

Inhalt

N. Blümer

Abschluss Wechselstrom (HR Kap. 33)

1. Leistung in Wechselstromkreisen: 33-10, CT1, (39) Lämpchen
2. Drehstrom: (60) Drehstrommotor
3. Transformatoren: 33-11, (72) Schweiß-, HV-, Tesla-Trafo, CT2

Elektromagnetische Wellen I (HR Kap 34)

4. Spektrum elm. Wellen: 34-1, (79) Prisma, CT3
5. Erzeugung elm. Wellen I: 34-2, (74) Hertz-Dipol, JA1
6. Ebene fortlaufende Wellen (Rechnung): 34-2b, 34-3, JA2, JA3, CT4
7. Erzeugung elm. Wellen II: (75a) Lecher-Leitung, (75b) Mikrowellen CT5
⊙ Koax-Kabel + Nadelimpulsgenerator,
8. Stehende ebene Wellen (Rechnung): JA4

Java applets:

- JA1 - Dipole etc. <http://www.falstad.com/emwave1/>
- JA2 - Fortl. Welle (E+B) <http://www.walter-fendt.de/ph14d/emwelle.htm>
- JA3 - " <http://www.schulphysik.de/ntnujava/emWave/emWave.html>
- JA4 - stehende W. (E) <http://www.walter-fendt.de/ph14d/stwellerefl.htm>

Elektromagnetische Wellen II (HR Kap 34)

9. Energietransport und Poynting-Vektor: 34-4
10. Polarisation: 34-6 (75b)-5 Mikrowellen (94a) Polfilter
(94c) Polarisation durch Streuung CT6, CT7
11. Reflexion und Brechung, Totalreflexion: 34-7, 34-8,
(78) (Halbkreisscheibe), (79) Prisma, (75b)-8 Mikrowelle
(CT8)
12. Polarisation durch Reflexion: 34-9, (94b)

- ausgelassen:
- Strahlungsdruck 34-5
 - zirkulare Polarisation
 - $\lambda/4$ - Plättchen
 - Intensität bei Reflexion (Fresnel-Formeln)
 - Dispersion (Teil von 34-7) + Absorption

Abschluss Wechselstrom

1. Leistung in Wechselstromkreisen* (cf HR 33-10)

Von der Spannungsquelle gelieferte Leistung:

$$P(t) = \varepsilon(t) i(t) \quad (\text{mech. Analogon: } P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t))$$

CT1: Leistung als Funktion der Phasenverschiebung

Rechnung dazu: sei $\varepsilon(t) = \varepsilon_m \sin(\omega t)$; $i(t) = I \sin(\omega t + \varphi)$

$$\Rightarrow P(t) = \varepsilon_m I \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi)$$

$$= \varepsilon_m I \sin(\omega t) [\sin(\omega t) \cos(\varphi) + \cos(\omega t) \sin(\varphi)]$$

$$= \varepsilon_m I \left[\underbrace{\sin^2(\omega t)}_{\geq 0} \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \underbrace{\sin(2\omega t)}_{\text{oszilliert}} \sin(\varphi) \right]$$

Wirkleistung

Blindleistung

mittlere Leistung:
$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{2} \varepsilon_m I \cos(\varphi)$$
$$= \varepsilon_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos(\varphi)$$

mit
$$\varepsilon_{\text{eff}} := \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}; \quad I_{\text{eff}} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

für ohmschen Widerstand gilt somit:

$$\bar{P} = \varepsilon_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = R I_{\text{eff}}^2 = \frac{\varepsilon_{\text{eff}}^2}{R} \quad \text{wie bei Gleichstrom}$$

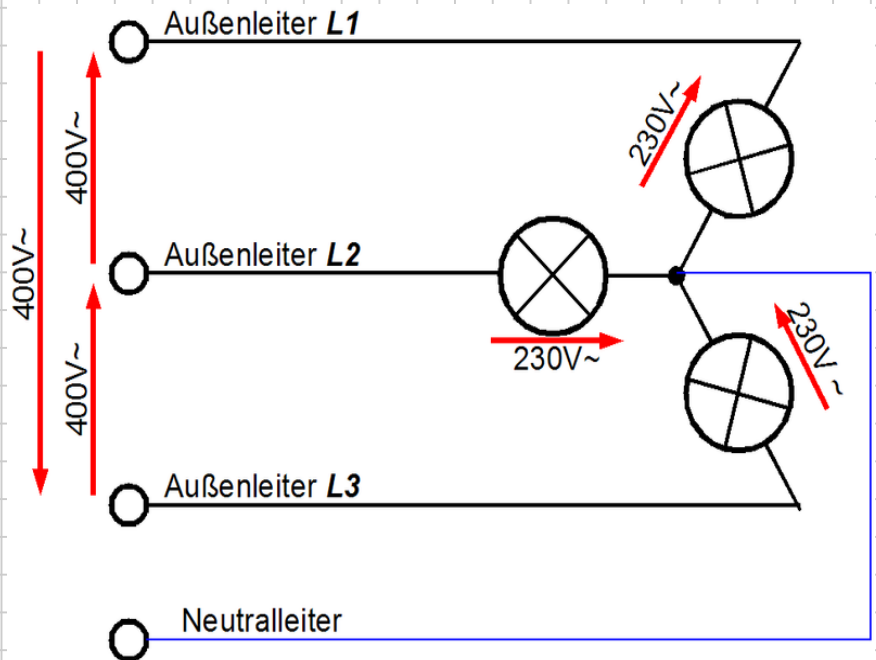
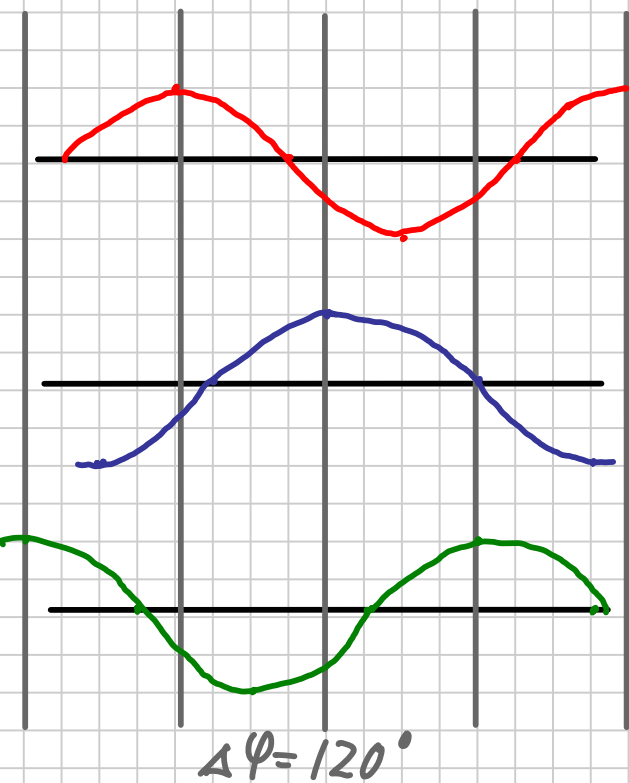
Versuch (39): 2 identische Lämpchen werden an Gleich- bzw. Wechselspannung angeschlossen. Sie leuchten gleich hell, wenn $\varepsilon_m^{(1)} \approx 9V \approx \sqrt{2} 6V \approx \varepsilon_{\text{const}}^{(2)}$

Netzspannung in Europa: $E_{eff} = 230V$; $E_m = 325V$

Blindleistung führt zu erhöhten ohmschen Verlusten in Versorgungsleitungen und ist daher unerwünscht.
*(in Vorlesung nur Versuch gezeigt)

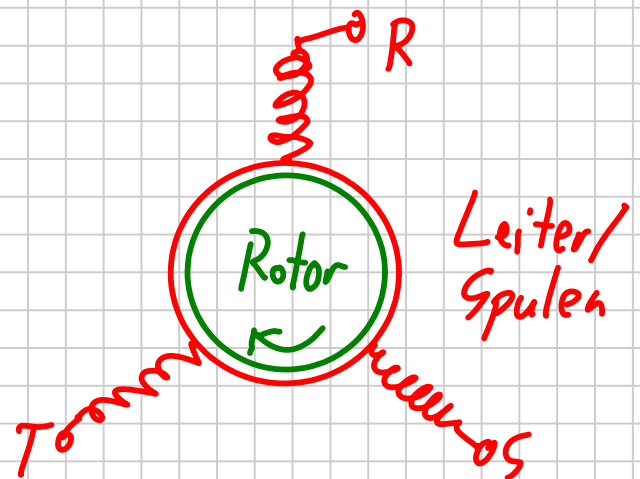
2. Drehstrom - Dreiphasen - Wechselstrom

In Europa wird elektrische Energie meist in Form von 3-Phasen-Wechselstrom verteilt.



