Sabine Klapp

Sprechstunde Di 12.15 – 13.00
klapp@physik.tu-berlin.de

Mi 12.15 – 13.45 (EW 202)
Fr. 8.30 – 10.00 (EW 203)

Übungszettel: Ausgabe Mittwoch
Abgabe jeweils 2 Wochen später im Briefkasten (Altbau)

Schein-Unterz.: 50 % Ü-Zettel
Vorrechnen!

Homepage: ~~http~~ http://www.itp.tu-berlin.de/menue/lehre

Theoretische Physik III: Elektrodynamik

Inhalte (in loser Reihenfolge)

- Einführung
- Elektrostatik: ruhende elektrische Ladungen, statische elektr. Felder
- Magnetostatik: Zeit-konstante Ströme, statische magnet. Felder
- Zeitabhängigen elektr. und magnet. Phänomene
  Maxwellgleichungen

- Elektrodynamik in Materie:
- Spezieller Relativitätstheorie, relativist. Formulierung der Elektrodynamik

Literatur:

- J.D. Jackson: Klassische Elektrodynamik (Standardwerk)
- W. Nolting: Grundkurs der Theoret. Physik $\underline{\underline{III}}$

Weitere Bücher s. Homepage der Veranstaltung!

I. Vorbemerkungen

„Definition":

Elektrodynamik ist ein Teilgebiet der Physik, ~~dass~~ das sich mit (bewegten) elektrischen Ladungen und mit (zeitl. veränderlichen) elektrischen und magnet. Feldern beschäftigt"

I.1. Wichtige historische Stationen

- 1785 C.A. Coulomb

→ Coulomb'sche Gesetz:
Kraft zwischen zwei kugelsymmetrischen
elektr. Ladungen
→ Basis der Elektrostatik

- frühes 19. Jahrhundert:
J.B Biot, F. Savart
(1774-1862) (1791-1841)

→ Biot-Savart-Gesetz:
Zusammenhang zwischen elektrischem Strom und
dem entsprechenden (statischen) Magnetfeld
→ Basis der Magnetostatik

1831 M. Faraday (1791-1867)

→ Faraday'sche Induktionsgesetz:

Entstehung elektrischer Spannung durch
Änderung des magnetischen Flusses Feldes

1861-1864: J.C. Maxwell

→ Maxwell'sche Gleichungen

→ Grundgleichungen der Elektrodynamik
(Bewegungsgleichungen für elektromagnetische Felder)

<u>ca. 1880</u> : H. A. Lorentz (1853–1928)

→ Lorentzkraft :

Kraft, die ein elektromagnet. Feld auf eine Ladung ausübt

→ Lorentz-Transformation

(→ spezielle Relativitätstheorie)

1902 : Nobelpreis Physik zusammen mit P. Zeeman

Einfluss des Magnetismus auf Strahlungsphänomene

<u>1886</u> : H. Hertz (1857–1894)

Erzeugung und Nachweis elektromagnet. Welle

• 1905 Albert Einstein (1879–1955)

→ Spezielle Relativitätstheorie

(Maxwellgleichungen in bewegten Bezugsystemen)

<u>Weiterentwicklungen</u> :

• ca. 1940 Quantenelektrodynamik (QED)

→ Quantenfeldtheoret. Beschreibung des Elektromagnetismus

z.B. Erzeugung von Teilchen durch elektromagnet. Felder

1965: ~~Nobel~~ Nobelpreis Physik: R. Feynman, J. Schwinger, S. Tomonaga

Weitere wichtige Beiträge: Arbeiten von Dirac, Heisenberg

70-er Jahre

Vereinheitlichung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung

Hintergrund: Es gibt 4 fundamentale Wechselwirkungen (WW) in der Physik.

Stärke ↓ — Reichweite ↑

- Gravitations-WW
- elektromagnet. WW
- schwache WW
- starke WW

schwache WW: verantwortl. für best. Zerfalls~~akt~~prozesse (β-Zerfall)

starke WW: Bindung zw. Quarks

I.2. Elektrodynamik als Feldtheorie

Die wesentl. Größen zur Beschreibung elektromagnet. Phänomene sind die (Vektor-) Felder

$\underline{E}(\underline{r}, t)$ elektrische Feld

$\underline{B}(\underline{r}, t)$ magnetische Feld

Ort, Zeit

→ Elektrodynamik ist eine Feldtheorie !

Dies ist anders als in der klass. Mechanik (Bewegung von Massenpunkte) und in der Quantenmechanik (Dynamik von quantenmechanische Zuständen im Hilbertraum)

⇒ Es ist für die Theorie der Elektrodynamik wichtig, sich mit Vektoranalysis zu beschäftigen!

z.B. Divergenz, Rotation, Integralsätze

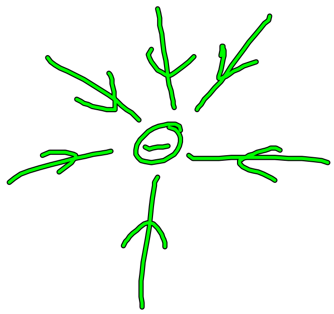
ausführl. Behandlung in der VL „Mathematische Methoden" bzw. in Büchern

hier: kurze Wiederholung der wesentl. Begriffe gegeben: Vektorfeld $\underline{A}(\underline{r},t)$

Darstellung zu einer bestimmten Zeit t durch „Feldlinien"

→ lokale Richtung des Feldes

z.B. elektr. Feld einer Punktladung:



räumliche

Ableitungen von Feldern:

• Sei speziell $\underline{A}(\underline{r},t)$ ein Skalar, also $\underline{A}(\underline{r},t) \to \varphi(\underline{r},t)$

skalares Feld

Frage: Wie ändert sich φ mit $\underline{r}$?

