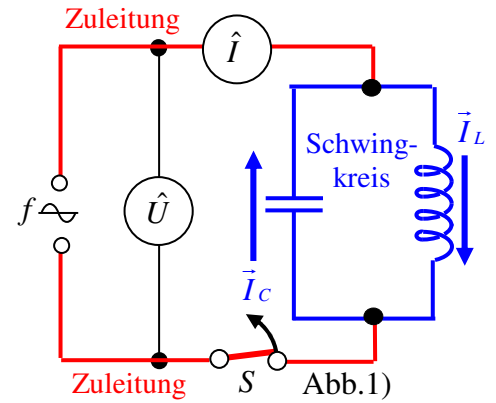


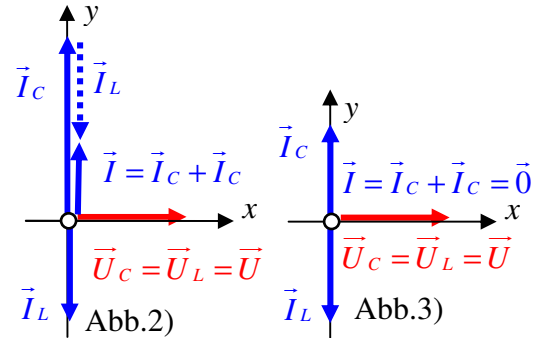
Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

1) Der ideale, ungedämpfte Schwingkreis

Im Arbeitsblatt Wechselstrom W3 und W4 wurde die Parallelschaltung aus Kondensator und Spule im Wechselstromkreis untersucht. Bei einer Parallelschaltung sind die Spannungen an den Bauteilen gleich. Der gemeinsame Zeiger $\vec{U}_C = \vec{U}_L = \vec{U}$ wird üblicherweise auf die x -Achse des Zeigerdiagramms gezeichnet. Weil der Strom am Kondensator der Spannung um 90° voraus eilt, kommt \vec{I}_C auf die positive y -Achse. Bei der Spule hinkt der Strom der Spannung um 90° nach, also kommt \vec{I}_L auf die negative y -Achse.



Aus den „Ohmschen Gesetzen“ $\hat{U}_C = X_C \cdot \hat{I}_C$ und $\hat{U}_L = X_L \cdot \hat{I}_L$ ergeben sich die Amplituden (Zeigerlängen) der Ströme: $\hat{I}_C = \hat{U}_C / X_C$ und $\hat{I}_L = \hat{U}_L / X_L$. Da die Stromzeiger gegenläufig sind und die Spannungen übereinstimmen, erhalten wir bei der Summenbildung für den Gesamtstrom $\hat{I} = |1/X_C - 1/X_L| \cdot \hat{U}$. Einsetzen von



$X_C = 1/\omega C$ und $X_L = \omega L$ ergibt $\hat{I} = |\omega \cdot C - 1/\omega \cdot L| \cdot \hat{U}$. In Abb.2) ist $\hat{I}_C > \hat{I}_L$, sodass die Amplitude des Gesamtstromes $\hat{I} \neq 0$.

In Abb.3) ist $\hat{I}_C = \hat{I}_L$. Das trifft zu, wenn $\omega \cdot C$ und $1/\omega \cdot L$ übereinstimmen, wenn also $\omega \cdot C = 1/\omega \cdot L$ bzw. $\omega^2 = 1/C \cdot L$ gilt. Für diese Wechselspannungsfrequenz fließt keinerlei Strom von außen durch die Schaltung. Der Widerstand ist unendlich, der Strom aus der Spannungsquelle ist gesperrt. Das Zeigerdiagramm zeigt, was geschieht: Während z.B. die Spule rückwärts von einem Strom der Amplitude \hat{I}_L durchflossen wird, wird der Kondensator gleichzeitig von einem Strom mit gleicher Amplitude $\hat{I}_C = \hat{I}_L$ vorwärts durchlaufen. Eine halbe Periode später sind die Stromrichtungen umgekehrt. Von der Spannungsquelle angeregt, *schwingt* also ein Strom durch Kondensator und Spule *hin- und her*, ohne, dass die Spannungsquelle diesen Strom weiter „füttern“ muss. Bei der Frequenz $\omega^2 = 1/C \cdot L$ sind die Zuleitungen ohne Strom, das Amperemeter in Abb.1) zeigt *null* Ampere an. Weil kein Strom in den Zuleitungen fließt, kann man auch den Schalter S in Abb.1) öffnen, ohne dass sich etwas ändert. Unbeeindruckt von der Schalteröffnung schwingt der Strom durch Kondensator und Spule weiter hin und her.

