VO Prüfung Theretische Elektrodynamik
Am 25.Jän.2019 in der VO präsentiert.

Von der Linden

5. Februar 2019

1 Statik

(a) **Multipolentwicklung des elektrischen Potentials**. Gegeben sei eine räumlich begrenzte Ladungsverteilung $\rho(\vec{x})$.

- Wie lautet der Monopolbeitrag zum Potential, inklusive Formel für das Monopolmoment.
- Wie lautet der Dipolbeitrag zum Potential, inklusive Formel für das Dipolmoment?
- Wie lautet der Quadrupolbeitrag zum Potential, inklusive Formel für den Quadtrupoltensor?
- Wie berechnet man generell aus dem Potential das elektrische Feld?

(b) **Eindimensonaler Draht**: Wir betrachten einen eindimensionalen sehr langen Draht, der entlang der z-Achse ausgerichtet ist. Es fließe ein Strom I in z-Richtung.

- Geben Sie das E- und B-Feld an. (Formel)
- Welche Kraft wirkt auf einen zweiten (zum ersten parallelen im Abstand d) Draht in dem ebenfalls der Strom I fließe? (Formel)

(c) **Elektrostatisches Potential**

- Welche Differenzialgleichung muss das skalare Potential bei gegebener Ladungsdichte erfüllen? (Beziehung und Formel)
- Gegeben sei eine metallische Platte in der xy-Ebene. Welche Randbedingung für das Potential liefert sie für die obige Differentialgleichung und warum?
- Oberhalb der Ebene befinden sich einige Punktladungen. Wie kann man daraus eine partikuläre Lösung der obigen Differentialgleichung berechnen (Formel)?
- Wie erhält man dann generell die allgemeine Lösung und mit welchen Trick kann man die richtige Lösung auch konstruieren?

2 Maxwell-Gleichungen

(a) Wie lauten die beiden homogenen Maxwell-Gleichungen? (Formel)

(b) Wie lauten die beiden inhomogenen Maxwell-Gleichungen? (Formel)

(c) Welche speziellen Wellen erfüllen die Maxwell-Gleichungen im Vakuum? Wie stehen das E-Feld und B-Feld und die Ausbreitungsrichtung dieser Wellen zueinander?

(d) Handelt es sich um transversale oder longitudinale Wellen?

(e) Wie lautet die Dispersionsrelation (Formel)?

(f) Wellenleiter: Elektromagnetische Wellen sollen sich in einem Hohlleiter ausbreiten, der ein quadratisches Profil in xy-Richtung hat und in der z-Richtung unendlich ausgedehtn ist. Innerhalb des Leiters gibt es keine Ladungen und Ströme.

- Was versteht man unter TEM, TE, TM Wellen?
- Gibt es TEM Wellen?

3 Jefimenko-Gleichungen

(a) Wie lautet die Jefimenko-Gleichung für das E-Feld?

(b) Wie lautet die Jefimenko-Gleichung für das B-Feld?

(c) Welche Anteile dieser Gleichungen tragen zur elektromagnetischen Strahlung bei? Was ist die Bedingung hierfür?

4 Relativistische Formulierung der Elektromechanik

(a) Geben Sie die Elemente der Feldtensoren $F^{\mu\nu}$ und $G^{\mu\nu}$ an. (Formel)

(b) Woraus besteht der Vierervektor J^μ der Stromdichte? (Formel)

(c) Wie lauten damit die Maxwell-Gleichungen (Formel)?

(d) Argumentieren Sie, warum diese Gleichungen unter Lorentstransformation forminvariant ist.

(e) Geben Sie die Minkowski-Kraft K^μ für ein geladenes Teilchen im elektromagnetischen Feld an. (Formel)

5 Zusätzliche Fragen der zweiten Klausur

5.1 Statik

(a) **Kondensator**: Ein Plattenkondensator unendlicher Ausdehnung in xy-Richtung habe die Flächenladungsdichten $+\sigma$ in der unteren Platte und $-\sigma$ in der oberen Platte. Die Flächennormale der Kondensatorplatte zeige in die z-Richtung. Die untere Platte befindet sich bei $z = 0$ und die obere bei $z = d$.

