrt{LC - 4\frac{L^2}{R^2}}$. Die Amplitude der Schwingung nimmt mit $e^{-\frac{R}{2L}t}$ exponentiell ab. Ein zu großer Widerstand $R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ verhindert eine Schwingung. Man bezeichnet dies als Kriechfall.[3]

2.1.3 Der halboffene Schwingkreis

Der einfachste Kondensator besteht aus zwei parallelen Drähten, die einfachste Spule aus einem geraden Leiterstück. Ein Schwingkreis läßt sich daher auch durch einen U-förmigen Drahtbügel darstellen.

2.1.4 Der lineare Oszillator

Durch Umbiegen des halboffenen Schwingkreises zu einem geraden Stab der Länge l erhält man einen linearen Oszillator. Die Dämpfung ist hier wesentlich höher als durch den ohmschen Widerstand zu erwarten wäre. Dies beruht auf der Abstrahlung von Energie in Form elektromagnetischer Wellen. Betrachtet man einzelne Punkte auf dem Stab, so läßt sich feststellen, dass in der Mitte ein Wechselstrom mit maximaler Amplitude fließt, während die Stromstärke an den Enden null ist. Zwischen den Enden liegt eine Wechselspannung an, die dem Strom um $\frac{\pi}{2}$ vorausgeht. Ein Vergleich des Wechselstromes mit einer mechanischen Schwingung zeigt eine Analogie zur Grundschiwingung eines beidseitig eingespannten, elastischen Stabes. Diese läßt sich als stehende Welle auffassen, deren Wellenlänge $\lambda = 2l$ beträgt. Eine stehende Welle ist prinzipiell auf die Überlagerung zweier gegenläufiger Wellen zurückzuführen. Da sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, beträgt die Frequenz $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}$. [4]

2.1.5 Der Hohlraumoszillator

Läßt man einen Schwingkreis, der aus einem Plattenkondensator und einem Draht als Spule besteht, um den Kondensator rotieren, und verkürzt man die Zuleitungen zum Kondensator, so erhält man einen Hohlraumoszillator. Dieser hat starke Ähnlichkeit mit einer Konservendose. Im Inneren bilden die magnetischen Feldlinien konzentrische Ringe. Senkrecht dazu schwingt das elektrische Feld (s. Abb. 2.1) [5]

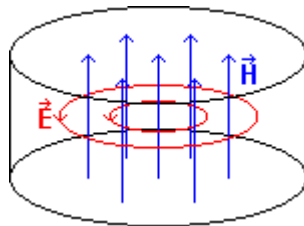


Abbildung 2.1: Felder im Hohlraumoszillator [5]

2.2 Schwingungserzeugung mit Elektronenröhren

2.2.1 Funktionsweise einer Elektronenröhre

Die gebräuchlichste Elektronenröhre, die Triode, besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in den drei Elektroden eingeschmolzen sind. Der Anode steht die beheizte Kathode gegenüber. Die Heizung kann direkt erfolgen, indem man einen Glühdraht als Kathode verwendet. Der Glühdraht kann jedoch auch separat hinter der Kathode angebracht sein; dies bewirkt eine indirekte Heizung (s. Abb. 2.2). Zwischen Kathode und Anode befindet sich das Gitter. Im Normalfall legt man an die Kathode eine negative Spannung gegenüber der Anode an. Durch die Wärmebewegung der Atome treten Elektronen aus der Kathode aus, die zur Anode hin beschleunigt werden. Sie erreichen die Anode und bewirken so einen Stromfluß. Legt man nun an das Gitter eine negative Spannung an, so können weniger Elektronen die Anode erreichen, da sie vom negativen Potential des Gitters abgebremst oder sogar in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt werden. Man kann nun den Anodenstrom durch verändern der Gitterspannung regulieren. [6]

2.2.2 LC-Generatoren

Wenn sich ein Kondensator durch eine Spule entlädt, klingt die dadurch entstehende Schwingung auf Grund von Energieverlusten mit der Zeit ab. Um eine ungedämpfte Schwingung zu erhalten, muß man periodisch Energie zuführen, indem man zum richtigen Zeitpunkt eine



Abbildung 2.2: Elektronenröhre mit indirekter Heizung (schematisch)[33]

Spannung anlegt. Das genaue Treffen dieses Zeitpunktes geschieht am einfachsten durch Rückkopplung. Ein Teil der Ausgangsspannung wird der Röhre als Gitterspannung zugeführt, um die Energiezufuhr zum Schwingkreis zu steuern. Je nach Art der Verbindung zwischen Schwingkreis und Gitter unterscheidet man zwischen induktiver und kapazitiver Kopplung. Bei induktiver Kopplung wird die Schwingung über einen Transformator übertragen (s. Abb. 2.3), bei kapazitiver Kopplung durch einen Kondensator (s. Abb. 2.4). Das Koppellement ist jeweils einstellbar zu wählen, um es auf bestmögliche Resonanz abzustimmen. Wenn man die Kapazität zwischen Anode und Gitter als Koppelkondensator verwendet, spricht man von einer Huth-Kühn-Schaltung.[7]

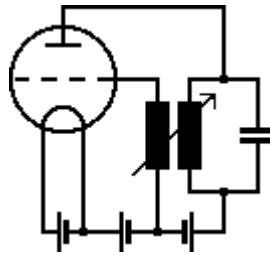


Abbildung 2.3: LC-Generator mit induktiver Kopplung[7]

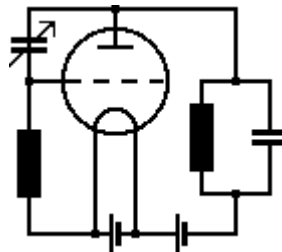


Abbildung 2.4: LC-Generator mit kapazitiver Kopplung[7]

Versuch: Schwingungserzeugung bei 30 MHz

Für den Versuch wird eine Dreipunktschaltung benutzt. Nach dem Einschalten der Heizspannung wird die Röhrenspannung auf 250 V geregelt. Die Glühlampe beginnt zu leuchten. Entfernt man nun die Induktionsspule von der Erregerspule, so nimmt das Leuchten ab und die Lampe erlischt. Bringt man sie wieder näher heran, leuchtet sie wieder. Das Leuchten der Lampe beruht auf dem durch das Wechselfeld induzierten Hochfrequenzstrom. Das Feld ist in der Nähe der Spule am stärksten. Dreht man die Spule um 90° , so erlischt die Lampe, da die Spule nun nicht mehr von dem Wechselfeld durchsetzt ist. Zieht man in der Nähe der Erregerspule den Kurzschlußstecker aus der Induktionsspule heraus, so leuchtet die Lampe schwächer weiter. Die Kapazität zwischen dem beiden Drahtenden reicht aus, um den Strom zu leiten. Indem man zwei Verbindungsschnüre an die Induktionsspule anschließt, kann man die Kapazität vergrößern und die Lampe leuchtet heller. Verbindet man die beiden Schnüre, so erlischt die Lampe wegen des hohen induktiven Widerstandes. (s. Abb. 2.5)



Abbildung 2.5: Versuch zur Schwingungserzeugung mit einer Dreipunktschaltung für 30 MHz

Versuch: Schwingungserzeugung bei 6 MHz

Der vorige Versuch wird leicht abgeändert, indem die Spule und der Kondensator ausgetauscht werden. Zusätzlich kommt ein variabler Kondensator hinzu, der mit der Spule einen Schwingkreis bildet. Nach dem Einschalten der Versorgungsspannung beginnt die Lampe zu leuchten. Durch Verändern des Kondensators läßt sich der Schwingkreis abstimmen, d.h. die Frequenz ändert sich. Bei einem Skalenwert von etwa 6 leuchtet die Lampe mit maximaler Helligkeit, die Amplitude des Wechselfeldes ist am größten. (s. Abb. 2.6)

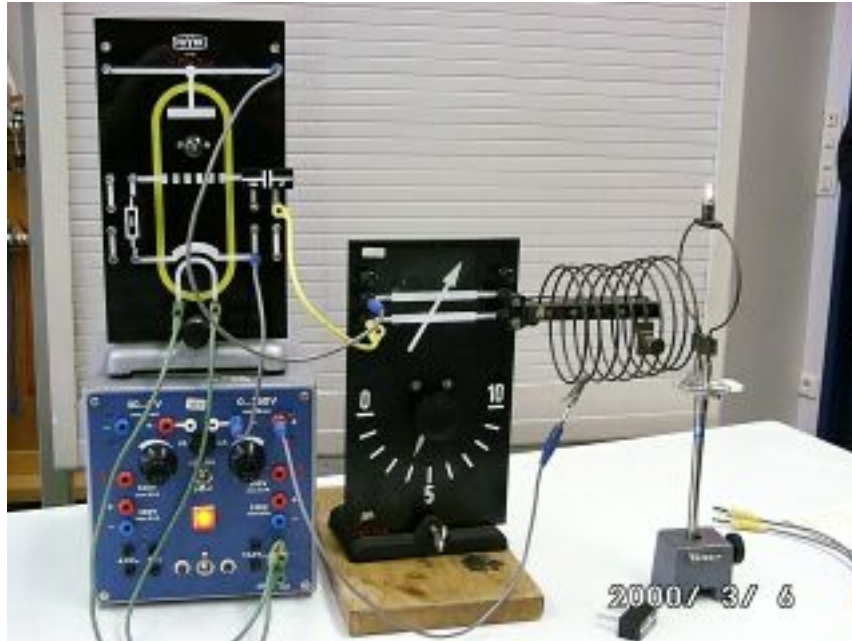


Abbildung 2.6: Versuch zur Schwingungserzeugung mit einer Dreipunktschaltung für 6 MHz

