

## 1 2.1 Ladungskontinuität

Maxwell ergänzt in der letzten Maxwellschen Gleichung die Summe der Leitungsströme mit der Änderung der Verschiebungsstromdichte.

$$\nabla \cdot (\nabla \times H) = \nabla \cdot \nabla \cdot \left( \frac{dD}{dt} \right) = \nabla \cdot S + d(\nabla \cdot D)/dt = \nabla \cdot S + d\rho/dt$$

## 2 2.2.1 Hilfsgleichung

Problem: 8 Maxwellgleichungen für 12 unbekannte, daher werden Hilfsgleichungen benötigt

el. und mag. Flussdichtegleichungen gelten in isotropen Medien (linear homogen?)

Rohace  $\nabla \cdot (\nabla \times H) = \nabla \cdot (S + dD/dt) \nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \nabla \cdot D = \rho$  (effektive Ladungsfreiheit bei  $f \ll 10^{18} \text{ Hz}$ , bei diesen Wellenlängen ist  $\lambda$  klein als der Atomradius, daher  $\rho = 0$ )  
 aus 1 und 3:  $0 = \nabla \cdot S + d\rho/dt$  folgt  $\sigma \nabla \cdot E + d\rho/dt = 0$   
 $\sigma \rho_0 / \epsilon = d\rho/dt = 0$   
 $\rho_0(x, y, z, t), (x, y, z) \in \mathbb{R}^3, t \in [0, \infty)$   
 $\rho_0(x, y, z) \cdot e^{-(t/\tau_D)} S = \sigma E D = \epsilon E$

$\sigma / \epsilon \rho_0(x, y, z) e^{-(t/\tau_D)} + \rho_0(x, y, z) (-1/\tau_D) e^{-(t/\tau_D)} = 0$   
 $\sigma / \epsilon = 1/\tau_D, \tau_D = \epsilon / \sigma$   
 allgemeine Lösung = homogen + partikulär  
 $\rho_0(x, y, z) = \rho_0(x, y, z) \cdot e^{-(t/\tau_D)} + \text{partikuläre Lösung}$   
 $\int_{\mathbb{R}^3} (\rho_0(x, y, z) e^{-t/\tau_D}) dx dy dz = e^{-(t/\tau_D)} Q(t) = e^{-(t/\tau_D)} \cdot Q_0$   
 Anfangsladungsverteilung  $Q_0 = \int_{\text{rect}} \rho_0(t) - \text{rect}_0(t)$

$\tau_D$  von Kupfer =  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} / 60 \cdot 10^6 \text{ S/m} = 10^{-18} \text{ s}$

$H(x, y, z, t) = \text{Re} \{ H(x, y, z) e^{j\omega t} \}$  ... Notiz: Spitzenwertzeiger  $\hat{H}$

$\nabla \times \hat{H} = \hat{S} + j\omega \hat{D} = \sigma \hat{E} + j\omega \epsilon \hat{E} = (\sigma + j\omega \epsilon) \hat{E} = j\omega \epsilon (1 + \sigma/j\omega \epsilon) \hat{E} = j\omega \epsilon (1 - j\sigma/\omega \epsilon) \hat{E}$   
 $\nabla \times \hat{H} = j\omega \epsilon \hat{E} \dots \Delta = \epsilon \text{ effektive Permittivität}$   
 $\nabla \times \hat{H} = -j\omega \hat{B} \nabla \cdot \hat{D} = -j\omega \hat{B} \nabla \cdot \hat{B} = 0$

## 3 Poyntingscher Satz

gleichungen mit H und E multiplizieren

Gleichungen subtrahieren Den Term  $\nabla \cdot (E \times H)$  mittels Produktregel + Spatproduktumformung auf  $H(\nabla \cdot E) - E(\nabla \cdot H)$  weiter Produktregel an E und H anwenden  $(x \cdot dx/dt = \text{betrag}^2/2)$

$\nabla \cdot (E \times H) + \sigma \text{betrag} E^2 = -d/dt (\epsilon \text{betrag} E^2 / 2 + \text{betrag}(H)^2 / 2)$  Abstrahlung + Heizung = elektromagnetische

Die dielektrischen Verluste wachsen direkt proportional zur Frequenz.

