Technische Universität Braunschweig

THz Photonics Group

Grundlagen der Informationstechnik (Wireless)

Die elektromagnetische Welle

Thomas Schneider

Inhalt

Elektromagnetische Wellen

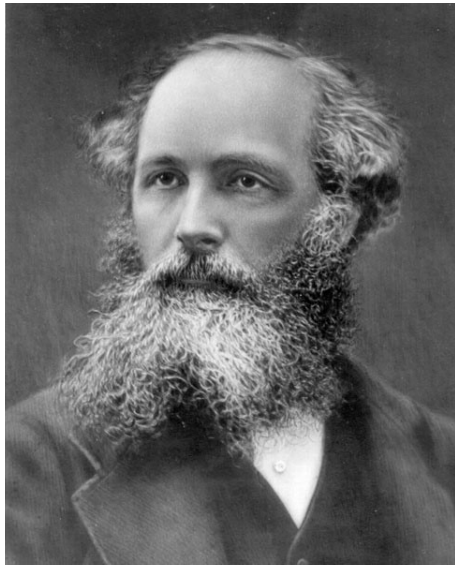
- Die elektromagnetische Welle
- Historie
- Maxwell-Gleichungen
- Polarisation
- Physikalische Größen einer Welle

Elektromagnetische Wellen

- Die elektromagnetische Welle
- Historie
- Maxwell-Gleichungen
- Polarisation
- Physikalische Größen einer Welle

Elektromagnetische Wellen

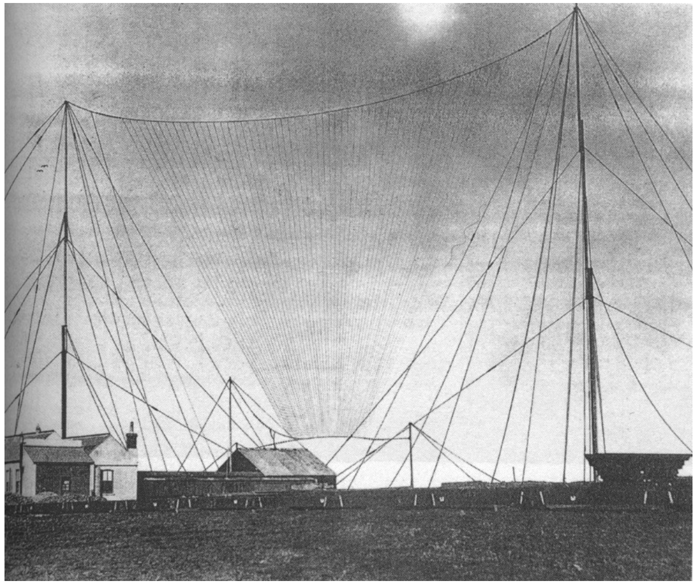
1873 J. C. Maxwell „A Treatise on Electricity and Magnetism“



Bilder: Wikipedia

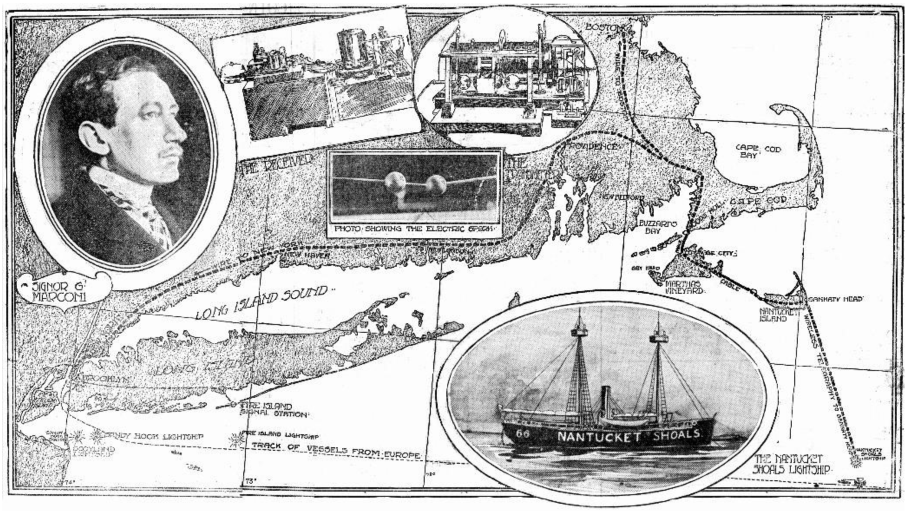
Elektromagnetische Wellen

1896	Guglielmo Marconi	3 km mit Funkeninduktor
1897	Guglielmo Marconi	16km über den Bristol Kanal
1899	Guglielmo Marconi	England - Frankreich
1901	Guglielmo Marconi	Europa - Amerika
1909	Guglielmo Marconi	Physik Nobelpreis

