

# Elektromagnetische Wellen

Im Gegensatz zu **Schallwellen** sind **elektromagnetische** Wellen **nicht** an ein materielles Medium gebunden -- sie können sich auch in einem perfekten Vakuum ausbreiten. Sie sind auch nicht longitudinale, sondern **transversale** Wellen. Die 'Auslenkungsgrößen' sind nicht mechanische Eigenschaften (wie z.B. der Druck oder die Dichte bei Schallwellen), sondern, wie der Name besagt, **elektrische** und **magnetische** Größen: genauer, ein **elektrisches** und ein **magnetisches Feld**.

Elektromagnetische Wellen sind tatsächlich harmonisch, sie bestehen aus sinusförmigen **elektrischen und magnetischen Feldern, welche senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen** (daher **transversale** Wellen!).

Diese Felder schwingen in der Zeit mit der **Frequenz**  $\nu$  (bzw. der **Kreisfrequenz**  $\omega = 2\pi\nu$ ) und wiederholen sich als Funktion vom Ort entlang der Ausbreitungsrichtung nach der **Wellenlänge**  $\lambda$  (bzw. mit der **Wellenzahl**  $k = 2\pi/\lambda$ ). Es gilt die übliche **Grundgleichung der Wellenlehre**:

$$c = \lambda\nu = \omega/k$$

wo  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) der Wellen ist.

Bei Ausbreitung im Vakuum ist das 'Medium' eben dieses *Vakuum*: es hat eine **elektrische Eigenschaft** (die 'Durchlässigkeit' oder 'Permittivität' für elektrische Felder, ausgedrückt durch die '**elektrische Feldkonstante**'  $\epsilon_0$ ), sowie eine **magnetische Eigenschaft** (die 'Permeabilität' für magnetische Felder, gegeben durch die entsprechende '**magnetische Feldkonstante**'  $\mu_0$ ). In Analogie zu mechanischen Wellen (z.B. Seilwellen) kann man die Konstante  $\epsilon_0$  als eine Art '**rücktreibende Kraftkonstante**' (für elektrische Ladungen) und die Konstante  $\mu_0$  als eine Art '**Trägheitskonstante**' (für die *Bewegung* von elektrischen Ladungen) interpretieren.

Es folgt für die **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum**:

$$c = \sqrt{1/\epsilon_0\mu_0}$$

' $c = 299\,792\,456,2$  m/s' ist eine **Naturkonstante** (ca. 1 Million mal größer als die Schallgeschwindigkeit) und gilt für alle Arten von **elektromagnetischen Wellen** im Vakuum [Licht (UV, sichtbar, infrarot bzw. Wärmestrahlung), Radiowellen, Mikrowellen, Röntgen- und Gammastrahlen].

## Lichtgeschwindigkeit in Materie

In **Materie** kommen die entsprechenden materialspezifischen Konstanten dazu (die '**relative Permittivität**' oder '**Dielektrizitätskonstante**'  $\epsilon_r$  sowie die '**relative Permeabilität**'  $\mu_r$ ). Beide sind üblicherweise größer/gleich 1, so daß die sich ergebende Geschwindigkeit:

$c_M = \sqrt{1/\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}$  *kleiner* als  $c$  (im Vakuum) ist.

Das Verhältnis  $N = c/c_M$  ist auch eine Eigenschaft der Materie und nennt sich **Brechungsindex** oder **Brechzahl (der Optik)**:

$$N = c/c_M = \sqrt{1/\epsilon_0 \mu_0} / \sqrt{1/\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} .$$

Meist ist  $\mu_r = 1$

$$\Rightarrow N = c/c_M = \sqrt{\epsilon_r}$$

## Entstehung von elektromagnetischen Wellen

Ebenso wie Seilwellen durch eine **Beschleunigung von Seilabschnitten** oder Schallwellen durch die **Beschleunigung von Materieteilchen** (Atomen oder Molekülen in dem Medium) entstehen, kommen **elektromagnetische Wellen** durch **beschleunigte elektrische Ladungen** zustande. Diese Ladungen können in einzelnen Atomen gebunden sein (Lichtemission durch elektronische Energieübergänge in Atomen oder Molekülen), sie können im freien Raum sein [schwingende Elektronen im Vakuum in einem Radarsender (Klystron) oder in Materie (schwingende Ladungen in einer Sendeantenne, Hertzscher Dipol)], sie können selbst die Ladungen im Atomkern sein (Emission von Gammastrahlen durch einen angeregten, schwingenden Kern).

Die EM-Wellen gehorchen einer **Wellengleichung**, genau wie derjenigen, die wir für die Seilwellen hergeleitet haben. Für das **elektrische Feld** lautet sie (eindimensional):

$$\partial^2 \mathbf{E} / \partial x^2 = (1/c^2) \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 .$$

Eine analoge Gleichung gilt für das magnetische Feld (mit  $B$  oder  $H$  statt  $E$ ). Die Konstante  $c$  ist wieder die *Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Vakuum*.