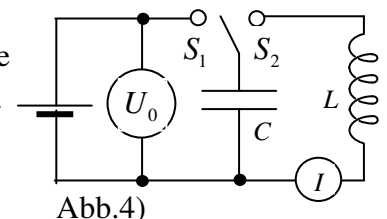
Deshalb heißt die Schaltung nicht nur *Sperrkreis* und die Frequenz $\omega = \sqrt{1/C \cdot L}$ nicht nur *Sperrfrequenz*, sondern die Schaltung heißt auch *Schwingkreis* und die Frequenz $\omega = \sqrt{1/C \cdot L}$ heißt auch *Schwingungsfrequenz* oder *Resonanzfrequenz*.

Einsetzen von $\omega = 2\pi f$ führt auf die Thomsonsche Schwingungsformel

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Die Frequenzformel der mechanischen Schwingung lautet $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}$. Die *träge* Masse m entspricht also der Selbstinduktivität L und die Federkonstante D dem Kehrwert $1/C$ der Kapazität.

Eine andere Möglichkeit, die Schwingung zu starten, ist in Abb.4) dargestellt: In der Schalterstellung S_1 wird der Kondensator durch die *Gleichspannungsquelle* der Spannung U_0 aufgeladen. Nach dem Umlagen in die Stellung S_2 entlädt sich der Kondensator über die Spule, wodurch dort ein Magnetfeld entsteht. Bei der Schwingung wechselt die Aktivität zwischen Kondensator und Spule hin- und her.



2) Energie- und Feldverlauf beim idealen Schwingkreis.

- Der Kondensator C wird durch U_0 aufgeladen.
Sein Energieinhalt beträgt $W_{el} = \frac{1}{2} C \cdot U_0^2$.
Weil die Stromstärke I noch null ist, bildet sich in der Spule noch kein Magnetfeld aus.
- Der Kondensator entlädt sich über die Spule, so dass Ladung Q , elektrische Feldstärke E und Spannung U abnehmen, während sich in der stromdurchflossenen Spule ein Magnetfeld aufbaut.
- Der Kondensator ist vollständig entladen, so dass W_{el} nun *null* ist. Dafür sind Stromstärke I und magnetische Feldenergie $W_{magn} = \frac{1}{2} L \cdot I_0^2$ maximal.
Dabei gilt $I_0 = U_0 \cdot \sqrt{1/LC}$.
- Die einsetzende Abnahme der Stromstärke und der Flussdichte bewirkt per Lenzscher Regel ein Weiterfließen des Stromes, sodass der Kondensator nun umgekehrt aufgeladen wird.
- Insgesamt entsteht eine elektromagnetische Schwingung mit der Schwingung mit der Spannungsamplitude $\hat{U} = U_0$ und der Stromamplitude $\hat{I} = I_0 = U_0 \cdot \sqrt{1/LC}$

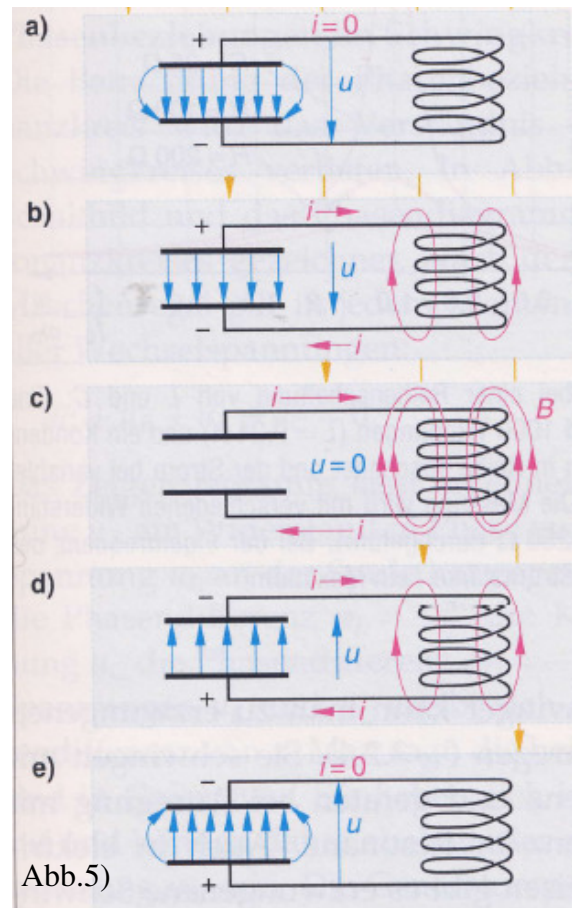
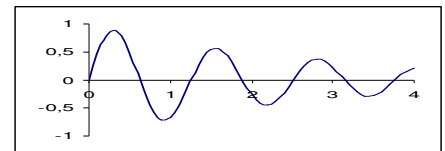