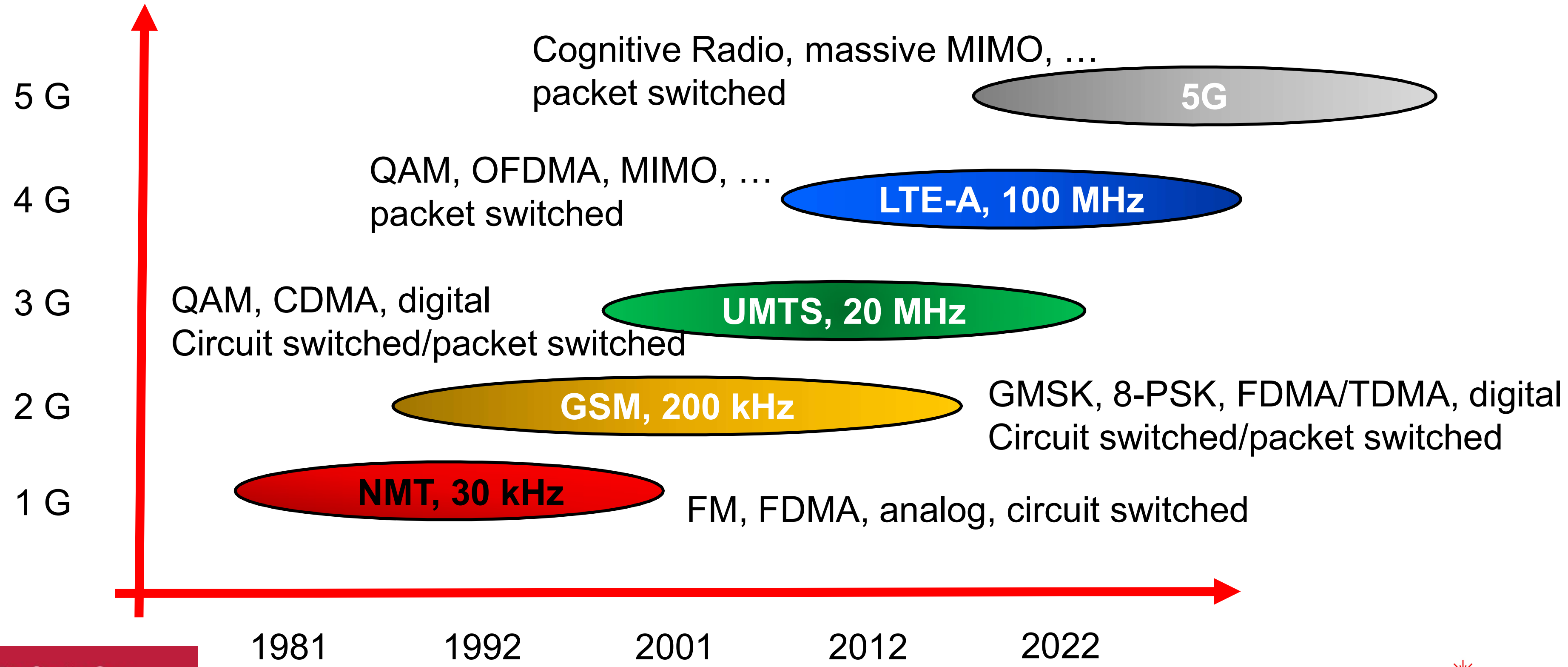


Elektromagnetische Wellen

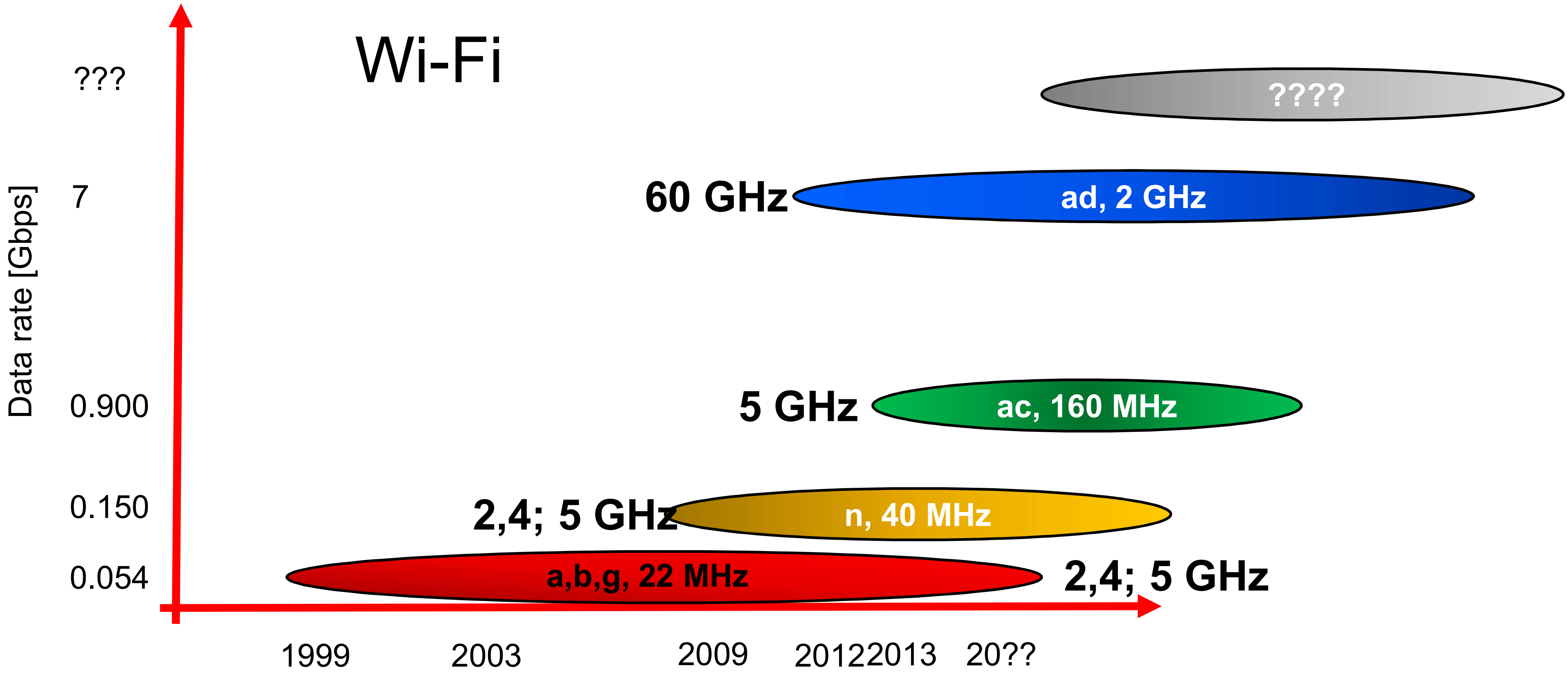
1903	Wilhelm II	Telefunken AG
1921	Marconi	Kurzwelle
1932		Funkverkehr mit Mikrowellen
1934		Fernsehen
1935		Radar



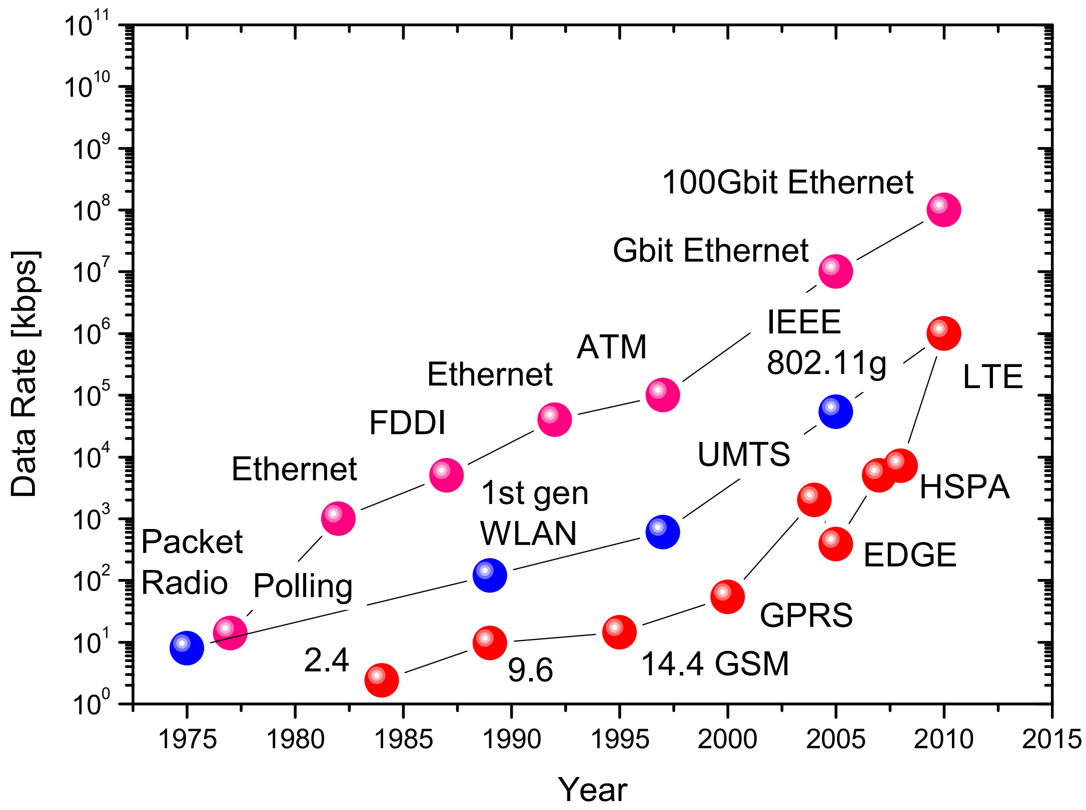
Cellular systems



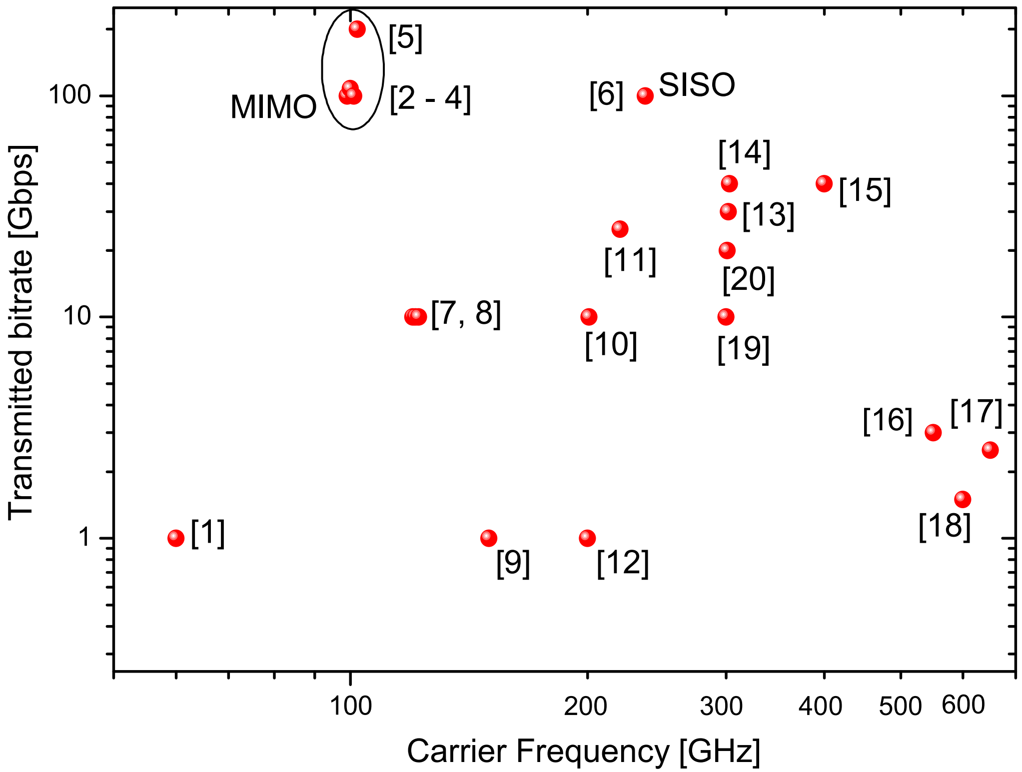
Elektromagnetische Wellen



Elektromagnetische Wellen



Elektromagnetische Wellen



[1] J. Montero-de-Paz, I. et al., JIMTW 34, 251, (2014)
[2] X. Li et al., Opt. Lett. 37, 106 (2012)
[3] X. Pang et al., Opt. Express 19, 24944 (2011)
[4] A. Kanno et al., Opt. Express 20, 29395 (2012)
[5] X. Li et al., Opt. Exp., 21, 18812 (2013)
[6] S. Koenig et al., Nat, Phot. 7, 977 (2013)
[7] M. Inoue et al., IEEE Trans. THz ST, 4, 2 (2014)
[8] A. Hirata et al., IEEE Trans. MTT, 54, 5, (2006)
[9] M. J. Fice et al., Opt. Exp., 20, 1769 (2012)
[10] G. Ducournau et al., Electron. Lett., 50, 5 (2014)
[11] I. Kallfass et al., IEEE Trans. THz ST, 1, 477 (2012)
[12] G. Ducournau et al., Electron. Lett., 46, 19 (2010)
[13] H.-J. Song et al., IEEE Trans. THz ST, 3, 4 (2014)
[14] T. Nagatsuma et al., Opt. Exp. 21, 23736 (2013)
[15] G. Ducournau et al., IEEE Trans. THz ST. 4 (2014)
[16] K. Ishigaki et al., Electron. Lett. 48, 10 (2012)
[17] L. Moeller et al., Electron. Lett. 47, 15 (2011)
[18] G. Ducournau et al., Electron. Lett., 50, 5 (2014)
[19] M. Inoue et al., IEEE Trans. THz ST, 4, 2 (2014)
[20] H.-J. Song et al., Electron. Lett., 48, 953 (2012)