- Geben Sie das E- und B-Feld innerhalb und außerhalb des Kondensators an. (Formel)
- Welche Kraft wirkt in diesem Feld auf ein Teilchen der Ladung q. (Formel)
- Geben Sie die potentielle Energie dieses Teilches als Funktion von z an. (Formel)
- Beschreiben Sie die Trajektorie des Teilchens, wenn es bei $z = 0$mit der Geschwindigkeit $\vec{v} = (v_x, 0, 0)$ startet.

(b) Gleich!

(c) Achtung! Gleiches Thema, andere Fragen!
Elektrostatisches Potential:

- Wie kann man aus den statischen Potential Φ das elektrische Feld $\vec{E}$ berechnen? (Formel)
- Wie lauten die Bestimmungsgleichungen für das Potential in einem Raumbereich V, in dem die Ladungsdichte $\rho(\vec{x})$ vorliegt. (Formel)
- Wie können hierbei Randbedingungen berücksichtigt werden? (Formel)
- Wodurch entstehen diese Randbedingungen?

5.2 Maxwell-Gleichungen

(a) und (b) gleich, Rest anders:

- Welche Gleichungen müssen die Felder E, B in Raumbereichen erfüllen, in denen keine Ladungen und Ströme vorliegen. (Formel)
- Wie lauten hierfür die funkdamentalen Lösungen? (Formel)
- Wie erhält man daraus die allgemeine Lösung? (Formel)
- **Maxwell-Gleichungen in Materie:** Die Ladungsdichte und die Stromdichte werde zerlegt in gebundene und freie Anteile. Die Einflüsse der gebundenen Ladungsträger werde in den Hilfsfeldern $\vec{P}$ und $\vec{M}$ berücksichtigt.
  - Wie lauten dann die inhomogenen Maxwell-Gleichungen? (Formel)
  - Was ist die physikalische Bedeutung von $\vec{P}$ und $\vec{M}$?
  - Was versteht man unter linearen Medien?

5.3 Quasistationäre Ströme

Neues Thema!

(a) Wodurch ist der Spannungsabfall an einer Spule gegeben? (Formel)

(b) Erklären Sie qualitativ anhand der Maxwell-Gleichungen wie es dazu kommt.

(c) Erklären Sie anhand der Maxwell-Gleichungen die Kirchhoff'schen Knoten- und Maschenregel.

(d) In einem Schwingkreis befindet sich in Serie ein Ohm'scher Widerstand, ein Kondensator (C) und eine Spule (L). Durch diese Anordnung fließe ein Wechselstrom. Erklären Sie für jedes Bauelement, ob es dem Schwingkreis im Mittel Energie entzieht und begründen Sie die Antwort physikalisch.

Jeffimenko und Relativistik die gleichen Fragen.

6 Lösungen

6.1 Statik

(a) **Multipolentwicklung des elektrischen Potentials**. Gegeben sei eine räumlich begrenzte Ladungsverteilung $\rho(\vec{x})$.

- Wie lautet der Monopolbeitrag zum Potential, inklusive Formel für das Monopolmoment.

$$\Phi_{el}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$
$$Q = \Sigma_i q_i$$

- Wie lautet der Dipolbeitrag zum Potential, inklusive Formel für das Dipolmoment?

$$\Phi_1(\vec{r}) = \frac{\vec{d}\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$
$$\vec{d} = \Sigma_i q_i \vec{r_i}$$

- Wie lautet der Quadrupolbeitrag zum Potential, inklusive Formel für den Quadtrupoltensor?

$$\Phi_2(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{2}\frac{r^k Q_{kl} r^l}{r^5}$$
$$Q_{kl} = \Sigma_i q_i (3r_k^{(i)} r_l^{(i)} - \delta_{kl} r_i^2)$$

- Wie berechnet man generell aus dem Potential das elektrische Feld?

$$-\vec{\nabla}\Phi = \vec{E}$$

(b) **Eindimensonaler Draht**: Wir betrachten einen eindimensionalen sehr langen Draht, der entlang der z-Achse ausgerichtet ist. Es fließe ein Strom I in z-Richtung.