Versuch: Induktionswirkung bei Hochfrequenz

Als Schwingungserzeuger wird der Aufbau aus dem vorigen Versuch benutzt. Die Induktionsspule wird durch eine Spule mit 9 Windungen ersetzt. Entfernt man die Induktionsspule von der Erregerspule, so erlischt die Lampe bei einer Entfernung von etwa 15 cm. Die Spule wird nun auf etwa 5 cm angenähert. Die Lampe leuchtet hell. Hält man nun eine Aluminiumplatte zwischen die beiden Spulen, so erlischt die Lampe. In der Aluminiumplatte wird ein Wechselstrom induziert. Das Feld durchdringt die Platte daher nicht, sondern wird vor ihr reflektiert. Hält man ein Blatt Papier oder einen anderen Isolator dazwischen, so leuchtet die Lampe unvermindert, da kein Strom induziert werden kann. (s. Abb. 2.7)

2.2.3 RC-Generatoren

Ein RC-Generator besteht aus einem invertierenden Verstärker und einem Phasenschieber-Netzwerk, das das Ausgangssignal verzögert dem Eingang zurückführt. Als Verstärker dient eine Röhre. Diese bildet zusammen mit dem Anodenwiderstand R_a einen Spannungsteiler. Eine negative Spannung am Gitter führt zu einer Verringerung des Anodenstroms und damit zu einer Spannungserhöhung am Eingang des Phasenschieber-Netzwerkes. Dieses besteht aus Widerständen und Kondensatoren, die auf zwei verschiedene Weisen zusammengeschaltet sein können. Bei einem RC-Generator 1.Art wird ein Kondensator C über einen Widerstand R langsam auf die Anodenspannung U aufgeladen (s. Abb. 2.8). Damit steigt auch die Spannung am folgenden RC-Glied, wodurch auch dieser Kondensator immer schneller aufgeladen wird. Dies pflanzt sich durch das Netzwerk fort und erreicht nach einer Verzögerungszeit t das Gitter. Eine Schwingung baut sich auf, wobei t der halben Periodendauer T entspricht. Dann besteht eine Phasendrehung um 180° zwischen Anode und Gitter. Zusammen mit den 180° Phasendrehung der Röhre ergeben sich die für eine Rückkopplung nötigen 360° . Die Frequenz eines solchen RC-Generators läßt sich berechnen durch $f = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC}$.

Nach dem gleichen Prinzip arbeitet auch ein RC-Generator 2.Art (s. Abb. 2.9). Die Frequenz beträgt hier $f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$. [8]

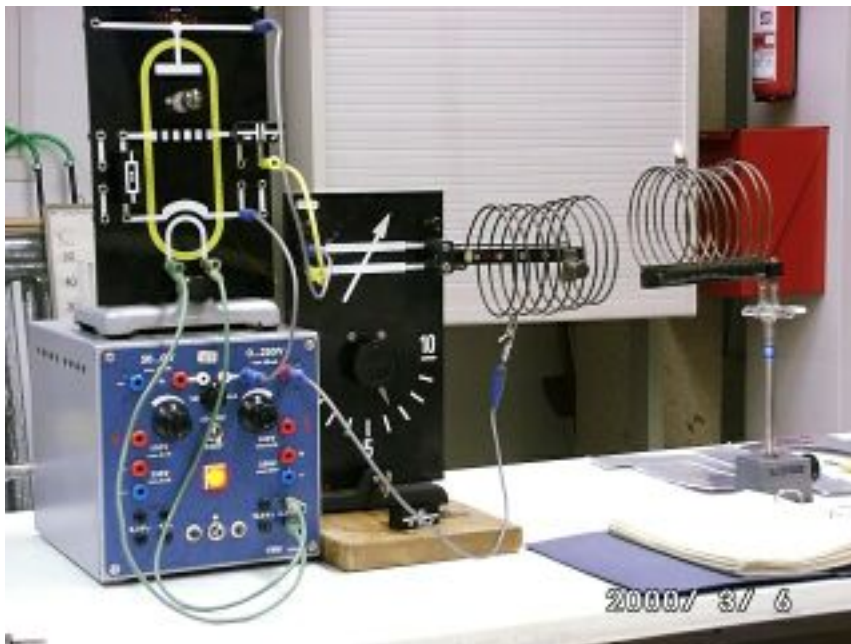


Abbildung 2.7: Versuch zur Induktionswirkung bei Hochfrequenz (6 MHz)

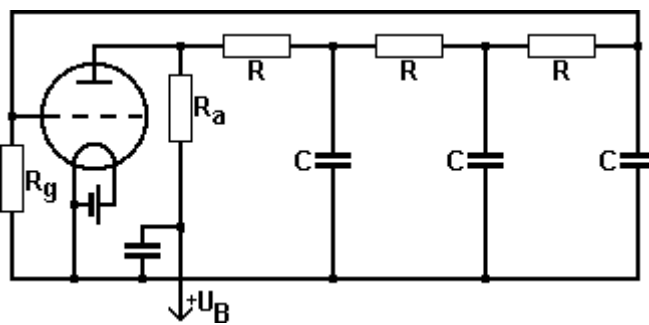


Abbildung 2.8: RC-Generator 1.Art[8]

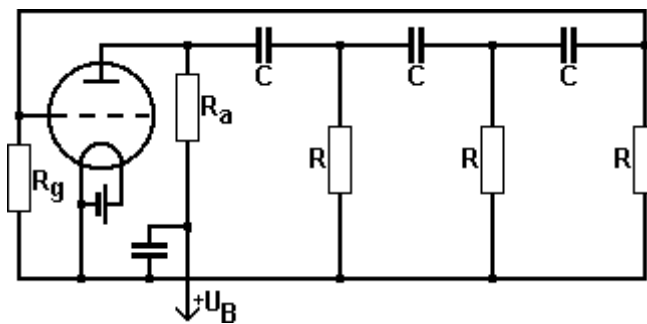


Abbildung 2.9: RC-Generator 2.Art[8]

2.2.4 Die Barkhausen-Kurz-Schaltung

Schwingungen besonders hoher Frequenz erreicht man mit der Barkhausen-Kurz-Schaltung (s. Abb. 2.10). An das weitmaschige Gitter legt man eine stark positive, an die Anode eine schwach negative Spannung an. Die Elektronen, die von der Kathode ausgehen, werden vom Gitterfeld beschleunigt, passieren dieses und werden vom Feld der Anode abgebremst. Sie passieren das Gitter erneut, Ändern ihre Richtung vor der Kathode und pendeln so mit einer Frequenz bis zu 10^{10} Hz hin und her, wodurch ein hochfrequenter Wechselstrom entsteht.[9]

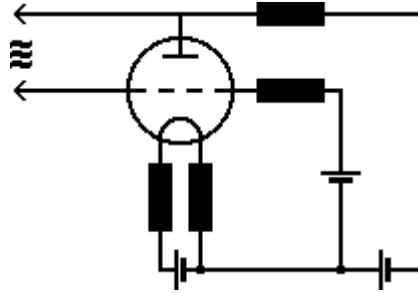


Abbildung 2.10: Die Barkhausen-Kurz-Schaltung[9]

2.3 Der Teslatransformator

Ein Teslatransformator besteht aus einem hochfrequenten Schwingkreis, dessen Induktivität die Primärspule eines Transformators darstellt (s. Abb. 2.11). Der Schwingkreis, der aus einem Kondensator C , einer Spule L und einer Funkenstrecke F besteht, wird durch ständige Energiezufuhr über einen NF-Transformator zu einer ungedämpften, hochfrequenten Schwingung angeregt. Der Kondensator wird aufgeladen, bis die Zündspannung der Funkenstrecke erreicht ist. Mit dem Funkenüberschlag wird der Schwingkreis geschlossen, der nun zu schwingen beginnt. Durch die hohe Frequenz wird in der Sekundärspule des Teslatransformators, deren Windungszahl wesentlich höher ist als die der Primärspule, eine sehr hohe Spannung induziert. Wegen des hohen induktiven Widerstandes des NF-Transformators werden die HF-Schwingungen nicht auf diesen übertragen.[10]

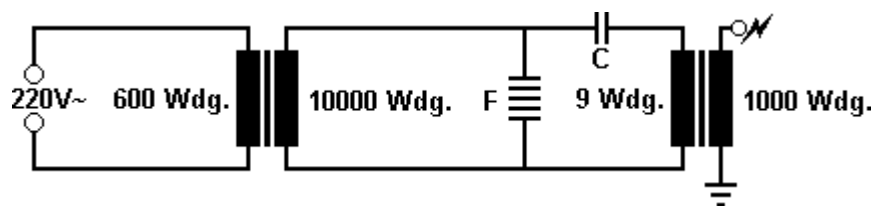


Abbildung 2.11: Teslatransformator (Prinzipschaltung)[34]

2.4 Das Magnetron

Bei einem Magnetron ist eine langgestreckte, beheizte Kathode von einer zylinderförmigen Anode umgeben. Parallel dazu liegt ein Magnetfeld an. Die Elektronen werden dadurch auf eine gekrümmte Bahn gezwungen. Diese ist jedoch nicht kreisförmig, da sie außerdem durch das elektrische Feld zur Anode hin abgelenkt werden. Als Bahn ergibt sich somit eine Kar-dioide. Schließt man einen passenden Schwingkreis an, so lassen sich damit Schwingungen bis $5 \cdot 10^{10}$ Hz anregen. Dieses Verfahren findet z.B. in Mikrowellenherden Anwendung.[9]

