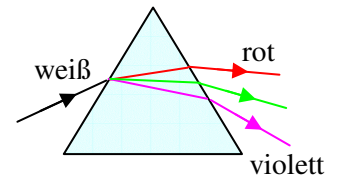


a) Licht als Elektromagnetische Welle

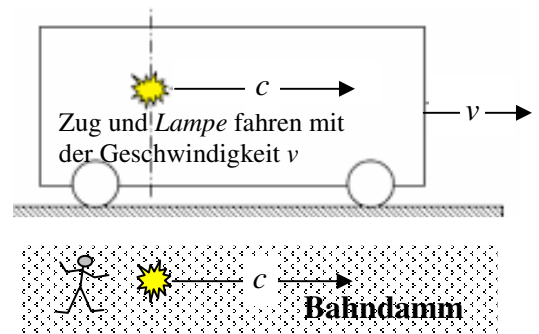
Zwischen 1800 und 1870 wurde die Wechselbeziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus aufgeklärt. Die Erkenntnis gipfelte in den *Maxwellschen* Gleichungen, aus denen abgeleitet wurde, dass zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder sich gegenseitig hervorbringen und dass auf Grund dessen elektromagnetische *Wellen* möglich sind, welche auch ohne materielles Medium das Vakuum durchheilen. Die Geschwindigkeit dieser Wellen ergibt sich einerseits aus der *elektrischen* Feldkonstante $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$, mit der Naturkonstanten $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ und der Materialkonstanten ϵ_r und andererseits aus der *magnetischen* Feldkonstante $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, mit der Naturkonstanten $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ und der Materialkonstanten μ_r . Die Formel der Geschwindigkeit lautet $c = 1/\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$. Für das Vakuum mit $\epsilon_r = 1$ und $\mu_r = 1$ ergibt sich somit $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$. Einsetzen der Werte liefert $c = 2,995 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Das stimmt aber *exakt* mit der schon bekannten Lichtgeschwindigkeit c überein. Desweiteren zeigte sich: Weil die Materialkonstanten ϵ_r und μ_r stets *größer* oder gleich eins sind und sie in der Formel $c = 1/\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ im *Nenner* stehen, wird die Geschwindigkeit der EM-Welle innerhalb eines Materials, wie z.B. innerhalb von Glas, *geringer*. Dadurch wurde schließlich klar, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist und dass der Konkurrenzkampf *für* Huygens und *gegen* Newton entschieden war.

An der Formel $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ erkennt man desweiteren:

- (1) Die Geschwindigkeit c des Lichtes im Vakuum hängt *nicht* von der Frequenz, bzw. der Farbe ab. Im Glas ist das anders, hier herrscht Dispersion: Violett läuft langsamer als rot und wird so stärker gebrochen.
- (2) Die Werte der Naturkonstanten ϵ_0 und μ_0 werden im Labor gemessen. Nach dem Trägheitssatz ist es egal, ob das Labor still steht oder ob es sich gleichförmig gradlinig bewegt. Die Messergebnisse von ϵ_0 und μ_0 sind unabhängig davon. Also ist auch die Lichtgeschw.



$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ unabhängig von der Bewegung. Deshalb ist die Lichtgeschwindigkeit auf dem Bahndamm genauso groß wie im fahrenden Zug. Ist der Wagen z.B. offen, so sieht der Mann auf dem Bahndamm auch das Licht im fahrenden Wagen. Weil die Lichtquelle mitfährt, erwartet er die Geschwindigkeit $c + v$. Doch das stimmt nicht. Obwohl die Lichtquelle mitfährt, sieht er nur c . Diese Merkwürdigkeit ist Ausgangspunkt der Relativitätstheorie: Bei Bewegung schrumpfen Längen so, dass sich die Addition aufhebt.



Das Verständnis des Phänomens Licht und allgemein das Verständnis der elektromagnetischen Welle, löste eine *Technische Revolution* aus, welche z.B. durch Firmengründungen mit dazu beitrug, dass Berlin als „Elektro-City“ eine Millionenstadt wurde.