- Geben Sie das E- und B-Feld an. (Formel)

$$\vec{E}(\vec{r}) = 0$$
$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho}\vec{e_\phi}$$

- Welche Kraft wirkt auf einen zweiten (zum ersten parallelen im Abstand d) Draht in dem ebenfalls der Strom I fließe? (Formel)

$$K(\mathscr{L}, \mathscr{L}') = \frac{\mu_0 I I' L}{2\pi d}\vec{e_x}$$

(c) **Elektrostatisches Potential**

- Welche Differenzialgleichung muss das skalare Potential bei gegebener Ladungsdichte erfüllen? (Beziehung und Formel)

$$\text{Poisson: } \Delta\Phi = -\frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$$

- Gegeben sei eine metallische Platte in der xy-Ebene. Welche Randbedingung für das Potential liefert sie für die obige Differentialgleichung und warum?

$$\Phi = \text{konstant}$$

$\vec{E}$ muss verschwinden, da sonst noch Kräfte in der Metallplatte wirken würden.

- Oberhalb der Ebene befinden sich einige Punktladungen. Wie kann man daraus eine partikuläre Lösung der obigen Differentialgleichung berechnen (Formel)?

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\Sigma_i \frac{q_i}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \tag{1}$$

- Wie erhält man dann generell die allgemeine Lösung und mit welchen Trick kann man die richtige Lösung auch konstruieren?

  Addition der allgemeinen Lösung der homogenen Differentialgleichung.
  Mit Spiegelladungen außerhalb des interessierden Bereiches eingesetzt in 1.

6.2 Maxwell-Gleichungen

(a) Wie lauten die beiden homogenen Maxwell-Gleichungen? (Formel)

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad \text{keine magnetischen Monopole}$$
$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \qquad \text{Faraday'sches Induktionsgesetz}$$

(b) Wie lauten die beiden inhomogenen Maxwell-Gleichungen? (Formel)

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \text{Gauß'sches Gesetz}$$
$$\nabla \times \vec{B} - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{j} \qquad \text{Ampere Maxwell'sches Gesetz}$$

(c) Welche speziellen Wellen erfüllen die Maxwell-Gleichungen im Vakuum? Wie stehen das E-Feld und B-Feld und die Ausbreitungsrichtung dieser Wellen zueinander?

Ebene Wellen. Die drei Vektoren stehen orthogonal aufeinander.

(d) Handelt es sich um transversale oder longitudinale Wellen?

Transversale

(e) Wie lautet die Dispersionsrelation (Formel)?

$$\omega = |\vec{k}|c$$

(f) Wellenleiter: Elektromagnetische Wellen sollen sich in einem Hohlleiter ausbreiten, der ein quadratisches Profil in xy-Richtung hat und in der z-Richtung unendlich ausgedehtn ist. Innerhalb des Leiters gibt es keine Ladungen und Ströme.

- Was versteht man unter TEM, TE, TM Wellen?

  Transversal im elektrischen und magnetischen Anteil,
  nur im elektrischen,
  nur im magnetischen.

- Gibt es TEM Wellen?

  Nein.

6.3 Jefimenko-Gleichungen

(a) Wie lautet die Jefimenko-Gleichung für das E-Feld?

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \int (\tfrac{\rho(\vec{r}',\tau_{ret})}{|\vec{r}-\vec{r}'|^2} \vec{e}_R + \tfrac{\dot{\rho}(\vec{r}',\tau_{ret})}{c|\vec{r}-\vec{r}'|} \vec{e}_R - \tfrac{\dot{\vec{j}}(\vec{r}',\tau_{ret})}{c^2|\vec{r}-\vec{r}'|} \vec{e}_R)\ dV'$$
$$\tau_{ret} = t - |\vec{r} - \vec{r}'|/c$$

(b) Wie lautet die Jefimenko-Gleichung für das B-Feld?

$$\vec{B}(\vec{r},t) = \tfrac{\mu_0}{4\pi} \int (\tfrac{\vec{j}(\vec{r}',\tau_{ret})}{|\vec{r}-\vec{r}'|^2} + \tfrac{\dot{\vec{j}}(\vec{r}',\tau_{ret})}{c|\vec{r}-\vec{r}'|}) \times \vec{e}_R\ dV'$$

(c) Welche Anteile dieser Gleichungen tragen zur elektromagnetischen Strahlung bei? Was ist die Bedingung hierfür?