$E(x, y, z, t) = \text{Re} \{ E(x, y, z, t) e^{j\omega t} \}$   
 $H(x, y, z, t) = 1/2 (\hat{H}(x, y, z, t) e^{j\omega t} + \hat{H}^*(x, y, z, t) e^{-j\omega t})$   
 $E(x, y, z, t) = 1/2 (\hat{E}(x, y, z, t) e^{j\omega t} + \hat{E}^*(x, y, z, t) e^{-j\omega t})$   
 $\text{Re} \{ 1/2 \hat{E} \hat{H}^* + 1/2 \hat{E}^* \hat{H} \} + \dots$

komplexer Poyntingvektor  $\hat{T} = 1/2 \hat{E} \hat{H}^* = \hat{T}_w + j\hat{T}_b$

## 4 tägliche Trivia

Quellen und Wellen hängen irgendwie zusammen, Antennen sind gerne mal Quellen. Der Begriff der Antenne kommt aus dem italienischen Wort für Zelt-

stange. Der Dipol ist die elementare Antenne. Merksatz: Die niedrigste Strahlungsordnung ist die Dipolstrahlung. Eine Druckwelle einer Explosion ist eine Monopolstrahlung, die Erbebenwelle ist eine Dipol- oder sogar Quadropolwelle. Die Kräfte einer Explosion gehen radial weg, während im Zentrum eines Erbebens Platten mit entgegengesetzten Kräften aneinander reiben. Dinge des Tages: -) Gerade Einzeldrahtantenne mit induktiver Kopplung in der Mitte. Die Kopplung teilt die Antenne in zwei Teile für kurz- und langwellige Signale. Skizze:  $\lambda = 70\text{cm}$   $\lambda = 100\text{cm}$

-) Koaxkabel -) Wifi-Antenne: Diese haben "gespiegelte" Stecker, damit normale Koaxantennen nicht in einen Router passen. Mehr dazu in Kapitel 11

Also, was war nochmal eine Antenne? Wandler zwischen raumbegrenzten und leitungsgebundenen Wellen.

## 5 2.4 Randbedingungen

Wiederholung: Faraday'sches Gesetz

## 6 2.1 Grenzflächen zwischen Dielektrika

Beispiel: Oberflächenintegral über kleines Rechteck an Grenzfläche.  $\Delta l$  ist größer als  $\Delta x$ , aber kurz genug, damit  $E_t$  tangential an den beiden kurzen Kanten konstant bleibt. siehe Resultat

Ähnliche infinitesimale Methode für die Divergenzgleichungen. Die elektrischen Flächenladungen, die in den Ergebnissen auftreten, spielen in dieser Vorlesung keine Rolle und daher gibt es auch keine Beispiele dazu. Die Flächenstromdichte spielt sehr wohl eine Rolle (Skinneffekt).

Sommerfeldsche Ausstrahlungsbedingung: Wellen verschwinden in der Unendlichkeit (Mathematische Formulierung wird erstmal nicht durchgeführt)

## 7 2.5 Lösung der Wellengleichung in kartesischen Koordinaten

Sei angemerkt: unter hinreichenden Bedingungen gilt der Satz von Schwarz.

$$\begin{aligned} \nabla_x H &= \sigma E + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} E \quad \nabla_x (\nabla_x H) = \sigma (\nabla_x E) + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla_x E) \\ \Delta H &= -\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \end{aligned}$$

Telegraphengleichung für  $H, B, E, D$  in dieser Form wird hauptsächlich benutzt.  $\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial H}{\partial t} - \Delta H = 0$  Helmholtzgleichung

HÜ: Empfehlung: Das gleiche für  $E$  wiederholen. Nächste Woche Di: Separationsansatz (sollte man aus Mathe noch kennen)

17.10.2023

## 8 2.5.1 Lösungsansätze

Methode 1:  $E = -\nabla \psi$  Methode 2: Reines Wirbelfeld  $E$  bzw.  $H = \nabla \times (a \psi) = -a \nabla \psi$  Durch Wiederholung:  $\nabla \times (\nabla \times (a \psi))$  Mitgehend Wiederholungen kann die Elektrodynamik gelöst werden

