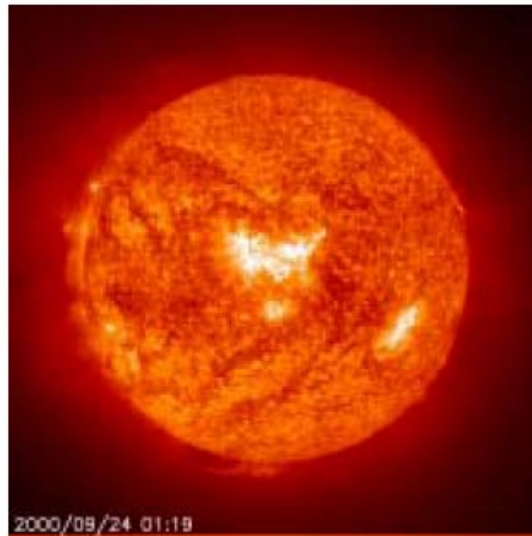


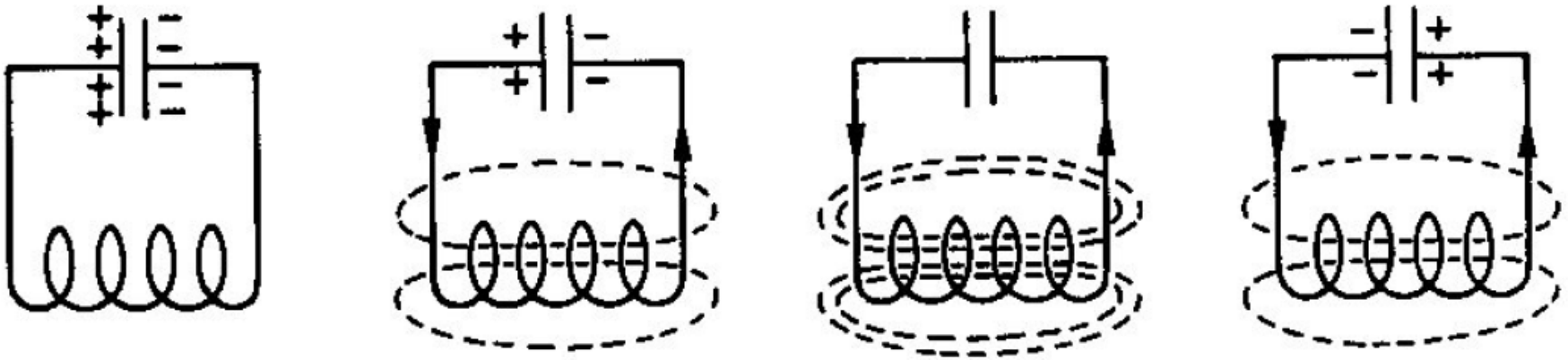
IV. Elektrizität und Magnetismus

IV.5 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen



Wiederholung: Schwingkreis



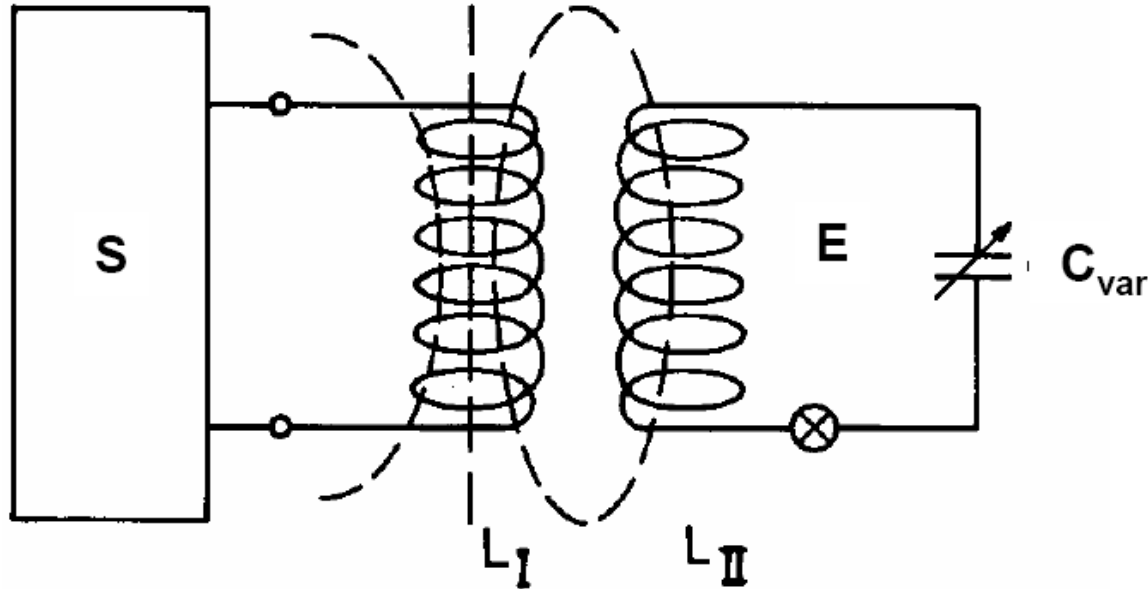
- elektrische Feld im Kondensator wird periodisch auf- und abgebaut
- Magnetfeld der Spule wird periodisch auf- und abgebaut