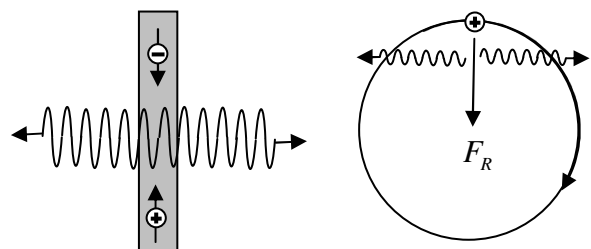
b) Erzeugung von elektromagnetischen Wellen.

Elektromagnetische Wellen sind nicht einfach von alleine da. Sie brauchen als „Geburtshelfer“ eine „Sendeantenne“, denn EM-Wellen entstehen nur durch *beschleunigt bewegte* elektrische Ladungen.

In der Stabantenne *schwingen* Ladungen auf und ab. Dabei werden sie permanent (positiv) beschleunigt und abgebremst (neg. beschleunigt).

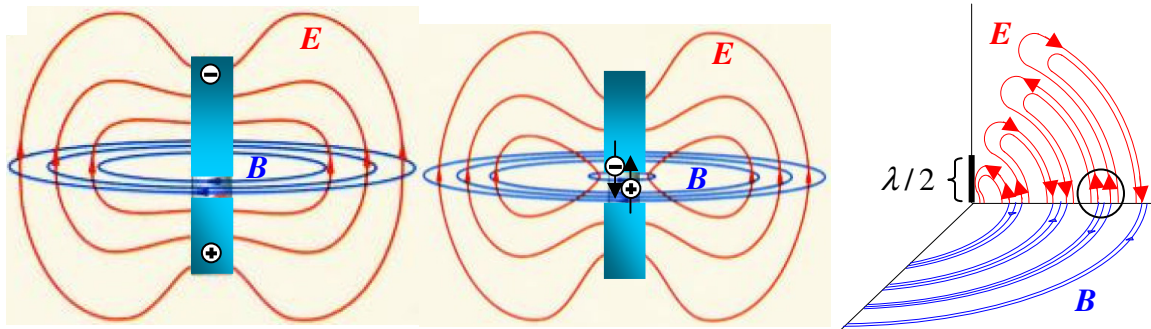
Bei der *Kreisbewegung* einer Ladung wirkt permanent die *Radialbeschleunigung*.

In beiden Fällen werden EM-Wellen senkrecht zur Beschleunigungsrichtung abgestrahlt.



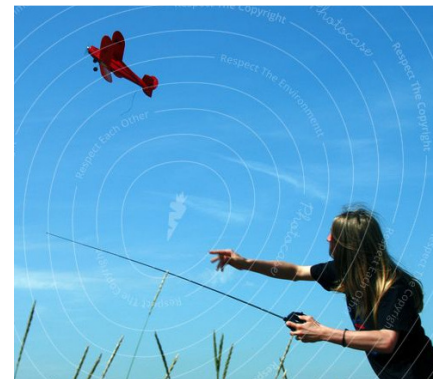
c) Ausbreitung der EM-Welle von der Stabantenne.

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.

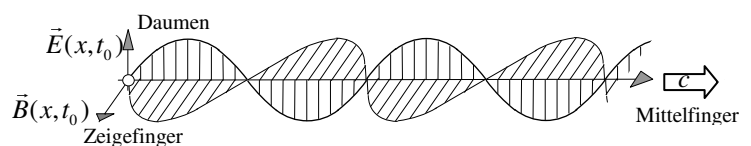


Dieses Loch können wir entsprechend als eine ebenso freibewegliche Ladung ansehen, das Vorzeichen des Loches ist positiv. Die beiden Ladungen schwingen dann im Gegentakt zwischen den Stabenden hin- und her. Ist das Elektron z.B. oben, so ist das Loch unten und zwischen den beiden getrennten Ladungen 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



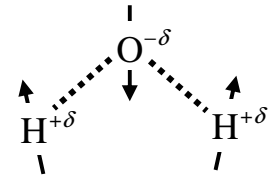
Antenne, desto größer ist die destruktive Interferenz der Teilwellen. Weil hauptsächlich in einen zwei-dimensionalen Ring mit zunehmend größer werdendem Umfang $U = 2\pi r$ abgestrahlt wird, nehmen die elektrische und magnetische Feldstärke, senkrecht zur Antenne, auch *nur* mit dem Abstand r und nicht 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 gilt:



Daumen: Elektrische Feldstärke, Zeigefinger: Magnetische Feldstärke, Mittelfinger: Ausbreitungsrichtung der Welle. Diese Regel geht letztlich auf die Lenz'sche Regel zurück, nach welcher die Induktion ihrer Ursache *entgegen* wirkt.

d) Mikrowelle

Chemische Bindungen sind nicht starr, sondern elastisch. Deshalb können Moleküle schwingen. Z.B. schwingt das Sauerstoffatom in dem geknickten Wassermolekül H_2O nach „unten“ und die beiden Wasserstoffatome gleichzeitig nach „oben“. Insgesamt bleibt der Schwerpunkt stehen. Damit benimmt sich das Wassermolekül wie eine Stabantenne. Die Frequenz dieser Schwingung liegt bei $700GHz$. Entsprechend wird eine Infrarot Wärmestrahlung mit dieser Frequenz abgestrahlt.



e) Die „Sendeantenne“ des sichtbaren Lichtes.

UKW Antennen sind ca. $1,5m$ lang. Wie groß ist die „Sendeantenne“ des sichtbaren Lichtes?

Der Atomradius beträgt nach dem Ölfleckversuch etwa $5 \cdot 10^{-10} m$. Nach Rutherford *umkreisen* die Elektronen den Kern in diesem Abstand. Überträgt man das Planetenmodell auf das Atom, so ergeben sich aus den Umlaufzeiten die Frequenzen des sichtbaren bzw. des UV-Lichtes. Das sichtbare Licht wird also in „atomaren Antennen“ durch Radialbeschleunigung von Elektr. erzeugt.

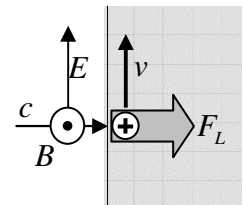
f) Energietransport durch die EM-Welle

Die Energie der *mechanischen Welle* (Seil, Schall) besteht (im Mittel) zu einer Hälfte aus potentieller Energie, weil Arbeit gegen die Rückstellkraft verrichtet wird, und zur anderen Hälfte aus kinetischer Energie, weil Masse bewegt wird. Weil größere Amplitude größere Rückstellkraft und größere Frequenz größere Geschwindigkeit bedeutet, ist die Intensität der mechanischen Welle zu dem Quadrat von Amplitude und Frequenz proportional: $I_{mech.Welle} \sim \hat{y}^2 \cdot f^2$.

Die Energie der *elektromagnetischen Welle* besteht ebenfalls aus zwei Teilen. Sie steckt zur Hälfte im elektrischen und zur Hälfte im magnetischen Feld. Doch läuft die EM-Welle auch durch das Vakuum und dieses hat keine Masse. Daher ist die Energie der EM-Welle *nur* vom Quadrat der Amplituden und nicht von der Frequenz abhängig: Im Bereich des Fernfeldes gilt $\hat{E} = c \cdot \hat{B}$, so dass man die Strahlungsenergie entweder durch \hat{E} oder durch \hat{B} ausdrücken kann. Ausgedrückt durch \hat{E} gilt: $I_{EM} = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot \hat{E}^2$. Da $\sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}$ konst. ist, hängt die Energieübertragung I_{EM} des Lichtes als elektromagnetische Welle also nur von der Helligkeit nicht aber von der Farbe ab.

g) Strahlungsdruck der EM-Welle

Auf eine Metalloberfläche falle von links eine elektromagnetische Welle. Wir betrachten einen Zeitpunkt, zu dem die elektrische Feldstärke E gerade nach oben und die magnetische Feldstärke B dann zwangsläufig nach vorne weist. Unterliegen die beweglichen Ladungsträger dem Ohmschen Gesetz, so ist ihre Geschwindigkeit v proportional zu E . Auf die sich nach oben bewegenden (pos.) Ladungen wirkt so über das B -Feld die Lorentzkraft gemäß der *Drei-Finger-Regel* der rechten Hand *in* Richtung der einfallenden Strahlung. Damit bewirkt die EM-Welle auf das Metall einen Strahlungsdruck. - Einsteins Lichtquantenhypothese erklärt denselben Druck später anders.