Vorteile: • Flexibilität in der Spannung (230V/400V)
• nur schwacher Nullleiter benötigt

Versuch (60e) Illustration eines Drehstrommotors:
Drehrichtung ändert sich bei jedem Umpolen (Kopplung hier durch Wirbelströme).



3. Transformatoren (cf. HR 33-11)

Ohmscher Verlust in Versorgungsleitungen:

$$\bar{P}_{\text{Verlust}} = I_{\text{eff}}^2 R_{\text{Leitung}} \quad \left(\text{nicht } \frac{\epsilon_{\text{eff}}^2}{R} ! \right)$$

↑
Hin- und Rückleitung

Leistung beim Verbraucher: $\bar{P}_{\text{Nutz}} = I_{\text{eff}} \epsilon_{\text{eff}} \cos(\varphi)$

Effizient: möglichst hohe Spannung zur Übertragung (aber handhabbare Spannung beim Verbraucher).

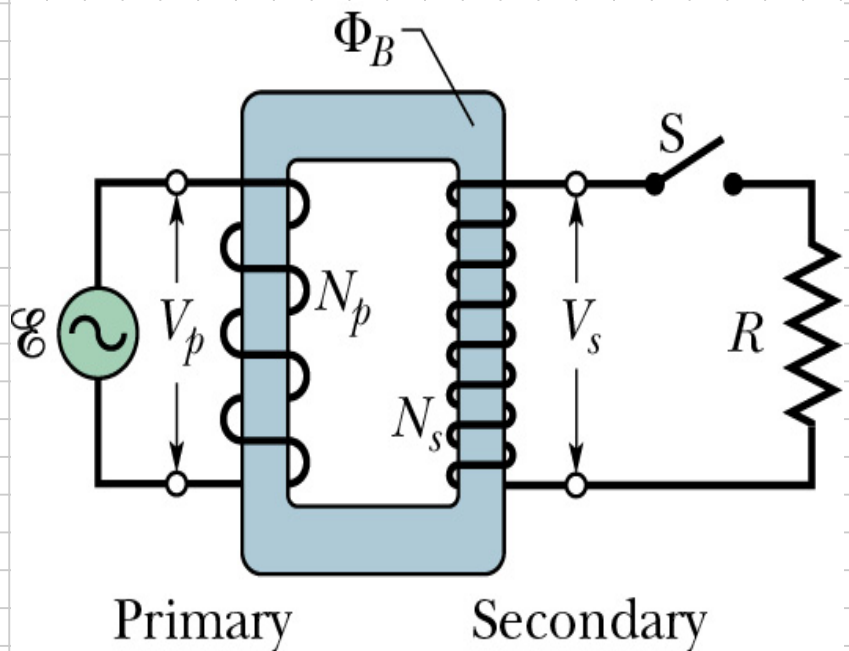
CT2: Idealer Transformator

Spannungsübersetzung

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Stromübersetzung (aus Energieerhaltung bei $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, gilt nicht allgemein):

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

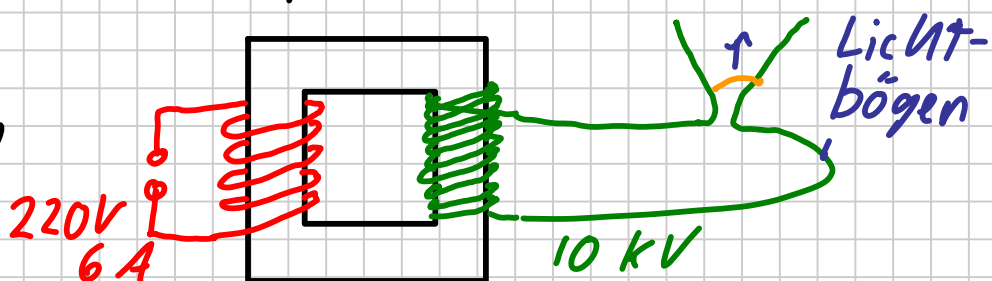


Dann scheinbarer Widerstand $R' = \frac{V_p}{I_p} = \frac{N_s^2}{N_p^2} R$

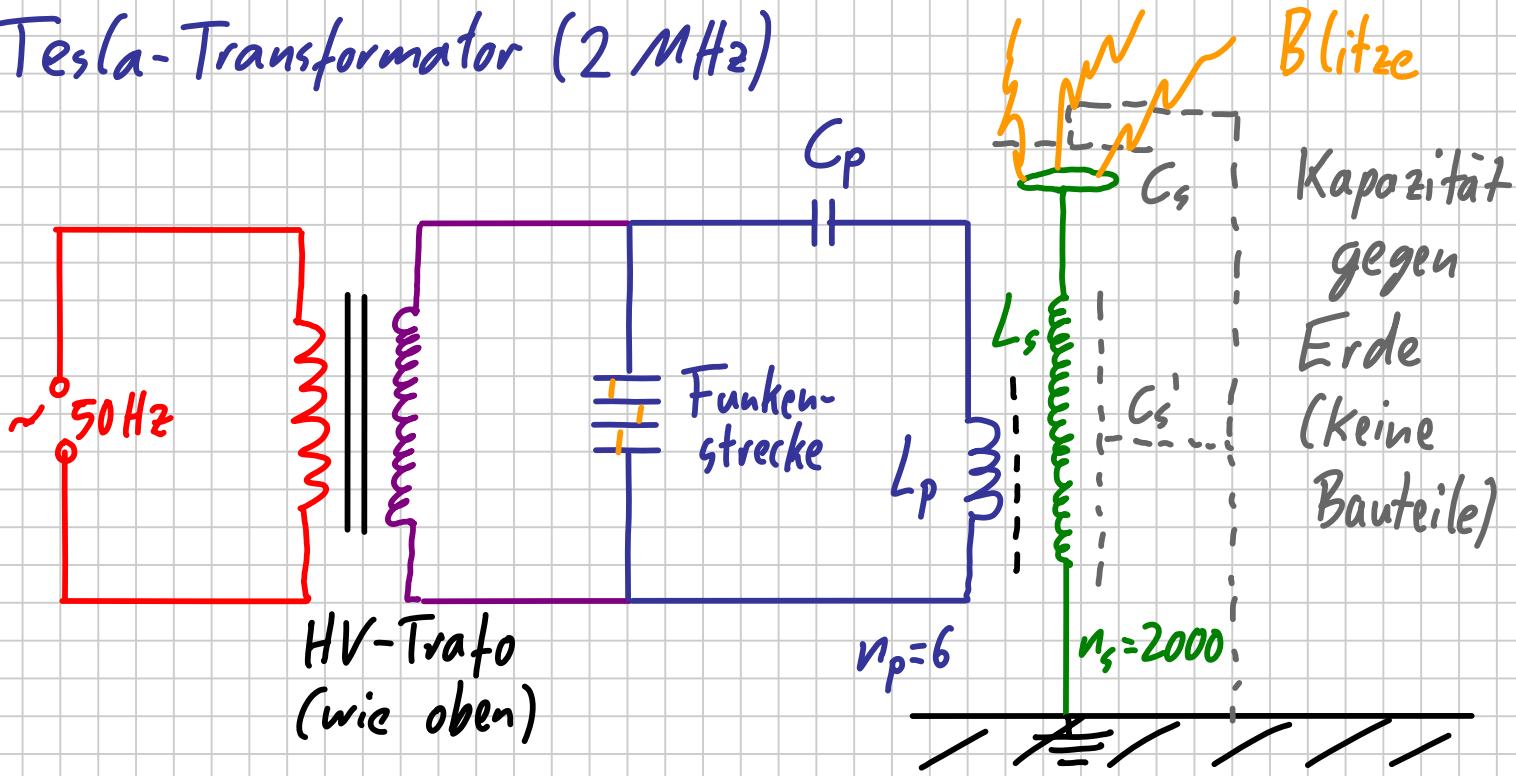
Versuch (72) Schweißtrafo $n_p = 500, n_s = 5, I_s \approx 400 A$