elektrische Energie \Leftrightarrow magnetische Energie

- analog zu mechanischen Schwingungen: potenzielle \Leftrightarrow kinetische Energie

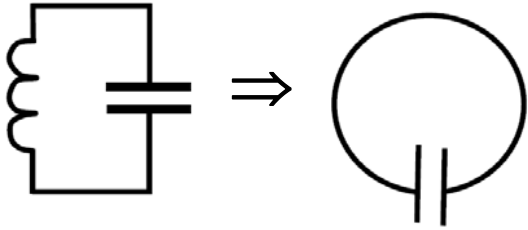
$$\text{Resonanz- (Eigen-) frequenz: } f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

Gekoppelte Schwingkreise: Sender und Empfänger



- Der **Sendeswingkreis S** schwingt bei seiner Resonanzfrequenz. Der **Empfängerswingkreis E** kann durch geeignete Abstimmung am variablen Abstimmkondensator C_{var} zum Mitschwingen (Resonanz) gebracht werden.
- Energieübertragung vom Sende- zum Empfängerkreis durch Induktion (analog Transformator)

Übergang vom Schwingkreis zum Hertz'schen Dipol

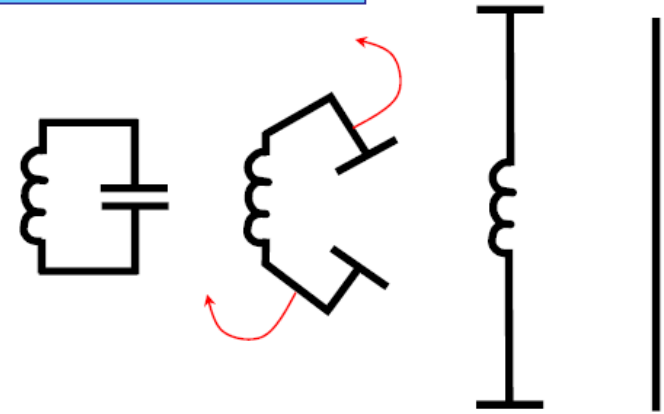


- Der einfachste Schwingkreis besteht nur aus einer einzigen Schleife mit zwei Kondensatorplatten

