

Strahlungsdruck und Impuls der Photonen

Die Energiedichte u des elektromagnetischen Feldes ist:

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

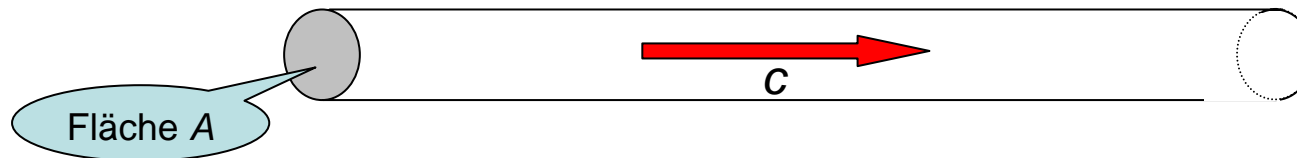
Anteil des elektrischen Feldes

Anteil des Magnetfeldes

In einer ebenen elektromagnetischen Welle sind beide Anteile im Mittel gleich groß

Beispiel: Laserstrahl , Leistung P

$$P = u \cdot c \cdot A$$



Die Energiedichte u hat die Dimension: $[u] = \frac{\text{Energie}}{\text{Volumen}}$ und die Einheit $\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

Der Strahlungsdruck p_{St} hat die Dimension: $[p_{\text{St}}] = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$ und die Einheit $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $[p_{\text{St}}] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

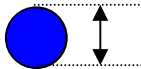
Die Energiedichte u und der Strahlungsdruck p_{St} haben nicht nur die gleiche Dimension, sondern sind auch gleich!

$$p_{\text{St}} = u$$

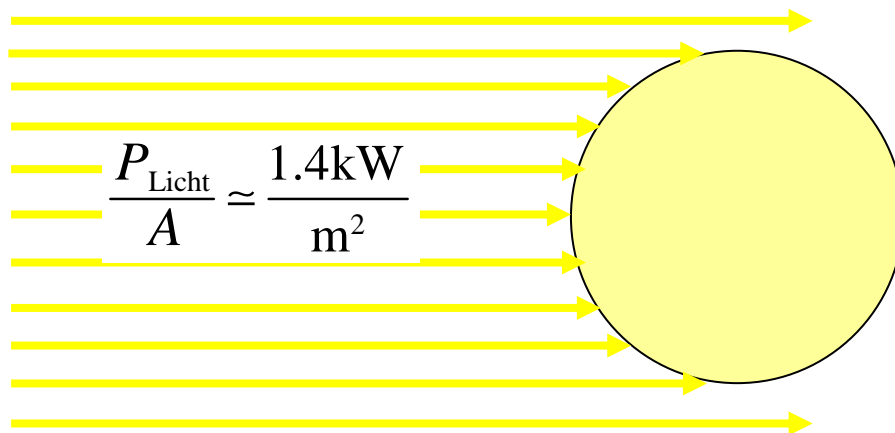
Beispiel: Laserstrahl, $P = 10 \text{ mW}$, Fläche $A = (1\text{mm})^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$

$$u = \frac{P}{A \cdot c} = \frac{10^{-2} \text{ W}}{10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3.33 \cdot 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad \longleftrightarrow \quad p_{\text{St}} = 3.33 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Auf die Fläche von 10^{-6} m^2 wirkt also die Kraft: $F = p \cdot A = 3.33 \cdot 10^{-11} \text{ N}$

Fokussiert man diesen Laserstrahl auf  $D = 2 \mu\text{m}$ $A = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ $p_{\text{St}} = 10.6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Ein Beispiel für eine großflächige Strahlungsquelle ist das Sonnenlicht:

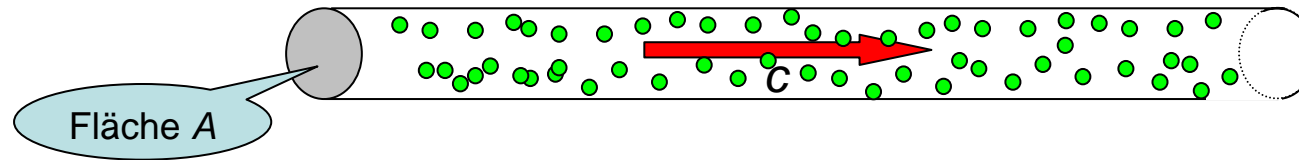


$$u = \frac{P}{A \cdot c} = \frac{1400 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 4.67 \cdot 10^{-6} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Die Kraft auf die gesamte Erde ist:

$$F = \pi \cdot R_E^2 \cdot 4.67 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 5.95 \cdot 10^8 \text{ N}$$

Wir betrachten jetzt das Licht im Strahl als eine Ansammlung von Lichtteilchen \bullet , welche sich mit der Geschwindigkeit c in die gleiche Richtung bewegen.



Die Energie des einzelnen Teilchens, die "Quantenenergie" E_{ph} ist: $E_{\text{ph}} = h \cdot \nu$

Die (räumliche) Dichte dieser Photonen sei n_{ph}

Dann ist die Energiedichte: $u = n_{\text{ph}} \cdot E_{\text{ph}} = n_{\text{ph}} \cdot h\nu$

Wenn also $N_{\text{ph}} = n_{\text{ph}} \cdot c \cdot A$ Teilchen pro Zeiteinheit eine Kraft $F = u \cdot A = n_{\text{ph}} \cdot E_{\text{ph}} \cdot A$ ausüben,

dann hat ein Lichtteilchen den Impuls p_{ph} :

$$p_{\text{ph}} = \frac{F}{n_{\text{ph}} \cdot A \cdot c} = \frac{n_{\text{ph}} \cdot E_{\text{ph}} \cdot c}{n_{\text{ph}} \cdot A \cdot c} = \frac{E_{\text{ph}}}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

Äquivalent ist die Aussage:

$$E_{\text{ph}} = p_{\text{ph}} \cdot c$$

Bei Teilchen ohne Ruhemasse (wie Photonen) ist die Energie einfach proportional zum Impuls.

Man kann den Impuls des Photons auch in Abhängigkeit der Wellenlänge λ schreiben:

$$p_{\text{ph}} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot c} = \frac{h}{\lambda}$$

Diese Impuls-Wellenlänge Beziehung ist eine sehr fundamentale Beziehung.

De Broglie hat diese Beziehung als generell gültig postuliert, und die Experimente zeigen, daß diese Impuls-Wellenlänge-Beziehung eine allgemeine Eigenschaft aller Teilchen ist:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

De Broglie Beziehung

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Die de Broglie Beziehung ist das wichtigste Bindeglied zwischen den Teilcheneigenschaften, beschrieben durch den Impuls p und den Welleneigenschaften, beschrieben durch die Wellenlänge λ .