Elektromagnetische Wellen

1840 Guiding of Light Daniel Colladon, Jaques Babinet, Paris

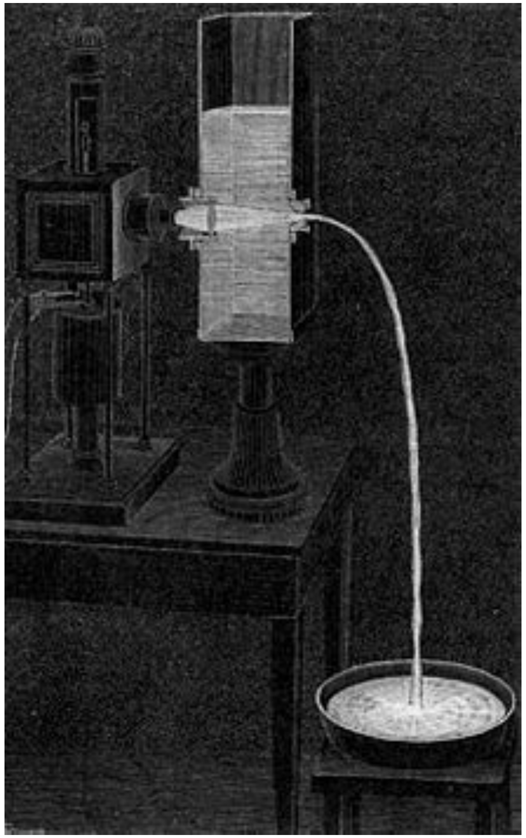
1870 John Tyndall, total internal reflection

1920 fiber cables for close internal Illumination for dentistry

1930 Heinrich Lamm image transmission through a bundle of fibers

1965 Manfred Börner first fiber optic data transmission (Telefunken, Ulm)

1968 NASA used fiber optics in the television camera sent to the moon



Wikipedia.org

Elektromagnetische Wellen

Er studierte in England und schloss mit ausgezeichnetem Erfolg ab. 1965 erhielt er am Imperial College London seinen Ph. D. Danach ging Kao zu den Standard Telecommunication Laboratories von ITT in Harlow (Essex), wo er*Director of Engineering* wurde und an der Optischen Nachrichtenübertragung mittels Infrarot forschte. Dort arbeitete er mit George Hockham auf dem Gebiet der Telekommunikation über Glasfasern, wobei er erstmals Lichtsignale als Daten über einen Leiter aus Glas übertrug. Dabei stellte Kao fest, dass die hohen Informationsverluste nicht durch elektronische Probleme, sondern durch Verunreinigungen in den Glasfasern bedingt sind.[2] Er schlug 1966 Glasfasern als taugliches Übertragungsmedium vor, wenn es möglich sei, die Verluste von 1000 dB/km auf 20 dB/km zu senken. Im Herbst 1970 hatte Corning Glass Works diese Grenze mit 17 dB/km durchbrochen.

Heute beste Fasertypen mit 0.15 dB/km. Allerdings in den letzten 20 Jahren nur Verbesserung von 0.2 auf 0.15 dB/km [Nat. Phot.11,11,678,2017]. Alternative Fasern wie Schwermetall Flouride und hollow core Photonic Crystal fibres haben theoretisch geringere Verluste, aber zur Zeit praktisch immer noch höhere Verluste als Standardfasern und das trotz mehrerer Jahrzehnte der Forschung.

Charles Kuen Kao
(高錕; * 4.November 1933, Shanghai)

Wikipedia.org

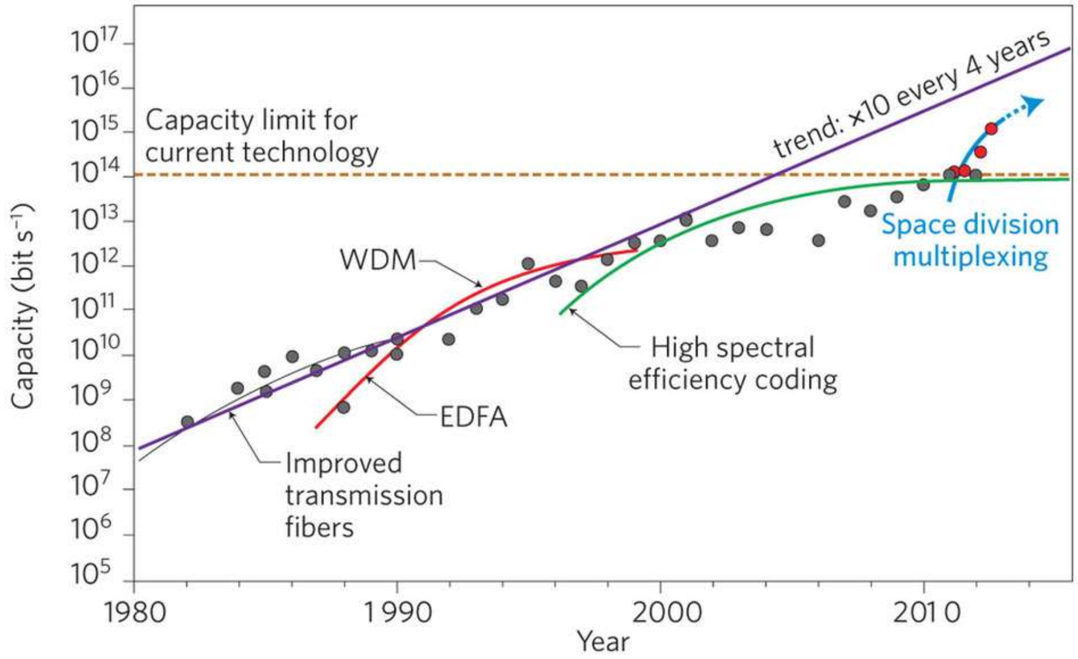
Elektromagnetische Wellen

1965 Charles K. Kao and George A. Hockham promote the idea that the attenuation in silica glass optical fibers can be below 20 dB/km
1970 Corning achieved 17 dB/km
few years later 4 dB/km
1981 General Electric was able to draw fibers with a length of 40 km
1983 Corning can manufacture fibers with 50m/s making them cheaper than copper cables
1977 Turin first metropolitan fiber optic cable
1986 David N. Payne invents the Erbium doped fiber amplifier in Southampton
1991 invention of Photonic Crystal fibers (PCF)
2000 PCF become commercially available
2009 Nobel prize in Physics

Charles Kuen Kao
(高錕; * 4.November 1933, Shanghai)

Wikipedia.org

Elektromagnetische Wellen



Space-division multiplexing in optical fibres

•**D. J. Richardson**, **J. M. Fini** & **L. E. Nelson**

Nature Photonics **7**,354–362(2013)

Elektromagnetische Wellen

- Fast die gesamte Daten- und Informationsübertragung beruht auf elektromagnetischen Wellen.

- Elektromagnetische Wellen bestehen aus einem elektrischen und einem magnetischen Anteil.