Die Terme mit $\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$.

6.4 Relativistische Formulierung der Elektromechanik

(a) Geben Sie die Elemente der Feldtensoren $F^{\mu\nu}$ und $G^{\mu\nu}$ an. (Formel)

$$F^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{E_x}{c} & -\frac{E_y}{c} & -\frac{E_z}{c} \\ \frac{E_x}{c} & 0 & -B_z & B_y \\ \frac{E_y}{c} & B_z & 0 & -B_x \\ \frac{E_z}{c} & -B_y & B_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$G^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & -B_x & -B_y & -B_z \\ B_x & 0 & \frac{E_z}{c} & -\frac{E_y}{c} \\ B_y & -\frac{E_z}{c} & 0 & \frac{E_z}{c} \\ B_z & \frac{E_y}{c} & -\frac{E_x}{c} & 0 \end{bmatrix}$$

(b) Woraus besteht der Vierervektor J^μ der Stromdichte? (Formel)

$$J^\mu = (c\rho, \vec{j})$$

(c) Wie lauten damit die Maxwell-Gleichungen (Formel)?

$$\partial_\nu F^{\nu\mu} = \mu_0 J^\mu$$

(d) Argumentieren Sie, warum diese Gleichungen unter Lorentstransformation forminvariant ist.

J^μ ist ein Vierer-Vector und $F^{\nu\mu}$ ein Vierer-Tensore zweiter Stufe und es gilt bei der Transformation:

$$J^\nu = \overline{J}^{\nu'} \Lambda_{\nu'}^{\nu}$$
$$\text{und } F^{\nu\mu} = \overline{F}^{\nu'\mu'} \Lambda_{\nu'}^{\nu} \Lambda_{\mu'}^{\mu}$$
$$\text{und } \partial_\nu = \overline{\partial}_\alpha \Lambda_{\nu}^{\alpha}$$

Einsetzen in (c)

$$\overline{\partial}_\alpha \Lambda^\alpha_{\ \nu} \overline{F}^{\nu'\mu'} \Lambda_{\nu'}^{\ \nu} \Lambda_{\mu'}^{\ \mu} = \mu_0 \overline{J}^{\nu'} \Lambda_{\nu'}^{\ \mu}$$
$$\overline{\partial}_\alpha \overline{F}^{\nu'\mu'} \Lambda^\alpha_{\ \nu} \Lambda_{\nu'}^{\ \nu} \Lambda_{\mu'}^{\ \mu} = \mu_0 \overline{J}^{\nu'} \Lambda_{\nu'}^{\ \mu}$$
$$\text{mit } \Lambda^\alpha_{\ \nu} \Lambda_{\nu'}^{\ \nu} = \delta^\alpha_{\ \nu'}$$
$$\overline{\partial}_\alpha \overline{F}^{\alpha\mu'} \Lambda_{\mu'}^{\ \mu} = \mu_0 \overline{J}^{\nu'} \Lambda_{\nu'}^{\ \mu}$$

Multiplikation mit $\Lambda^\rho_{\ \mu}$ und Summation über μ ergibt

$$\overline{\partial}_\nu \overline{F}^{\nu\mu} = \mu_0 \overline{J}^\mu$$

(e) Geben Sie die Minkowski-Kraft K^μ für ein geladenes Teilchen im elektromagnetischen Feld an. (Formel)

$$K^\mu = qF^{\mu\nu} u_\nu$$

7 Lösungen zusätzliche Fragen der zweiten Klausur

7.1 Statik

(a) **Kondensator**: Ein Plattenkondensator unendlicher Ausdehnung in xy-Richtung habe die Flächenladungsdichten $+\sigma$ in der unteren Platte und $-\sigma$ in der oberen Platte. Die Flächennormale der Kondensatorplatte zeige in die z-Richtung. Die untere Platte befindet sich bei $z = 0$ und die obere bei $z = d$.