2.5 Das Klystron

Frequenzen bis über 10^{11} Hz erzielt man mit geschwindigkeitsgesteuerten Laufzeitröhren, sog. Klystrons. In einem Zweikammerklystron wird ein Elektronenstrahl durch einen Hohlraumresonator geleitet, in dem ein elektromagnetisches Feld schwingt (s. Abb. 2.12). Durch dessen elektrische Komponente werden die Elektronen abwechselnd abgebremst und beschleunigt. Nach der Laufstrecke 1 haben die beschleunigten Elektronen die unmittelbar vor ihnen ausgesandten Elektronen eingeholt. Zur gleichen Zeit treffen dort auch die zuvor ausgesandten, gebremsten Elektronen ein, es herrscht daher eine erhöhte Elektronendichte. Eine halbe Periodendauer später ist die Elektronendichte minimal. An diesem Punkt befindet sich ein weiterer Hohlraumresonator, in dem durch die wechselnde Elektronendichte eine Schwingung angeregt wird. Ein Teil der Schwingungsenergie wird dem ersten Hohlraumresonator zugeführt, um eine Rückkopplung zu erreichen. Die Frequenz ergibt sich durch die Eigenfrequenz der Hohlraumresonatoren. Bei einem Reflexklystron wirkt eine negative Elektrode wie ein Spiegel für die Elektronen, sodass nur ein Hohlraumresonator benötigt wird. Die Rückkopplung stellt sich hier von selbst ein. [11]

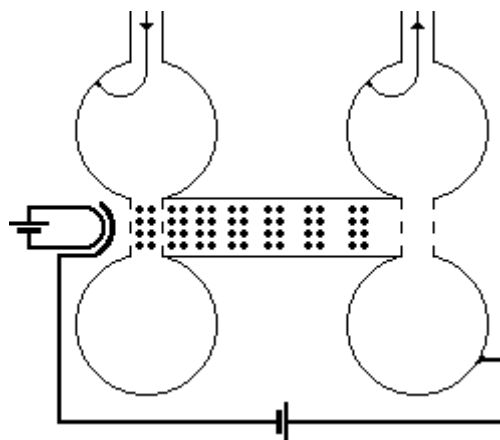


Abbildung 2.12: Zweikammerklystron

Kapitel 3

Transport

3.1 Drahtleitungen

3.1.1 Allgemeines

Der Transport von Hochfrequenzströmen durch Drahtleitungen unterscheidet sich in mehreren Punkten vom Transport von Gleich- oder Niederfrequenzströmen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen Kraftwirkung ist ebenfalls die Lichtgeschwindigkeit c . Da jedoch die Frequenz f wesentlich größer ist, ist die Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{f}$ unter Umständen kleiner als die Leiterlänge. Daher hängen Strom und Spannung nicht nur von der Zeit, sondern auch vom Ort ab. Außerdem sind neben dem ohmschen Widerstand auch der induktive Widerstand längs des Leiters und der kapazitive Widerstand parallel dazu zu berücksichtigen. Zusätzlich nimmt der wirksame Leiterquerschnitt durch den Skineneffekt mit steigender Frequenz ab (s. Abb. 3.1). Das schnelle Anwachsen des Stromes bewirkt ein sich rasch aufbauendes Magnetfeld, welches dabei ein elektrisches Feld hervorruft. Dieses ist im Zentrum des Leiters dem Stromfluß entgegengerichtet, sodass der Strom an die Oberfläche verlagert wird. Daher hängt der Widerstand nicht vom Querschnitt, sondern vom Umfang ab. Man benutzt daher auch sog. HF-Litzen, die aus gegeneinander isolierten Einzeldrähten bestehen, oder dünnwandige Rohre.[12] Eine Hochfrequenzleitung zeichnet sich somit durch vier Kenngrößen aus, die jeweils pro Längeneinheit angegeben werden: den ohmschen Widerstand und die Induktivität längs des Drahtes sowie den Leitwert und die Kapazität parallel dazu.[13] Der Hochfrequenztransport durch Drahtleitungen läßt sich nicht nur als Stromfluß, sondern auch als Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle auffassen. Durch Reflexion an offenen oder kurzgeschlossenen Drahtenden erhält man eine stehende Welle.[14]

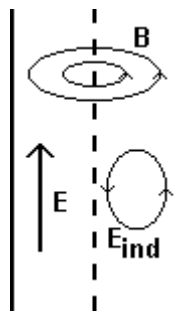


Abbildung 3.1: Skineneffekt[12]

3.1.2 Die symmetrische Paralleldrahtleitung (Lecher-System)

Die einfachste Bauform einer Drahtleitung besteht aus zwei gleichartigen, parallelen Drähten. Zwischen den Drähten breitet sich das elektrische Feld aus. Betrachtet man den Draht im

Querschnitt, so erhält man das zweidimensionale Feld zweier entgegengesetzt geladener Ladungsträger, deren Ladung zwischen einem Maximalwert im positiven und negativen Bereich gemäß $Q(t) = Q_{max} * \sin \omega t$ oszilliert. In der gleichen Ebene, aber senkrecht zum elektrischen Feld schwingt das magnetische Feld. Der Poynting-Vektor $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ zeigt die Richtung des Energieflusses an.[14] Dieser Leitungstyp ist sehr stör anfällig, da Felder anderer Leitungen eine Induktion bewirken. Man kann dies vermeiden, indem man die Leitung mit einem Metallmantel abschirmt.[15]

3.1.3 Die kreiszylindrische Koaxialleitung

Im MHz- und unteren GHz-Bereich benutzt man überwiegend Koaxialleitungen. Hier ist ein Draht zentral in einen zylinderförmigen Mantel eingebettet. Die elektrischen Feldlinien verlaufen radial, während die magnetischen Feldlinien konzentrische Kreise bilden. Es gibt eine untere Grenzwellenlänge $\lambda = \frac{\pi}{2}(d_a + d_i)$, wobei d_a der Innendurchmesser des Außenleiters und d_i der Außendurchmesser des Innenleiters ist. Wegen des Skin effektes benutzt man als Innenleiter versilberten Kupferdraht oder -litze.[16]

3.2 Hohlleiter

Bei noch höheren Frequenzen ist die Dämpfung durch den Skin effekt zu groß, um Drahtleitungen zu benutzen. Man leitet elektromagnetische Wellen im GHz-Bereich daher durch Hohlleiter. Bei einem Hohlleiter handelt es sich um eine allseitig von metallischen Wänden umschlossene Röhre, die für gewöhnlich mit Luft unter Normaldruck gefüllt ist. Die Energie wird hier nicht durch einen Stromfluß, sondern ausschließlich durch die Energie des elektromagnetischen Feldes im Inneren des Hohlleiters übertragen. Dieses hat im Gegensatz zu Feldern um Drahtleitungen auch Feldlinien parallel zur Ausbreitungsrichtung (s. Abb. 3.2). Je nachdem, ob es sich dabei um elektrische oder magnetische Feldlinien handelt, unterscheidet man zwischen E- und H-Wellen. Diese sind beim rechteckigen Hohlleiter durch die Indizes m und n weiter unterteilt. Dabei bezeichnet m die Feldverteilung entlang der Breitseite a und n entlang der Schmalseite b . Für die Wellenausbreitung gibt es eine untere Grenzfrequenz $f_g = \lambda_g \frac{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{c}$, wobei ϵ_r und μ_r für Luft etwa 1 sind. Die Grenzwellenlänge

erhält man in Abhängigkeit der beiden Indizes durch $\lambda_g = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$. Die Einkopplung

einer Welle ist sowohl auf kapazitivem als auch auf induktivem Wege möglich. Der Wellentyp sowie die Feldverteilung lassen sich durch die Wahl der Antennenform festlegen. Da Hohlleiterwellen polarisiert sind, sind besondere Maßnahmen zur Anpassung von Hohlleitern nötig. Zur Phasendrehung benutzt man kreiszylindrische Hohlleiter. Diese finden u.a. auch bei der Verbindung von Hohlraumresonatoren Anwendung.[17]

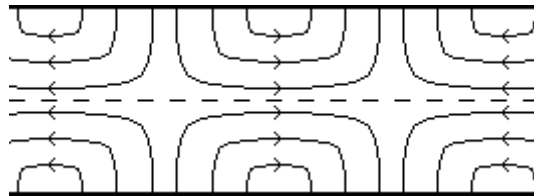


Abbildung 3.2: Feldlinien im Hohlleiter[5]