Technische Universität Braunschweig

TPG THz Photonics Group

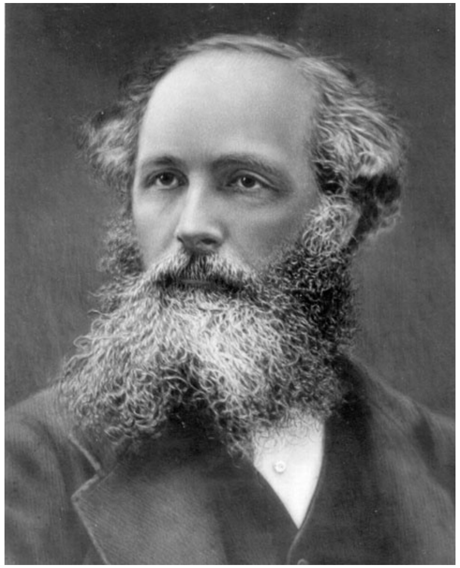
Grundlagen der Informationstechnik (Wireless)

Die elektromagnetische Welle

Thomas Schneider

- Motivation und Einführung
- **Elektromagnetische Wellen**
  - Historie
  - **Die Welle**
  - Polarisation
  - Physikalische Größen einer Welle
- Drahtlose Kommunikation
- Optische Kommunikation
- Silizium Photonik
- Plasmonik

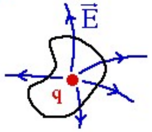
Elektromagnetische Wellen



Maxwell's Equations

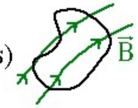
$$\oiint \vec{E} \bullet \hat{n}\, dS = \frac{q}{\varepsilon_o}$$

Gauss's Law



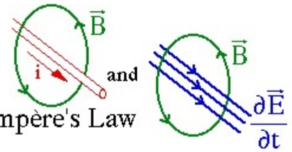
$$\oiint \vec{B} \bullet \hat{n}\, dS = 0$$

(no monopoles)



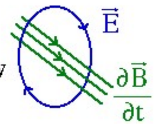
$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{l} = \mu_o \left(i + \varepsilon_o \frac{d}{dt} \Phi_E \right)$$

Ampère's Law



$$\oint \vec{E} \bullet d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \Phi_B$$

Faraday's Law

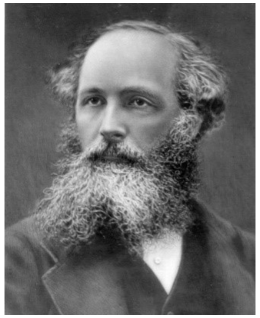


$$\vec{\nabla} \bullet \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_o} \qquad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_o \left(\vec{j} + \varepsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0 \qquad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Differential Forms)

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

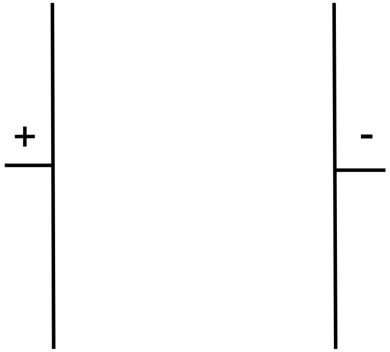


Maxwell-Gleichungen

$$\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \times \vec{B} = rot\vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \qquad \vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E}$$

Vakuum

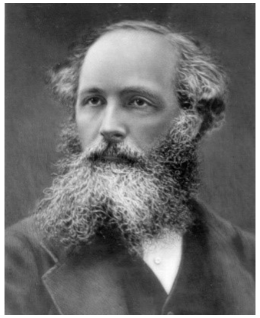
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \times \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$$



Quellenfrei: $\nabla \cdot \vec{E} = div\vec{E} = 0$

frei von Leitungen und Strömen: $\vec{j} = 0$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

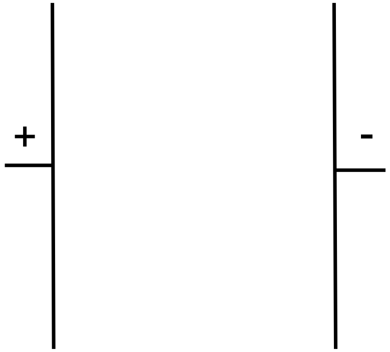


Maxwell-Gleichungen

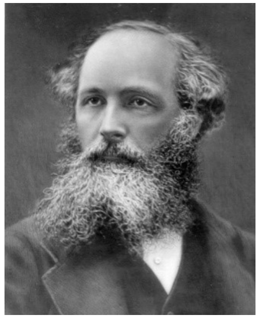
$$\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \times \vec{B} = rot\vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$$

Lösung für ebene, monochromatische Wellen

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \times \vec{B}\right) = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$



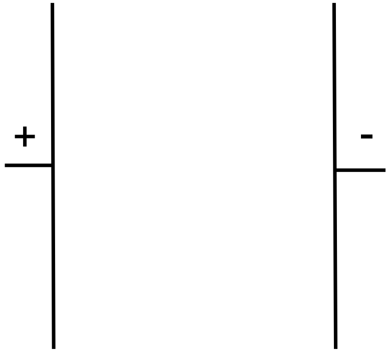
Die elektromagnetische Welle im Vakuum



Maxwell-Gleichungen

$$\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \times \vec{B} = rot\vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$$

Lösung für ebene, monochromatische Wellen



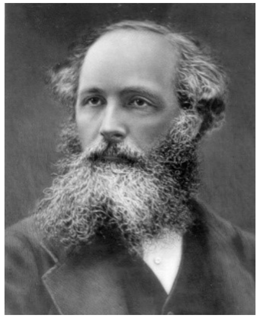
$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \times \vec{B}\right) = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Entwicklungssatz: $\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \mathrm{rotrot}\vec{E} = \mathrm{graddiv}\vec{E} - (\nabla \cdot \nabla)\vec{E}$

$$(\nabla \cdot \nabla) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta$$

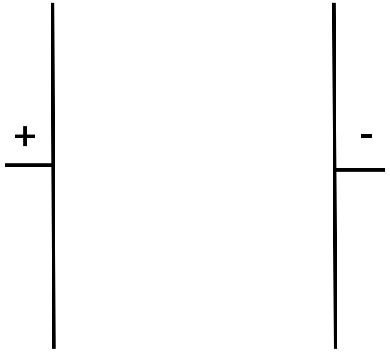
Die elektromagnetische Welle im Vakuum



Maxwell-Gleichungen

$$\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \times \vec{B} = rot\vec{B} = \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \vec{B} = \mu_0\vec{H} \qquad \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}$$

Lösung für ebene, monochromatische Wellen



$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \times \vec{B}\right) = \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

Entwicklungssatz: $\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \mathrm{rotrot}\vec{E} = \mathrm{graddiv}\vec{E} - (\nabla \cdot \nabla)\vec{E}$

$$(\nabla \cdot \nabla) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta$$

$$\boxed{\Delta\vec{E} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Lösung für ebene, monochromatische Wellen

$$\nabla^2\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2\vec{E} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} \end{pmatrix}$$

Vereinfachung: ebene, monochromatische, transversale Welle

$$\frac{\partial\vec{E}}{\partial x} = \frac{\partial\vec{E}}{\partial y} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$$

z.B. $\vec{E}(z,t) = \frac{1}{2}\left(\overrightarrow{E_0}e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = \left|\overrightarrow{E_0}\right| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)$

$$\left|\vec{k}\right| = \frac{\omega}{c} \qquad \omega = 2\pi f \qquad c = \lambda \cdot f$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Wellengleichung→ Helmholtz Gleichung

$$\nabla^2 u - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

Wellengleichung aus Wellenoptik

Helmholtz Gleichung: $(\nabla^2 + k^2)U(\vec{r}) = 0$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Wellengleichung→ Helmholtz Gleichung

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

Wellengleichung aus Wellenoptik

Helmholtz Gleichung: $(\nabla^2 + k^2)U(\vec{r}) = 0$

$$\Delta\vec{E} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0}(z)e^{j\omega t}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Wellengleichung→ Helmholtz Gleichung

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

Wellengleichung aus Wellenoptik

Helmholtz Gleichung: $(\nabla^2 + k^2)U(\vec{r}) = 0$

$$\Delta\vec{E} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0}(z)e^{j\omega}$$

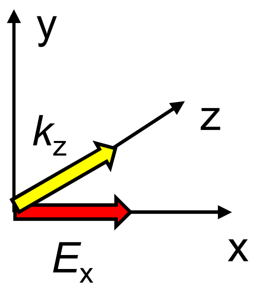
$$\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2\vec{E}(z,t)$$

$$\Delta\vec{E}(z) = -\frac{\omega^2}{c^2}\vec{E}(z) = -k^2\vec{E}(z) \qquad \nabla^2 = \Delta$$

Helmholtz Gleichung: $(\nabla^2 + k^2{}_0)\vec{E}(z) = 0$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil

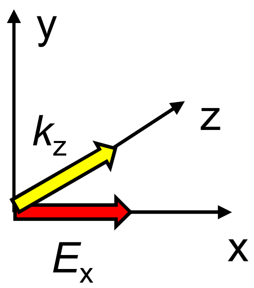


$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

1.Maxwell-Gleichungen $$\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil



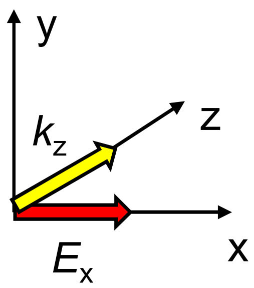
$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

1.Maxwell-Gleichungen $\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil



$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

1.Maxwell-Gleichungen $\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

$$\nabla \times \vec{E} = \left| \begin{array}{ccc|ccc} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z & \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} & \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 & E_x & 0 & 0 \end{array} \right| = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \vec{e}_z + \frac{\partial E_x}{\partial z} \vec{e}_y$$