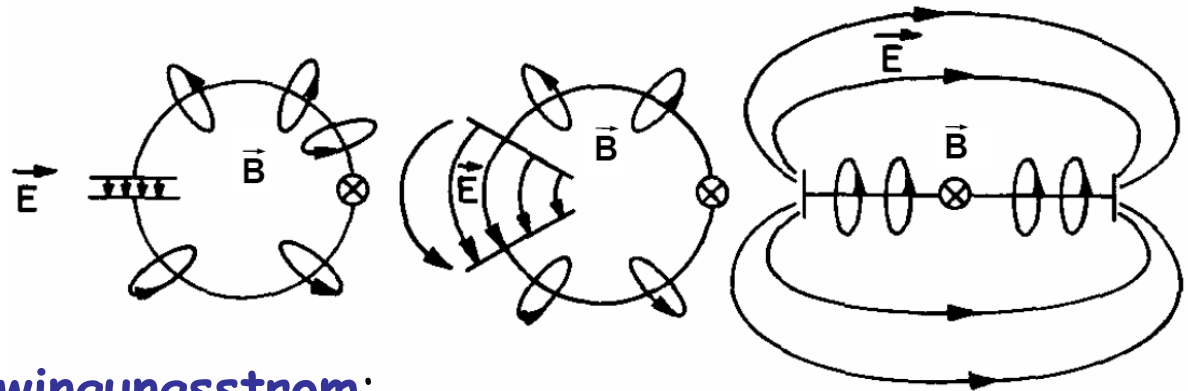


Einfach-Schwingkreis

- Aufbiegen eines Schwingkreises führt zum Hertz'schen Dipol; Spule und Draht sind nicht mehr als getrennte Schaltelemente zu erkennen:

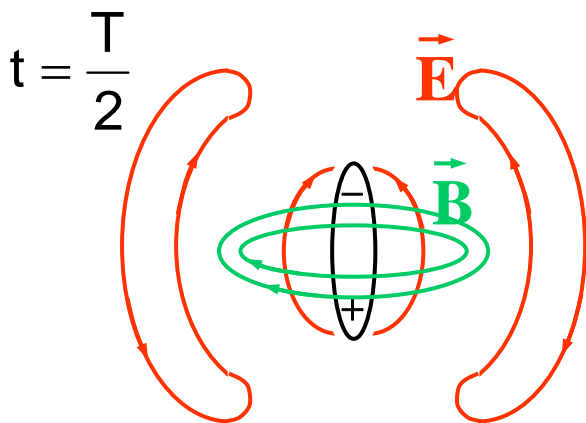
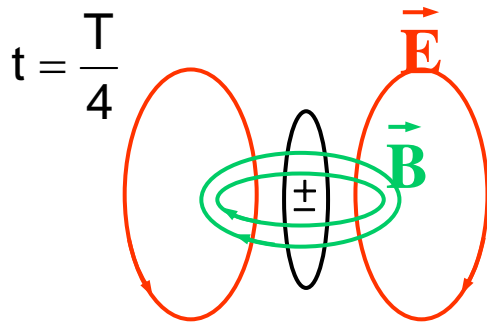
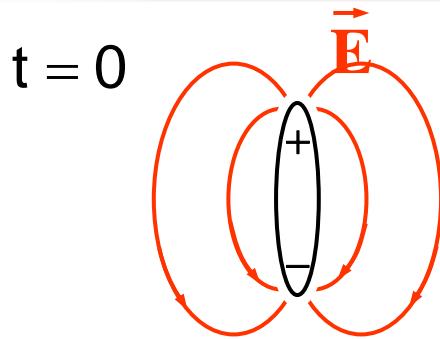


- Verlauf der elektrischen und magnetischen Felder:



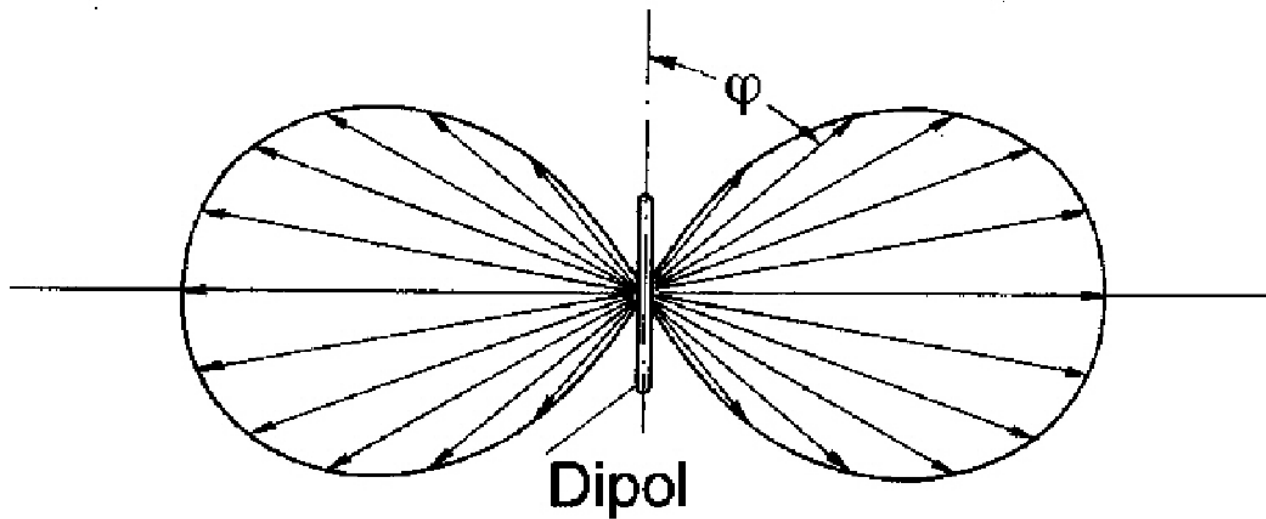
- im Draht fließt ein **Schwingungsstrom**;
zwischen den Drahtenden besteht eine **Schwingungsspannung**

