

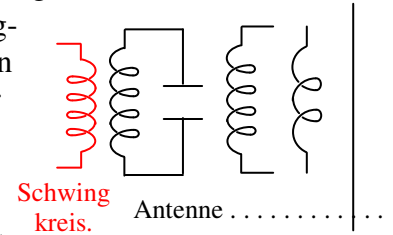
1) Die elektromagnetische Welle (EM-Welle) und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Es wurde schon frühzeitig vermutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle mit der elektrischen und magnetischen Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ und $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ zusammenhängt. Bildet man $\epsilon_0 \cdot \mu_0 = 1,115 \cdot 10^{-17} \text{ s}^2/\text{m}^2$, so erhält man als Maßeinheit den Kehrwert des Quadrates einer Geschwindigkeit. Die Maßeinheit von $\sqrt{1/\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ ist also m/s . Tatsächlich ergibt $(\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{-1/2} = 299500 \text{ km/s}$.

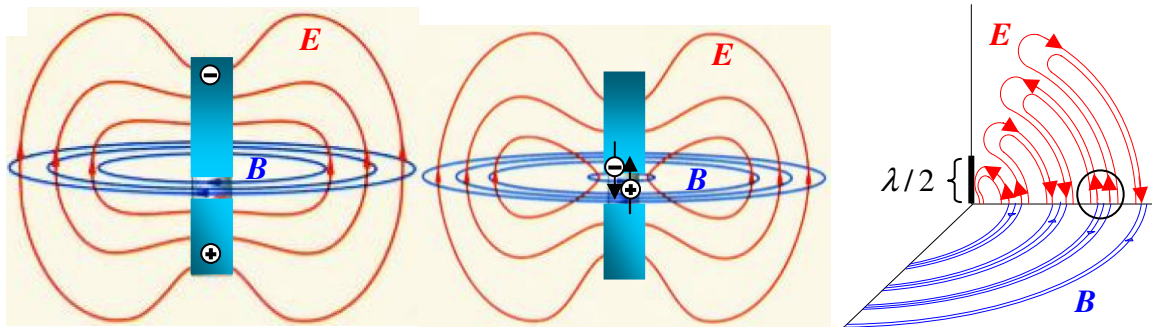
Das ist aber genau als Lichtgeschwindigkeit c . Also: Licht ist eine elektromagnetische Welle.

2) Die Antenne des Rundfunksenders dient zur Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen.

Um die Sendeleistung optimal abzustrahlen, koppelt man die Schwingkreispule mit einer Antenne. Die Antenne ist in Wirklichkeit *auch* ein Schwingkreis, der lediglich aufgebogen und lang gezogen wurde. Der Schwingkreis des Senders zwingt dem „Antennenschwingkreis“ dann seinen Rhythmus auf. Die Elektronen in der Antenne führen dann erzwungene Schwingungen aus. Von der Stabform lösen sich die elektromagnetischen Wellen besser ab, als von dem geschlossenen „Kreis“.

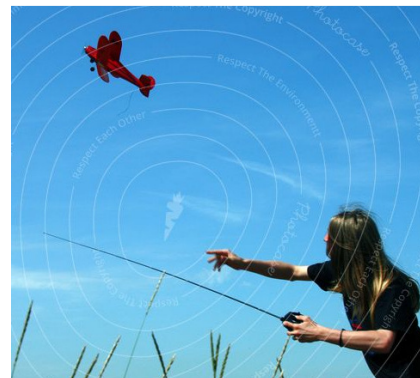
3) Ausbreitung der elektromagnetischen (EM) - Welle von einer Stabantenne in dem Raum.

Wir stellen uns vereinfachend vor, dass in der gesamten Stabantenne nur *ein* freibewegliches Elektron existiert. Dieses Elektron lässt an dem Atom, von dem es stammt, ein *Loch* zurück.

