

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

Wissenschaftlicher Film C 1159/1975

**Der Strahlungsvorgang beim
Hertzschen Dipol**

Begleitveröffentlichung von

Prof. Dr.-Ing. J. SONNTAG, Berlin

Mit 3 Abbildungen

GÖTTINGEN 1975

Der Strahlungsvorgang beim Hertzschen Dipol

J. SONNTAG und W. WERNER, Berlin

Begleitveröffentlichung von J. SONNTAG, Berlin

Allgemeine Vorbemerkungen¹

Erfahrungsgemäß bereitet es Schwierigkeiten, die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen anschaulich darzustellen. Eine ebene elektromagnetische Welle kann mit der Lichtausbreitung paralleler Strahlen verglichen werden. Die Entstehung der Welle kann dabei nicht gezeigt werden.

Der einfachste Elementarstrahler, an dem sowohl die Entstehung als auch die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen dargestellt werden kann, ist der Hertzsche Dipol. HEINRICH HERTZ führte 1887/88 den Nachweis, daß elektromagnetische Wellen sich wie Lichtwellen ausbreiten und ebenfalls gebrochen und reflektiert werden können. Für sein Experiment verwendete er eine hochfrequente Kugelfunkenstrecke, die man näherungsweise als einen Dipolstrahler betrachten kann. H. HERTZ [1] hat außerdem die ersten Feldberechnungen und Feldbilder für den nach ihm benannten elektrischen Dipolstrahler angegeben. Um den Abstrahlungsvorgang anschaulich zu machen, liegt es nahe, den zeitlichen Vorgang durch eine Aneinanderreihung von Einzelzeichnungen — den Feldbildern — in einem Trickfilm in Zeitlupe darzustellen.

Hertzscher Dipol

Einen Hertzschen Dipol mit einem zeitlich sich sinusförmig ändernden Dipolmoment kann man sich anschaulich durch zwei kleine Kugeln vorstellen, die sich gegenüberstehen und periodisch aufgeladen und entladen werden (Abb. 1). Dieser Ladungsvorgang entspricht auch einem Strom i in der leitenden Verbindung zwischen den beiden Kugeln. Unter

¹ Angaben zum Film und kurzgefaßter Filminhalt (deutsch, englisch, französisch) s. S. 9 u. 10.

einem Dipol versteht man allerdings im strengen mathematischen Sinn ein Dipolelement mit verschwindend kleinen Abmessungen. Die Bestimmung der vom Hertzschen Dipol ausgehenden elektrischen und magnetischen Feldstärke soll hier nicht näher ausgeführt werden. Die Berechnung dieser Feldgrößen ist in vielen Lehrbüchern der Physik, Elektrotechnik und Hochfrequenztechnik zu finden (z.B. SIMONYI [2],

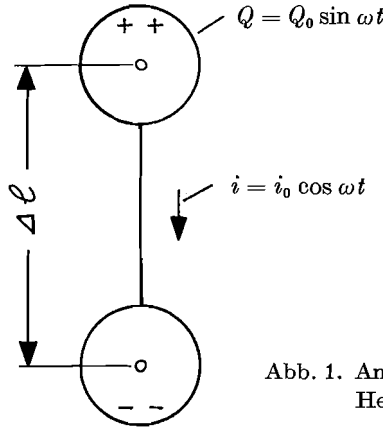


Abb. 1. Anschauliche Darstellung des Hertzschen Dipols

ZINKE u. BRUNSWIG [3]). Die Bestimmungsgleichungen für die Feldstärken werden meist in Kugelkoordinaten (r, φ, ϑ) angegeben. Von den drei möglichen Komponenten liegen jedoch wegen der Rotationssymmetrie für die elektrische Feldstärke nur E_r und E_ϑ und für die magnetische Feldstärke nur H_φ vor (Abb. 2):

$$E_r = \frac{\Delta l \cdot i_0}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \omega} 2 \cos \vartheta \left[\frac{1}{r^3} \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{r^2} \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

$$E_\vartheta = \frac{\Delta l \cdot i_0}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \omega} \sin \vartheta \left[\frac{1}{r^3} \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{r^2} \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{r} \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

$$H_\varphi = \frac{\Delta l \cdot i_0}{4\pi} \cdot \sin \vartheta \left[\frac{1}{r^2} \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{r} \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

Für das Verhalten der Feldstärken ist die Wellenlänge λ von entscheidender Bedeutung; es gilt der Zusammenhang:

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\mu \cdot \epsilon},$$

wobei μ die Permeabilitätskonstante und ε die Dielektrizitätskonstante des umgebenden Raumes sind. Zwischen der Wellenlänge λ und der Frequenz f ergibt sich daraus folgender Zusammenhang¹:

$$\lambda = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}.$$

Im sog. Nahfeld des Dipols, in dem die Entfernung r vom Dipol sehr klein gegenüber der Wellenlänge ist, überwiegen in den Gleichungen (1)—(3) die Glieder mit der niedrigsten Potenz von r . Die elektrische Feldstärke ist also in diesem Fall proportional $1/r^3$ und entspricht dem statischen Verhalten eines Dipols.