Abstrahlung vom Hertzschen Dipol



- **$t=0$** : einfache Ladungstrennung; Kondensator aufgeladen; reines elektrisches Feld
- **$t=0$ bis $t=T/4$** : Elektronen bewegen sich zur positiv geladenen Seite. Der entsprechende Strom baut ein Magnetfeld auf
- **$t=T/4$** : Ladungsausgleich: elektrisches Feld Null; weiterhin Stromfluss; magnetisches Feld maximal
- **$t=T/4$ bis $T/2$** : Aufladung mit umgekehrter Polarität; elektrisches Feld baut sich auf; Strom und damit Magnetfeld nehmen ab
- **$t=T/2$** : elektrisches Feld umgekehrt wie am Anfang
- zeitlich und räumlich periodische Feldverteilung; jeweils bei $t=T/4, 3T/4$ etc. löst sich das elektrische Feld vom Dipol ab
⇒ **elektromagnetische Welle**

Abstrahlungscharakteristik des Hertzschen Dipols



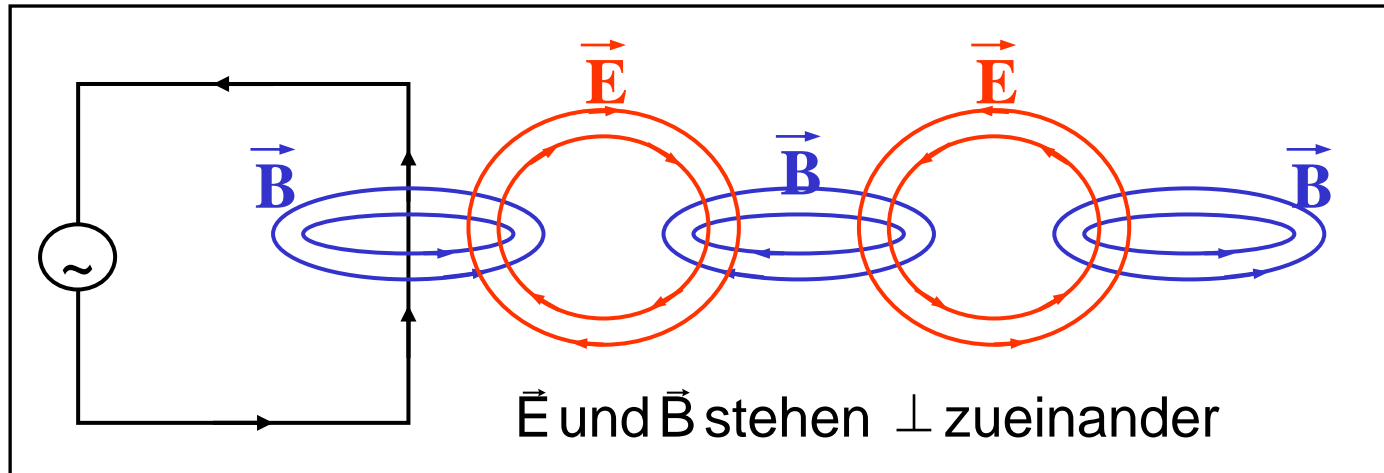
Heinrich Hertz
(1857-1894)