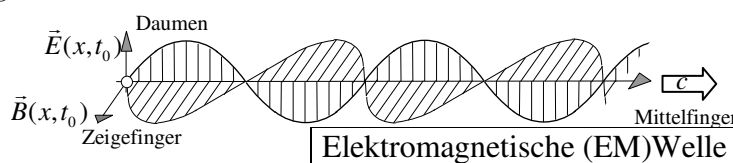


Dieses Loch können wir entsprechend als eine ebenso freibewegliche positive Ladung ansehen. Die beiden Ladungen schwingen dann im Gegentakt zwischen den Stabenden hin- und her. Ist das Elektron z.B. oben, so ist das Loch unten und zwischen den beiden getrennten Ladungen entsteht ein elektrisches Feld, dessen Feldlinien von Plus nach Minus gekrümmt durch den Außenraum verlaufen. Jetzt muss man wissen, dass das elektrische Feld nicht sofort da ist. Es bildet sich zwischen den getrennten Ladungen zwar sehr schnell, aber doch „nur“ mit *Lichtgeschwindigkeit* aus. Wenn Elektron und Loch jetzt zurück schwingen, so begegnen sie sich in der Mitte. Dabei fließt *einerseits* der größtmögliche Strom, sodass sich ein ringförmiges Magnetfeld ausbildet (Korkenzieher-Regel einmal mit links, einmal mit rechts). *Andererseits* gibt es in diesem Moment aber keine getrennten Ladungen mehr, so dass die elektrischen Feldlinien keinen Ansatzpunkt mehr auf der Antenne finden. Sie verschwinden aber nicht einfach, sondern laufen in sich selbst zurück und schnüren sich somit von der Antenne ab. Nach einer halben Periode bilden sich elektrische Feldlinien in umgekehrter Laufrichtung, welche sich nach einer weiteren viertel Periode erneut abschnüren. Die sich abschnürenden nierenförmigen elektrischen Ringfelder sind dann abwechselnd links und rechts orientiert. Zwischen diesen elektrischen Ringfeldern verlaufen die magnetischen Ringfelder ebenfalls mit wechselnder Orientierung. Betrachten wir nun die rechte Abb. oben mit vier elektrischen und vier magnetischen Ringfeldern. Die eingekreiste Stelle zeigt, dass die innen verlaufenden Feldlinien des vierten elektrischen Ringes und die außen verlaufenden Feldlinien des dritten elektrischen Ringes in die *gleiche* Richtung laufen und sich somit verstärken. Zwischen ihnen verläuft das magnetische Ringfeld nach vorne. Dadurch entsteht die kuriose Situation, dass das elektrische und magnetische Feld im sog. *Fernbereich*, also einige Wellenlängen entfernt von der Antenne, *gleichphasig* verlaufen, obwohl sie an der Antenne, im sog. *Nahbereich*, *gegenphasig* erzeugt wurden. Das gilt aber nur perfekt in der Abstrahlungsrichtung *senkrecht* zur Antenne.

Deshalb hält der Modellflieger seine Funkantenne auch rechtwinklig zur Flugzeugrichtung. In Richtung der Antenne besteht sogar ein „Funkloch“. Je schräger die Antenne, desto größer ist die destruktive Interferenz der Teilwellen. Weil hauptsächlich in einen zweidimensionalen Ring mit zunehmend größer werdendem Umfang $U = 2\pi r$ abgestrahlt wird, nehmen die elektrische und magnetische Feldstärke, senkrecht zur Antenne, auch *nur* mit dem Abstand r und nicht mit r^2 ab. In diesem Bereich sind die elektrische und magnetische Feldstärke in *Phase*. Desweiteren stehen sie senkrecht aufeinander, wobei die *Drei-Finger-Regel* der rechten Hand



Daumen: Elektrische Feldstärke,
Zeigefinger: Magnetische Feldstärke,
Mittelfinger: Ausbreitungsrichtung.



