

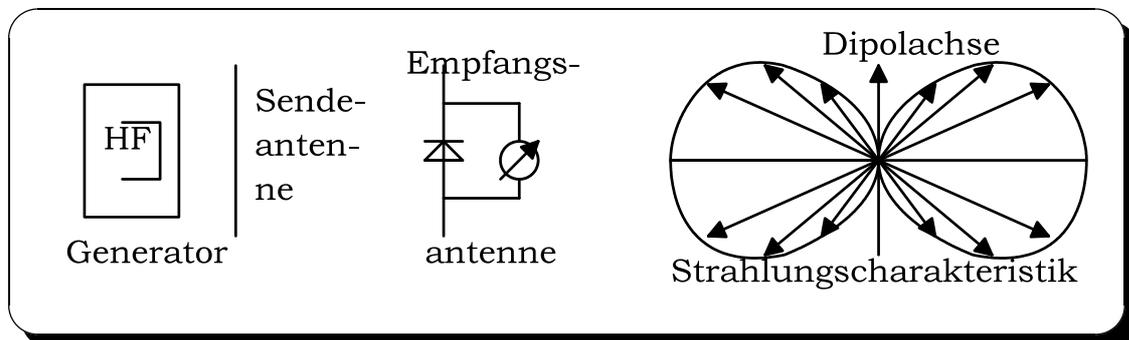
2.2.2 Dipolstrahlung

Nah- und Fernfeld eines schwingenden Dipols

Mit den Experimenten des vorangegangenen Kapitels kann gezeigt und zwanglos verstanden werden, dass ein Empfangsdipol zu elektrischen Schwingungen angeregt werden kann, und dass die Stromstärke längs des Dipols inhomogen und maximal ist, wenn eine sog. $\frac{\lambda}{2}$ -Antenne verwendet wird. Weiterhin kann ein Phasenunterschied zwischen magnetischem und elektrischem Feldvektor einfach erklärt werden.

Das elektromagnetische Feld reicht aber über die sog. Nahzone hinaus:

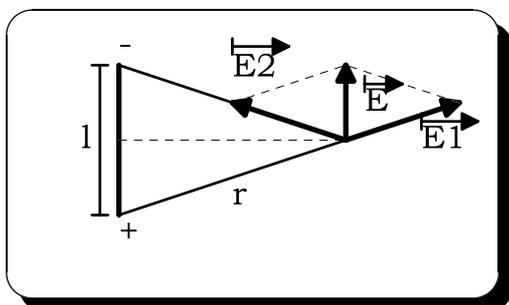
Versuch:



In der üblichen Anordnung zum Nachweis elektrischer Schwingungen ist in der Empfangsantenne statt eines Lämpchens eine Hochfrequenzdiode geschaltet; den dann entstehenden pulsierenden Gleichstrom misst man mit einem empfindlichen Strommesser.

Ergebnisse:

1. Verdoppelt man die Entfernung des Empfangsdipols vom Sendedipol, so beobachtet man eine Abnahme des elektrischen Stroms und damit der elektrischen Feldstärke auf den halben Anfangswert, das heißt das elektrische Feld ist umgekehrt proportional zur Entfernung vom Sendedipol. Bei einem "normalen" Dipol ergäbe sich aber eine ganz andere Abhängigkeit der Feldstärke von der Dipolentfernung (siehe Skizze)



Zur Vereinfachung habe der Dipol an seinen Enden die entgegengesetzten Ladungen $+Q$ und $-Q$, die im Punkt P auf der Mittelachse die Feldstärken E_1 und E_2 bewirken, aus denen sich die resultierende Feldstärke E durch Vektoraddition zusammensetzt. Den ähnlichen

Dreiecken kann man die Beziehung

$$\frac{E}{E_1} = \frac{1}{r} \text{ bzw. } E = E_1 \cdot \frac{1}{r}$$

entnehmen. Nach dem Coulomb-Gesetz ist aber

$$E \sim \frac{1}{r^2};$$

also gilt für die im Punkt P herrschende elektrische Feldstärke

$$E \sim \frac{1}{r^3}$$

im Gegensatz zur tatsächlich beobachtbaren Abhängigkeit von r !

2. Das Dipolfeld weist die skizzierte Strahlungscharakteristik auf, d. h. die Intensität der Dipolstrahlung ist in der Richtung senkrecht zur Dipolachse maximal, in Richtung der Dipolachse ist sie Null.
3. Auch in größerer Entfernung von der Sendeantenne kann eine elektrische Feldstärke registriert werden. Dabei kann es sich aber um keine "normale" Feldausbreitung handeln, wie nachfolgende Überlegung zeigt: Bei einer Sendefrequenz $f = 434 \text{ MHz}$ bauen sich elektrisches bzw. magnetisches Feld während der Zeit $\frac{T}{4}$ auf. Versuche zeigen, dass sich elektrische und magnetische Felder mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten. Beide Felder dürften sich damit nur bis zu einer maximalen Entfernung $s_{\text{max}} = \frac{c \cdot T}{4} = \frac{c}{4 \cdot f} = 17 \text{ cm}$ ausbreiten und sich in größerer Entfernung nicht mehr nachweisen lassen. Dies ist offenbar nicht der Fall.