1.) Geben Sie das E- und B-Feld innerhalb und außerhalb des Kondensators an. (Formel)

$$\vec{E}_{\text{außen}} = 0$$
$$\vec{E}_{\text{innen}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{e}_z$$
$$\vec{B}_{\text{außen}} = 0$$
$$\vec{B}_{\text{innen}} = 0$$

2.) Welche Kraft wirkt in diesem Feld auf ein Teilchen der Ladung q. (Formel)

$$\vec{F} = \vec{E} q = \frac{\sigma q}{\epsilon_0} \vec{e}_z$$

3.) Geben Sie die potentielle Energie dieses Teilches als Funktion von z an. (Formel)

$$E_{\text{pot}} = -Q \int_\infty^r E(r)\ dr = -q \int_0^z \frac{\sigma}{\epsilon_0} dz\ E_{\text{pot}} = -qz \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

4.) Beschreiben Sie die Trajektorie des Teilchens, wenn es bei $z = 0$mit der Geschwindigkeit $\vec{v} = (v_x, 0, 0)$ startet.

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q = \frac{\sigma q}{\epsilon_0} \vec{e}_z$$

$$\vec{v} = \int \frac{\sigma q}{\epsilon_0} \frac{1}{m} \vec{e}_z dt = \frac{\sigma q}{\epsilon_0 m} t$$

$$\vec{r_z} = \int \vec{v}\ dt = \frac{\sigma q}{\epsilon_0} \frac{1}{2} t^2 \frac{1}{m} \vec{e}_z$$

Trajectory

$$\vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\sigma q}{2\epsilon_0 m} t^2 \vec{e}_z = \begin{pmatrix} v_x t \\ 0 \\ \frac{1}{2}\frac{q}{m}\frac{\sigma}{\epsilon_0} t^2 \end{pmatrix}$$

(b) Gleich wie in der vorhergehenden!

(c) Achtung! Gleiches Thema, andere Fragen!
Elektrostatisches Potential: 1.) Wie kann man aus den statischen Potential Φ das elektrische Feld $\vec{E}$ berechnen? (Formel)

$$-\vec{\nabla}\Phi = \vec{E}$$

2.) Wie lauten die Bestimmungsgleichungen für das Potential in einem Raumbereich V, in dem die Ladungsdichte $\rho(\vec{x})$ vorliegt. (Formel)

Helmholz Gleichung:

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int dV' \rho(\vec{r}') \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

3.) Wie können hierbei Randbedingungen berücksichtigt werden? (Formel)

Potential Randbedingungen auf einer Metaloberfläche:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla}\Phi = \frac{\gamma(\vec{r})}{\epsilon_0}, \qquad \Phi = \text{const.}$$

4.) Wodurch entstehen diese Randbedingungen?

Entweder Potential konstant und bekannt (Dirichlet), oder Flächenladungsdichte bekannt und dann Berechnung über Normalableitung (von Neumann).
Nebenbedingungen:
Kommen aus den Stetigkeitsbedingungen: $\vec{E}^1_{||} = \vec{E}^2_{||}$ und $\vec{E}^1_n \neq \vec{E}^2_n$; Normalkomponente hat eine Unstetigkeit, diese ist proportional zu γ. Über Gauß'sches Kästchen folgt:

$$\vec{n}\nabla\Phi = \frac{\gamma(\vec{r})}{\epsilon_0}$$

7.2 Maxwell-Gleichungen

(a) und (b) gleich, Rest anders:

1.) Welche Gleichungen müssen die Felder E, B in Raumbereichen erfüllen, in denen keine Ladungen und Ströme vorliegen. (Formel)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$\rightarrow$ Wenn schon Felder da sind, so halten diese sich gegenseitig am Leben.

2.) Wie lauten hierfür die funkdamentalen Lösungen? (Formel)

$$\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \Delta \vec{E}$$
$$\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \Delta \vec{B}$$

Lösung durch homogene Helmholzgleichung:

$$\Delta \vec{X}(\vec{r}, \omega) + \mu \epsilon \omega^2 X(\vec{r}, \omega) = 0$$

Ergibt eine Lösung mit folgenden Ansatz:

$$\vec{X}(\vec{r}, \omega) = \vec{X}_0(\vec{k}, \omega) e^{i \cdot \vec{k} \cdot \vec{r}}$$

3.) Wie erhält man daraus die allgemeine Lösung? (Formel)

Über addieren der homogenen mit einer Partikulären Lösung.