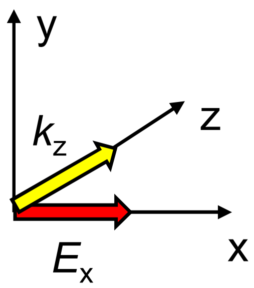
Technische Universität Braunschweig

Institut für Hochfrequenztechnik
Technische Universität Braunschweig

TPG
THz Photonics Group

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil



$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

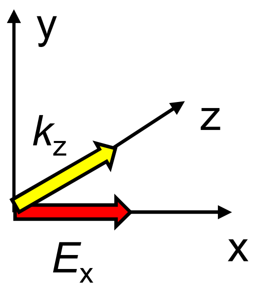
1.Maxwell-Gleichungen $\quad \nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \vec{e}_z + \frac{\partial E_x}{\partial z} \vec{e}_y$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} \vec{e}_y = jk_0 \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_y = jk_0 \vec{E}(z,t) \vec{e}_y = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil



$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

1.Maxwell-Gleichungen $\nabla \times \vec{E} = rot\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \vec{e}_z + \frac{\partial E_x}{\partial z} \vec{e}_y$$

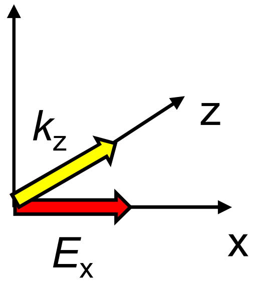
$$\frac{\partial E_x}{\partial z} \vec{e}_y = jk_0 \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_y = jk_0 \vec{E}(z,t) \vec{e}_y = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{B}(z,t) = -jk_0 \int \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} dt \vec{e}_y = \frac{k_0}{\omega} \vec{E}(z,t) \vec{e}_y$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \Rightarrow \frac{k_0}{\omega} = \frac{1}{c}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil



$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{c} \vec{E}(z,t) \vec{e}_y \qquad = (0 \quad B_y \quad 0)$$

$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{c} \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_y$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Der magnetische Anteil

$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega\ )} \vec{e}_x \qquad = (E_x \quad 0 \quad 0)$$

$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{c} \vec{E}(z,t) \vec{e}_y \qquad = (0 \quad B_y \quad 0)$$

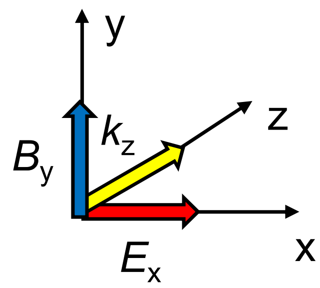
$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{c} \overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} \vec{e}_y$$

$$|\vec{B}| = \frac{1}{c} |\vec{E}|$$

$$\varphi_B = \varphi_E$$

$$\vec{B} \perp \vec{E} \perp \vec{k}$$

$$\boxed{\vec{B} = \frac{1}{c} \left(\vec{E} \times \overrightarrow{k_0} \right)}$$



Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Wellenwiderstand des Freiraums

$$Z_W = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} \qquad |\vec{B}| = \frac{1}{c}|\vec{E}| \qquad |\vec{B}| = \mu_r\mu_0|\vec{H}| \qquad \mu_r = 1 \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

$$\mu_0|\vec{H}| = \sqrt{\varepsilon_0\mu_0}|\vec{E}|$$

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{\mu_0}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377\Omega$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Poynting-Vektor (Energiefluß der e/m Welle)

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad \left|\vec{B}\right| = \mu_r \mu_0 \left|\vec{H}\right| \qquad \mu_r = 1 \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left(\vec{E} \times \vec{B}\right)$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Poynting-Vektor (Energiefluß der e/m Welle)

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad \left|\vec{B}\right| = \mu_r \mu_0 \left|\vec{H}\right| \qquad \mu_r = 1 \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left(\vec{E} \times \vec{B}\right)$$

$$\vec{E}(z,t) = \frac{1}{2}\left(\overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = |E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_x}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Poynting-Vektor (Energiefluß der e/m Welle)

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad \left|\vec{B}\right| = \mu_r \mu_0 \left|\vec{H}\right| \qquad \mu_r = 1 \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left(\vec{E} \times \vec{B}\right)$$

$$\vec{E}(z,t) = \frac{1}{2}\left(\overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = |E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_x}$$

$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{2c}\left(\overrightarrow{B_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = \frac{1}{c}|E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_y}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Poynting-Vektor (Energiefluß der e/m Welle)

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad |\vec{B}| = \mu_r \mu_0 |\vec{H}| \qquad \mu_r = 1 \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left(\vec{E} \times \vec{B}\right)$$

$$\vec{E}(z,t) = \frac{1}{2}\left(\overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = |E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_x}$$

$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{2c}\left(\overrightarrow{B_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = \frac{1}{c}|E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_y}$$

$$\vec{E} \times \vec{B} = \left|\begin{matrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ E_x & 0 & 0 \\ 0 & B_y & 0 \end{matrix}\right| \begin{matrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y \\ E_x & 0 \\ 0 & B_y \end{matrix} = E_x B_y \vec{e}_z \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0 c}|E_0|^2 cos^2(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_z}$$

Die elektromagnetische Welle im Vakuum

Poynting-Vektor (Energiefluß der e/m Welle)

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad |\vec{B}| = \mu_r \mu_0 |\vec{H}| \qquad \mu_r = 1 \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0}(\vec{E} \times \vec{B})$$

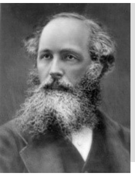
$$\vec{E}(z,t) = \frac{1}{2}\left(\overrightarrow{E_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = |E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_x}$$

$$\vec{B}(z,t) = \frac{1}{2c}\left(\overrightarrow{B_0} e^{j(k_0 z - \omega t)} + c.c.\right) = \frac{1}{c}|E_0| cos(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_y}$$

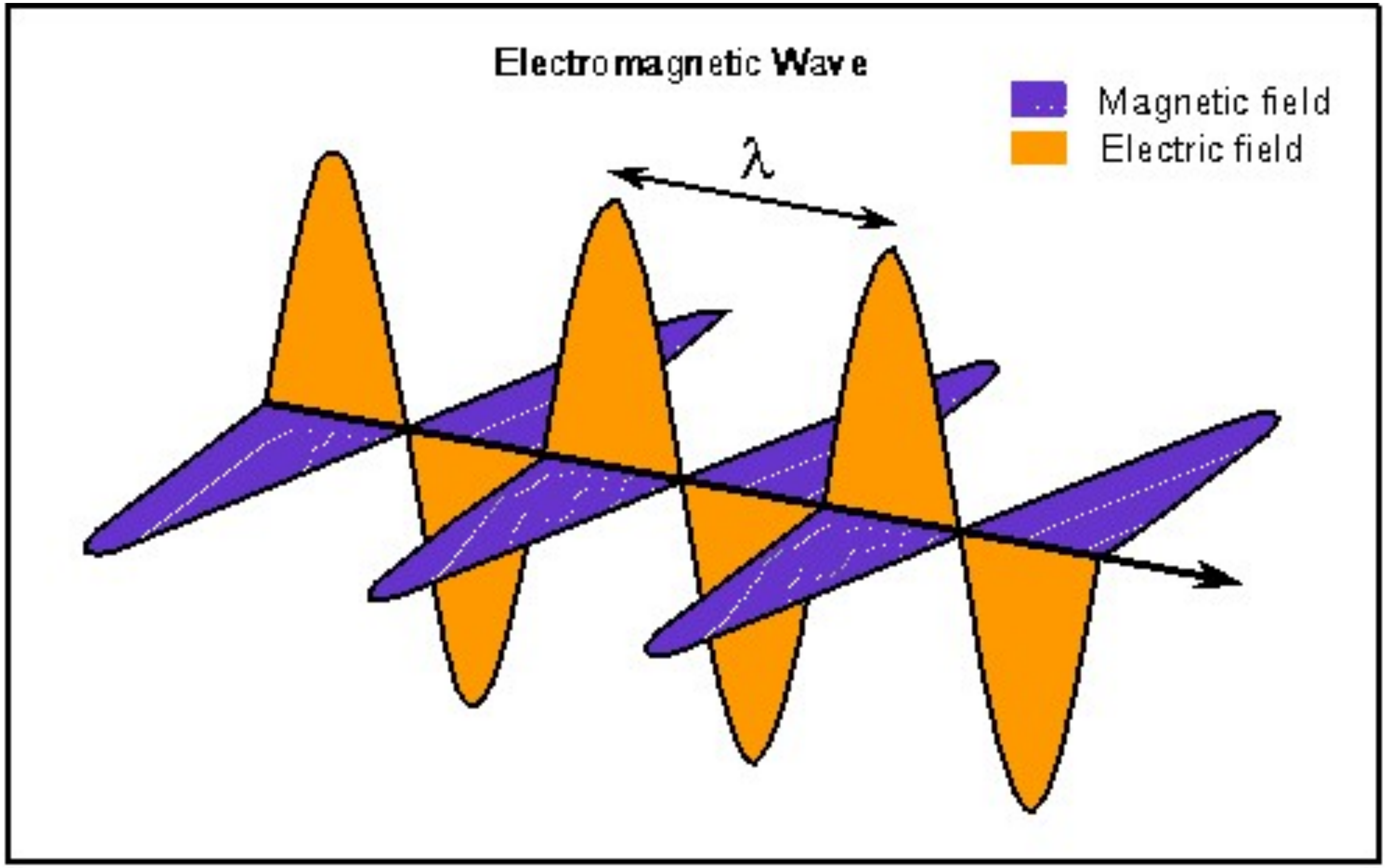
$$\vec{E} \times \vec{B} = \left|\begin{matrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ E_x & 0 & 0 \\ 0 & B_y & 0 \end{matrix}\right| \begin{matrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y \\ E_x & 0 \\ 0 & B_y \end{matrix} = E_x B_y \vec{e}_z \qquad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0 c}|E_0|^2 cos^2(k_0 z - \omega t + \varphi_0)\overrightarrow{e_z}$$

$$\overline{cos^2(x)} = \frac{1}{2} \qquad \vec{S} = \frac{1}{2\mu_0 c}|E_0|^2 \overrightarrow{e_z}$$