- elektromagnetische Welle transportiert Feldenergie vom Dipol weg. Pfeile bezeichnen die Abstrahlungsrichtung
- Abstrahlungscharakteristik ist rotationssymmetrisch zur Dipolachse
- keine Abstrahlung in Richtung der Dipolachse



Abstrahlung
Hertzscher Dipol

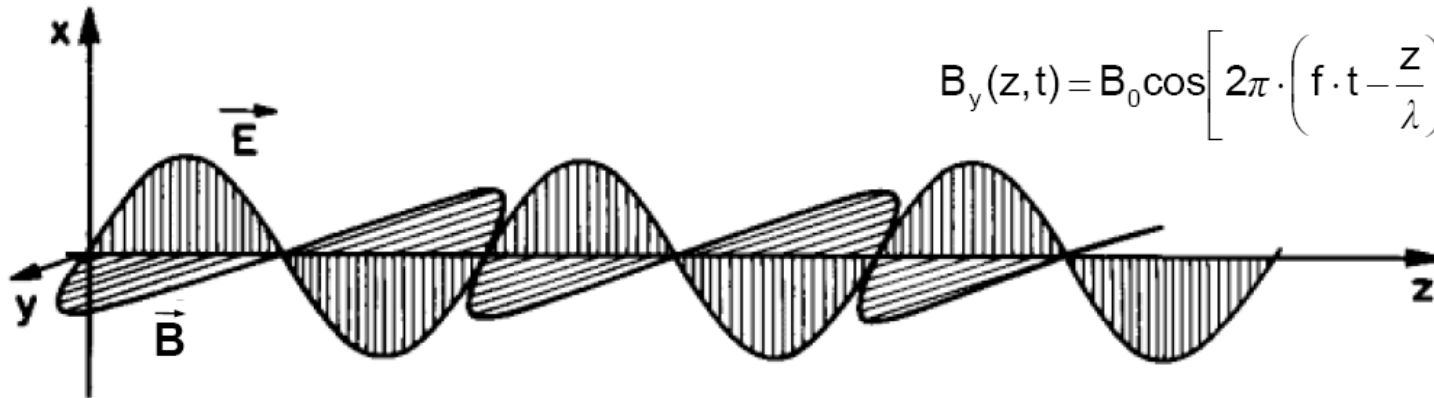
Elektromagnetische Welle (Fernfeld des Dipols)



im Fernfeld:

$$E_x(z,t) = E_0 \cos \left[2\pi \cdot \left(f \cdot t - \frac{z}{\lambda} \right) \right]$$

$$B_y(z,t) = B_0 \cos \left[2\pi \cdot \left(f \cdot t - \frac{z}{\lambda} \right) \right]$$