Hochspannungstrafo

$n_p = 500, n_s = 23000$

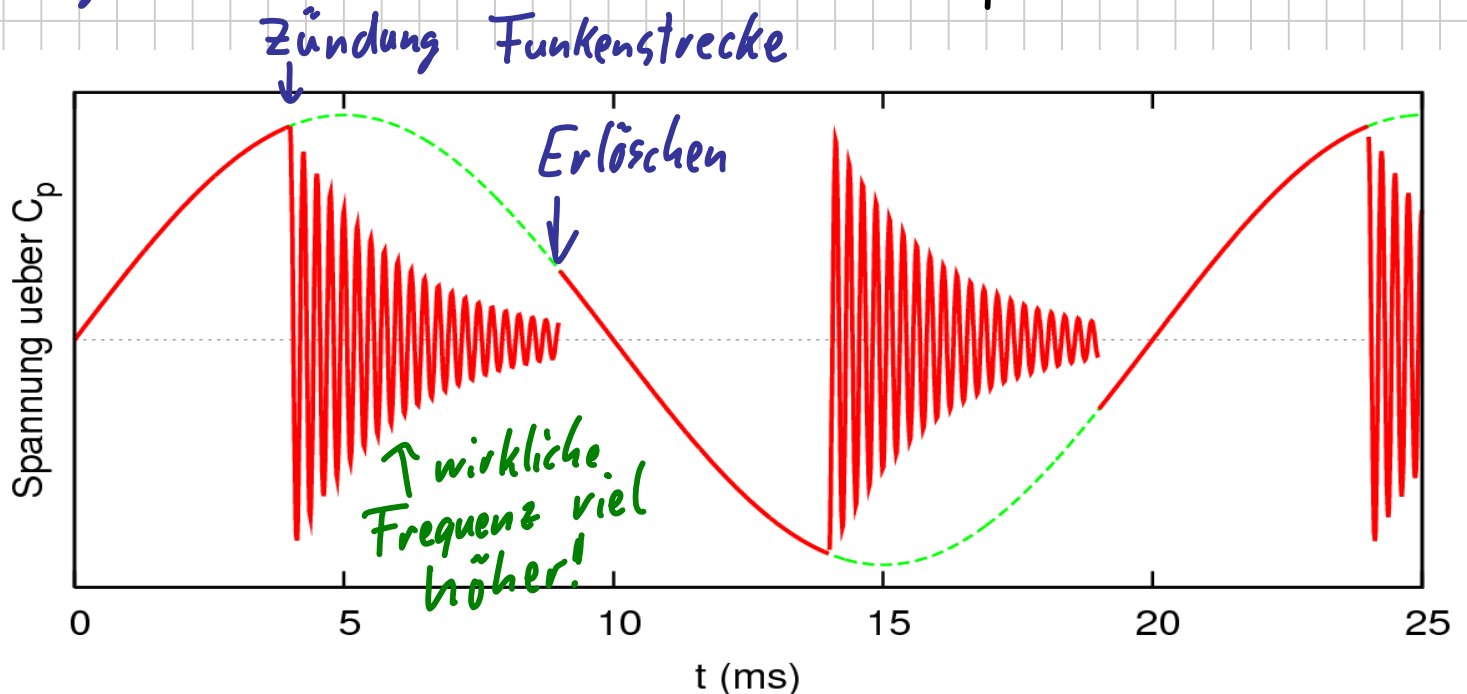


Tesla-Transformator (2 MHz)



Funktionsweise: innerhalb einer viertel Periode lädt der HV-Trafo die Kapazität C_p (Leidener Flasche) auf $\sim 7,5 \text{ kV}$, dann schließt die Funkenstrecke den HV-Trafo kurz. Dadurch wird der C_p - L_p -Schwingkreis angeregt, der seine Energie resonant (bei schwacher Kopplung über die Luftspulen) auf den MV-Kreis ($L_s - C_s + C_s'$) überträgt.

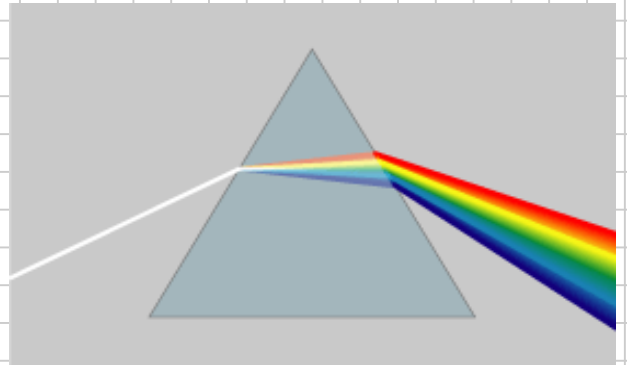
Ergebnis: $V_m \approx 2 \text{ MV}$ bei $f \approx 2 \text{ MHz}$