Kapitel 4

Praktische Anwendungen

4.1 NMR-Spektroskopie

4.1.1 Physikalische Grundlagen

Die Kernresonanz wurde 1946 von den beiden Arbeitsgruppen F. Bloch, W. W. Hansen und M. E. Packard sowie E. M. Purcell, H. C. Torrey und R. V. Pound unabhängig voneinander entdeckt. Bloch und Purcell erhielten dafür 1952 gemeinsam den Nobelpreis für Physik. Die NMR-Spektroskopie ist ein Verfahren, das bei der Strukturaufklärung organischer Substanzen mehr und mehr an Bedeutung gewinnt. Es ermöglicht Analysen im 5-Minutentakt und erlaubt daher eine große Anzahl von Analysen in kurzer Zeit, wie es z.B. bei der modernen Pharmaforschung nötig ist. Man unterscheidet vor allem zwischen vier Spektroskopietypen, die auf die Nuklide Wasserstoff-1, Kohlenstoff-13, Fluor-19 und Phosphor-31 ausgerichtet sind. Im weiteren soll nur vom Wasserstoff die Rede sein, man spricht hier auch von ^1H -NMR. Die Methode läßt sich sowohl quantenmechanisch als auch mit den Mitteln der klassischen Physik erklären. Im Folgenden beziehe ich mich auf die klassische Physik. Der Atomkern des einfachen Wasserstoffs besteht aus einem einzelnen, einfach positiv geladenen Proton. Es besitzt einen Spin von $\frac{1}{2}$, hat also einen Drehimpuls, der der Hälfte des Drehimpulsquantums \hbar ¹ entspricht. Die Rotation einer Ladung führt ähnlich wie in einer Spule zu einem magnetischen Moment μ . Legt man nun ein Magnetfeld B_0 an, erfährt das magnetische Moment ein Drehmoment, welches zu einer Taumelbewegung (Präzession) um eine Achse entlang der Feldrichtung führt. In einem solchen Feld kann sich das magnetische Moment parallel oder antiparallel zur Feldrichtung ausrichten, wobei zwischen beiden Zuständen eine Energiedifferenz besteht. Kennt man den Betrag μ_z der Komponente von μ , die parallel zur Feldrichtung ist, so läßt sich die Energiedifferenz berechnen durch $\Delta E = 2\mu_z B$. Bei einer Flußdichte von 1T beträgt ΔE ca. $2,8 \cdot 10^{-29}$ J. Bei der Untersuchung einer Stoffprobe hat man jedoch kein einzelnes Proton. Beim Anlegen eines Magnetfeldes erhält man daher eine statistische Verteilung beider Zustände, wobei der energieärmere, parallele Zustand überwiegt. Durch Energiezufuhr läßt sich dieser Gleichgewichtszustand beeinflussen. Wenn man die Probe einem Hochfrequenzimpuls mit der Resonanzfrequenz $f_r = \frac{\Delta E}{h}$ aussetzt, wird diese von Protonen des unteren Energiezustandes absorbiert. Diese erreichen dadurch den oberen Energiezustand. Nach dem Abschalten des Impulses stellt sich der ursprüngliche Gleichgewichtszustand wieder ein, wobei eine Strahlung mit der Resonanzfrequenz ausgesandt wird.[18]

4.1.2 Kernresonanz in Molekülen

In einem Molekül ist jedes Wasserstoffatom mit einem anderen Atom verbunden und hat eine ihm eigene Umgebung, die die Kernresonanz beeinflusst. Beim Einbringen der Stoff-

¹Das Drehimpulsquantum ist eine Größe aus der Quantenphysik. Es ergibt sich aus dem Planckschen Wirkungsquantum h durch $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. Der Drehimpuls kann nur bestimmte Vielfache davon annehmen.

probe in das Magnetfeld wird im Molekül eine Elektronenbewegung induziert, die wie bei einem Supraleiter so lange bestehen bleibt, wie sich die Probe im Magnetfeld befindet. Diese Elektronenzirkulation bewirkt ihrerseits ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Magnetfeld B_0 entgegengesetzt ist. Mit erhöhter Elektronendichte ist das lokale Magnetfeld B_{loc} schwächer, die Energiedifferenz ΔE und damit auch die Resonanzfrequenz f_r geringer. Da f_r auch von B_0 abhängig ist, hat man für diese Flußdichteverschiebung einen anderen Maßstab gewählt. Man berechnet die Verschiebung relativ zu einer Standardsubstanz, dem Tetramethylsilan (TMS) mit der chemische Formel $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$. In der Praxis geht man von einer festen Frequenz f aus und erhält daher eine Resonanzflußdichte B_{0x} . Die chemische Verschiebung δ ist von der Frequenz unabhängig und ergibt sich durch $\delta = \frac{B_{0TMS} - B_{0x}}{B_{0TMS}}$ und wird auf der Rechtsachse dargestellt, die Stärke der Absorption auf der Hochachse. Die Fläche unter einer Resonanzbande ist der Anzahl der Protonen direkt proportional. Die chemische Verschiebung wird außer durch Elektronen in der unmittelbaren Umgebung auch durch andere Wasserstoffatome an benachbarten Atomen beeinflusst. Diese verstärken bzw. schwächen das lokale Magnetfeld zusätzlich in Abhängigkeit von ihrer Ausrichtung, allerdings in geringerem Maße. Dies führt zu einer Aufspaltung der Banden in Multipletts (s. Abb. 4.1). Man bezeichnet diesen Effekt als Spin-Spin-Kopplung. Ein weiterer Effekt findet sich bei Wasserstoffatomen an aromatischen Ringen (s. Abb. 4.2). Trotz der höheren Elektronendichte kommt es hier zu einer Erhöhung der Flußdichte im Bereich der Protonen. Dies kommt dadurch zustande, dass in dem Ring ein Strom induziert wird, der nur durch den aromatischen Zustand möglich ist. Jedes Kohlenstoffatom steuert ein Elektron zur aromatischen Bindung bei. Diese sechs Elektronen sind über den Ring frei beweglich. Der Ringstrom führt zu einer Verringerung der Flußdichte im inneren des Ringes, aber zu einer Verstärkung außerhalb, wo sich die Wasserstoffatome befinden.[19]

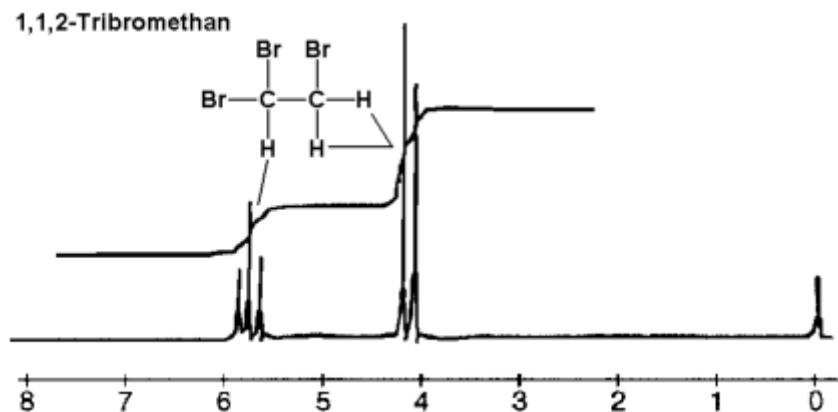


Abbildung 4.1: NMR-Spektrogramm; Aufspaltung in Multipletts[19]

4.1.3 Praktischer Aufbau

Grundsätzlich gibt es zwei Typen von NMR-Spektroskopen: Geräte mit konstanter Frequenz und Geräte mit konstantem Magnetfeld. Bei ersteren wird ein konstantes Magnetfeld durch das variable Magnetfeld einer Spule überlagert, um den Resonanzbereich zu überstreichen. Man unterscheidet nun zwischen Geräten mit einer und mit zwei Spulen. Bei einem Zweispulengerät wird in der Sendespule ein Hochfrequenzfeld mit einer Frequenz von z.B. 200 MHz erzeugt. Mit der Empfängerspule wird die Amplitude gemessen und durch Magnetfeldänderung nach Absorptionsmaxima gesucht. Bei einem Einspulengerät wird der Rückgang der Amplitude in der Spule gemessen. Diese Gerätetypen werden jedoch mehr und mehr durch Geräte mit konstantem Magnetfeld verdrängt, da sich mit ihnen höhere Flußdichten erreichen lassen (s. Abb. 4.3). Man verwendet supraleitende Spulen, die in flüssigen Helium auf -269°C gekühlt werden. Dieses Kühlgefäß ist von flüssigem Stickstoff

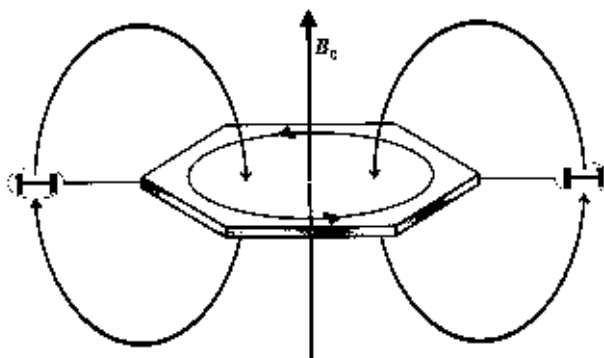


Abbildung 4.2: Magnetfeld des aromatischen Ringstroms[19]

mit -196°C umgeben. In der Spule wird ein Strom erzeugt, der wegen des fehlenden Widerstandes praktisch nicht abnimmt. So erreicht man ein extrem starkes, hochkonstantes Magnetfeld, in das die auf 25°C temperierte Probe in einem dünnen Röhrchen eingebracht wird. Anschließend wird ein breitbandiger, hochfrequenter Impuls ausgesandt, der die Protonen in der Probe in den höherenergetischen Zustand versetzt. Beim Zurückfallen in den Normalzustand senden diese Strahlung mit charakteristischen Frequenzen aus, die sich zu einem komplexen Signal überlagern. Dieser Vorgang wird mehrfach wiederholt und die aufgezeichneten Signale aufsummiert. Die erhaltene Schwingung wird einer Fourier-Analyse unterzogen, um die Anteile der einzelnen Frequenzen zu erhalten, die auf die chemische Verschiebung umgerechnet werden. Der Nachteil dieses Gerätes ist das starke magnetische Streufeld, das abgeschirmt werden muß und sich nicht abschalten läßt. Eine Unterbrechung der Spule würde zum Zusammenbruch des Magnetfeldes und zur Induktion einer sehr hohen Spannung führen, die das 400.000,- DM teure Gerät zerstören würde.[20]