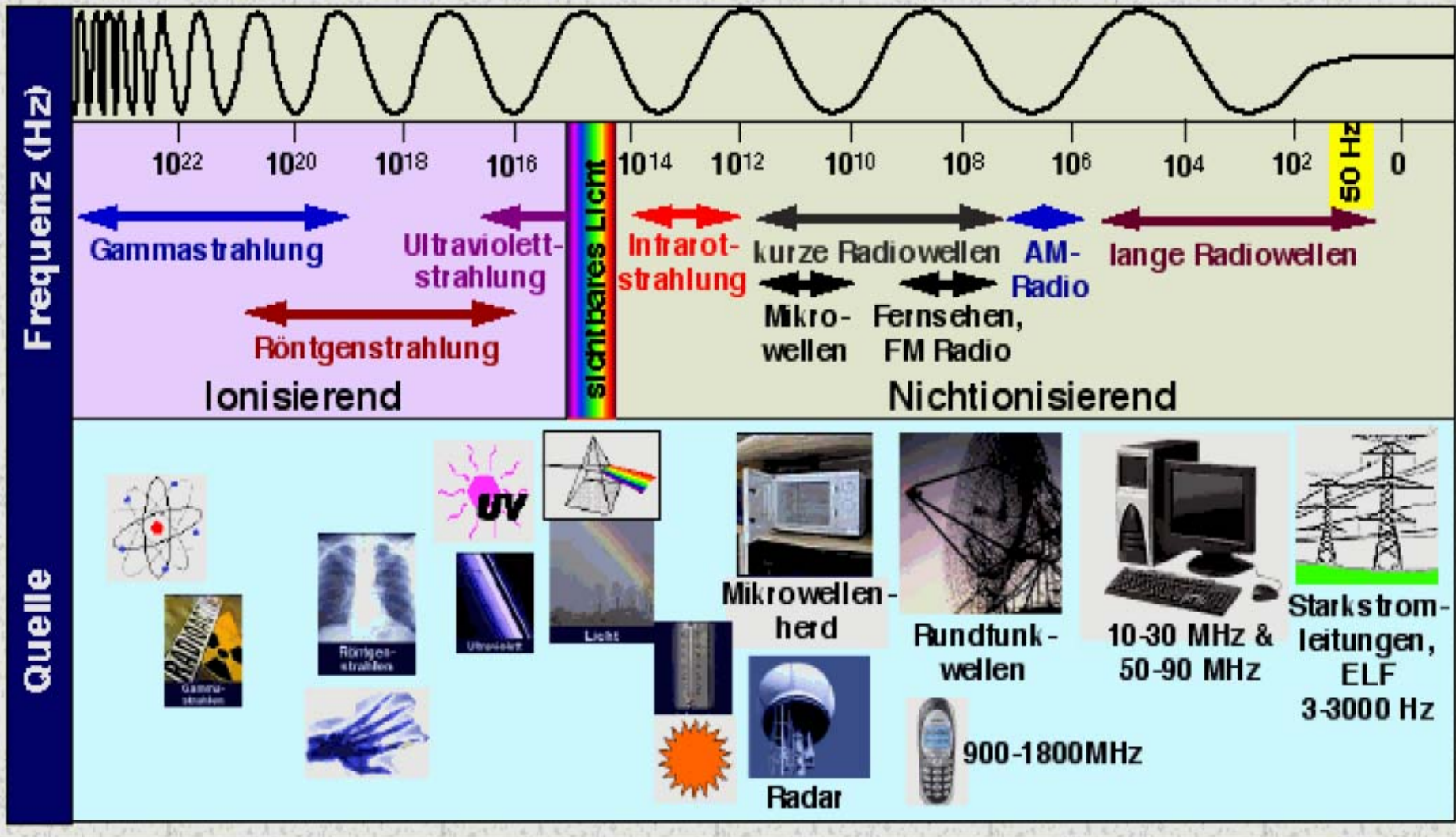
- Ausbreitungsrichtung entlang z-Achse mit Lichtgeschwindigkeit c
- elektrisches und magnetisches Feld schwingen \perp zur Ausbreitungsrichtung
 \Rightarrow **Transversalwellen**

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung

Ausbreitungsgeschwindigkeit = Lichtgeschwindigkeit, im Vakuum: $c = \lambda \cdot f = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

| λ (in m) | f (in Hz) | Art der Wellen | |
|-------------------------------------|-------------------|--|----------------------------------|
| 10^4 | $3 \cdot 10^4$ | Langwellen Mittelwellen Kurzwellen Ultrakurzwellen Dezimeterwellen | elektrotechnisch erzeugte Wellen |
| $10^3 \triangleq 1 \text{ km}$ | $3 \cdot 10^5$ | | |
| 10^2 | $3 \cdot 10^6$ | | |
| 10 | $3 \cdot 10^7$ | | |
| 1 m | $3 \cdot 10^8$ | | |
| $10^{-1} \triangleq 1 \text{ dm}$ | $3 \cdot 10^9$ | Mikrowellen | Licht |
| $10^{-2} \triangleq 1 \text{ cm}$ | $3 \cdot 10^{10}$ | | |
| $10^{-3} \triangleq 1 \text{ mm}$ | $3 \cdot 10^{11}$ | fernes Infrarot | |
| 10^{-4} | $3 \cdot 10^{12}$ | | |
| 10^{-5} | $3 \cdot 10^{13}$ | nahes Infrarot | |
| 10^{-6} | $3 \cdot 10^{14}$ | | |
| $10^{-7} \triangleq 100 \text{ nm}$ | $3 \cdot 10^{15}$ | sichtbares Licht | |
| 10^{-8} | $3 \cdot 10^{16}$ | | |
| $10^{-9} \triangleq 1 \text{ nm}$ | $3 \cdot 10^{17}$ | Ultraviolett | |
| 10^{-10} | $3 \cdot 10^{18}$ | | |
| 10^{-11} | $3 \cdot 10^{19}$ | | |
| $10^{-12} \triangleq 1 \text{ pm}$ | $3 \cdot 10^{20}$ | sehr weiche weiche harte sehr harte | Röntgenstrahlen |
| 10^{-13} | $3 \cdot 10^{21}$ | | |
| | | γ -Strahlung | |