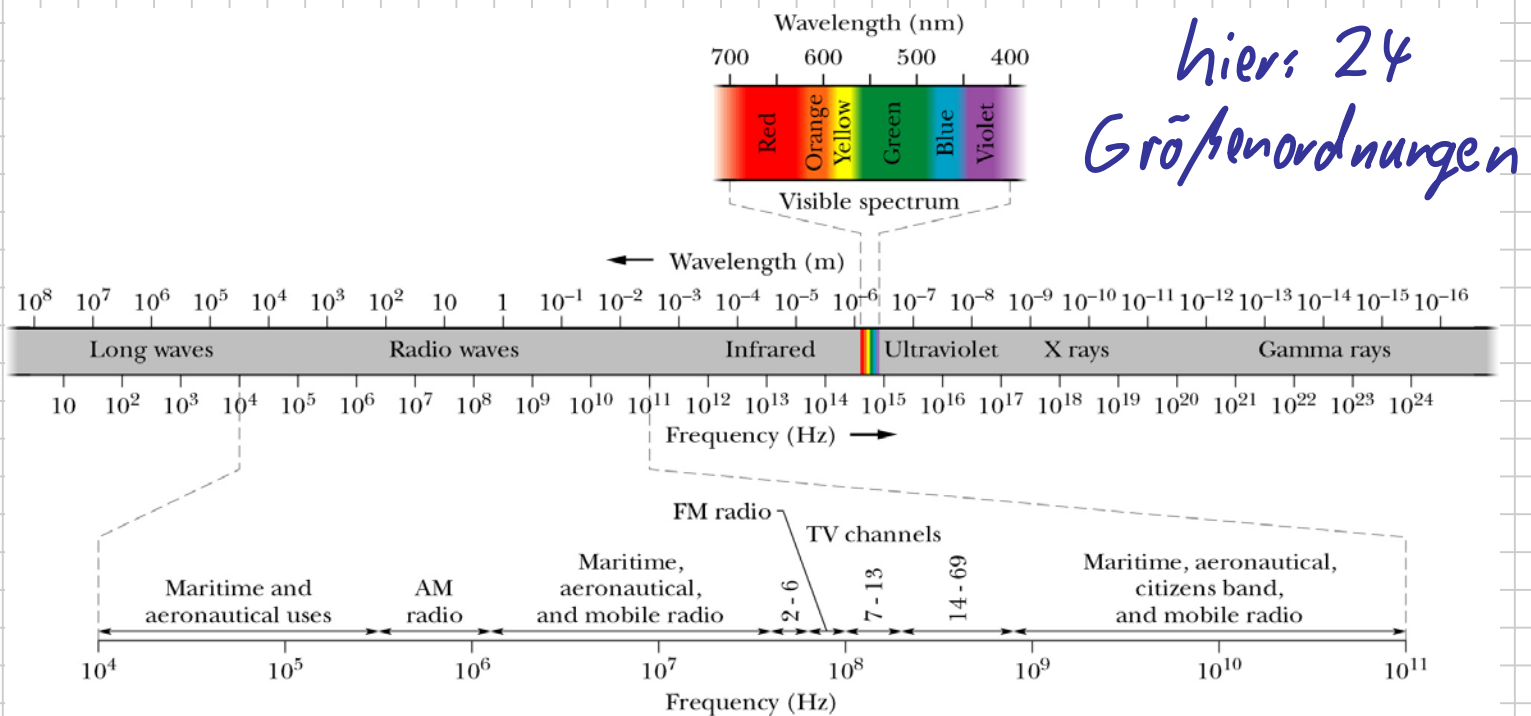
Elektromagnetische Wellen I

4. Spektrum elektromagnetischer Wellen (HR 34-1)

Versuch (79) Aufspaltung des Spektrums einer (weissen) Bogenlampe durch Prisma



Sichtbares Licht ist nur winziger Teil des elektromagnetischen Spektrums, das universell durch Maxwell-Gleichungen erfasst wird:



CT3 Mikrowellenherd

$$f \approx 2,45 \text{ GHz}$$

(Wasser-Resonanzen bei $f > 25 \text{ GHz}$, aber dann zu starker Skin-Effekt)

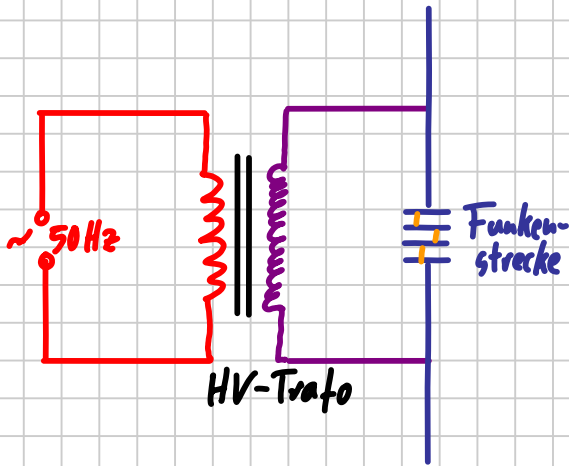
$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{c}{f} \approx 12 \text{ cm}$$

($\lambda \approx L \rightarrow$ stehende Wellen müssen „durchgerührt“ werden.)

Wichtig: elektromagnetische Wellen brauchen kein Medium (Beispiel: Sonnenlicht durch Weltall-Vakuum)!

5. Erzeugung elektromagnetischer Wellen I

Versuch 74 Hertz-Dipol



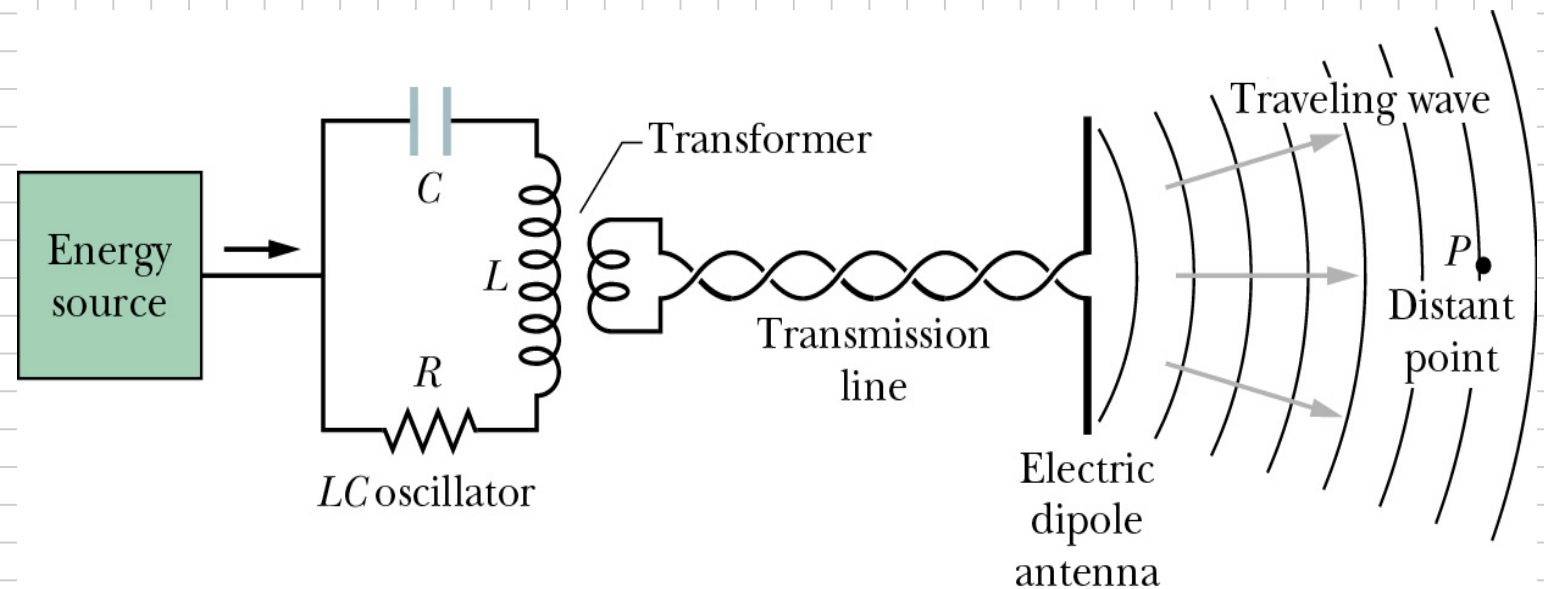
Prinzip: Erregung hochfrequenter Schwingungen durch Funkenüberschlag, genau wie kV-Teil des Tesla-Trafos