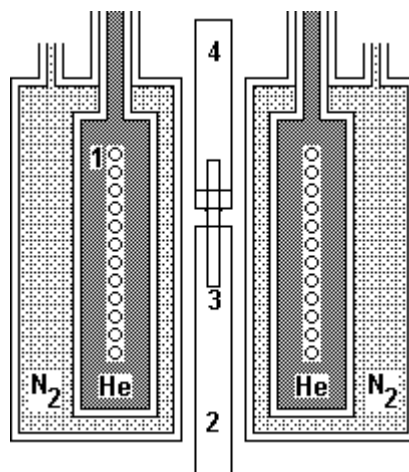


Abbildung 4.3: NMR-Spektroskop; 1: supraleitende Spule; 2: Sende/Empfangsspule; 3: Probenröhrchen; 4: Probenwechsler[35]

4.1.4 Kernspin-Tomographie

Auf den gleichen physikalischen Grundlagen beruht auch die Kernspin-Tomographie (KST). Hier wird jedoch nicht die chemische Verschiebung gemessen, sondern die Protonendichte. In einem kleinen Bereich mit bekannten Koordinaten wird ein Magnetfeld im Resonanzbereich erzeugt und die Absorption gemessen. Je größer diese ist, desto höher ist die Protonendichte. Das Ergebnis der Messung wird Anschließend in ein Schnittbild umgewandelt.

4.1.5 Ortung von Grundwasservorkommen

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Braunschweig hat ein ursprünglich russisches Verfahren weiterentwickelt, mit dem sich nach dem Prinzip der Kernspintomographie Wasseradern im Boden orten lassen. Als Magnetfeld dient hier das relativ schwache Erdmagnetfeld. Eine Drahtschleife von 100m Durchmesser dient als Sende- und Empfangsspule. Durch einen Impuls von 3000V werden die Protonen angeregt. Das empfangene Signal liegt wegen der geringen Flußdichte im Längstwellenbereich. Durch wiederholtes Messen und Aufsummieren erhält man nicht nur Informationen über das Vorhandensein von Wasser, sondern auch über dessen Salzgehalt und Fließgeschwindigkeit sowie die Porengröße des Bodens, die für die Förderung entscheidend ist.[21]

4.2 Der Mikrowellenherd

In einem Mikrowellenherd werden Speisen durch Mikrowellen erwärmt. Diese werden von einem Magnetron erzeugt und haben eine Frequenz von etwa 2,5 GHz. Ihre Wärmewirkung beruht auf der Absorption durch Wassermoleküle. Deren Dipolnatur bewirkt eine wechselnde Ausrichtung nach dem elektrischen Feld. Bei niedrigen Frequenzen erfolgt diese Ausrichtung synchron, sodass wie bei einem idealen Kondensator nur Blindleistung abfällt. Bei optimaler Frequenz bewirkt die Trägheit der Wassermoleküle eine Verzögerung, durch die eine Wirkleistung in Form von kinetischer Energie (Wärme) erbracht wird. Würde man die Frequenz noch höher wählen, so würden sich die Wassermoleküle kaum noch bewegen. Aus der Geometrie des Wassermoleküls folgt eine optimale Frequenz $f \approx 2,5\text{GHz}$. Die Eindringtiefe entspricht etwa der Wellenlänge von 12cm. Tiefer gelegene Zonen werden konventionell durch Wärmeleitung erwärmt.[22] Da Mikrowellen von Metallen reflektiert werden, ist ein Mikrowellenherd von metallischen Wänden umgeben. Auch in die gläserne Ofentür ist ein Metallgitter integriert. Aus dem gleichen Grund kann man in einem Mikrowellenherd kein Metallgeschirr benutzen. Keramik ist für Mikrowellen durchlässig. Für die Bräunung von Fleisch benutzt man spezielles Mikrowellengeschirr. Dessen Beschichtung absorbiert die Mikrowellen und erwärmt die Keramik. Die Bräunung erfolgt dann über Wärmeleitung. Allerdings sind nicht alle Lebensmittel gleichermaßen für eine Mikrowellenzubereitung geeignet. Zwar enthalte viele Lebensmittel Wasser, dieses ist aber häufig ungleichmäßig verteilt. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Erwärmung. Unter Umständen kann auch der Energieverbrauch bei einer Kochplatte geringer sein, je nach Menge der Lebensmittel. Nur etwa 50% der aufgewandten Energie werden in Mikrowellen umgewandelt, der Rest ist (Ab-)Wärme. Bei einer Kochplatte wird sämtliche Energie in Wärme umgesetzt, die jedoch indirekt auf die Speisen übertragen wird.[23]

4.3 Anwendungen des Teslatransformators

4.3.1 Hochspannung

Wenn man eine Sekundärspule mit sehr vielen Windungen benutzt, lassen sich damit sehr hohe Spannungen erzeugen, die für den menschlichen Körper ungefährlich sind. Die hohe Frequenz bewirkt einen Skineffekt, durch den der Strom an der Körperoberfläche abfließt und keinen Schaden anrichten kann. Dadurch sind Versuche mit Blitzen möglich, in die der Mensch eingeschaltet werden kann (s. Abb. 4.4). Diese sind jedoch nicht besonders realistisch, da die Stromstärken wesentlich geringer sind als bei Blitzen während eines Gewitters. Dennoch kann man den Weg des Blitzes verfolgen. Mit etwas Zubehör läßt sich mit einem Teslatransformator Kirlian-Fotografie betreiben. Man benötigt dafür eine mit einer durchsichtigen, leitfähigen Schicht beschichtete Glasplatte, unter die man im Dunkeln ein Fotopapier legt. Nun legt man zwischen die Beschichtung und den Körper einer Testperson eine hochfrequente Hochspannung an. Die Person legt ihren Finger auf die Glasplatte. Durch die dabei entstehenden Funkenentladungen wird das Fotopapier belichtet. Heilpraktiker versuchen, aus solchen Fotos auf den Gesundheitszustand ihrer Patienten zu schließen,

was jedoch jeder wissenschaftlichen Grundlage entbehrt. Eine besonders dekorative Anwendung sind Blitze in Glaskugeln. Diese sind innen leitfähig beschichtet. Wenn man die Hände auf die Kugel legt, wandern die Blitze durch das veränderte elektrische Feld. Die Farbe der Blitze ist abhängig von der Gasfüllung.[24]

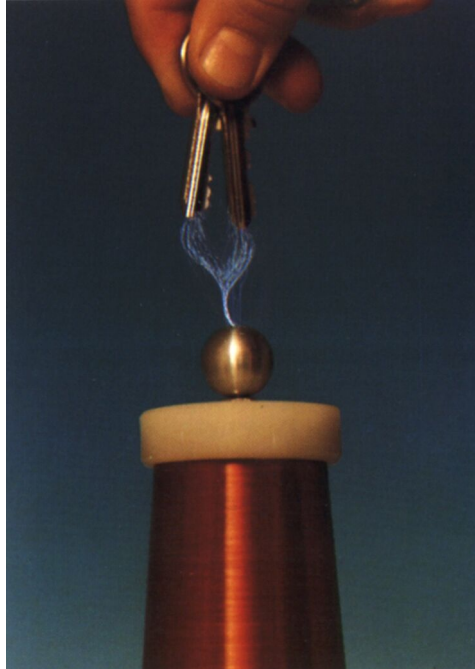


Abbildung 4.4: Blitze aus einem Teslatriansformator[24]

4.3.2 Hochstrom

Hohe Stromstärken erreicht man durch eine Sekundärspule mit wenigen Windungen. Diese muß einen geringen Widerstand haben, da die Spannungen relativ klein sind. Solche Hochfrequenzströme werden in der Medizin benutzt, um innere Organe zu erwärmen. Dies ist trotz Stromstärken von etwa 10A ungefährlich.[10]

4.4 Rundfunk

4.4.1 Grundlagen

Wenn man einem linearen Oszillator laufend Energie zuführt, indem man ihn an eine geeignete Schaltung zur Erzeugung hochfrequenter Schwingungen ankoppelt, dann vollführen die in ihm enthaltenen freien Ladungsträger eine ungedämpfte Schwingung. Dabei wird Energie in Form elektromagnetischer Wellen abgestrahlt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Diese Wellen sind polarisiert. Das elektrische Feld liegt parallel zum Sendedipol, die magnetischen Feldlinien bilden konzentrische Kreise darum. Der Poynting-Vektor $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ zeigt entlang der Ausbreitungsrichtung. Der größte Teil der Wellen wird in einer Ebene senkrecht zum Dipol abgestrahlt, während parallel dazu keine Wellen abgestrahlt werden. Betrachtet man nun einen Punkt, der weit genug vom Sender entfernt ist, um nicht durch dessen nahes Wechselfeld beeinflusst zu werden, so läßt sich das Durchlaufen der Wellen verfolgen. An diesem Punkt ist ein elektromagnetisches Wechselfeld mit der Sendefrequenz feststellbar. Stellt man hier einen geeigneten Empfangsdipol parallel zum elektrischen Feld und damit auch zum Sendedipol auf, so wird in ihm eine Schwingung ange-regt. An diesen Dipol läßt sich ein Schwingkreis mit einem Verstärker ankoppeln, an dessen Ausgang eine Anzeigeeinheit angeschlossen werden kann, wodurch die Welle nachweisbar

ist. Schaltet man den Sender ab, so klingt auch die Schwingung im Empfänger ab, es wird nichts mehr angezeigt. Diese einfachste Art der drahtlosen Kommunikation mit Radiowellen läßt sich für die Übermittlung von Morsezeichen verwenden. Für weitere Anwendungen sind jedoch zusätzliche Maßnahmen nötig.[25]