Antwort: Betrachte Richtungsableitung (Gradient)

$$\nabla \varphi(\underline{r}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{pmatrix}$$

in kartesischen Koordinaten

Nabla-Operator

• Sei nun $\underline{A}(\underline{r},t)$ ein „richtiger" Vektor

1. Frage: „Quellen" die Feldlinien aus dem Punkt $\underline{r}$ heraus oder „versinken" sie in diesem Punkt

Antwort: Berechne die sogenannte Quelldichte von $\underline{A}$ am Punkt $\underline{r}$ $\hat{=}$ Divergenz von $\underline{A}$

Definition
betrachte eine feste Zeit t

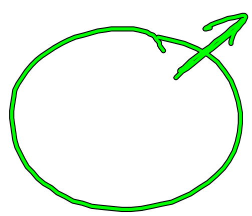
$$\operatorname{div} \underline{A}(\underline{r}) := \lim_{\Delta V \to 0} \frac{1}{\Delta V} \underbrace{\oint_{F_{\Delta V}} d\underline{F} \cdot \underline{A}(\underline{r}')}_{\text{„Fluss" von } \underline{A} \text{ durch die Oberfläche } F_{\Delta V}}$$

Integral über die geschlossene Oberfläche eines kleinen Volumens ΔV

$$d\underline{F} = dF \, \underline{n}(\underline{r}')$$

Normalenvektor (Einheitsvektor, zeigt nach außen)

Interpretation
⇒ die Divergenz ist ein Maß für die durch die Oberfläche $F_{\Delta V}$ stoßenden Feldlinien

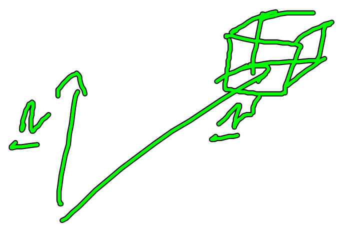


ΔV

beachte: Die Divergenz ist ein Skalar!

weitere Folgerungen aus der Definition:

— Auswertung für einen Würfel in kartesische Koordinaten



man findet

$$\operatorname{div} \underline{A}(\underline{r}) = \frac{\partial A_x(\underline{r})}{\partial x} + \frac{\partial A_y(\underline{r})}{\partial y} + \frac{\partial A_z(\underline{r})}{\partial z}$$

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} \qquad = \nabla \cdot \underline{A}(\underline{r})$$

$$= \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}$$

- Wende die Definition auf eine Vielzahl miteinander verbundener Flächen an

$$\Rightarrow \oint_{F_V} d\underline{F} \cdot \underline{A}(\underline{r}) = \int_V dV \operatorname{div} A(\underline{r})$$

$\boxed{\text{Gauß'sche Integralsatz}}$

geschlossene Oberfläche über das Gesamtvolumen

$$V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 + \ldots$$

$$F_V = F_{\Delta V_1} + F_{\Delta V_2} + \ldots$$

→ verknüpft ein Volumenintegral über die Divergenz des Feldes mit dem Oberflächenintegral über das Feld an sich!

Beispiel für Wichtigkeit der Divergenz

$$\operatorname{div} \underline{E}(\underline{r},t) = \nabla \cdot \underline{E}(\underline{r},t)$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_0}\,\rho(\underline{r},t)$$

gesamte Ladungsdichte am Ort $\underline{r}$

man sagt:

Das elektr. Feld ist ein „Quellenfeld".
Die Quellen sind die elektrische Ladungen

2. Frage: (zu einem gegebenen Vektorfeld $\underline{A}(\underline{r})$)

Bilden die Feldlinien am Ort $\underline{r}$ ein Wirbel?

Antwort: Berechne die sogenannte „Wirbeldichte" von $\underline{A}$ am Ort $\underline{r}$

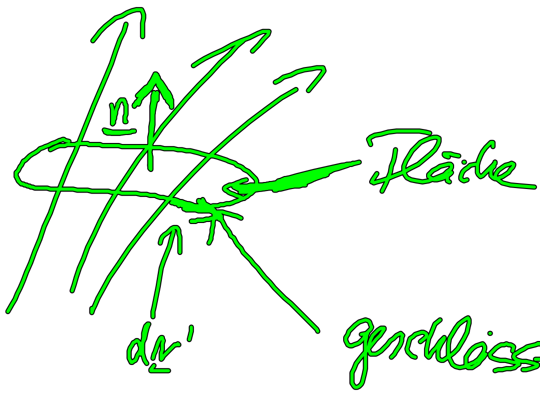
(Rotation!

Definition:

$$\operatorname{rot} \underline{A}(\underline{r}) \cdot \underline{n} = \lim_{\Delta F \to 0} \frac{1}{\Delta F} \oint_{C_{\Delta F}} d\underline{r}' \cdot \underline{A}(\underline{r}')$$

geschlossenes Kurvenintegral über Kurve $C_{\Delta F}$

$d\underline{r}'$, Wegelement



beachte: die Kurve bildet Rechtskurve um $\underline{n}$

Folgerungen

- Auswertung in kartesischen Koordinaten (mit $C_{\Delta F}$ ein Rechteck)

$$\operatorname{rot} \underline{A}(\underline{r}) = \nabla \times \underline{A}(\underline{r}) = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}$$