hier: • Stab ist Schwingkreis
• symmetrische Ausführung

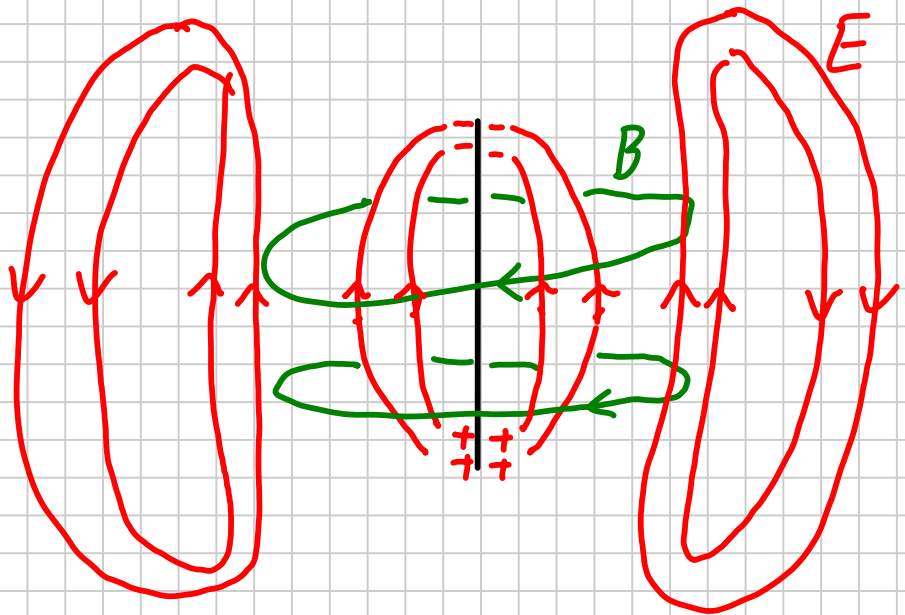
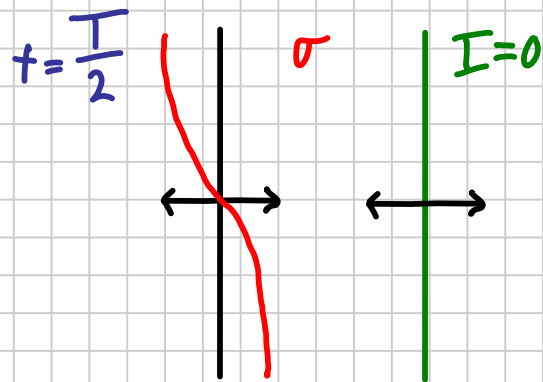
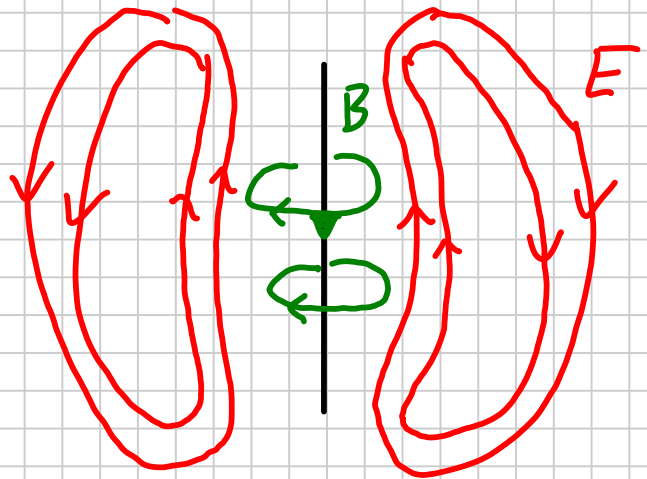
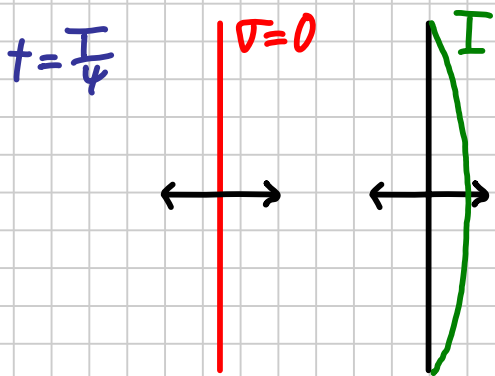
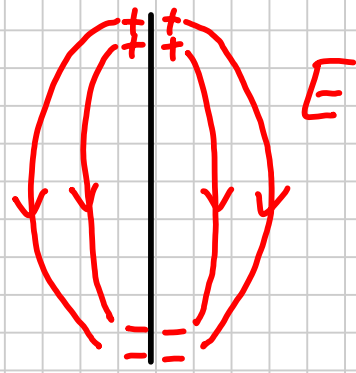
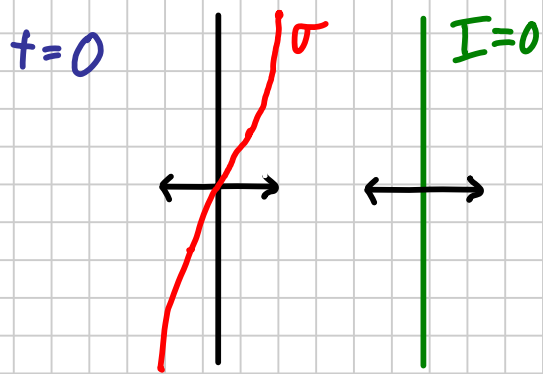
• Frequenz $f \approx 750 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda \approx 0,4 \text{ m}$

$\frac{\lambda}{2}$ -Dipolantenne mit Glimmlampe weist parallelen Anteil des \vec{E} -Feldes nach: Strahlung ist polarisiert

Prinzip eines Kurzwellen-Senders (HR Abb. 34-3): erzeugt monochromatisches Signal, erlaubt Modulation



Betrachte jetzt elektromagnetisches Feld um Dipol:



Nahfeld kompliziert: Java-Simulation!

Strahlungsleistung eines kurzen Dipols ($d \ll \lambda$) in Raumwinkel ϑ bei Abstand r :

$$\bar{S}(r, \vartheta) = \frac{\omega^4 p_0^2 \sin^2(\vartheta)}{8\pi (4\pi \epsilon_0) c^3 r^2}$$

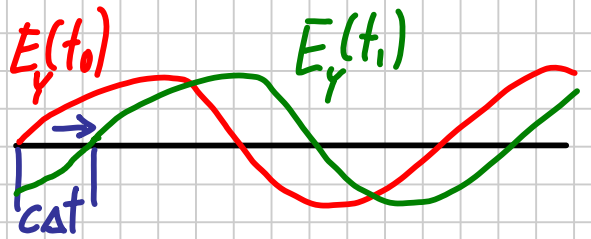
6. Ebene fortlaufende Wellen (HR 34-2, 34-3)

Bei genügendem Abstand vom Sender und in einem nicht zu großen Raumwinkel erscheinen Wellen als eben. Betrachte Ausbreitung in positive x -Richtung

Ansatz: E-Feld linear in y -Richtung polarisiert:

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = E_m \hat{e}_y \sin(kx - \omega t)$$

Argument $\varphi = 0$ für
 $kx = \omega t \Leftrightarrow x = \frac{\omega}{k} t \equiv ct$



(allgemeiner: zusätzlich z -Komponente von \vec{E} ggf. mit Phasenverschiebung.
Keine x -Komponente von \vec{E} , da $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$ wg x -Ausbr.)

Faradaysches Induktionsgesetz $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ in

differentieller Form: $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (äquivalent via Stokes)

$$\Rightarrow -\frac{\partial \vec{B}(\vec{x}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{pmatrix} \partial E_z / \partial y - \partial E_y / \partial z \\ \partial E_x / \partial z - \partial E_z / \partial x \\ \partial E_y / \partial x - \partial E_x / \partial y \end{pmatrix} = \hat{e}_z \frac{\partial E_y}{\partial x}$$

$$= E_m \hat{e}_z k \cos(kx - \omega t)$$

$$\Rightarrow \vec{B}(\vec{x}, t) = E_m \frac{k}{\omega} \sin(kx - \omega t) \hat{e}_z \quad \text{also} \quad \vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{k}$$

Amplitudenverhältnis: $\frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c$

Was bestimmt Lichtgeschwindigkeit c ?