4.4.2 Modulation

Die Höhe des Sendemastes sollte etwa der halben Wellenlänge entsprechen. Würde man Audiosignale direkt in elektromagnetische Wellen umwandeln, so ergäbe sich wegen $f \approx 1\text{kHz}$: $h = \frac{\lambda}{2f} \approx 150\text{km}$. Solche Höhen sind natürlich nicht erreichbar.[26] Daher sendet man ein hochfrequentes Signal, auf das die Audiosignale aufmoduliert werden. Man unterscheidet zwischen Amplitudenmodulation und Frequenzmodulation. Bei der Amplitudenmodulation (AM) wird die Sendeamplitude im Takt der Tonfrequenz variiert. Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass die Amplitude beim Empfänger auch durch andere Einflüsse (z.B. Wetter) schwankt. Damit schwankt auch die Lautstärke. Daher benutzt man heute vielfach Frequenzmodulation (FM). Hier wird die Sendefrequenz verändert. Da die Frequenz von äußeren Faktoren unabhängig ist, ergibt sich eine konstante Lautstärke und auch eine verbesserte Tonqualität. Da dieses Verfahren eine höhere Übertragungsbandbreite benötigt, sind höhere Sendefrequenzen nötig. Diese lassen sich nur in direkter Sichtverbindung zum Sender empfangen. Für Langstreckenkommunikation benutzt man daher amplitudenmodulierte Kurzwellen, die von der Ionosphäre reflektiert werden und so auch interkontinental übertragen werden können. [27]

Versuch: Amplitudenmodulation bei 6 MHz

Als Sender wird der bereits in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Röhrengenerator benutzt. Um die Modulation zu erreichen, wird ein Sinusgenerator benutzt, dessen Ausgangsspannung an einem Transformator anliegt. Die Sekundärwicklung liegt in Reihe mit dem Gitterableitwiderstand. Der Empfänger besteht aus einer Drahtwicklung, an die ein Speicheroszilloskop angeschlossen ist (s. Abb. 4.5). Zu Beginn ist die Amplitude des Sinusgenerators null. Durch Verändern des Kondensators ändert sich die Schwingungsfrequenz. Dies ist mit dem Oszilloskop deutlich zu erkennen (s. Abb. 4.6). Nun wird der Sinusgenerator eingeschaltet und auf eine Frequenz von etwa 1 kHz eingestellt. Um die Modulation sichtbar zu machen, wird der Frequenzbereich des Oszilloskops umgestellt und die Speicherfunktion eingeschaltet. Erhöht man nun die Amplitude des Sinusgenerators, so wird die charakteristische Form einer amplitudenmodulierten Welle sichtbar, die sich auch festhalten läßt (s. Abb. 4.7).

4.4.3 Empfangsschaltungen

Da man beim Rundfunkempfang gezielt einen Sender mit einer bestimmten Frequenz empfangen möchte, muß man den Empfänger auf genau diese Frequenz abstimmen. Dafür benötigt man einen Schwingkreis mit variabler Frequenz, der durch die empfangene Schwingung zu Resonanz angeregt wird. Man kann nun entweder die Induktivität verändern (z.B. indem man einen Ferritkern hinein oder heraus schiebt) oder die Kapazität. Bei 'handbetriebenen' Geräten wird die Sendereinstellung durch drehen an einem Regler vorgenommen. Dadurch werden die Platten eines Plattenkondensators gegeneinander verschoben, wodurch sich die Kapazität dieses sog. Drehkondensators verändert. In vollelektronischen Geräten übernehmen Kapazitätsdioden diese Aufgabe. Werden diese in Sperrichtung betrieben, so wirkt ihre Sperrschicht wie das Dielektrikum eines Kondensators. Dessen Kapazität hängt von der Dicke der Sperrschicht ab. Diese verändert sich mit der anliegenden Spannung, die z.B. beim Aufrufen eines gespeicherten Senders eingestellt wird. Beim Sendersuchlauf wird die Spannung kontinuierlich verändert, bis ein Signal empfangen wird. Da jedoch die Amplitude der Schwingung sehr klein ist, muß diese in mehreren Verstärkerstufen verstärkt werden. Eine Ausnahme bildet das Detektorradio. Dabei wird direkt an den Schwingkreis ein hochohmiger Ohrhörer angeschlossen. So lassen sich allerdings nur sehr starke Sender



Abbildung 4.5: Versuch zur Amplitudenmodulation: links der Sinusgenerator mit Koppeltransformator, in der Mitte der Röhrengenerator, rechts die Empfangsspule mit Oszilloskop

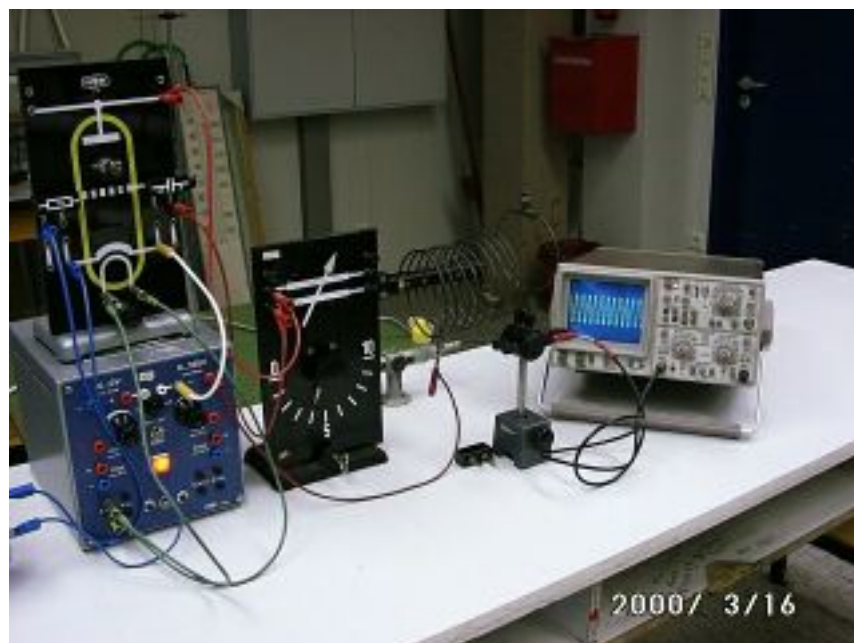


Abbildung 4.6: empfangene Sinusschwingung auf dem Oszilloskop

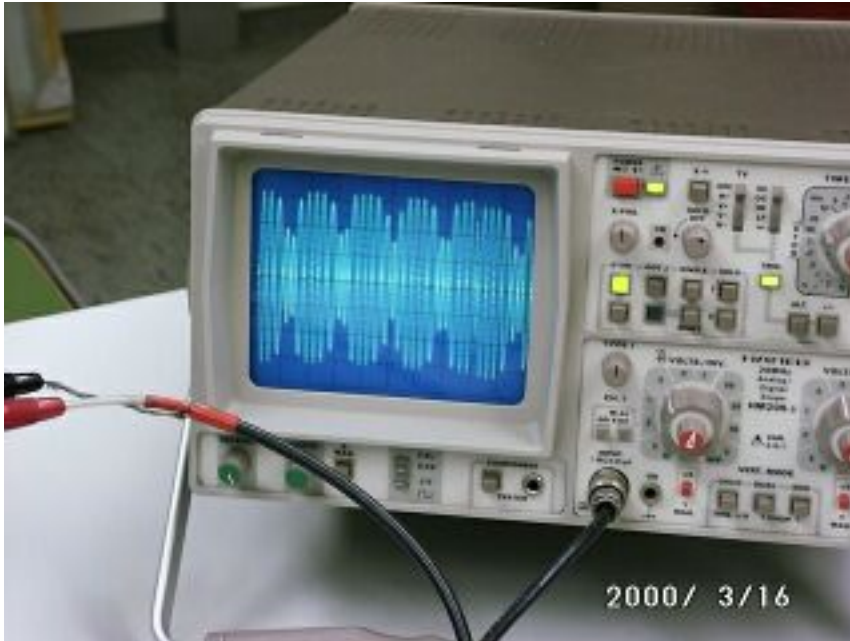


Abbildung 4.7: amplitudenmodulierte Sinusschwingung, im Speicherbetrieb

empfangen. Für die Schaltung des Empfangsteils gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im einfachsten Fall verbindet man den Empfangsdipol (die Antenne) mit dem Schwingkreis und schließt daran die Verstärkerstufen an. Diese müssen im gesamten Frequenzbereich verstärken. Solche Breitbandverstärker erreichen keinen sehr hohen Verstärkungsgrad. Bessere Ergebnisse erzielt man mit selektiven Verstärkerstufen. Diese verstärken eine Frequenz besonders stark, auf die sie mit einem Resonanzglied aus Spule und Kondensator abgestimmt sein müssen. Würde man nun den Sender wechseln, so müßten alle Verstärkerstufen auf die neue Frequenz abgestimmt werden, was in der Praxis schwierig ist. Moderne Geräte funktionieren daher nach einem anderen Prinzip, dem des Superhet-Empfängers. Dieser verfügt über einen Oszillator mit variabler Frequenz. Diese wird dem Empfangssignal überlagert. Dabei entsteht eine Schwebung, deren Frequenz sich aus der Differenz der Oszillatorfrequenz und der Frequenz des gewählten Senders ergibt. Auf diese sog. Zwischenfrequenz sind alle nachfolgenden Verstärkerstufen abgestimmt. Indem man nun die Oszillatorfrequenz verändert, läßt sich festlegen, mit welcher Sendefrequenz sich durch Überlagerung die eingestellte Zwischenfrequenz ergibt. Am Ende jeder dieser Empfangsschaltungen erhält man eine verstärkte Hochfrequenz, die zur nächsten Stufe weitergeleitet wird.[28]