Intensität: $I = |\vec{S}| = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c |E_0|^2$



Die elektromagnetische Welle im Vakuum



Zusammenhang $\vec{B} = \frac{1}{c}\left(\vec{E} \times \vec{k}\right)$

$c = \lambda \cdot f$

Wellen-widerstand $Z_0 = \frac{\vec{E}}{\vec{H}}$

Energiefluss Poynting Vektor $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$

Energie des Photons $\mathrm{E} = hf = \hbar\omega$

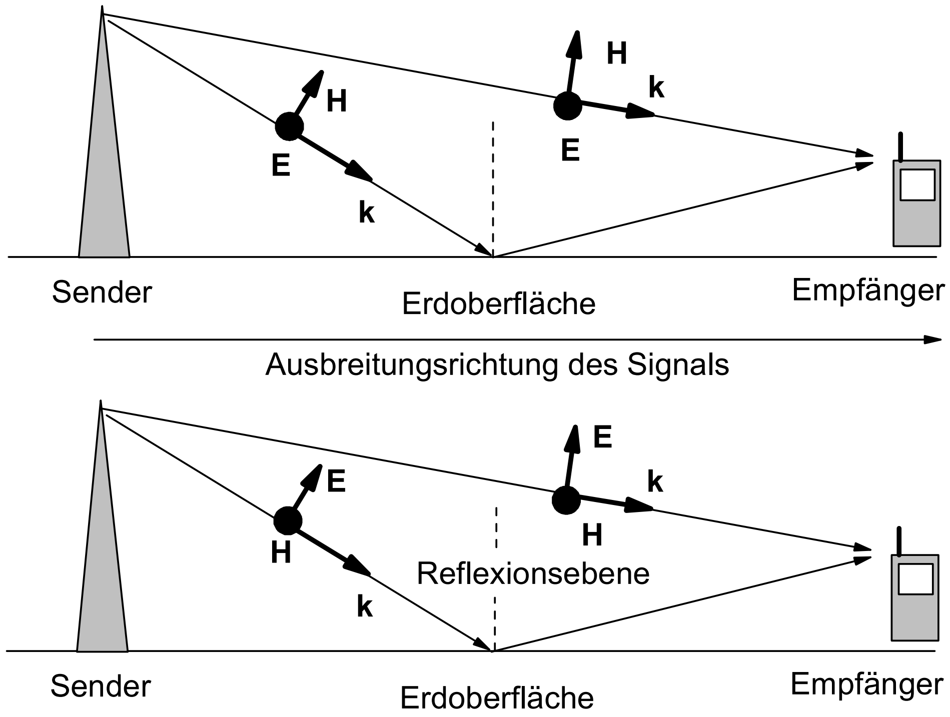
Impuls des Photons $\vec{p} = \hbar k$

Intensität

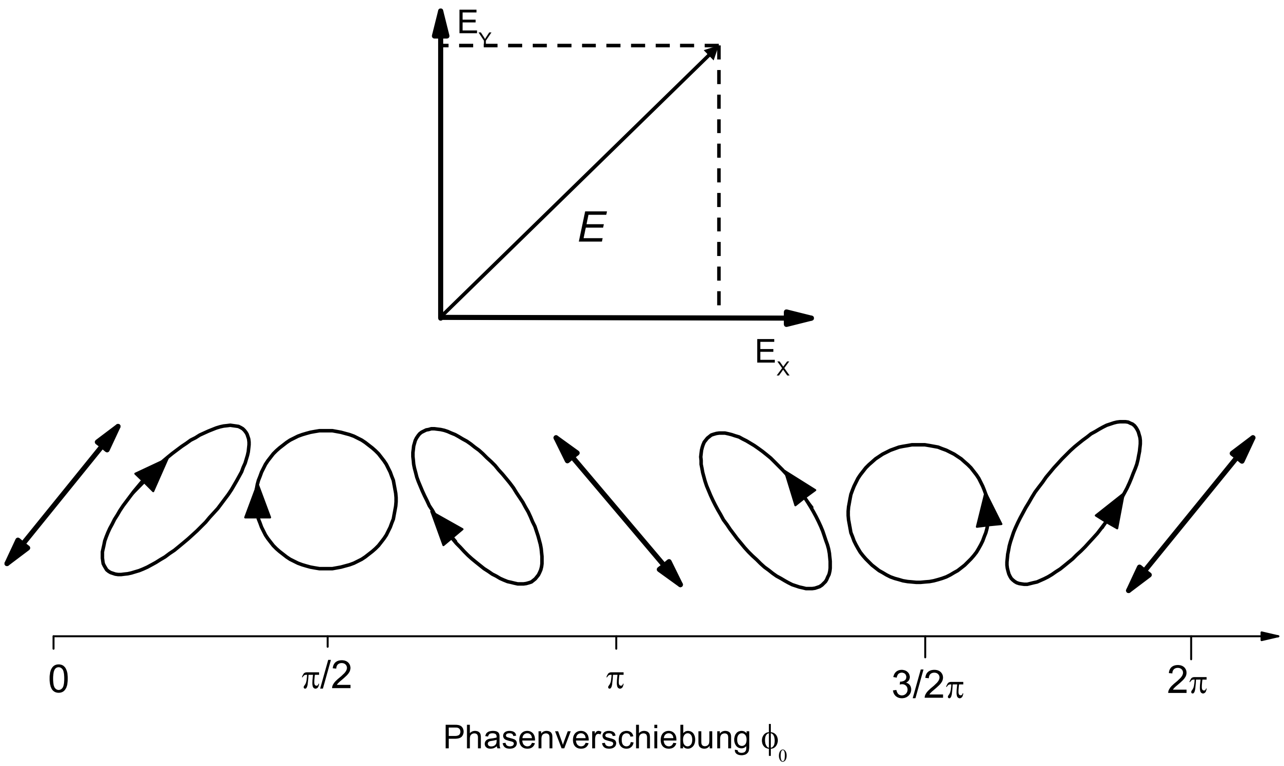
$$I = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 \left|\vec{E_0}\right|^2 = \frac{P}{A} = \frac{nhf}{\Delta t \Delta A} = \frac{n\mathrm{E}}{\Delta t \Delta A}$$

- Motivation und Einführung
- **Elektromagnetische Wellen**
  - Historie
  - Die Welle
  - **Polarisation**
  - Physikalische Größen einer Welle
- Drahtlose Kommunikation
- Optische Kommunikation
- Silizium Photonik
- Plasmonik