Zusammenfassung: Das elektrische Feld, das in größerer Entfernung vom schwingenden Dipol nachgewiesen werden kann, gehorcht anderen Gesetzen als das von den Ladungen des Dipols ausgehende elektrostatische Nahfeld. Offenbar entsteht außer diesem Nahfeld noch ein weiteres, auch in großem Abstand vom Dipol kräftig wirkendes Fernfeld.

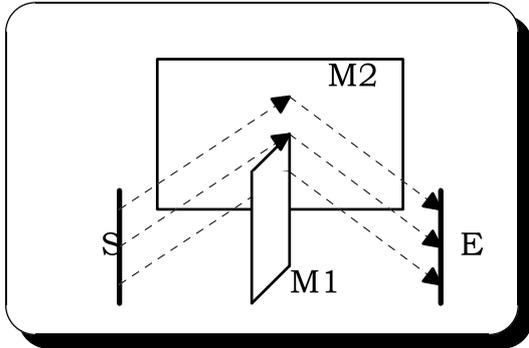
Wellennatur der elektromagnetischen Strahlung

Das elektromagnetische Wechselfeld muss sich offenbar vom Dipol lösen und in den Raum hinaus ausbreiten können. Schon Faraday nahm 1832 an, dass ein schwingender Dipol Energie in Form einer elektromagnetischen Welle abstrahlt. Die Richtigkeit dieser Annahme soll zunächst experimentell überprüft werden.

Typische Wellenphänomene sind Interferenz, Beugung und Reflexion. Mit der bisher verwendeten Apparatur soll im folgenden das Auftreten jedes dieser Phänomene nachgewiesen werden:

Versuch 1:

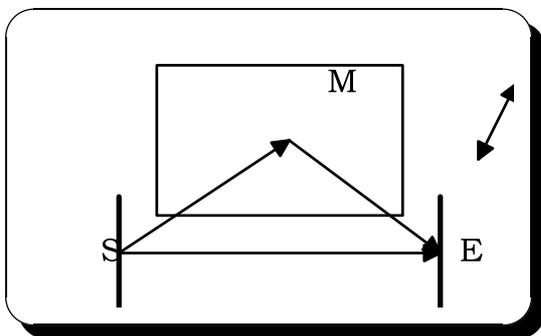
Sendedipol S und Empfangsdipol E werden zueinander parallel aufgestellt. Dann wird zuerst eine Metallplatte M_1 zwischen S und E gebracht, dann seitlich eine zweite Metallplatte M_2 so, dass der Empfänger E den Sender S durch M_2 "sieht".



Ergebnis: Bringt man die Metallplatte M_1 zwischen Sender und Empfänger, erlischt das Lämpchen im Empfangsdipol; erst nach Reflexion an der Platte M_2 leuchtet es wieder auf.

Folgerung: Die Dipolstrahlung kann reflektiert werden.

Versuch 2:



Sende-, Empfangsdipol und Metallplatte liegen in zwei parallelen Ebenen. Dann wird der Abstand zwischen den beiden Ebenen variiert.

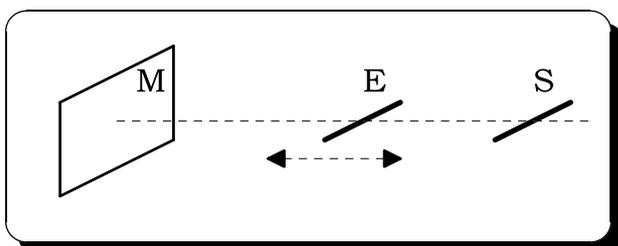
Ergebnis: Das Lämpchen leuchtet und erlischt abwechselnd.

Folgerung: Offenbar ist die Dipolstrahlung interferenzfähig.

Interferenzerscheinungen sind ein besonders typisches Anzeichen für eine Welle. Im folgenden Versuch soll die Erzeugung stehender Wellen gezeigt werden.

Physikalische Grundlagen: Wird eine fortschreitende Welle an einer Wand reflektiert, so überlagern sich einfallende und reflektierte Welle; es bildet sich eine stehende Welle aus. Sie weist Schwingungsknoten auf, deren Abstand jeweils eine halbe Wellenlänge beträgt. Damit kann man den Wellencharakter eines Feldes direkt nachweisen und auch die Wellenlänge λ bestimmen.