4.) **Maxwell-Gleichungen in Materie:** Die Ladungsdichte und die Stromdichte werde zerlegt in gebundene und freie Anteile. Die Einflüsse der gebundenen Ladungsträger werde in den Hilfsfeldern $\vec{P}$ und $\vec{M}$ berücksichtigt.

- Wie lauten dann die inhomogenen Maxwell-Gleichungen? (Formel)

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad \text{mit} \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} + \vec{P}$$
$$\nabla \cdot \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = j_f \quad \text{mit} \quad \vec{H} = \frac{\mathcal{B}}{\mu_0} + \vec{M}$$

- Was ist die physikalische Bedeutung von $\vec{P}$ und $\vec{M}$?

$$\text{Polarisation: } \vec{P} = \frac{\text{elektrisches Dipolmoment in} \Delta V}{\Delta V}$$
$$\text{Magnetisierung: } \vec{M} = \frac{\text{magnetisches Dipolmoment in} \Delta V}{\Delta V}$$

- Was versteht man unter linearen Medien?

In einem linearen Medium gilt:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{und} \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

7.3 Quasistationäre Ströme

Neues Thema! 1.) Wodurch ist der Spannungsabfall an einer Spule gegeben? (Formel) (Kondensator auch gleich, 'just in case')

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int I \, dt$$

$$U_R = R\ I$$

2.) Erklären Sie qualitativ anhand der Maxwell-Gleichungen wie es dazu kommt.

$$U_{ind} = -\tfrac{d\Phi}{dt} = -L\tfrac{dI}{dt} \qquad \text{(Faraday)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \Phi = \int \vec{B}\ d\vec{A} = LI$$

Durch die Änderung im Magnetfeld, bedingt duch die Spule, entsteht eine Induzierte Spannung.

3.) Erklären Sie anhand der Maxwell-Gleichungen die Kirchhoff'schen Knoten- und Maschenregel.

gebundene Ströme: $\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_b = 0$ // nur für nicht statiäre / quasistationäre Ströme!

$$\rightarrow\ 0 = \int_V \vec{\nabla}\vec{j}_b\ dV = \oint_{\partial V} \vec{j}_b d\vec{f} \rightarrow 0 = \sum_i \int_{F_i} \vec{j}_b d\vec{f} = \sum_i I_i$$

Maschenregel aus: $\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial B}{\partial t}$

$$\rightarrow \int_F (\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{E}})\ d\vec{f} = \oint_S \vec{\mathcal{E}}\ d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_F \vec{B} \cdot d\vec{f} = -\frac{d}{dt}\Phi(F) = 0$$

Das letzte Gleichheitszeichen gilt nur wenn kein Zeitlich veränderliches Magnetfeld vorliegt!

$$\rightarrow \sum_i \int_{a_i}^{b_i} \vec{\mathcal{E}}\ d\vec{s} = 0$$

4.) In einem Schwingkreis befindet sich in Serie ein Ohm'scher Widerstand, ein Kondensator (C) und eine Spule (L). Durch diese Anordnung fließe ein Wechselstrom. Erklären Sie für jedes Bauelement, ob es dem Schwingkreis im Mittel Energie entzieht und begründen Sie die Antwort physikalisch.

Es gilt: $P_{eff} = I_{eff}\ U_{eff}\ \cos(\phi)$

<u>Ohmscher Widerstand</u> $\phi = 0\ \rightarrow\ P_{eff} = I_{eff}\ U_{eff}$
Gibt Energie als Wärme ab.

<u>Spule</u> $\phi = \frac{\pi}{2}\ \rightarrow\ P_{eff} = 0$
Die Spule gibt keine Wärme ab. Sie speichert Energie im aufbauenden Magnetfeld und gibt diese dann wieder an den Stromkreis ab.

Kondensator $\phi = -\frac{\pi}{2} \;\rightarrow\; P_{eff} = 0$
Gleich wie Spule. Energie geht hier aber ins aufbauende $\vec{E}$-Feld und wird dann wieder abgegeben.

Jeffimenko und Relativistik die gleichen Fragen.