Aufgaben

- 1) Rechne nach, dass $1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ tatsächlich die Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ergibt.
- 2) Erkläre, warum die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum unabhängig von f ist.
- 3) In einem optischen Medium, wie z.B. Glas, sind die relativen Werte ϵ_r und μ_r größer als 1. Erkläre, inwiefern das ein Argument für Huygens und gegen Newton ist.
- 4) Die Naturkonstanten ϵ_0 und μ_0 werden in einem stillstehenden Labor gemessen. „Stillstehen“ und „Gleichförmig gradlinig bewegt“ ist aber gemäß Trägheitsgesetz durch kein Experiment unterscheidbar. Also ergibt die Messung von ϵ_0 und μ_0 im gleichförmig gradlinig dahin fahrenden Wagen genau die gleichen Werte wie im stillstehenden Labor. Was bedeutet das für die Lichtgeschwindigkeit? Was sagt Einstein dazu?
- 5) Führe aus, warum die Intensität einer EM-Welle im Vakuum nur von der Amplitude, nicht aber von der Frequenz des Lichtes abhängt.
- 6) Benenne die beiden Typen von Sendeantenne.
- 7) Benenne, warum eine EM-Welle eine „Sendeantenne“ benötigt.
- 8) Erkläre das Zustandekommen von Mikrowellen am Beispiel des Wassermoleküls.
- 9) Benenne, wie das sichtbare Licht zustande kommt.
- 10) Erkläre die Abstrahlung der EM-Welle von einer Stabantenne und erläutere, wieso die beiden Feldstärken im Fernbereich in Phase und nicht um 90° versetzt sind.
- 11) Veranschauliche die Ausbreitungseigenschaften der EM-Welle mit der Drei-Finger-Regel.
- 12) Erkläre mit der Drei-Finger-Regel und der Lorentzkraft, inwiefern die EM-Welle einen Strahlungsdruck ausübt.

Lösungen

- 1) $1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0} = 1/\sqrt{(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} / \text{V} \cdot \text{m}) \cdot (1,257 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m})} = 2,9982 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- 2) Bei der Seilwelle wird die Masse des Seiles bewegt, bei der Schallwelle die Masse der Luftpartikel. Bei jeder mechanischen Welle wird Masse bewegt. Die EM-Welle durchläuft das Vakuum. Das elektrische Feld setzt das Vakuum zwar „unter eine gewisse Spannung“, ϵ_0 spielt die Rolle der „Federkonstante des Vakuums“. Eine Masse wird durch die EM-Welle aber nicht bewegt. Daher ist nur die „Auslenkung des Vakuums“ nicht aber die Frequenz relevant.
- 3) Wegen $c_{\text{Medium}} / c_{\text{Vakuum}} = 1/\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} < 1$
- 4) Weil die Lichtgeschw. beide Male gleich ist, gilt das „normale“ Additionsgesetz der Geschw. nicht mehr. Das Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschw. ist so Ausgangspunkt der RTh.
- 5) Siehe Aufg. 2)
- 6) Stabantenne mit linearer Beschl. der Ldgträger. Kreisbew. mit Radialbeschl. der Ldgträger.
- 7) EM-Wellen entstehen nur durch beschl. Bewegung von Ladungen. Das erfolgt in der Antenne.
- 8) Chem. Bindungen sind nicht starr, sondern elastisch. Daher sind Moleküle schwingungsfähige Gebilde. Die Knickschwingung des polarisierten H_2O hat Mikrowellenfrequenz.
- 9) Die Frequenz des sichtbaren Lichtes entspricht etwa der Umlauffrequenz der Elektronen in den Atomen. Daher sind die Atome die „Sendeantennen“ des sichtbaren Lichtes.
- 10) Siehe Abschnitt c)
- 11) Siehe Abschnitt c)
- 12) Siehe Abschnitt g)