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung

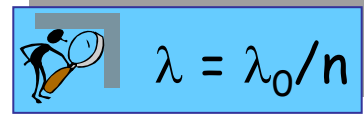


Elektromagnetische Wellen im Medium

• **zwei wesentliche Effekte:**

- **Phasengeschwindigkeit** c im Medium ist kleiner als die Phasengeschwindigkeit c_0 im Vakuum. Die Frequenz im Medium und Vakuum ist gleich: $f = f_0$
die Wellenlänge verkürzt sich: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

im Vakuum: $c_0 = f \cdot \lambda_0$; im Medium: $c = \frac{c_0}{n} = f \cdot \lambda = f \cdot \frac{\lambda_0}{n}$


$$\lambda = \lambda_0 / n$$

n ist der **Brechungsindex**; n hängt vom Medium ab und ist eine Funktion der Wellenlänge: $n = n(\lambda) \Rightarrow$ **Dispersion**

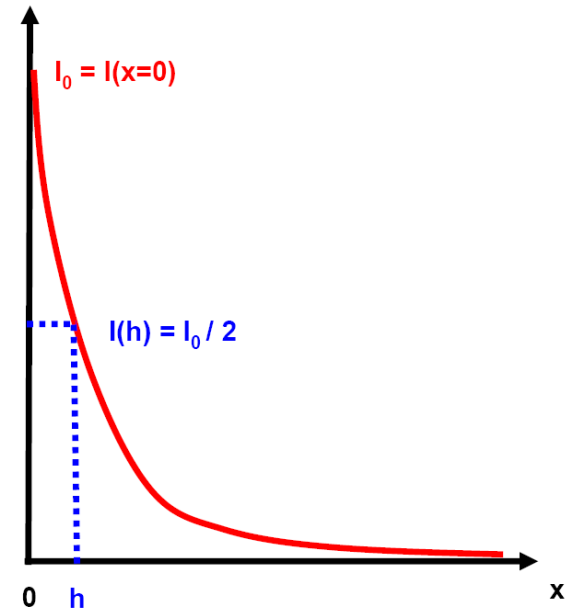
- **Absorption:** elektromagnetische Wellen können vom Medium absorbiert werden

Absorptionsgesetz: $I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$

d.h. Intensität nimmt exponentiell mit der Eindringtiefe x ab.

Absorptionskoeffizient $\mu = \mu(\lambda)$

Halbwertsdicke h ist die Eindringtiefe, bei der die Intensität auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes gesunken ist.