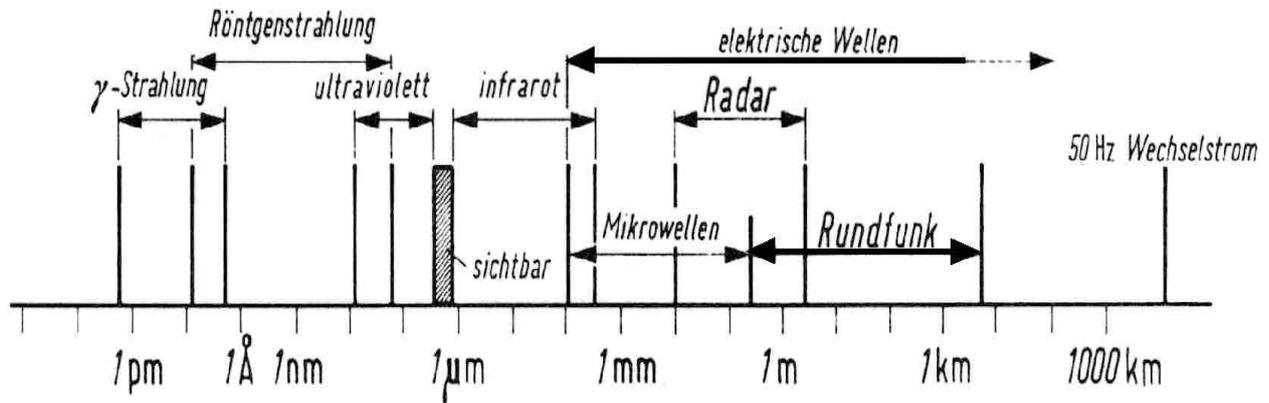
- **Der E-Feldvektor schwingt senkrecht zum B-Feldvektor, beide schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung => Transversale Wellen**
- EM-Wellen können polarisiert sein (wie alle transversalen Wellen). **Die Polarisationsrichtung ist die Schwingungsrichtung des E-Feld-Vektors (*per definitionem*).**
- **EM-Wellen transportieren Energie.** Die Energieflussdichte bzw. (Licht-)Intensität  $I$  kann z.B. in  $\text{W/m}^2$  gemessen werden. Sie ist proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke oder der magnetischen Feldstärke. Es gilt (in Luft bzw. Vakuum):

$$I = c \varepsilon_0 E^2 = c \mu_0^{-1} B^2$$

wobei  $E$  und  $B$  Effektivwerte sind, also um den Faktor Wurzel-2 kleiner sind als die entsprechenden Maximalwerte

- Der "Transport" von Informationen durch EM-Wellen erfolgt durch **Modulation, entweder der Amplitude** (Amplitudenmodulation, AM; Pulsmodulation) **oder der Frequenz** bzw. Phase (Frequenzmodulation, FM; Phasenmodulation).

Das **elektromagnetische Spektrum** erstreckt sich über viele Größenordnungen in  $\nu$  und  $\lambda$ , und entsprechend in der *Energie* der Wellen (die proportional  $\nu$  ist):



**Elektromagnetisches Spektrum** als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ .

---

Die *Art* und *Größe* des 'Wellengenerators', welcher die Wellen ausstrahlt, sind auch sehr unterschiedlich: für langwellige Radiowellen ist er eine Antenne von mehreren hundert meter Länge; für Mikrowellen, eine Vakuumröhre von einigen cm Durchmesser; für Licht, einzelne Atome oder Moleküle; und für  $\gamma$ -Strahlen, Atomkerne. Grundsätzlich gilt aber: ***beschleunigte Ladungen strahlen Energie in Form von elektromagnetischen Wellen aus.***

## Frequenzabhängigkeit des Hertzschen Dipols

Die Ausstrahlung und der Empfang elektromagnetischer Radiowellen lässt mithilfe von Sendeantennen bzw. Empfangsantennen diskutieren, die als "Hertzscher Dipol" wirken. Es gilt für die abgestrahlte Leistung  $P$  des Hertzschen Dipols:

$$P = \frac{\omega^4 |\mathbf{p}|^2}{12\pi\epsilon c^3}$$

wobei  $\mathbf{p}$  Stärke und Richtung des oszillierenden Dipolmoments angibt,  $\omega$  die Frequenz (der EM-Strahlung),  $\epsilon$  die Dielektrizitätskonstante und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.

Auf der molekularen Ebene lässt sich Streuung von Licht als die "Probeabsorption" deuten, auf die das Wiederaussenden der EM-Strahlung folgt. Die Wellenlängen- bzw. Frequenzabhängigkeit der Lichtstreuung verhält sich dann wie beim makroskopischen Hertzschen Dipol: Die Lichtstreuung nimmt mit der vierten Potenz der Frequenz des Lichtes zu, d.h. sie ist proportional zu  $\omega^4$ . Hiermit lässt sich sowohl die bisweilen blaue Farbe des Himmels als auch das Abendrot erklären.

---