4) Energieübertragung durch die elektromagnetische Welle (EM-Welle)

In Arbeitsblatt EM6 von „Elektromagnetische WW“ lernten wir, dass die Energieübertragung im „normalen Gleichstromkreis“ von der Spannungsquelle zum Verbraucher auch als konstante „Strahlung“ eines gekreuzten elektromagnetischen Feldes mit der Intensität $J = E \cdot H$ verstanden werden kann. Beim Stromkreis sind E und H über das Ohmsche Gesetz $H = E / R$ miteinander verbunden. Bei der elektromagnetischen Welle stehen die Feldrichtungen von E und H ebenfalls senkrecht aufeinander und es gilt die gleiche 3-Finger-Regel. Deshalb können wir die Formeln vom Stromkreis auf die EM-Welle übertragen. Lediglich das Ohmsche Gesetz $H = E / R$ muss neu überlegt werden, denn die EM-Welle wandert durch das Vakuum, welches keinen Ohmschen Widerstand besitzt. – Die EM-Welle stammt von der Antenne. In dieser schwingen Elektronen und Löcher hin und her. Der Energieerhaltungssatz sagt, dass die potentielle Energie der maximal getrennten Ladungsträger an den Antennenenden genauso groß ist, wie die kinetische Energie der maximal bewegten Ladungsträger in der Antennenmitte. Die maximal getrennten Ladungen sind aber für die Amplitude \hat{E} und die maximal bewegten Ladungen für die Amplitude \hat{H} bzw. \hat{B} verantwortlich. Daher überträgt sich die Gleichheit der Energien auf die Amplituden. Doch die Beziehung zwischen \hat{B} und \hat{E} kann wegen unterschiedlicher Maßeinheiten nicht einfach $\hat{B} = \hat{E}$ lauten. Tatsächlich gibt es eine feste Beziehung zwischen \hat{B} und \hat{E} , welche für *alle* EM-Wellen im Fernfeld gültig ist. Sie lautet $\hat{B} = \hat{E} / c$. Mit $B = \mu_0 \cdot H$ folgt $\mu_0 \cdot \hat{H} = \hat{E} / c$ bzw. $\hat{H} = \hat{E} / (c \cdot \mu_0)$. Also entspricht der Ausdruck $c \cdot \mu_0$ dem Ohmschen Widerstand R . So, wie die elektrische Stromstärke im Stromkreis durch R gesteuert wird, so wird die elektromagnetische Welle durch $c \cdot \mu_0$ gesteuert. Die EM-Welle kann nicht „nach Lust und Laune“ agieren, ihr wird vom Vakuum die feste Geschwindigkeit $c = 299\,500\,000\text{ km/s}$ „aufgedrückt“. Das geschieht, weil das Vakuum der EM-Welle den „Wellenwiderstand“ $R \hat{=} c \cdot \mu_0$ entgegensetzt. Der Vakuumwiderstand = Wellenwiderstand kommt nicht durch Materie zustande, sondern auf Induktion und Maxwellscher Ergänzung. Deshalb ist der Wellenwiderstand kein Ohmsches „ R “, sondern er ist eine Impedanz Z . Der Wert des Wellenwiderstandes lässt sich leicht berechnen. Er beträgt

$$Z_0 = c \cdot \mu_0 = \frac{299\,500\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{\text{A} \cdot \text{m}}{\text{Vs}}} \cdot \frac{1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \underline{\underline{326,7 \Omega}}$$

Also: Auch für das Vakuum gibt es ein „Ohmsches Gesetz“. Es lautet $\hat{H} = \hat{E} / Z_0$.

Häufig wird Z_0 noch anders formuliert. In Abschnitt 1) dieses Arbeitsblattes hatten wir gesehen, dass sich die Lichtgeschwindigkeit c aus den beiden Feldkonstanten ϵ_0 und μ_0 ergibt.