4.4.4 Demodulation

Aus der verstärkten Hochfrequenz muß die Tonfrequenz zurückgewonnen werden. Bei Amplitudenmodulation ist dies recht einfach. Die Hochfrequenz wird gleichgerichtet und mit einem parallel geschalteten Kondensator ausgefiltert. Die Tonfrequenz wird verstärkt und hörbar gemacht. Etwas komplizierter ist die Demodulation von frequenzmodulierten Signalen. Neben integrierten Schaltungen benutzt man hier Verhältnisgleichrichter, die die Frequenzschwankungen in Spannungsschwankungen umwandeln. Diese werden von ihrer Gleichspannungskomponente durch einen Kondensator befreit und dem Verstärker zugeführt. Eine andere Möglichkeit ist der Phasendemodulator. Dabei wird ein Resonanzkreis zu einer erzwungenen Schwingung angeregt. Diese ist zur Erregerschwingung phasenverschoben. Dabei hängt die Phasendifferenz von der Erregerfrequenz ab. Beide Schwingungen werden addiert, wobei sie sich je nach Phasendifferenz verstärken oder schwächen. Dies äußert sich in einer veränderlichen Amplitude. Dafür ist es notwendig, dass die Amplitude am Eingang des Demodulators konstant ist. Dies wird durch eine hohe Verstärkung mit anschließender

Spannungsbegrenzung erreicht.[29]

4.4.5 Andere Rundfunkanwendungen

Außer Audiosignalen lassen sich auch Videosignale drahtlos übermitteln. Das Bild wird dabei in drei Komponenten für die drei Grundfarben zerlegt, deren Helligkeit zeilenweise abgetastet und auf die Trägerwelle aufmoduliert wird. Zusätzlich enthält das Signal zwei Audiokanäle (für Stereo- oder Zweikanalton), Videotext und einen Synchronisationsimpuls, der dafür sorgt, dass der linke obere Bildpunkt stets in der linken oberen Ecke dargestellt wird. In großen (überwiegend städtischen) Gebieten erfolgt die Fernsehübertragung drahtgebunden über Koaxialleitungen. Bei diesem sog. Kabelfernsehen erreicht man bessere Übertragungsqualitäten, ohne Sendemasten in der Nähe zu benötigen, und eine geringere Störanfälligkeit, z.B. bei Gewitter. Eine weitere Möglichkeit bildet die Satellitenübertragung. Auf die Trägerfrequenz (in GHz-Bereich) wird das Videosignal aufmoduliert. Außerdem werden mehrere MHz-Signale aufmoduliert, die ihrerseits mit den Audiosignalen moduliert sind. Somit lassen sich auf einem Kanal ein Fernsehprogramm mit Stereoton und zusätzlich mehrere Radioprogramme übertragen. Noch höhere Übertragungskapazitäten erreicht man in Digitaltechnik. Dadurch verbessert sich auch die Übertragungsqualität. Mittlerweile ist sogar das Herunterladen großer Datenmengen aus dem Internet via Satellit möglich.[30] Aber auch im Nahbereich findet Funkübertragung Anwendung. Beispiele sind die Datenübertragung von Wettersensoren zu einer Auswerteeinheit oder Funkfernbedienungen. Diese funktionieren auch durch (nichtleitende) Wände hindurch, was bei Infrarotfernbedienungen nicht der Fall ist. Besonders beliebt sind Schnurlos- und Mobiltelefone (sog. Handys), mit denen man im ganzen Haus bzw. praktisch überall telefonieren kann. Umstritten ist jedoch, ob die starken Abstrahlungen vor allem von Schnurlostelefonen schädlich sind. Versuche der Universität Zürich, bei denen schlafende Testpersonen den Wechselfeldern ausgesetzt wurden, ergaben eine Erhöhung der Gehirnwellentätigkeit.[31]

4.5 Radar

Elektromagnetische Wellen werden von Metallen reflektiert. Läßt man einen gerichteten Sender um eine Achse rotieren, so kann man die reflektierten Wellen in Abhängigkeit von der Richtung des reflektierenden Objekts nachweisen. Auch dessen Entfernung läßt sich berechnen, indem man die zeitliche Differenz von der Aussendung des Signals bis zu seiner Ankunft mißt und mit der Lichtgeschwindigkeit multipliziert. Dieses Verfahren wird vor allem in der See- und Luftfahrt benutzt. Es gibt jedoch sog. Stealth-Flugzeuge, die die Radarwellen zerstreuen und so praktisch nicht zu orten sind. Indem man zwei Empfänger benutzt, erhält man dreidimensionale Bilder. Dadurch war die Vermessung der Erde von einem Space Shuttle aus mit einer Genauigkeit von 6m möglich. Etwas anders funktioniert die Geschwindigkeitsmessung. Durch den Dopplereffekt steigt die Frequenz der reflektierten Wellen, wenn sich das Objekt nähert, ansonsten sinkt sie. Daraus läßt sich die Geschwindigkeit z.B. von Fahrzeugen berechnen. Sollte diese einen bestimmten Maximalwert überschreiten, so wird ein Fotoapparat ausgelöst.[32]

Schlußbewertung

Die Arbeit an einem eigenen, selbst erdachten Thema erwies sich als sehr interessant. Besonders lehrreich waren die praktischen Probleme bei den Versuchen. Keiner der aufgeführten Versuche entspricht genau der Vorgabe aus der Literatur. Aber auch das Erkennen von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Quellen war sehr interessant. Es war nicht schwierig, Informationen zu einem Themenbereich zu bekommen, der (wenn auch unbewußt) vollkommen alltäglich ist. Die Anwendungsbereiche sind bereits so zahlreich, dass es schwierig ist, sie auf fünfzehn Seiten unterzubringen. Im kommenden Jahrhundert wird die Hochfrequenztechnik in weitere Bereiche des Lebens vordringen, und vielleicht wird schon in zehn Jahren jemand, der dieses Thema für die Facharbeit wählt, ernsthafte Probleme damit bekommen, sich auf *zwanzig* Seiten zu beschränken.

Anhang A

Technische Daten zu den Versuchen

Alle Versuche sind nach Anleitungen von PHYWE durchgeführt bzw. leicht modifiziert worden. Für den Nachbau von Versuchen sind im Folgenden die benutzten Geräte sowie deren Handhabung angegeben.

A.1 Schwingungserzeugung bei 30 MHz

Benötigte Materialien:

- 1 Elektronenröhre EC 92
- 1 Kondensator 50 pF
- 1 Widerstand 5 kW
- 1 HF-Spule, 3 Windungen
- 1 HF-Spule, 1 Windung
- 1 Glühlampe, 4 V/40 mA
- Spannungsversorgung, 6,3 V \sim und 250 V $=$
- Anschlußmaterial
- Stativmaterial

Der Sender wird gemäß dem Schaltplan (Abb. A.1) aufgebaut und durch Einschalten des Netzgerätes in Betrieb genommen. Als Empfänger dient die HF-Spule mit einer Windung, in die die Glühlampe eingeschaltet ist. Bei einer Entfernung von etwa 5 cm sollte diese aufleuchten. Ist die nicht der Fall, so ist ggf. mit einem Oszilloskop zu prüfen, ob überhaupt eine Schwingung erzeugt wird. Unter Umständen kann es nötig sein, den Gitterableitwiderstand zu verändern.

A.2 Schwingungserzeugung bei 6 MHz

Benötigte Materialien:

- 1 Elektronenröhre EC 92
- 1 Kondensator 100 pF
- 1 Drehkondensator

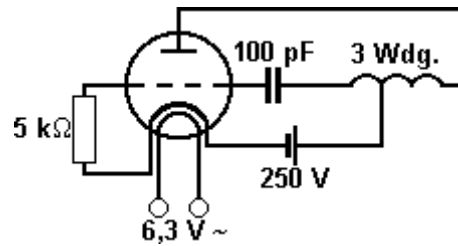


Abbildung A.1: Schaltplan zum Röhrengenerator für 30 MHz

- 1 Widerstand 5 kW
- 1 HF-Spule, 9 Windungen
- 1 HF-Spule, 1 Windung
- 1 Glühlampe, 4 V/40 mA
- Spannungsversorgung, 6,3 V \sim und 250 V=
- Anschlußmaterial
- Stativmaterial

Der Sender wird gemäß dem Schaltplan (Abb. A.2) aufgebaut und durch Einschalten des Netzgerätes in Betrieb genommen. Die Handhabung entspricht der des vorigen Versuches.