Bei großen Entfernungen ($r \gg \lambda$), im sog. Fernfeld, überwiegen dagegen in den Gleichungen (1)—(3) die Glieder mit der höchsten Potenz von r .

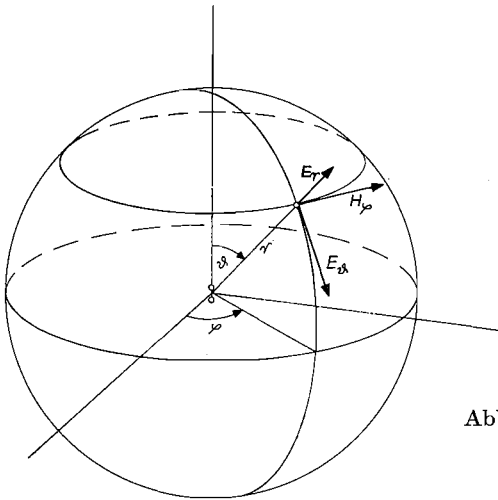


Abb. 2. Feldstärkekomponenten des Hertzschen Dipols

Mit wachsender Entfernung nehmen also die Feldstärkekomponenten E_θ und H_φ nur mit $1/r$ ab. Es unterscheidet sich die magnetische Feldstärke H_φ von der elektrischen Feldstärke E_θ nur durch einen konstanten Faktor, den sog. Wellenwiderstand. Beide Feldstärkekomponenten sind im Fernfeld in Phase, d. h. die Strahlungsleistung ist stets positiv, und der POYNTINGSCHE Strahlungsvektor ist radial nach außen gerichtet. Die relativ kleine elektrische Feldstärkekomponente E_r ist gegenüber H_φ um 90° phasenverschoben und trägt daher nicht zur Abstrahlung bei.

¹ Im Vakuum bzw. auch in Luft beträgt z. B. bei einer Frequenz von 50 Hz die Wellenlänge $\lambda = 6000$ km, dagegen bei 1 MHz $\lambda = 300$ m.

Feldbild des Hertzschen Dipols

Zur Darstellung des Feldverlaufs ist es zweckmäßig, anstelle der Feldstärken die Feldlinien zu betrachten, deren Tangenten ja bekanntlich mit der Richtung der Feldstärke übereinstimmen. Der Verlauf der Feldlinien beschreibt also im ganzen Raum die Richtung der Feldstärke. Aber auch aus dem Abstand zwischen benachbarten Feldlinien kann man — falls die Flußanteile zwischen den Feldlinien gleich sind — qualitative Rückschlüsse auf die Größe der Feldstärke ziehen. So ist in dem Bereich des Feldbildes, in dem die Feldlinien dicht zusammenlaufen, die Feldstärke groß — und umgekehrt.

Den Verlauf der magnetischen Feldlinien kann man direkt der Gleichung (3) entnehmen; da nur eine φ -Komponente der magnetischen Feldstärke vorhanden ist, sind die Feldlinien Kreise um die Dipolachse. Zur Bestimmung der Feldliniengleichung für die elektrische Feldstärke geht man von der Definition der Feldlinien aus: Das Vektorprodukt aus der elektrischen Feldstärke und dem Wegelement der Feldlinien muß verschwinden. Die Lösung der sich daraus ergebenden Differentialgleichung führt nach einigen Umformungen auf die Feldliniengleichung:

$$\vartheta = \arcsin \sqrt{\frac{c}{\frac{\lambda}{2\pi r} \sin\left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda}\right) + \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda}\right)}}. \quad (4)$$

Hierbei ist c ein dimensionsloser Feldlinienparameter, der für eine bestimmte Feldlinie eine Konstante ist. Das Feldbild zu einem beliebigen Zeitpunkt t kann damit aus dem eindeutigen Zusammenhang (4) zwischen r und ϑ für jede einzelne Feldlinie mit dem Parameter c ermittelt werden. Der Feldlinienverlauf wurde erstmals von H. HERTZ [1] berechnet und angegeben. Skizzierte Feldbilder sind in vielen Lehrbüchern zu finden; genauer berechnete Feldlinienbilder findet man in dem Buch von ZINKE u. BRUNSWIG [3].