Elektromagnetische Wellen



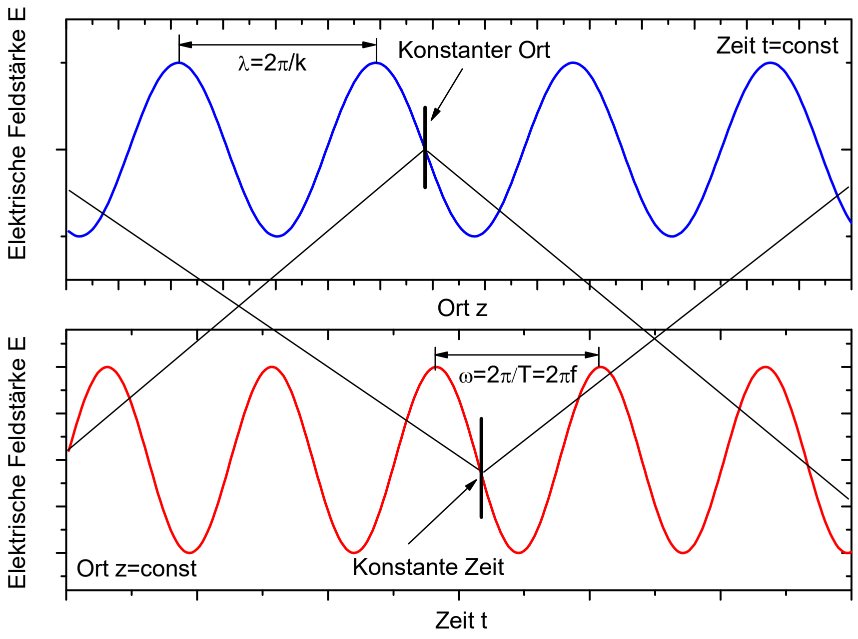
Elektromagnetische Wellen

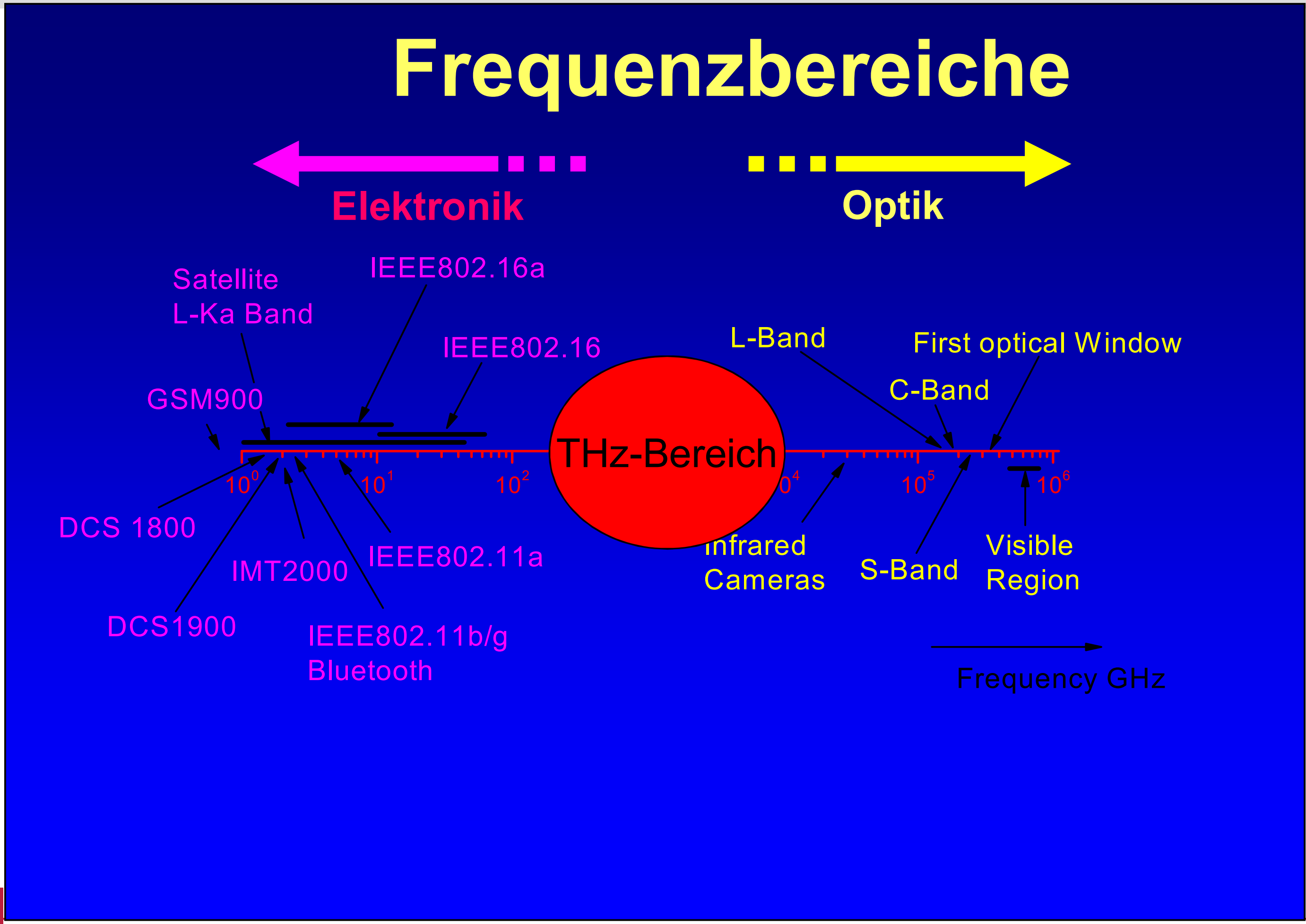


Elektromagnetische Wellen

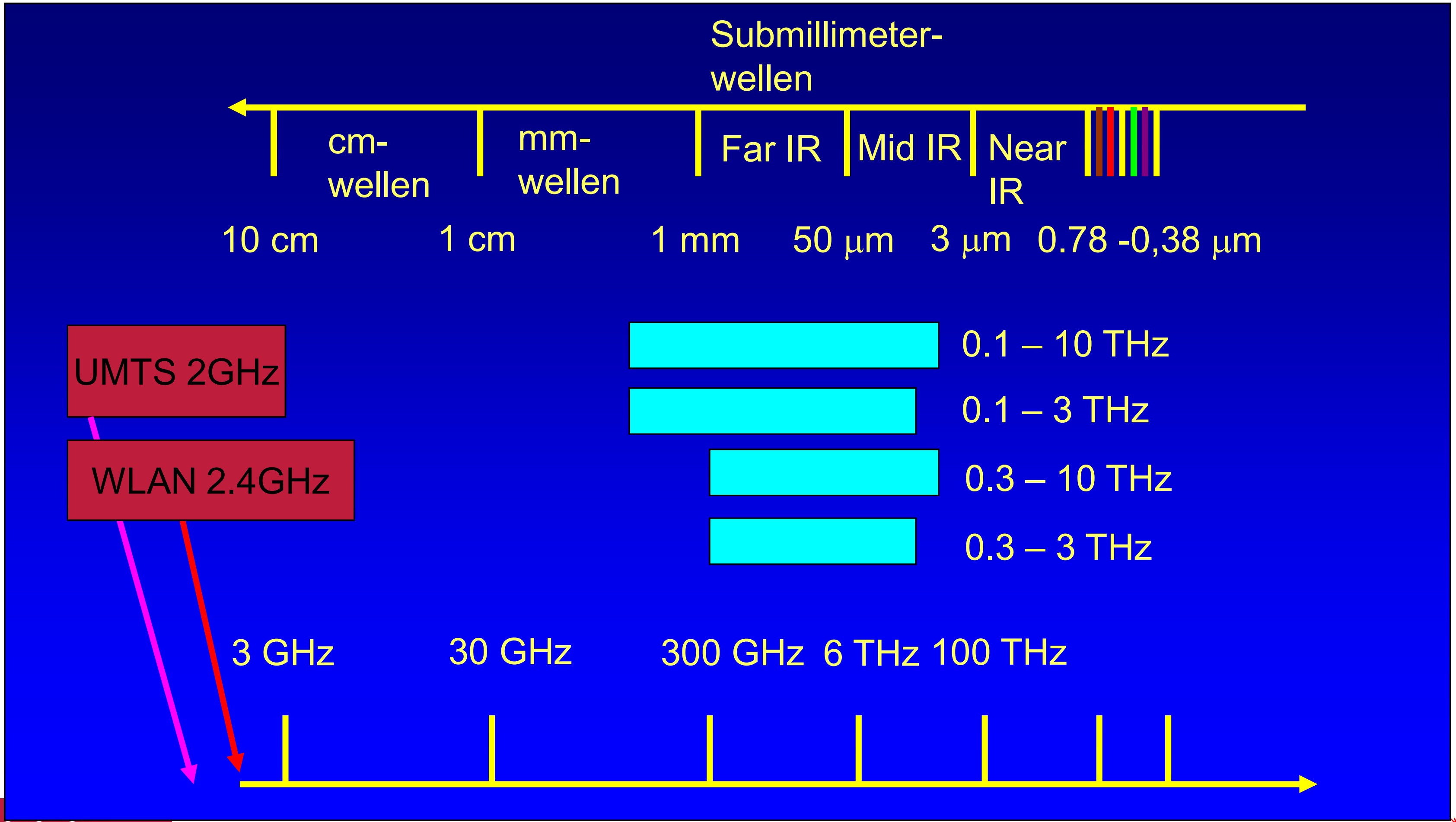
Frequenz: $$f = c / T$$

Wellenlänge: $$c = \lambda \times f$$

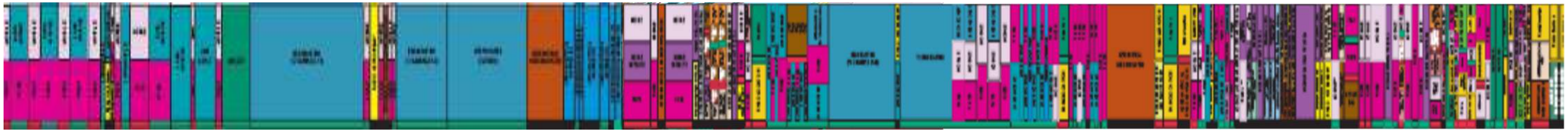



Frequenzbereiche
Elektronik
Optik
Satellite
L-Ka Band
IEEE802.16a
IEEE802.16
GSM900
L-Band
First optical Window
C-Band
THz-Bereich
DCS 1800
IMT2000
IEEE802.11a
DCS1900
IEEE802.11b/g
Bluetooth
Infrared
Cameras
S-Band
Visible
Region
Frequency GHz