Methode 3: Ansatz mittels elektrodynamischer Potentiale Ansatz mittels Vektorpotential

## 9 2.5.2 Separationsansatz

zu lösen:  $\text{pard}^2 \psi / \text{pard} x^2 \text{pard}^2 \psi / \text{pard} y^2 + \text{pard}^2 \psi / \text{pard} z^2 + w^2 \text{sigma} \psi = 0$   
 $\psi(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z) \text{pard}^2 \psi / \text{pard} x^2 Y Z \cdot X \text{pard}^2 \psi / \text{pard} y^2 \cdot Z + X Y \text{pard}^2 \psi / \text{pard} z^2 + w^2 \text{sigma} \psi \cdot X Y Z = 0$   
 $1/X(x) \cdot \text{pard}^2 \psi / \text{pard} x^2 + 1/Y(y) \cdot \text{pard}^2 \psi / \text{pard} y^2 + 1/Z(z) \cdot \text{pard}^2 \psi / \text{pard} z^2 + w^2 \text{sigma} = 0$   
 aufgrund der konstanten Terms folgt:  
 $1/X(x) \cdot \text{pard}^2 \psi / \text{pard} x^2 + 1/Y(y) \cdot \text{pard}^2 \psi / \text{pard} y^2 + 1/Z(z) \cdot \text{pard}^2 \psi / \text{pard} z^2 + w^2 \text{sigma} = 0$   
 $M k x^2 + k y^2 + k z^2 = w^2 \text{sigma} \dots$   
 Separationsansatz  
 $1/X \cdot d^2 X(x)/dx^2 = -k x^2$  folglich  $X''(x) + k x^2 \cdot X(x) = 0 \dots$   
 Schwingungsgleichung ANALOGY''(x) +  $k y^2 \cdot Y(y) = 0$   
 $Z''(z) + k z^2 \cdot Z(z) = 0$   
 Fundamentalsystem:  $\sin(kx.x), \cos(kx.x) \dots$   
 hufig verwendet Komplexes  $e^{-jkx.x}, e^{+jkx.x} \dots$   
 hufig verwendet Mischform:  $\sin(kx.x), e^{+jkx.x}, \text{etc.}$   
 Hyperbelfunktion:  $\cosh(kx.x), \sinh(kx.x)$   
 Physikalische Bedeutungen in Tabelle 2.1  
 kann durch einsetzen in unsere Wellenfunktion  $\text{Resin}(kz.z) \cdot e^{j \omega t}$  überprüft werden.  
 Die Wellenfront verläuft in z-Richtung.

Fortan wird die verkürzte Schreibweise  $\text{pard}/\text{pard} x = \text{pard}_x$  verwendet.

$$(2.39) \quad \text{pard}_y H_z - \text{pard}_z H_y = j w \text{sigma} E_x / j \omega (2.43) \quad \text{pard}_z E_x - \text{pard}_x E_z = -j \omega H_y / \text{pard}_z \text{ber} 2 \text{ Schritte folgt: } j \omega \cdot \text{pard}_y H_z + \text{pard}_z^2 E_x - \text{pard}_z \text{pard}_x E_z = -w^2 \text{sigma} \cdot E_x$$

Annahme wanderwelle nach z + inf .....  $j \omega \text{pard}_y H_z - k_z^2 \cdot E_x + j k_z \cdot \text{pard}_x E_z = -w^2 \text{sigma} E_y (w^2 \text{sigma} - k_z^2) E_x = -j \omega \text{pard}_y \cdot H_z - j k_z \text{pard}_x E_z \text{appa}^2 E_x = -j / \text{kappa}^2 \cdot (k_z \cdot \text{pard}_x E_z + w \text{pard}_y H_z) \dots$   
 sollte die erste Gleichung (2.45) ergeben)  $H$ :  
 Fr 2.46 bis 2.48 wiederholen