Es gilt $c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$. Setzt man dies in $Z_0 = c \cdot \mu_0$ ein, so folgt $Z_0 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \mu_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$.

Einsetzen in $\hat{H} = \frac{\hat{E}}{Z_0}$ ergibt endgültig für jede EM-Welle $\hat{H} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \hat{E}$.

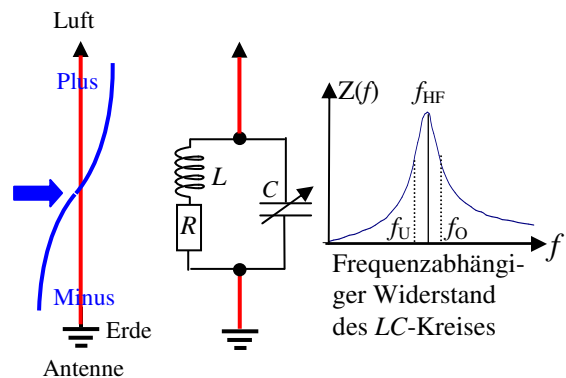
Diese Beziehung wirkt sich auch auf die Strahlungsintensität $J = \hat{E} \cdot \hat{H}$ der EM-Welle aus:

Einsetzen von $\hat{H} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \hat{E}$ ergibt $J = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \hat{E}^2$ bzw. $J = \frac{\hat{E}^2}{Z_0}$.

5) Rundfunkempfänger, Demodulation

a) Der Empfang der Rundfunkwelle.

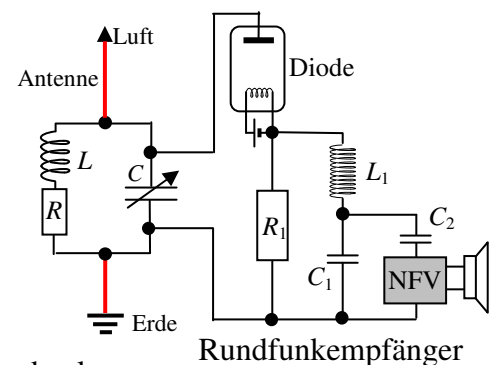
Der Empfang elektromagnetischer Wellen erfolgt mit einer Empfängerantenne. Sende- und Empfangsantenne für Lang- und Mittelwelle sind Stäbe, deren eines Ende in der Erde steckt. Die EM-Welle „kriecht“ nämlich über den Erdboden und hat dort einen ihrer Wechsele Pole. Der andere Pol ist im Luftraum. Die Stabantenne wird daher entsprechend mit der Periodizität der Rundfunkwelle wechselnd zwischen oben und unten positiv und negativ aufgeladen.



Die EM-Welle wirkt auf den Stab quasi wie eine „Wechselstromquelle“. Wir wissen, dass der Stab ein aufgebogener Schwingkreis ist. Doch die Eigenfrequenz dieses Antennenschwingkreises ist weit entfernt von den Frequenzen die er empfangen soll. Ja, sie muss weit davon entfernt sein, damit der Stab die Frequenzen *aller* Sender seines Empfangsbereiches als erzwungene Schwingungen empfangen kann und für sich selbst keine Sendefrequenz bevorzugt. Das Ausfiltern der Frequenz eines Senders erfolgt durch einen zusätzlichen Sperr- bzw. Schwingkreis, den man in die Antenne einbaut. Für alle Sendefrequenzen, die nicht der Resonanzfrequenz des Schwingkreises übereinstimmen hat die Impedanz Z irgendeinen Wert, der von „Unendlich“ verschieden ist. Deshalb durchfließen diese „falsche“ Wechselströme den Antennenstab von der Spitze zur Erde (oder umgekehrt) und werden somit kurzgeschlossen. Nur für die Rundfunkwelle, deren Frequenz mit der des Sperrkreises übereinstimmt, wird nicht kurzgeschlossen und bringt den Schwingkreis zum Schwingen. Diese Schwingung wird dann abgegriffen und weiter verarbeitet. Der freien Senderwahl dient meist ein „Drehko“, ein regelbarer Kondensator Siehe Arbeitsblatt „Wechselstr“ W3