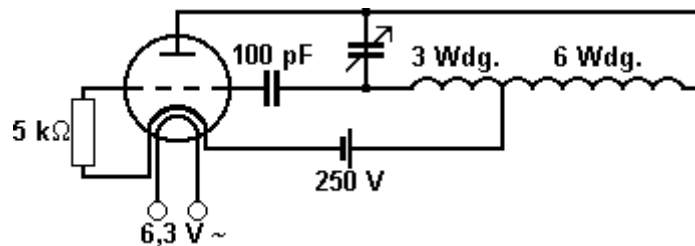


Abbildung A.2: Schaltplan zum Röhrengenerator für 6 MHz

A.3 Induktionswirkung bei Hochfrequenz

Benötigte Materialien:

- 1 Elektronenröhre EC 92
- 1 Kondensator 100 pF
- 1 Drehkondensator
- 1 Widerstand 5 kW
- 2 HF-Spulen, 9 Windungen
- 1 Glühlampe, 4 V/40 mA
- Spannungsversorgung, 6,3 V \sim und 250 V=
- Anschlußmaterial
- Stativmaterial

- Abschirmplatten aus verschiedenen Materialien

Der Sender wird gemäß dem Schaltplan (Abb. A.2) aufgebaut und durch Einschalten des Netzgerätes in Betrieb genommen. Als Empfänger dient die zweite HF-Spule, in die die Glühlampe eingeschaltet ist. Die Reichweite sollte mindestens 15 cm betragen. Um die Abschirmung zu demonstrieren, nähert man die Spulen auf etwa 5 cm an. Beim Einführen der Metallplatten ist darauf zu achten, dass diese die Spulen nicht berühren.

A.4 Amplitudenmodulation

Benötigte Materialien:

- 1 Elektronenröhre EC 92
- 1 Kondensator 100 pF
- 1 Drehkondensator
- 1 Widerstand 5 kW
- 1 HF-Spule, 9 Windungen
- 1 HF-Spule, 1 Windung
- 1 NF-Übertrager, 300 + 1200 Windungen mit Eisenkern
- Spannungsversorgung, 6,3 V~ und 250 V=
- Speicheroszilloskop (min. 10, besser 30 MHz)
- Sinusgenerator
- Anschlußmaterial
- Stativmaterial

Der Versuch wird gemäß dem Schaltplan (Abb. A.3) aufgebaut. Zunächst wird das Oszilloskop eingeschaltet, bis ein Bild sichtbar wird. Nun wird das Netzgerät für den Röhrengenerator eingeschaltet. Auf dem Oszilloskop ist eine Sinuskurve sichtbar. Die Frequenz wird auf etwa 5 MHz eingestellt. Um die modulierte Schwingung zu sehen, muß nun der Frequenzbereich gewechselt werden. Als Modulationsfrequenz eignen sich 1 - 10 kHz. Der Sinusgenerator wird auf diese Frequenz eingestellt und eingeschaltet. Die Amplitude wird langsam erhöht, bis die Modulation deutlich erkennbar ist. Dabei ist zu beachten dass sich stets zwei Berge bzw. Täler gegenüberstehen. Sollte dies nicht der Fall sein, so handelt es sich nicht um die gewünschte Modulation, sondern um eine überlagerte Brummspannung. In diesem Fall sind die Anschlüsse des Sinusgenerators zu überprüfen, ggf. ist dessen Amplitude zu erhöhen. Das Bild läßt sich mit dem Oszilloskop einfrieren.

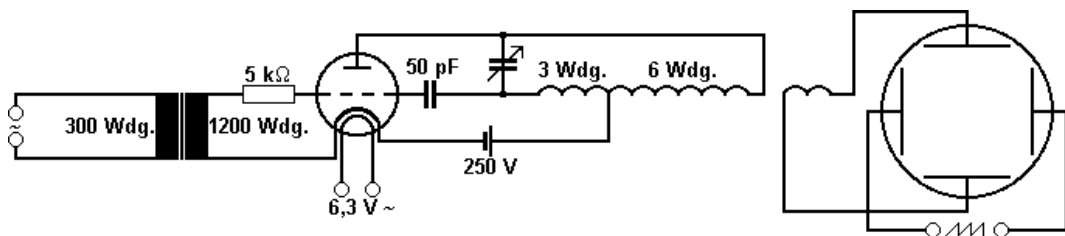


Abbildung A.3: Schaltplan zur Amplitudenmodulation

Literaturverzeichnis

- [1] 5, S. 176f.
- [2] 4, S. 358ff. + S. 429
- [3] 4, S. 411f.
- [4] 4, S. 430f.
- [5] 4, S. 437
- [6] 6, S. 288
- [7] 3, S. 488f.
- [8] 3, S. 490f.
- [9] 3, S. 492f.
- [10] 4, S. 416
- [11] 3, S. 493f.
- [12] 4, S. 422
- [13] 5, S. 206ff.
- [14] 4, S. 436
- [15] 5, S. 209f.
- [16] 5, S. 210ff.
- [17] 5, S. 212ff.
- [18] 10, S. 1
- [19] Bode, D.: NMR - Ein physikalisches Verfahren mit zunehmender Bedeutung, in: H. Pietka (Hrsg.), Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 8/44 (1.Dezember 1995), Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln 1995, S. 22 - 27
- [20] 10; Notizen anlässlich eines Chemie-Seminars
- [21] Forschung Aktuell, Wissenschaftsmagazin; Do, 17.3.2000, 16:35, Deutschlandfunk
- [22] 4, S. 1101
- [23] 7, S. 354ff.
- [24] 7, S. 324f.
- [25] 4, S. 431ff.; 9 Band 1, S. 88f.
- [26] 4, S. 435f.

- [27] 9 Band 2, S. 115
- [28] 8, S. 448ff.
- [29] Kagerer, Ernst: Modulation, in: Südbeck, Walter / Kagerer, Ernst (Hrsg.), Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 3/34 (15.April 1985), Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln 1985, S. 18 - 23
- [30] Bedienungsanleitung für Satellitenreceiver SAT 8002 S, Nokia
- [31] Nano, Wissenschaftsmagazin; Mi, 16.3.2000, 18:30, 3Sat
- [32] 4, S. 501
- [33] 2, hinterer Buchdeckel
- [34] Leybold-Gerätekarte 58136/58131, Teslatransformator mit Neonrohr, Schaltung modifiziert
- [35] 10, S. 19
1. Mirow, Berndt: Physik-Formeln / Sekundarstufe II, 10. Auflage, Dümmlers Verlag, Alfeld 1996
 2. Mende / Simon: Physik - Gleichungen und Tabellen, 10. Auflage, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1988
 3. Grimsehl: Lehrbuch der Physik, Band II, Elektromagnetisches Feld, 16. Auflage, von Prof. Dr. W. Schallreuter (Hrsg.), Greifswald, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1963
 4. Gerthsen / Vogel: Physik, 18. Auflage, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg 1995
 5. Bayer, H.: Hochfrequenz, in: Kohlrausch, F.: Praktische Physik, Band 2, 23.Auflage, von D. Hahn / S. Wagner (Hrsg.), B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1985
 6. Körner, Wolfgang: Physik - Fundament der Technik, 10. Auflage, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1989
 7. Bublath, Joachim: 100 × Knoff-Hoff, Wilhelm Heyne Verlag, München 1995
 8. Schreiber, Herrman: Professionelle Schaltungstechnik, Band 2, Franzis Verlag, Feldkirchen 1996
 9. Anleitungsbuch zu den Busch-Experimentiersystemen 4000 - 7000, Band 1 + 2, Busch GmbH, Viernheim 1988
 10. Friebolin, Horst: Ein- und zweidimensionale NMR-Spektroskopie, 3. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 1999

Index

- Anode, 3
- Barkhausen-Kurz-Schaltung, 8
- Demodulation, 19
- Dezimeterwellen, 1
- Dielektrizität, 1
- Dipol, 3, 16
- Dopplereffekt, 20
- Drahtleitung, 10
- Drehkondensator, 17
- Dreipunktschaltung, 5
- E-Welle, 11
- Elektronenröhre, 3
- Empfänger, 17
- Energiestromdichte, 1
- Feld
 - elektrisches, 1
 - magnetisches, 1
- Feldstärke, 1
- Flußdichte, 1
- Gitter, 3
- Grundwasserortung, 15
- H-Welle, 11
- Heizung, 3
- Hochfrequenz, 1
- Hohlleiter, 11
- Hohlraumoszillator, 3
- Huth-Kühn-Schaltung, 3
- Induktion, 6
- Kapazitätsdiode, 17
- Kathode, 3
- Kernresonanz, 12
- Kernspin-Tomographie, 14
- Klystron, 9
- Koaxialleitung, 11
- Kondensator, 2
- Kopplung
 - induktive, 3
 - kapazitive, 3
- Kurzwellen, 1
- Längstwellen, 1
- Langwellen, 1
- Laufzeitröhre, 9
- LC-Generator, 3
- Lecher-Leitung, 10
- Magnetron, 8
- Mikrowellenherd, 8, 15
- Millimeterwellen, 1
- Mittelwellen, 1
- Modulation, 17
- NMR, 12
- Oszillator
 - Hohlraum-, 3
 - linearer, 3
- Permeabilität, 1
- Phasenschieber, 6
- Poynting-Vektor, 1
- Rückkopplung, 6
- Radar, 20
- RC-Generator, 6
- Rundfunk, 16
- Schwingkreis, 2
 - geschlossener, 2
 - halboffener, 2
- Sender, 16
- Skinneffekt, 10, 15
- Spule, 2
- Stealth-Flugzeug, 20
- Teslatransformator, 8, 15
- Tetramethylsilan, 12
- Triode, 3
- Ultrakurzwellen, 1
- Verschiebung
 - chemische, 12
- Zentimeterwellen, 1