Versuch 3:



In einiger Entfernung vom Sender befindet sich eine Metallwand parallel zur Sendeantenne; der Raum zwischen Sender und Reflektor wird mit dem Empfangsdipol abgetastet.

Ergebnis: Im betrachteten Gebiet findet man abwechselnd Stellen mit maximalem und minimalem Empfang. An der Metallwand befindet sich ein Knoten der elektrischen Feldstärke, weitere folgen im Abstand von 34,5 cm ($= \frac{\lambda}{2}$). In Verbindung mit der Sendefrequenz $f = 434 \text{ MHz}$ lässt sich aus der für fortschreitende Wellen gültigen Gleichung

$$c = \lambda \cdot f$$

die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = 2 \cdot 0,345 \text{ m} \cdot 434 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

bestätigen.

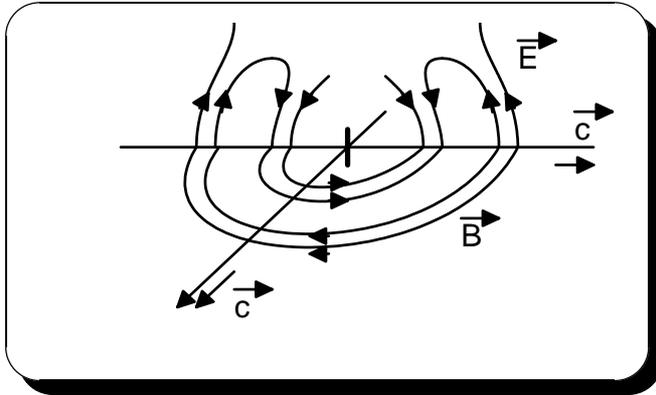
Vorläufige Zusammenfassung: Ein von einem Hochfrequenzgenerator angeregter Dipol sendet eine fortschreitende elektromagnetische Welle aus.

Der Ausbreitungsmechanismus elektromagnetischer Wellen

Die elektrischen Feldlinien in größerer Entfernung von einem strahlenden Dipol können, wie weiter oben dargelegt, nicht auf den Dipolladungen enden, da dieses unmittelbare Dipolfeld eine begrenzte Reichweite hat. Man muss sich vielmehr die Ausbreitung eines elektromagnetischen Feldes in Form einer Welle folgendermaßen vorstellen:

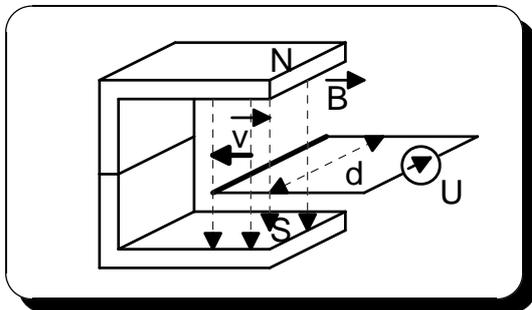
Das elektrische Feld, das sich bei $t = \frac{T}{4}$ um den Dipol gebildet hat, kann während der folgenden Viertelperiode seine Energie nur zum Teil wieder an den Dipol zurück liefern. Ein Teil der elektrischen Feldenergie breitet sich als Energie des elektrischen Wechselfeldes in den Raum hinaus aus, indem sich die elektrischen Feldlinien teilweise abschnüren und als Paket geschlossener elektrischer Feldlinien mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum ausbreiten. Während der nächsten Hälfte der Schwingungsdauer baut sich das elektrische Dipolfeld in entgegengesetzter Richtung auf; wieder kommt es zur Abschnürung von Feldlinien und dem Verlassen des Dipols. So verlassen die elektrischen Wirbel den Dipol in regelmäßiger Folge mit der Frequenz der Dipolschwingung.

Das magnetische Feld umgibt den Dipol kreisförmig. Der gleiche Bruchteil der Feldenergie wie beim elektrischen Feld wandert in den Raum hinaus (vgl. Skizze).



Die parallele Existenz von elektrischen und magnetischen Feldern kann mit den bisherigen Erkenntnissen sehr wohl verstanden werden. Zuerst soll gezeigt werden, dass ein wanderndes Magnetfeld ein elektrisches Feld erzeugt:

Versuch (Schlittenversuch):



Eine Leiterschleife wird aus einem ruhenden homogenen Magnetfeld herausgezogen bzw. das Magnetfeld wird in entgegengesetzter Richtung von der ruhenden Schleife entfernt.