b) AM - Demodulation

Die Demodulation der amplituden-modulierten Welle dient der Rückgewinnung des Audio-Niederfrequenz (NF)-Signals, nachdem durch den Schwingkreis die HF-Welle des gewünschten Senders herausgefiltert hat. Der Sperr- bzw. Schwingkreis enthält noch einen Widerstand. In Arbeitsblatt „Wechselstrom“ W4 haben wir gelernt, dass die Resonanzkurve an ihrer Spitze dadurch minimal abgerundet wird, damit das Frequenzband zwischen $f_U = f_{HF} - f_{NF}$ und $f_O = f_{HF} + f_{NF}$ für das Sprachverständnis empfangen werden kann.

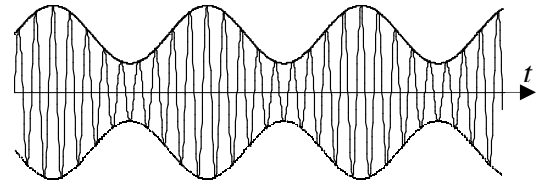


Die AM-Demodulation erfolgt über drei Spannungsteiler:

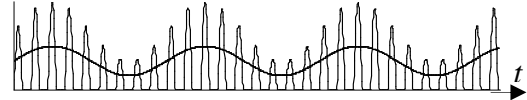
- 1) Der erste Spannungsteiler besteht aus einer Diode und dem Widerstand R_1 . Für positive Spannungswerte ist die Anode der Diode positiv und der Diodenwiderstand etwa beträgt *null*, weil die Elektronen dann von der Glühkathode zur Anode gelangen können. Die gesamte

Spannung fällt am Widerstand ab.

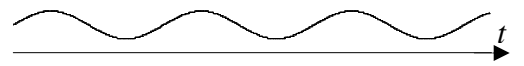
Ist die Spannung an der Anode hingegen negativ, so blockiert die Diode und die Gesamtspannung liegt an der Diode, weil die höhere Spannung ja immer am größeren Widerstand liegt. Für den Spannungsanteil an R_1 bleibt jetzt also nur „null“ übrig. Deshalb liegt an R_1 eine gleichgerichtete NF-modulierte HF-Spannung.



NF-modulierte HF-Schwingung am Kondensator C des Empfängerschwingkreises.



Gleichgerichtete NF-modulierte HF-Schwingung am Widerstand R und ihr Mittelwert.



Am Kondensator C_1 bleibt nur der niederfrequente Mittelwert der vormaligen HF-Spannung übrig.



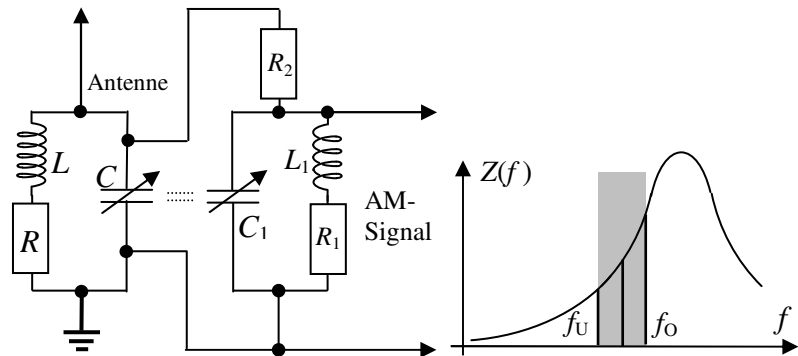
Der Kondensator C_2 blockt den Gleichspannungsanteil ab. Am Verstärkereingang liegt so die ursprüngliche NF-Wechselspannung.