Elektromagnetische Wellen



Elektromagnetische Wellen

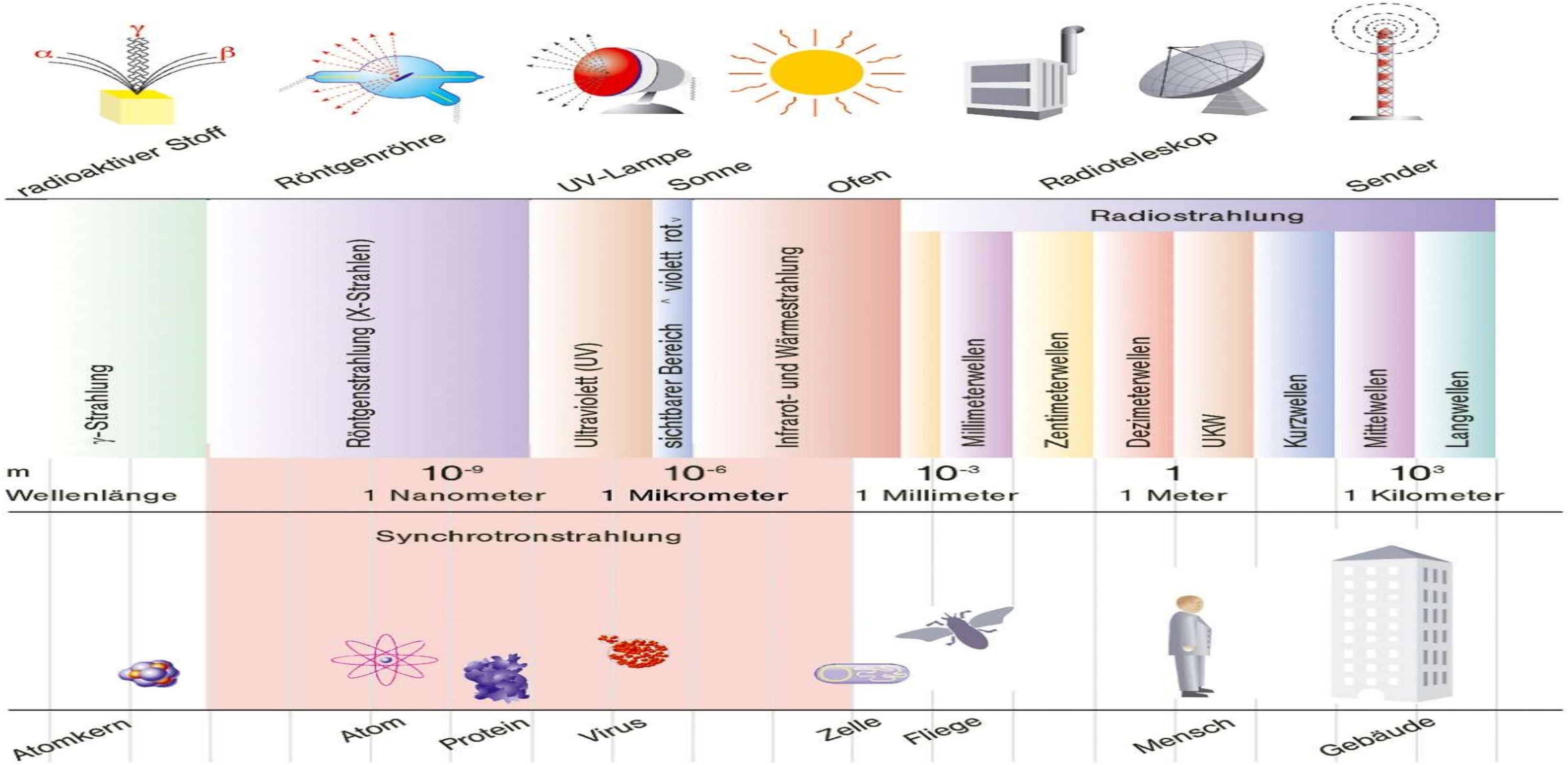


30 MHz 3 GHz

3 GHz 300 GHz

http://www.ntia.gov/osmhome/allochrt.pdf

Elektromagnetische Wellen



Elektromagnetische Wellen

- Der Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern wird durch die Maxwell Gleichungen beschrieben.
- Ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld ruft ein sich zeitlich änderndes magnetisches Feld hervor und umgekehrt.
- Für die Beschreibung der physikalischen Verhältnisse der Wellenausbreitung in Funksystemen ist in den allermeisten Fällen die Vakuumwellengleichung ausreichend.
- Im Vakuum, weit entfernt von der Ursache der Wellen, schwingen elektrisches und magnetisches Feld in Phase. Der elektrische Feldvektor steht senkrecht auf dem magnetischen und beide zusammen stehen senkrecht auf dem Wellenzahlvektor der die Ausbreitungsrichtung der Wellen bestimmt.
- Der Betrag des magnetischen Feldes ist im Vakuum um die Lichtgeschwindigkeit ($\approx 3\times10^8$ m/s) kleiner als der Betrag des elektrischen Feldes.

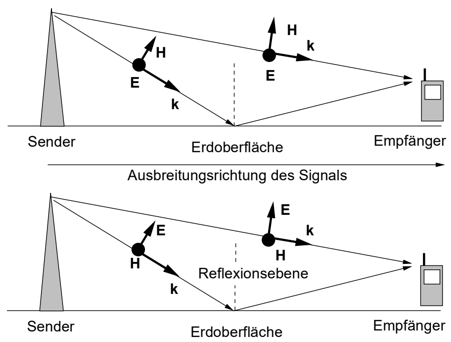
$$\vec{B} = 1/c\left(\vec{E}\times\vec{k}\right)$$

Elektromagnetische Wellen

- Die Polarisation einer elektromagnetischen Welle ist als die Richtung des elektrischen Feldvektors definiert.

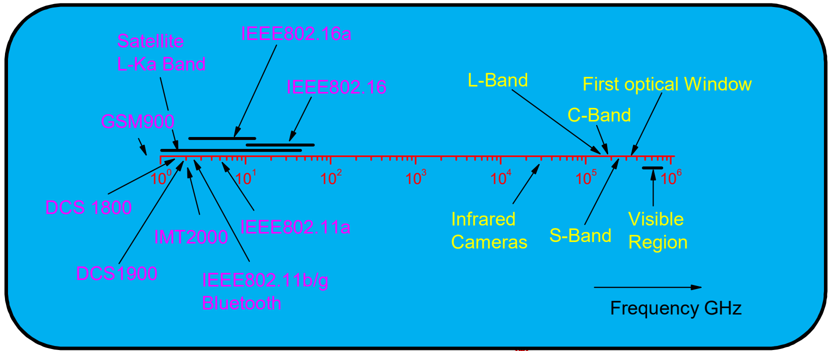
- Bleibt die Richtung des elektrischen Feldstärkevektors während der ganzen Zeit der Ausbreitung der Welle erhalten, so spricht man von linear polarisierten Wellen. Je nach Bezugssystem unterscheidet man linear polarisierte Wellen in horizontal-vertikal, s-p, TE-TM und H-E Wellen.

- Dreht sich der elektrische Feldvektor während der Ausbreitung der Welle um deren Ausbreitungsrichtung und bleibt sein Betrag konstant spricht man von zirkular polarisierten Wellen. Ändert sich der Betrag während der Drehung handelt es sich um elliptisch polarisierte Wellen.



Elektromagnetische Wellen

- Die Frequenz ist der reziproke Wert einer vollständigen Schwingungsdauer des Feldes.
- Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional zur Frequenz im Vakuum.
- Der Proportionalitätsfaktor ist die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit.
- Der Poynting Vektor bestimmt die Richtung des Energieflusses der elektro-magnetischen Welle.
- Die Intensität des Feldes ist der Betrag des Poynting Vektors, sie bestimmt welche Leistung durch eine Flächeneinheit tritt.
- Der Wellenwiderstand des Freiraums ist das Verhältnis zwischen den Beträgen des elektrischen und magnetischen Feldes, er ist eine Konstante mit einem Wert von ≈377 Ω.



Elektromagnetische Wellen

- Die Frequenz ist der reziproke Wert einer vollständigen Schwingungsdauer des Feldes.
- Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional zur Frequenz im Vakuum.
- Der Proportionalitätsfaktor ist die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit.
- Der Poynting Vektor bestimmt die Richtung des Energieflusses der elektromagnetischen Welle.
- Die Intensität des Feldes ist der Betrag des Poynting Vektors, sie bestimmt welche Leistung durch eine Flächeneinheit tritt.
- Der Wellenwiderstand des Freiraums ist das Verhältnis zwischen den Beträgen des elektrischen und magnetischen Feldes, er ist eine Konstante mit einem Wert von ≈377 Ω.