Abb.5)

3) Der reale gedämpfte Schwingkreis

Durch die Ohmschen Leiterwiderstände und durch *Abstrahlung elektromagnetischer Wellen*, verliert der Schwingkreis Energie, so dass die Schwingungsfrequenz zwar in etwa gleich bleibt, die Amplitude jedoch exponentiell abnimmt.



Zur Aufrechterhaltung der Schwingung trotz Leiterverlusten und bewusster Antennenabstrahlung wurde von Alexander Meißner 1913 in Berlin die Rückkopplungsschaltung erfunden. Diese Schaltung läutete das **Rundfunk-Zeitalter** ein.

Die Schaltung nutzt eine Triode (Vakuümröhre).

Eine Triode ist im Prinzip ein regelbarer Widerstand. Doch ein normaler Schiebewiderstand ist hier ungeeignet, denn der Widerstandswert muss viele tausendemale in der Sekunde geändert werden. Die Triode besteht aus einer evakuierten Glasröhre, in dem Elektronen durch Glühemission in der negativ gepolten Kathode **K** freigesetzt werden. Die Elektronen wandern dann fast widerstandsfrei zu der positiv geladenen Anode **A**. Der Widerstandswert der Stromstrecke wird durch ein zwischengeschaltetes Gitter **G** geregelt. Durch einen Schaltungstrick ist das Gitter *immer* negativ gepolt. Ist die Gitterspannung U_G nur leicht negativ, so bleibt der Widerstandswert der Stromstrecke noch fast null. Mit zunehmend negativem Wert von U_G nimmt der Widerstandswert der Triode zu, denn ein negativ geladenes Gitter stößt die Elektronen zurück, sodass immer weniger von ihnen zur Anode gelangen.



Schiebewiderstand

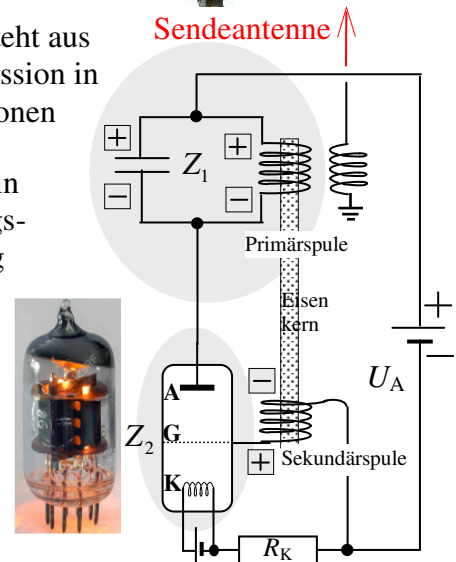


Abb.7) Der erste Rundfunksender nach Meißner.

Die Rückkopplungsschaltung von Meißner arbeitet als Spannungsteiler, bestehend aus zwei „Widerständen“.

Der eine „Widerstand“ Z_1 ist der Schwingkreis, also die Parallelschaltung von Spule und Kondensator. Der andere „Widerstand“ Z_2 ist die Triode. Z_1 und Z_2 sind in Reihe geschaltet und teilen sich die feste Spannung U_A auf. U_A heißt Anodenspannung. Meist nimmt man $U_A = 150V$. Die Spannungsaufteilung erfolgt im Verhältnis der Widerstände Z_1 und Z_2 : Ist der Widerstand Z_2 der Röhre vergleichsweise groß, dann liegt an der Röhre der größere Spannungsanteil und am Schwingkreis der kleinere. Andernfalls ist es umgekehrt.

In der Abb.7) ist ein Moment erfasst, zu welchem die obere Kondensatorplatte gerade *positiv* geladen ist. Dann ist auch das obere Spulenende positiv, während das untere Spulenende, sowie die untere Kondensatorplatte *negativ* ist. Der Schwingkreis und die Röhre sind über einen Transformator gekoppelt. Der gemeinsame Eisenkern ist schematisch eingezeichnet.