Maxwellsches Induktionsgesetz für Vakuum (d.h. $i=0$)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \stackrel{\text{Stokes}}{\Leftrightarrow} \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} \stackrel{\text{hier}}{=} -\hat{e}_y \frac{\partial B_z}{\partial x} = -E_m \frac{k}{\omega} k \cos(kx - \omega t) \hat{e}_y$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -E_m \omega \cos(kx - \omega t) \hat{e}_y$$

$$\Rightarrow \frac{k^2}{\omega} = \mu_0 \epsilon_0 \omega \Leftrightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Ableitung in integraler Form: HR 34-3

Visualisierung: Java-applets 2 + 3

CT 3: Umkehrung der Laufrichtung

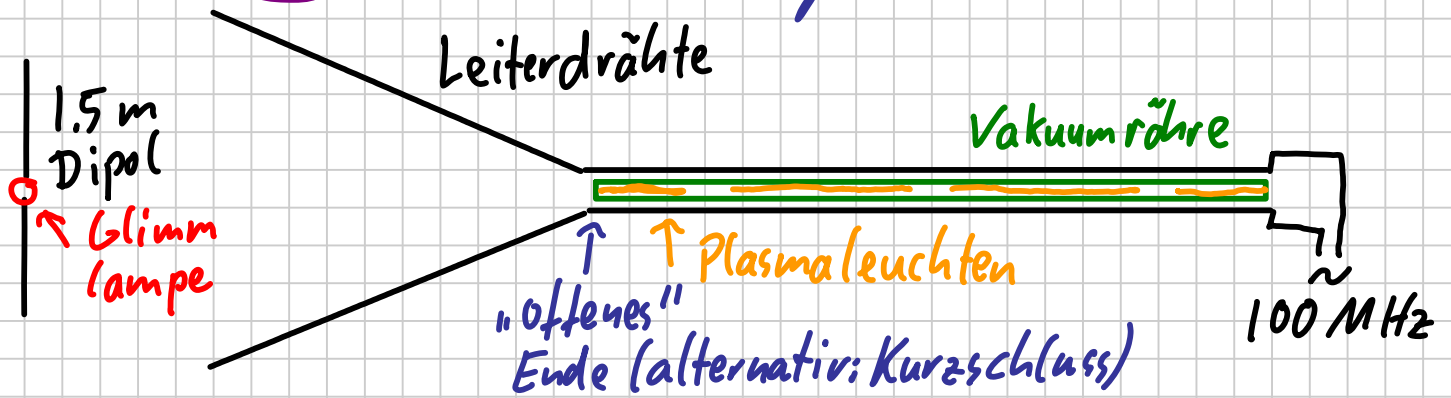
$$\vec{E}(\vec{x}, t) = E_m \hat{e}_y \sin(kx + \omega t)$$

$$\Rightarrow \vec{B}(\vec{x}, t) = -\hat{e}_z \frac{E_m}{c} \sin(kx + \omega t) \quad \text{umgekehrtes Vorzeichen!}$$

Ende 28.6.06

7. Erzeugung elektromagnetischer Wellen II

Versuch (75a) Lecher-Leitung



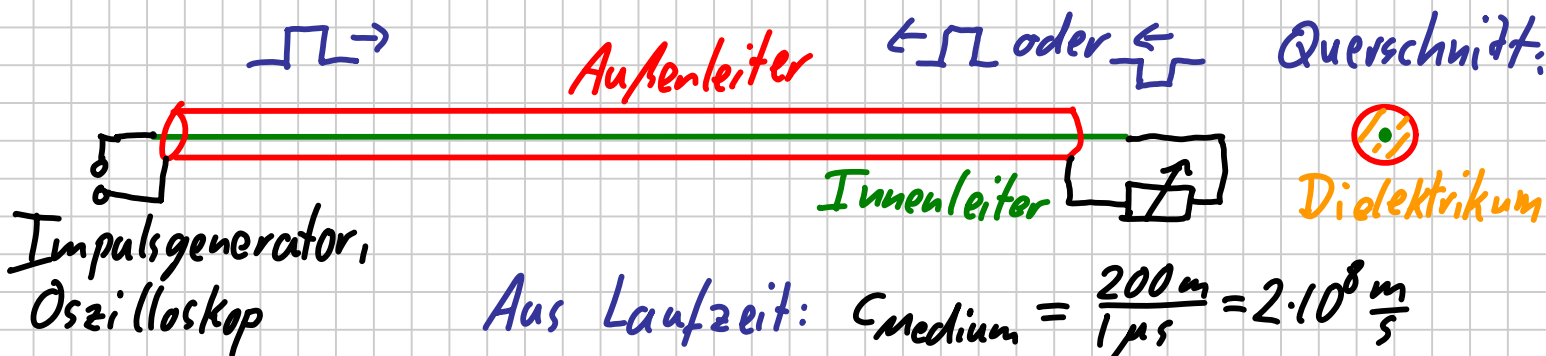
Neues Phänomen: stehende Wellen (sichtbar durch Plasma und Dipolantenne)

E-Feld-Bauch an "offenem" Ende

E-Feld-Knoten an geschlossenem Ende + Wand

Eine 17cm-Antenne wird nur im Wasserbad resonant:
mit $\epsilon = 81$ folgt $n = 9 \Rightarrow c_{\text{Wasser}} = \frac{c}{n}$; $\lambda_{\text{Wasser}} = \frac{1,5\text{m}}{9} \approx 17\text{cm}$

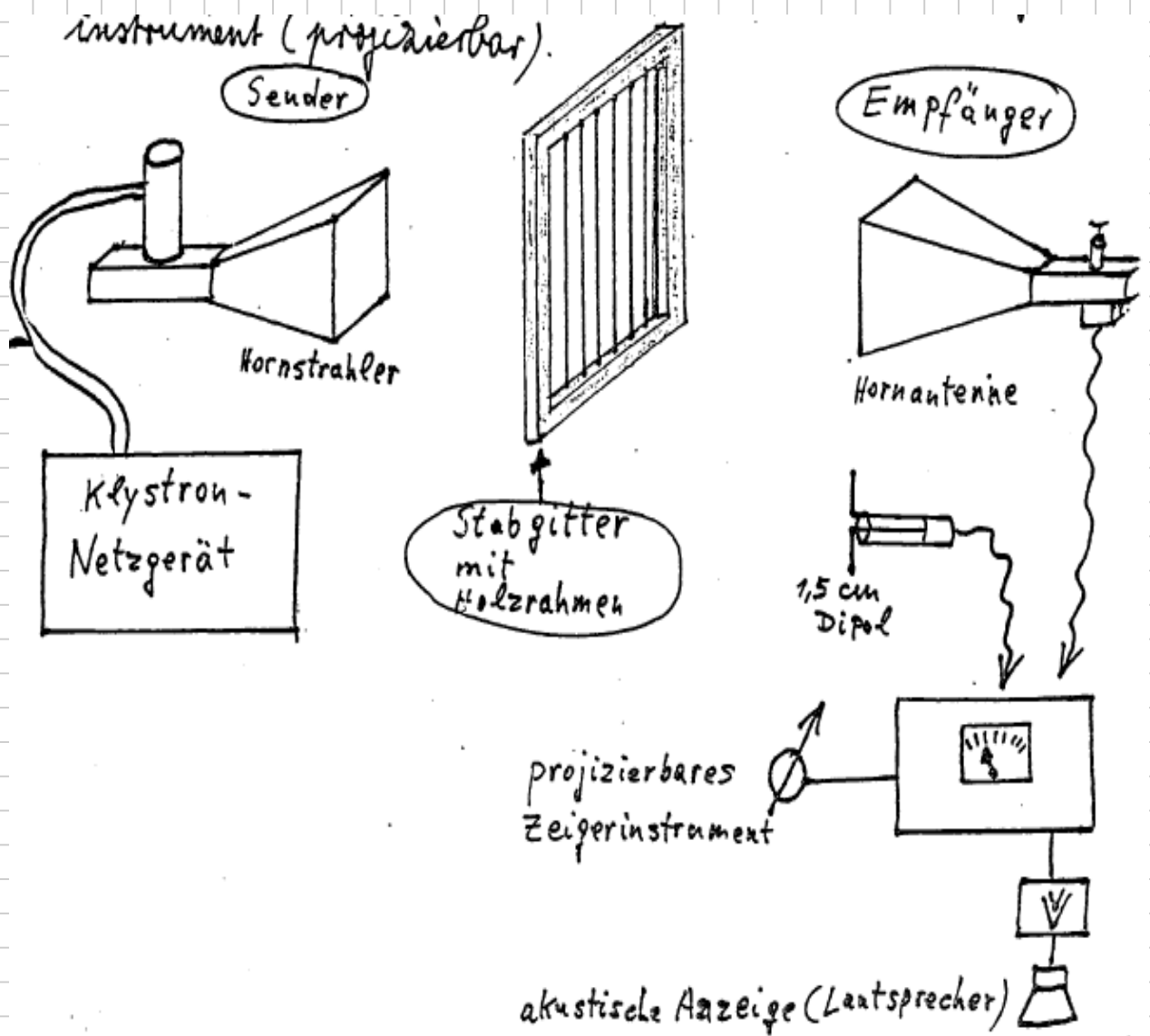
Versuch (neu) Einzelimpulse auf Koax-Kabel