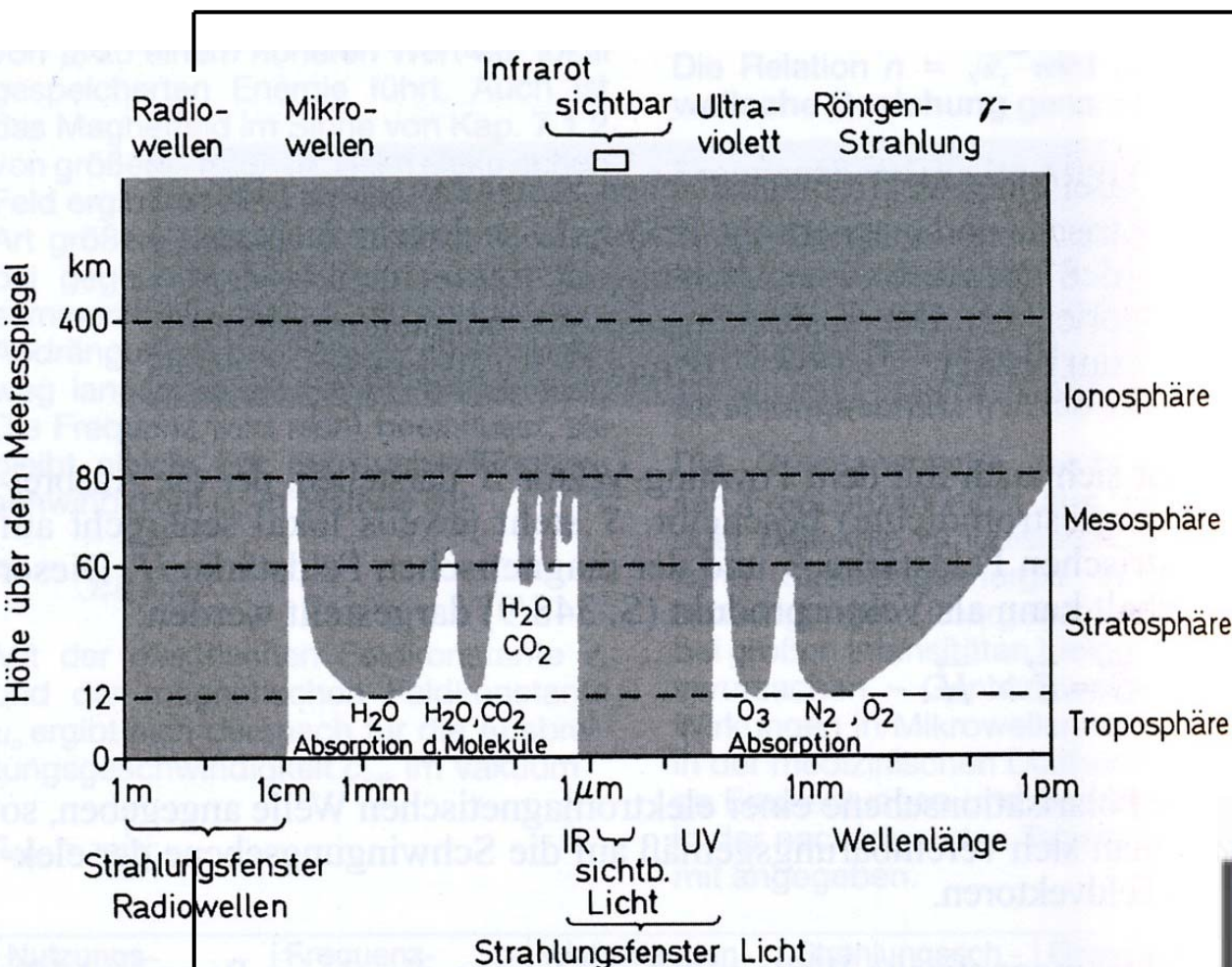


Absorption elektromagnetischer Wellen

Handy: $f \approx 1 \text{ GHz}$; $\lambda \approx 30 \text{ cm}$



Spez. Absorptionsrate (SAR) = 2W/kg



Mikrowelle: $f \approx 1,5 \text{ GHz}$; $\lambda \approx 20 \text{ cm}$



 **Mikrowelle**

Zusammenfassung

- in **Schwingkreisen** wird periodisch elektrische Energie (Kondensator) in magnetische Energie (Spule) umgewandelt
 - Schwingkreise kann man induktiv koppeln (Sender und Empfänger)
 - über das elektromagnetische Feld wird Energie über große Entfernungen auch im Vakuum übertragen
- **Hertzscher Dipol** ist ein offener (aufgebogener) Schwingkreis
 - Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen
- **elektromagnetische Wellen**
(Radiowellen, Mikrowellen, Licht, Röntgenstrahlen, γ -Strahlen)
 - E-Feld und B-Feld stehen \perp zueinander und beide \perp zur Ausbreitungsrichtung (**Transversalwellen**)
 - Energietransport (auch im Vakuum) entlang der Ausbreitungsrichtung erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit c .
- im Medium: **Phasengeschwindigkeit** reduziert auf $c = \frac{c_0}{n}$; **Absorption**