$\text{kappa}^2 = 0$   
 $w^2 \text{sigma} - k_z^2 = 0$   
 $k_z = \pm w / \sqrt{(\epsilonpsilon) \text{kappa}^2} = 0$   
 $w^2 \text{sigma} - k_z^2 = k_x^2 + k_y^2 \dots$   
 Der Betrag der k-Vektors bleibt gleich, daher wird die k\_z Komponente wegen k\_x und k\_y kleiner.  
 Die TEM-Welle ist die schnellste Welle. *Notiz: Ein gerahmte Formeln müssen auswendig gelernt werden, auch wenn sie nicht immer notwendig sind.*

## 10 3. Die homogene ebene Welle

### 11 3.1 Die HEW im idealen Dielektrikum

e ... elektrische Feldstärke h ... magnetische Feldstärke Kleinbuchstaben als Anzeichen der Zeitabhängigkeit.

$$\text{pard}_z^2 e_x(z, t) - \epsilonpsilon \cdot \text{pard}_z^2 e_x(z, t) = 0$$

$$m \text{ite}_x(z, t) = f_1(z - vt) + f_2(z + vt)$$

$$\text{eingesetzt (normal fr f1): } f_1''(z - vt) - \epsilonpsilon f_1''(z - vt)(-v) \cdot (-v) = 0$$

$$1 - \epsilonpsilon v^2 = 0 \text{ folgt } v = \pm 1 / \sqrt{\epsilonpsilon}$$

$$h_y^+ = 1/n \cdot e_x^+ \dots n = \sqrt{(\epsilonpsilon) \text{kappa}^2} = \sqrt{(\epsilonpsilon / \text{kappa}^2)} = \sqrt{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m})^2 \cdot c_0^2} = 120\pi \cdot 10^3 \text{Ohm} = 120\pi \text{Ohm} \dots$$

$$\text{Feldwellenwiderstand}^h \text{at nicht mit ohmschen Verlusten zu tun}$$

$$\epsilonpsilon_0 \cdot 0 = 1/c_0^2 \epsilonpsilon_0 = 1/(0 \cdot c_0^2)$$

19.10.2023

## Ding des Tages

Der Prof. baute sich einmal eine Antenne, um mit der ISS beim FAQ mit einer Schule zuzuhören. Eine 50cm Stange nach links, eine 50cm Stange nach rechts. Die Stangen gehen per Bananenstecker in eine mysteriöse graue Box. Von unten wird ein Koax-Kabel angesteckt, bissl qualitativer, nicht so wie das vom grindigen Fernsehen.

Es wird ein Balun benötigt (Bal=balanced, un=unbalanced). Dieses schließt

eine balanzierte Leitung an eine unbalanzierte Leitung an.

Abb.: Tafelbild + Diashow Weil die Ströme gegensinnig, die Wicklung aber gleichsinnig ist, heben sich die Flüsse auf  $\implies L=0$ ,  $\omega_0 = 0$  Da bereits eine geringe Stromdifferenz eine relativ hohe Impedanz erzeugt, bestraft dieser Balun Differenzströme.

Weil die Schule unterhalb des Horizontes lag, konnte der Prof. nur der ISS, nicht aber der Schule zuhören. Der Prof. hat auch die Aufnahme zur Verfügung gestellt.

### 3.1.3 Energiedichte der HEW, Poyntingscher Vektor

Zu jedem Zeitpunkt, an jedem Ort, ist die elektrische Energiedichte gleich groß wie die magnetische Energiedichte: sie gehen synchron.

Abb. 3.1 Man sieht die Energiedichte eines Photons. Dort wo die Pfeile näher zusammen liegen, ist die Feldstärke erhöht. Man kann einen sinusförmigen Verlauf der Feldstärke erkennen.

Weiters ist die Homogene Elektromagnetische Welle im freien Raum dargestellt. Unbedingt einprägen!

### 3.1.4 Wellenzahl und Wellenlänge

Unterschied zwischen  $k$  und  $\omega$ .

## Polarisation

Alle haben eine Polarisation. Unpolarisierte sind nur im Mittel nicht polarisiert.

### Polarisationsarten

elliptische Polarisation (allgemeine Form)