Je nach Abschlusswiderstand wird das Signal mit gleichem Vorzeichen (z.B. offen) oder umgekehrtem Vorzeichen (z.B. Kurzschluss) reflektiert. Absorption bei $R = Z = 50\Omega$.

Versuch (75b) Mikrowellen

Aufbau
aus
Versuchs-
skizzen-
Sammlung:



3cm-Wellen werden mit einem 10 GHz-Klystron mit vertikaler Polarisation des E-Feldes erzeugt.

- Versuche:
- Abstrahlcharakteristik, Abstandsabhängigkeit
 - Polarisation (Drehen des Empfängers)
 - Transmission: Drahtkamm, Holzplatte, trockenes/nasses Handtuch
 - Stehende Welle: Abstände zwischen E-Maxima
 - Brechung, (Total-) Reflexion

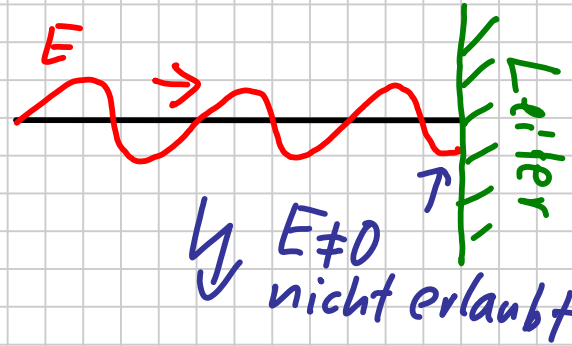
CTS: Trans-
mission, falls
Stäbe $\perp \vec{E}$

8. Stehende ebene Wellen (Rechnung)

Betrachte ebene fortlaufende Welle, die normal auf perfekten Leiter trifft. Randbedingung auf Leiter-

Oberfläche: $E_{||} = 0 \xRightarrow{\vec{E} \perp \vec{k}} \vec{E} = \vec{0}$

Annahme: Leiterfläche bei $x=0$



Lösung: überlagere rechtslaufende Welle mit linkslaufender Welle ($\vec{E}(\vec{x}, t) = E(x, t) \hat{e}_y$):

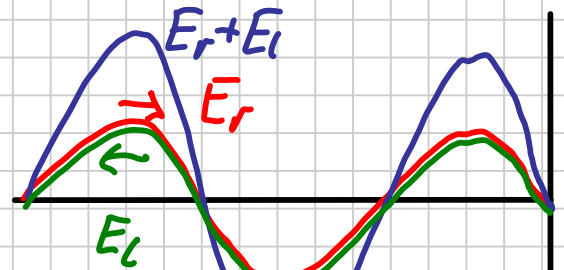
$$E(x, t) = E_m \sin(kx - \omega t) - E_m \sin(-kx - \omega t)$$

Beweis: $E(0, t) = E_m [\sin(-\omega t) - \sin(-\omega t)] = 0$

Visualisierung:

Java-Animation 4

$t=0$

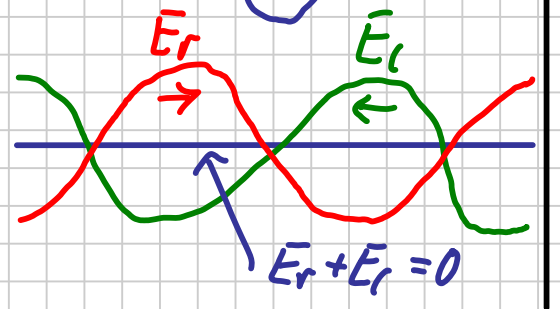


Die Überlagerung ergibt eine stehende Welle;

zu Zeitpunkten

$$t_i = (2n+1) \frac{T}{4}$$

$t = \frac{T}{4}$



verschwindet das E-Feld!

Benutze $\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta) = 2 \sin(\alpha) \cos(\beta)$

$$\Rightarrow E(x, t) = 2E_m \sin(kx) \cos(\omega t)$$

Knoten des E-Felds bei $x=0$

$$\begin{aligned} B(x, t) &= \frac{E_m}{c} [\sin(kx - \omega t) + \sin(-kx - \omega t)] \\ &= \frac{2E_m}{c} \cos(kx) \sin(\omega t) \end{aligned}$$

Bauch des B-Feldes bei $x=0$

In einer stehenden elm. Welle schwingt Energie zwischen E- und B-Feld (zeitlich und räumliche Phasenverschiebung!)

9. Energie transport und Poynting-Vektor (HR 34-4)

Der Poynting-Vektor $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$ gibt die Energiestromdichte an. Einheit: Leistung/Fläche

Für ebene Welle: $\vec{S} \parallel \vec{k}$ (\vec{S} zeigt in Ausbreitungsrichtung)

speziell fortlaufende Welle:
$$S(x,t) = \frac{1}{c\mu_0} E^2(x,t)$$
$$= \frac{1}{c\mu_0} E_m^2 \sin^2(kx - \omega t)$$

Zeitmittelung:
$$I = S(x,t)_{\text{gem}} = \frac{1}{c\mu_0} \frac{E_m^2}{2}$$

Intensität/Bestrahlungsstärke I ist für fortlaufende Welle ortsunabhängig

magnetische/elektrische Feldenergiedichten gleich:
$$u_B = u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 (cB)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Punktquelle:
$$I(r) = \frac{P_a}{4\pi r^2}$$

(Strahlungsdruck: siehe HR 34-5 und Ergänzungsvorlesungen!)

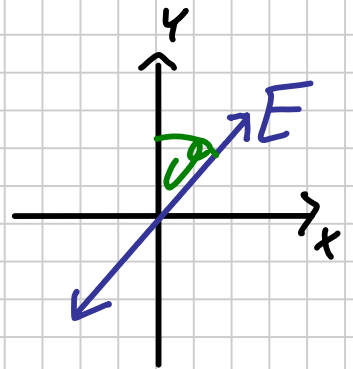
10. Polarisation (HR 34-6)

Mikrowellensender (Hertz-Dipol, Klystron etc.) liefern vollständig polarisierte Strahlung: bei Ausbreitung in x-Richtung ist das \vec{E} -Feld z.B. immer parallel zur y-Achse ausgerichtet – die Schwingungsebene liegt fest.