Die Schwingkreisspule dient als *Primärspule*. Im Arbeitsblatt EM5 von „Elektromagnetische Wechselwirkung“ wurde der Transformator besprochen. Wir lernten, dass bei *unbelastetem* Transformator Primär- und Sekundärspannung um 180° phasenverschoben sind, dass also zwischen $U_2(t)$ und $U_1(t)$ ein Minuszeichen steht. Bei gleichen Windungszahlen gilt

$U_2(t) = -U_1(t)$. Da das Gitter durch den Schaltungstrick (wird unten erklärt) immer negativ geladen ist, stößt es grundsätzlich die Elektronen ab, das heißt, der Gitterstrom ist immer null. Damit ist die Sekundärseite des Transformator „unbelastet“ und bei gleicher Windungszahl gilt tatsächlich $U_2(t) = -U_1(t)$. An der *Sekundärspule* in Abb.7) haben wir deshalb zu dem gewählten Zeitpunkt oben einen negativen und unten einen *positiven* Spannungswert. Dieses untere Ende ist mit dem Gitter der Röhre verbunden. Dadurch erhält das stets negativ vorgespannte Gitter eine *positive Zusatzspannung* und wird dadurch insgesamt *weniger negativ*. Daher sinkt der Widerstandswert Z_2 der Röhre und bei der Spannungsaufteilung bekommt der Schwingkreis Z_1 nun den größeren Anteil. Dadurch verstärkt sich das ohnehin schon vorhandene „Plus“ an der oberen Kondensatorplatte, denn die Spannungsquelle hat ebenfalls oben ihren Pluspol.

Die Ladungsverluste, welche der Kondensator bei der vorangegangenen Schwingung durch Ohmsche Widerstände und Antennenabstrahlung erlitten hat, werden kompensiert, der Kondensator wird wieder *voll* aufgeladen. Nach einer halben Periode ist die obere Kondensatorplatte negativ und somit letztlich auch die Zusatzspannung am Gitter. Damit wird der Röhrenwiderstand Z_2 groß und an der Röhre liegt fast die gesamte Anodenspannung. Der Kondensator erhält jetzt keine Aufladung, die ja gerade falsch herum wäre. Eine „Falschaufladung“ wird also vermieden.

4) Hochfrequenz-Sender (HF) in Dreipunktschaltung.

Die Meißnerschaltung funktioniert gut für Frequenzen bis ca. 50 kHz . Für höhere Datenübertragungsraten benötigt man höhere Frequenzen. Als erstes wurde dafür die *Dreipunktschaltung* entworfen. Sie arbeitet ebenfalls nach dem Rückkopplungsprinzip. Um gemäß Thomsonscher Schwingungsformel $\omega_{res} = \sqrt{1/C \cdot L}$ eine hohe Schwingkreisfrequenz zu erzielen, braucht man eine winzige Induktivität L und einen Kondensator mit einer winzigen Kapazität C . Als „Platten“ des Kondensators dienen die Anode und das Gitter der

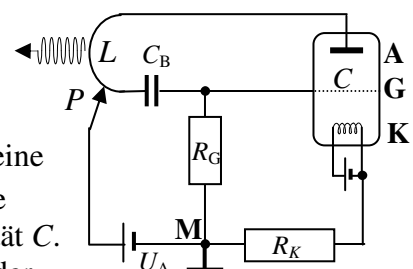


Abb.8)

Triode. $C \approx 1\text{ pF}$. Die „Spule“ hat nur eine *halbe* Windung. Man verwendet einen Bügel zwischen Anode und Gitter. Mit dieser Anordnung erzielt man die Frequenzen im *MHz*-Bereich für die UKW Übertragung. Der „Blockkondensator“ $C_B \approx 10\mu\text{F}$ vor dem Gitter ist notwendig, um die positive Anodenspannung vom Gitter abzublocken und *nur* auf die Anode zu leiten. Die Kapazität $C_B \approx 10\mu\text{F}$ beeinflusst die Kapazität des Schwingkreises kaum, denn bei der Reihenschaltung von Kondensatoren sehr unterschiedlicher Größe, dominiert der kleinere Wert. Bei Schwingungsbetrieb schnüren sich vom Anodenbügel elektromagnetische Wellen ab.

In der Abb.8) ist der „Schaltungstrick“ eingezeichnet, der das Gitter gegenüber der Kathode negativ „vorspannt“. Der negative Pol der Anodenbatterie liegt nicht direkt an der Kathode **K** der Triode, sondern am Punkt **M** (für Masse). Zwischen **M** und **K** liegt noch der „Kathodenwiderstand“ R_K .