Die einzelnen Feldbilder für den Trickfilm wurden nach der Gleichung (4) mit dem Digitalrechner GIER-DISK berechnet¹. Die Zeitwerte t wurden so gewählt, daß im Filmablauf der Vorgang kontinuierlich erscheint. Ausgehend von den Feldlinien mit dem Parameter $c = 0$ wurden die Feldlinienparameter um jeweils $\Delta c = 0, 2$ vergrößert bzw. verkleinert. Bei einer effektiven Formatgröße von $41,2 \times 30$ cm, die für die Filmaufnahmen gewählt wurde, mußten für ein formatfüllendes Feldbild etwa 11000 Feldlinienpunkte berechnet werden. Bei dieser großen Anzahl von Rechenwerten konnten die Feldbilder nur über einen Plotter gezeichnet werden. Der Plotter erhielt über einen Lochstreifen, der vom

¹ Der Verfasser dankt Herrn Dipl.-Ing. W. WERNER, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische Elektrotechnik der TU Berlin, für die Erstellung des Rechenprogramms.

Rechner ausgegeben wurde, die notwendigen Koordinatenwerte und Zeichenbefehle. Für den zeitlichen Ablauf einer Halbperiode wurden 86 Vorlagen und für den gesamten Film etwa 360 Zeichnungen verwendet.

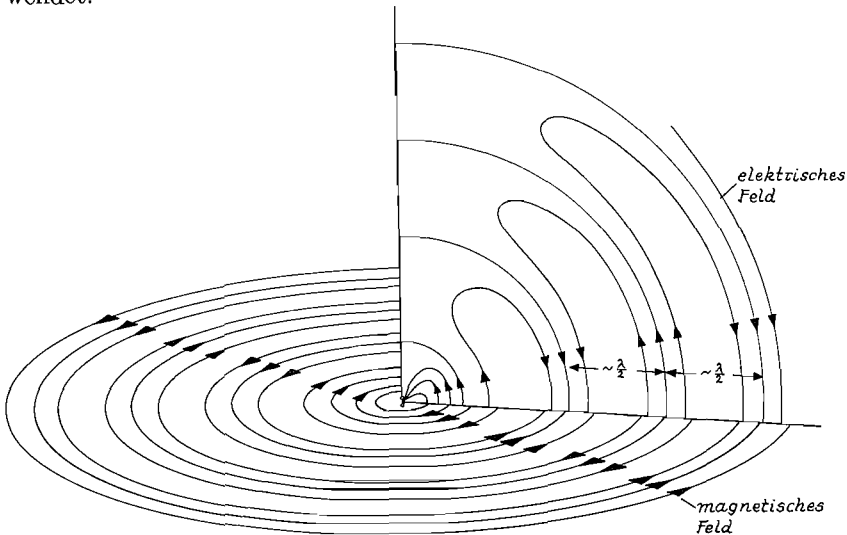


Abb. 3. Perspektivische Darstellung des elektrischen und magnetischen Feldes beim Hertzschen Dipol

Erläuterungen zum Film¹

Ladung und Strom

Der Hertzsche Dipol besteht aus zwei kleinen, dicht benachbarten Kugeln, auf denen sich die Ladungsverteilung in Abhängigkeit von der Zeit sinusförmig ändert.

Beim Ladungsaustausch fließt im Draht ein Strom, der sich wegen der Phasenverschiebung kosinusförmig ändert.

Zur Darstellung des Strahlungsvorganges denkt man sich den Hertzschen Dipol zu einer Punktquelle geschrumpft und beobachtet das Verhalten der Feldlinien.

Elektrisches Feld

Sobald die erste Halbwelle des elektrischen Feldes ausgebildet ist, lösen sich die ersten Feldlinien ab und breiten sich aus.

¹ Die kleingedruckten Abschnitte geben den Wortlaut des im Film gesprochenen Kommentars wieder.

Es wurden spezielle Feldlinien (Kreise) mit dem Parameter $c = 0$ der vorangegangenen Halbwellen ebenfalls dargestellt, um nicht den Eindruck entstehen zu lassen, daß hier ein Einschaltvorgang vorliegt. Zur besseren Anschauung wurde die Abstrahlung der einzelnen Halbwellen nacheinander dargestellt. Der Hertzsche Dipol befindet sich also im eingeschwungenen Zustand.

Es folgt die nächste Halbwelle.

Ist die maximale Dipolaufladung erreicht, zieht sich ein Teil der Feldlinien wieder zusammen. Die übrigen schnüren sich ab und dringen weiter nach außen.