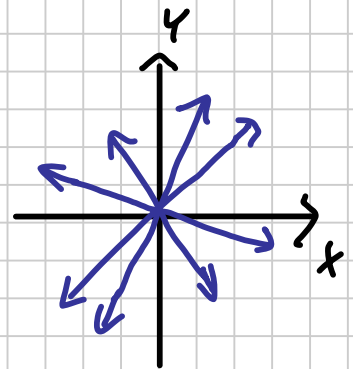
Konvention: Polarisation, Schwingungsebene immer in Bezug auf das E-Feld

Allgemeine linear polarisierte ebene Welle (Ausbreitung in x-Richtung):

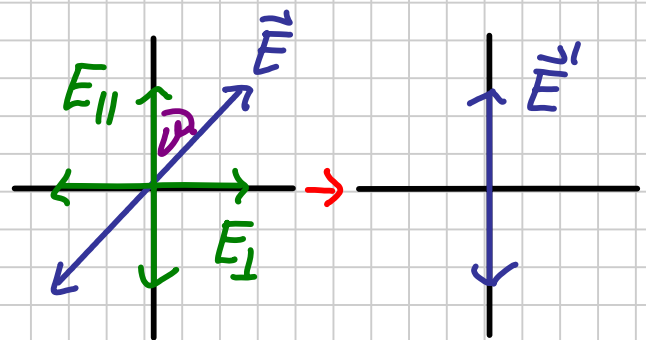
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_m \sin(kx - \omega t) [\cos(\vartheta) \hat{e}_y + \sin(\vartheta) \hat{e}_z]$$



Dagegen ist z.B. die Strahlung von Sonne, Glüh- und Leuchtstofflampen unpolarisiert: zu verschiedenen Zeiten schwingt \vec{E} in verschiedenen Richtungen.



Ein **Polarisationsfilter** lässt nur Strahlung einer bestimmten Polarisation durch – die senkrechte Komponente wird absorbiert



$$E_m' = E_m \cos(\vartheta)$$

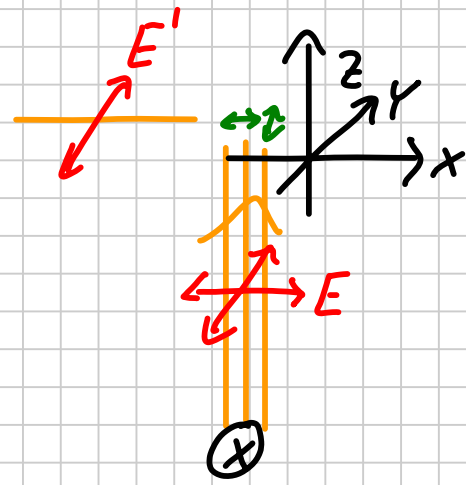
$$\text{Intensität: } I' = I \cos^2(\vartheta)$$

Bei anfangs unpolarisiertem Licht: $I' = I \overline{\cos^2(\vartheta)} = \frac{1}{2} I$

Versuch (94a) 2 Polfilter auf Overheadprojektor:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2(\vartheta)$$

Versuch 94c) Polarisation durch
Streuung: von unten wird eine
Lösung beleuchtet; wegen Ausbreitung
in z-Richtung müssen alle E-Vektoren
in xy-Ebene liegen. Die Schwingungs-
richtung bleibt bei Streuung
erhalten \rightarrow Streustrahlung in x-Richtung
ist in y-Richtung polarisiert!



CT6 2 Polarisationsfilter

CT7 3 Polarisationsfilter

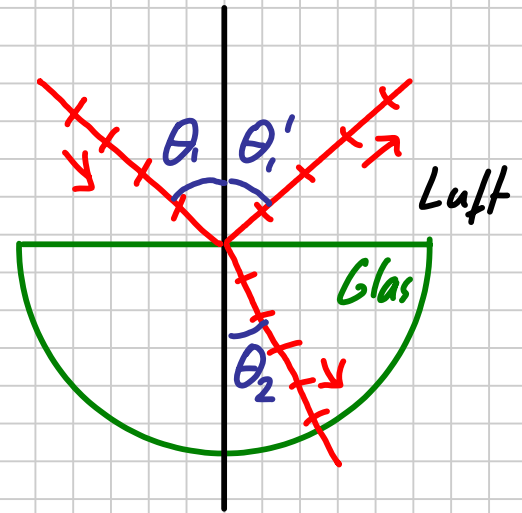
11. Reflexion und Brechung; Totalreflexion (HR 34-7+8)

Trifft ein Lichtstrahl (allgemeiner: elektromagnetische Strahlung) nicht-normal auf eine Grenzfläche zwischen 2 Medien, so wird er i.a. (i) reflektiert und (ii) gebrochen. Es gilt:

(i) $\theta_1 = \theta_1'$ Reflexionsgesetz

(ii) $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$ Brechungsg.

wobei der **Brechungsindex** n_i für ein homogenes Material und für eine Frequenz (bzw. einen F.-Bereich) spezifisch ist – unabhängig vom Winkel!



Merke: Beim Übergang ins dichteren Material wird der Strahl zum Lot hin gebrochen.

Einige Brechungsindizes:

Vakuum: $n = 1$

Luft: $n \approx 1,0003$

Wasser: $n \approx 1,33$

Kronglas: $n \approx 1,5$

Diamant: $n \approx 2,42$

Totalreflexion: Beim Übergang ins dünnere Medium hat das Brechungsgesetz nur für $\theta < \theta_{\text{krit}}$ eine Lösung

$$n_1 \sin(\theta_{\text{krit}}) = n_2 \sin(90^\circ) \Leftrightarrow \theta_{\text{krit}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

für $\theta_1 > \theta_{\text{krit}}$: nur Totalreflexion, keine Brechung!

Versuch (78) Halbkreisscheibe

Versuch (756) Mikrowellen - zusätzlich Strahlteiler durch Nahfeld-Effekte

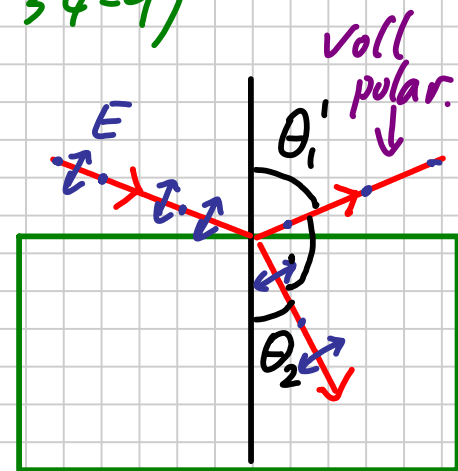
Versuch (81) Lichtleiter: Führung des Lichtstrahls im Glasfaserkabel durch Totalreflexion; Strahl entkommt, wenn Kabel in Xylol getaucht wird.

Ende 29.6.06

CT 8: Brechung an Schichtstruktur

12. Polarisation durch Reflexion (HR 34-9)

Experimentell stellt man fest, dass z. B. an Glasscheiben oder Wasseroberflächen reflektierte Strahlen vorzugsweise senkrecht zur Strahlebene polarisiert sind.



Diese Polarisation ist vollständig, falls

$$\theta_1' + \theta_2 = 90^\circ \quad (\text{nenne } \theta_1 = \theta_1' \equiv \theta_B \text{ Brewster-Winkel})$$

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin(90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos(\theta_B)$$

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \text{Brewster-Gesetz}$$

Spiegelungen können daher durch Polfilter in Fotoapparaten und Sonnenbrillen unterdrückt werden.