Ergebnis: Beide Male entsteht eine konstante Gleichspannung mit identischer Polung. Variation der entsprechenden Parameter liefert

$$U = B \cdot v \cdot d.$$

Daraus folgt für die Feldstärke E

$$E = \frac{U}{d} = B \cdot v.$$

Der Leiter, an dem die Spannung anliegt, ist nur ein Indikator für dieses elektrische Feld; dieses existiert auch dann, wenn der Leiter gar nicht vorhanden ist! Ein mit der Geschwindigkeit v über einen Punkt hinwegziehendes Magnetfeld der Flussdichte B erzeugt also dort ein elektrisches Feld der Feldstärke $E = B \cdot v$.

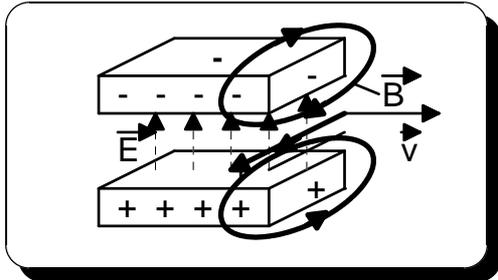
Für elektromagnetische Wellen folgt daraus:

Eine magnetische Welle hat also einen ständigen Begleiter in Form einer gleichphasigen elektrischen Welle.

Elektromagnetische Wellen wandern weiter in den Raum hinaus, ohne sich gegenseitig zu verzehren, auch wenn der Sendedipol längst aufgehört hat zu schwingen. Der schottische Physiker James Clerk Maxwell (1831 - 1879) fasste die Ideen von Faraday zu einem umfassenden Gleichungssystem (Maxwell-Gleichungen) zusammen. Aus diesen Gleichungen folgt einerseits, dass wandernde Magnetfelder mitwandernde elektrische Felder erzeugen,

andererseits, dass wandernde elektrische Felder mitwandernde magnetische Felder generieren.

Letzteres lässt sich so verstehen (vgl. Skizze):



Der geladene Kondensator bewege sich nach rechts. Seine mit ihm bewegten Ladungen (= Strom!) erzeugen Magnetfelder. Diese überlagern sich (ähnlich wie in einer stromdurchflossenen Spule) im Innern des Kondensators zu magnetischen Feldlinien, die senkrecht zu den elektrischen Feldlinien verlaufen.

Die Maxwell-Gleichungen sagen nun aus, dass man die Platten beliebig weit voneinander entfernen - und sogar ganz weglassen darf. Im Sinne der Faradayschen Feldphysik darf man nämlich die Erzeugung des B-Feldes allein dem wandernden E-Feld zuschreiben, ohne dass mitbewegte Ladungen nötig wären.

Die wandernden elektrischen und magnetischen Felder erzeugen also einander, wenn sich keine der beiden Feldarten auf Kosten der anderen "bereichert". Dies ist sicher der Fall, wenn die beiden Energiedichten stets gleich sind:

$$w_{el} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} .$$

Der Zusammenhang zwischen E und B ist (vgl. oben) gegeben durch $E = B \cdot v$. Daraus folgt

$$\frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot B^2 \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} \quad \text{bzw.} \quad v^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad \text{oder} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} .$$

Wenn also eine elektromagnetische Welle mit dieser Geschwindigkeit fortschreitet, braucht sie zu ihrer Existenz keine elektrischen Dipolladungen und Ströme mehr.

Zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen ist nicht unbedingt ein schwingender Dipol nötig. Nach Maxwell müssen sich elektrische und magnetische Felder ändern, damit elektromagnetische Wellen abgestrahlt werden; dies ist der Fall, wenn sich elektrische Ladungen mit wechselnder Geschwindigkeit, also beschleunigt bewegen. Strahlungsquellen aufgrund des Auftretens beschleunigter Ladungen sind z. B. Blitze, Röntgenröhren und Kreisbeschleuniger.

Endgültige Zusammenfassung:

1. Elektromagnetische Strahlung breitet sich in Form einer Welle aus.
2. Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen, d. h. elektrischer und magnetischer Feldvektor schwingen in jedem Moment senkrecht zur Ausbreitungsrichtung; beide Feldvektoren stehen aufeinander senkrecht.

Dipolstrahlung

3. Im Nahfeld schwingen elektrischer und magnetischer Feldvektor mit einer Phasendifferenz $\pi/2$; im Fernfeld schwingen sie gleichphasig.
4. Die von einem schwingenden Dipol ausgehende elektromagnetische Welle ist polarisiert.
5. Die Abstrahlung eines schwingenden Dipols ist ein Sonderfall; grundsätzlich strahlt jede beschleunigte Ladung Energie ab.
6. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle hängt von der elektrischen und magnetischen Feldkonstanten und der Materie, in der sie sich ausbreitet, ab: $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$. Im Vakuum gilt $v = c$.