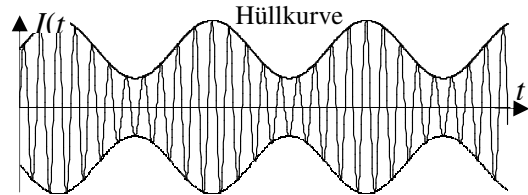
Fließt Strom durch die Röhre, so stellen R_K und die Röhre einen Spannungsteiler für U_A dar. Gilt z.B. $U_A = 100V$ und ist der Spannungsanteil an der Röhre 98° , dann liegt die Anode **A** weiterhin auf $+100V$, doch die Kathode liegt nicht auf null, sondern auf $+2V$. Der „Gitterwiderstand“ R_G wird sehr groß gewählt, sodass der Gitterstrom $I_G \approx 0$ ist. Gemäß $U = R \cdot I_G$ „fällt“ dann auch keine Spannung an R_G ab und das Spannungsniveau *null* des Minuspol der Batterie liegt ohne Abänderung am Gitter. Das Gitter ist also nicht wirklich negativ, sondern nur „negativer“ als die Kathode. Relativ zur Kathode ist das Gitter negativ, aber das reicht.

5) Modulation der HF-Schwingung mit einem NF-Signal

Mit einem Schalter in der Anodenleitung der Dreipunktschaltung (Abb.8) kann man den Sender AN und AUS schalten. Dabei wird die Amplitude der Hochfrequenzschwingung auf die Werte „0“ und „1“ gesetzt (digitale Steuerung). Verändert man den Amplitudenwert kontinuierlich, so lassen sich auch analoge Audiosignale übertragen. Diese Vorgehensweise heißt *Amplitudenmodulation* (AM). Die Modulation gelingt z.B. dadurch, dass der Gitterwiderstand durch ein Widerstandsmikrophon (Kohlemikrophon) ersetzt wird. Die Gittervorspannung schwankt dann im Rhythmus der Musik. Als weitere Modulationsmöglichkeit kann man die Frequenz des HF-Signal im Rhythmus der NF-Information variieren, wobei die Amplitude konstant bleibt. Diese Technik nennt man *Frequenzmodulation*(FM).

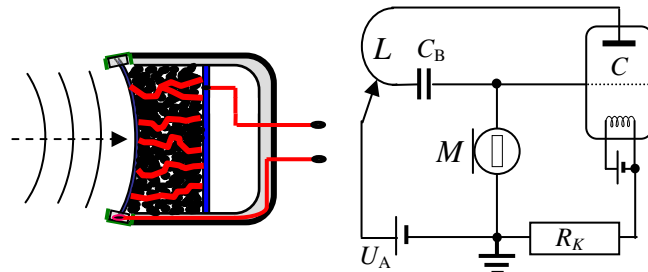
a) Amplitudenmodulation (AM)

Ein amplitudenmoduliertes HF-Signal hat etwa nebenstehenden zeitlichen Verlauf. Die Trägerwelle hat die Frequenz f_{HF} des Schwingkreises des Rundfunksenders. Die Niederfrequenzschwingung variiert durch Sprache oder Musik. Die NF-



Frequenz f_{NF} beträgt für höchste Zischlaute maximal $16 kHz$.

Technisch gelingt die Amplitudenmodulation der HF-Schwingung z.B. durch Ersetzen des Gitterwiderstandes R_G durch ein Kohlemikrophon. Der Schalldruck komprimiert über die Membran Graphitpulver im Rhythmus der Tonfrequenz, wodurch



sich der Widerstandswert des Pulvers entsprechend ändert. Dadurch wird ein mehr oder weniger großer Teil der Steuerspannung des Gitters kurzgeschlossen. Dies beeinflusst die Amplitude der HF-Schwingung entsprechend. Die AM kommt im Mittel- und Langwellenbereich zur Anwendung. Da auch atmosphärische Störungen auf die Amplitude des Funksignals einwirken, ist die AM störanfällig. Man hört meist Knacken und Rauschen.

b) Frequenzmodulation (FM)

Die Frequenzmodulation (FM) wird ab dem UKW-Bereich genutzt. Bei ihr wird die *Frequenz* der HF-Schwingung im Rhythmus des NF-Signals variiert. Bei $100 MHz$ HF und $20 kHz$ NF beträgt die Frequenzschwankung weniger als 1/1000 Promille, sodass die relative Bandbreite gering ist und die Sendefrequenzen dichter bei einander liegen können. Technisch erreicht man die Frequenzänderung z.B. durch ein Kondensatormikrophon im Schwingkreis, denn eine Änderung der Schwingkreis Kapazität wirkt sich direkt auf die HF-Frequenz aus.