2) Der zweite Spannungsteiler besteht aus L_1 und C_1 . Der Wechselstromwiderstand eines Kondensator beträgt $X_C = 1/\omega C$. Er geht für hohe Frequenzen gegen null und für niedrige gegen unendlich. Bei der Spule ist es umgekehrt: $X_L = \omega L$. Somit fällt die HF-Spannung an der Spule L_1 und die NF-Spannung, inklusive Gleichspannungsanteil, am Kond. C_1 ab.

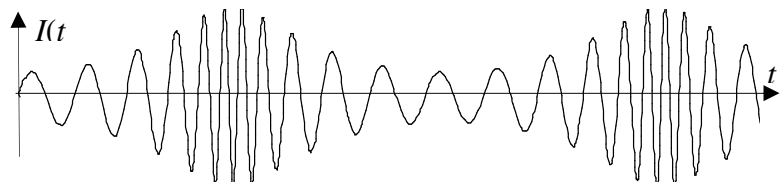
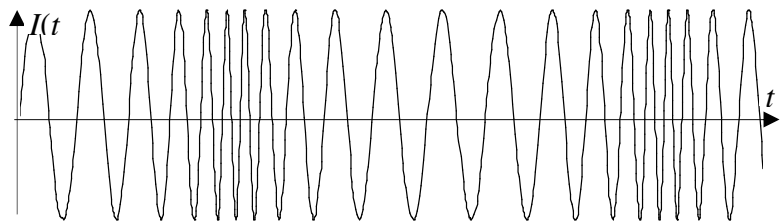
3) Der dritte Spannungsteiler besteht aus dem Kondensator C_2 und dem Verstärker NFV, dessen Eingang man als Widerstand ansehen kann. Der noch vorhandene Gleichspannungsanteil wird von C_2 abgeblockt, sodass das anfängliche NF-Signal am Verstärkereingang wieder hergestellt ist.

6) FM - Demodulation

Das gewünschte HF-Signal wird wieder durch eine Antenne mit integriertem LC-Kreis aus dem „Wellensalat“ herausgefiltert. Wie oben sorgt R für den Empfang des gesamte Frequenzbandes von f_U bis f_O . Am Kondensator C steht deshalb das FM-modulierte Signal des eingestellten Senders zur Verfügung. Dieses wird auf einen Spannungsteiler, bestehend aus dem Widerstand R_2 und dem $L_1 C_1 R_1$ -Kreis, geleitet.



Die Drehkondensatoren der beiden Kreise sitzen auf einer gemeinsamen Achse und werden somit jeweils gleich eingestellt. Die Spule L_1 hat jedoch ein paar Windungen weniger als L , sodass die Resonanzfrequenz des zweiten Kreises minimal höher liegt, als die des Eingangskreises. Dadurch fällt das HF-Signal auf die linke Flanke der Resonanzkurve $Z(f)$ des zweiten Kreises. Hier stellt sich den höheren Frequenzen aber ein größerer Widerstand entgegen, sodass die höheren Frequenzen mit einer höheren und die niedrigeren Frequenzen einer geringeren Spannung an den Abgriffen abgenommen werden. Damit ist die FM-Modulation in eine AM-modulierte FM-Modulation überführt und kann entsprechend weiter AM-demoduliert werden.



weniger als L , sodass die Resonanzfrequenz des zweiten Kreises minimal höher liegt, als die des Eingangskreises. Dadurch fällt das HF-Signal auf die linke Flanke der Resonanzkurve $Z(f)$ des zweiten Kreises. Hier stellt sich den höheren Frequenzen aber ein größerer Widerstand entgegen, sodass die höheren Frequenzen mit einer höheren und die niedrigeren Frequenzen einer geringeren Spannung an den Abgriffen abgenommen werden. Damit ist die FM-Modulation in eine AM-modulierte FM-Modulation überführt und kann entsprechend weiter AM-demoduliert werden.