Beim Überschreiten der maximalen Dipolaufladung erkennt man deutlich den Einfluß des Nahfeldes; der Feldanteil, der proportional $1/r^3$ nach den Gleichungen (1) und (2) ist, bewirkt ein Zusammenziehen der Feldlinien in nächster Nähe des Dipols.

Jede Umkehrung der Polarität des Dipols läßt eine neue Halbwelle entstehen. Stark verlangsamt wird dieser Vorgang deutlicher: Eben lösen sich die ersten Feldlinien vollständig ab. Am Ort der Abschnürung entsteht zunächst ein singulärer Punkt. Darauf läuft das Feld in zwei Teilen auseinander.

Im singulären Punkt, in dem sich eine Feldlinie schneidet, verschwindet die Feldstärke. Diese feldfreie Stelle trennt den Anteil des Feldes, der in Form einer Welle nach außen läuft, und den, der sich zum Dipol zusammenzieht.

Die Pfeile zeigen die Feldrichtungen im Nahfeld der Quelle. Jetzt löst sich auch die letzte Feldlinie dieser Halbwelle ab.

Magnetisches Feld

Die magnetischen Feldlinien sind kreisförmig. Sie breiten sich in einer Ebene senkrecht zur Verbindungslinie der Ladungsträger aus. In der räumlichen Verteilung des Feldes wechseln Linien entgegengesetzter Richtung einander ab. Das gleiche gilt auch für die darauf senkrechten elektrischen Feldlinien.

In einem Abstand von etwa einer Wellenlänge vom Dipol kann man mit ausreichender Genauigkeit die Wellenlänge direkt dem Feldbild entnehmen (vgl. Abb. 3).

Außerhalb des Nahfeldes dehnen sich die Feldlinien beim Strahlungsvorgang gleichförmig aus. Für einen Beobachter in großer Entfernung vom Dipol, im sogenannten Fernfeld, nimmt das Feldbild mit abnehmender Krümmung der Feldlinien die Form nahezu ebener Wellen an.

Hier zunächst die magnetischen Feldlinien — und jetzt die elektrischen Feldlinien. Die Pfeile machen nochmals deutlich, daß die Richtung des Feldes ständig wechselt.

Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen

Elektrisches und magnetisches Feld breiten sich ohne gegenseitige Phasenverschiebung im Raume aus. Ein ortsfester Empfänger kann die aufeinanderfolgenden Wellenfronten als periodische Änderungen der elektrischen und magnetischen Feldstärke registrieren.

Literatur

- [1] HERTZ, H.: „Die Kräfte electrischer Schwingungen, behandelt nach der MAXWELLSCHEN Theorie“. Ann. d. Phys. **36** (1888), 147.
- [2] SIMONYI, K.: „Theoretische Elektrotechnik“. VEB Deutscher Verlag d. Wissenschaften, Berlin 1966.
- [3] ZINKE, O., u. H. BRUNSWIG: „Lehrbuch der Hochfrequenztechnik“. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg/New York 1965.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. J. SONNTAG, Institut für Theoretische Elektrotechnik der TU Berlin, D-1 Berlin 10, Einsteinufer 25.

Angaben zum Film

Das Filmdokument wurde 1975 veröffentlicht und ist für die Verwendung im Hochschulunterricht bestimmt. Tonfilm, 16 mm, schwarzweiß, 45 m, 4½ min (Vorführgeschw. 24 B/s).

Die Aufnahmen entstanden im Jahre 1974. Veröffentlichung aus dem Institut für Theoretische Elektrotechnik der Technischen Universität Berlin, Prof. Dr.-Ing. J. SONNTAG, Dipl.-Ing. W. WERNER, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Dr. G. GLATZER.

Inhalt des Films

Der Film zeigt den Abstrahlungsvorgang elektromagnetischer Wellen beim Hertzschen Dipol. In einem kontinuierlichen Vorgang wird die Ablösung der elektrischen Feldlinien in allen Phasen dargestellt. Weiterhin werden die magnetischen Feldlinien gemeinsam mit den elektrischen Feldlinien in perspektivischer Sicht im Nah- und Fernfeld gezeigt.

Summary of the Film

The film shows the radiation of electromagnetic waves from a Hertz dipole. In a continuous process the detachment of the lines of the electric field is depicted in all phases. Moreover, the lines of the magnetic field are shown in combination with those of the electric field in a perspective view in both the near and far fields.

Résumé du Film

Le film montre le phénomène de rayonnement d'ondes électromagnétiques dans le dipôle de Hertz. Dans un processus continu, le décollage des lignes de flux électriques est représenté dans toutes les phases. En outre, les lignes de flux magnétiques sont montrées en même temps que les lignes de flux électriques, en perspective, dans une zone de Fresnel et une zone Fraunhofer.

