

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)

Übungszeitel: Ausgabe Mittwoch
Abgabe jeweils 2 Wochen später im Briefkasten
(A11bau)

Schein-Unterricht: 50 % Ü-Zettel
Verwenden!

Homepage: ~~http~~ <http://www.ifp.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 III

Weitere Bücher s. Homepage der Veranstaltung:

I. Vorbemerkungen

"Definition":

Elektrodynamik ist ein Teilgebiet der Physik, das sich mit (bewegten) elektrischen Ladungen und mit (zeitveränderlichen) elektrischen und magnet. Feldern beschäftigt

I.1. Wichtige historische Stationen

- 1785 C.A. Coulomb

→ Coulomb'sche Gesetz :

Kraft zwischen zwei kugelsymmetrischen
elktr. ~~q~~ Ladungen

→ Basis der Elektrostatik

• frühes 19. Jahrhundert:

J.B. Biot, F. Savart

(1774-1862) (~~1791~~ 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)

ca. 1880 : 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)

1886 : H. Hertz (1857-1894)

Erzeugung und Nachweis elektromagnet. Wellen

• 1905 Albert Einstein (1879-1955)

→ spezielle Relativitätstheorie

(Maxwellgleichungen in bewegten Bezugssystemen)

Weiterentwicklung :

• ca. 1940 Quantenelektrodynamik (QED)

→ Quantenfeldtheorie. Beschreibung des Elektromagnetismus

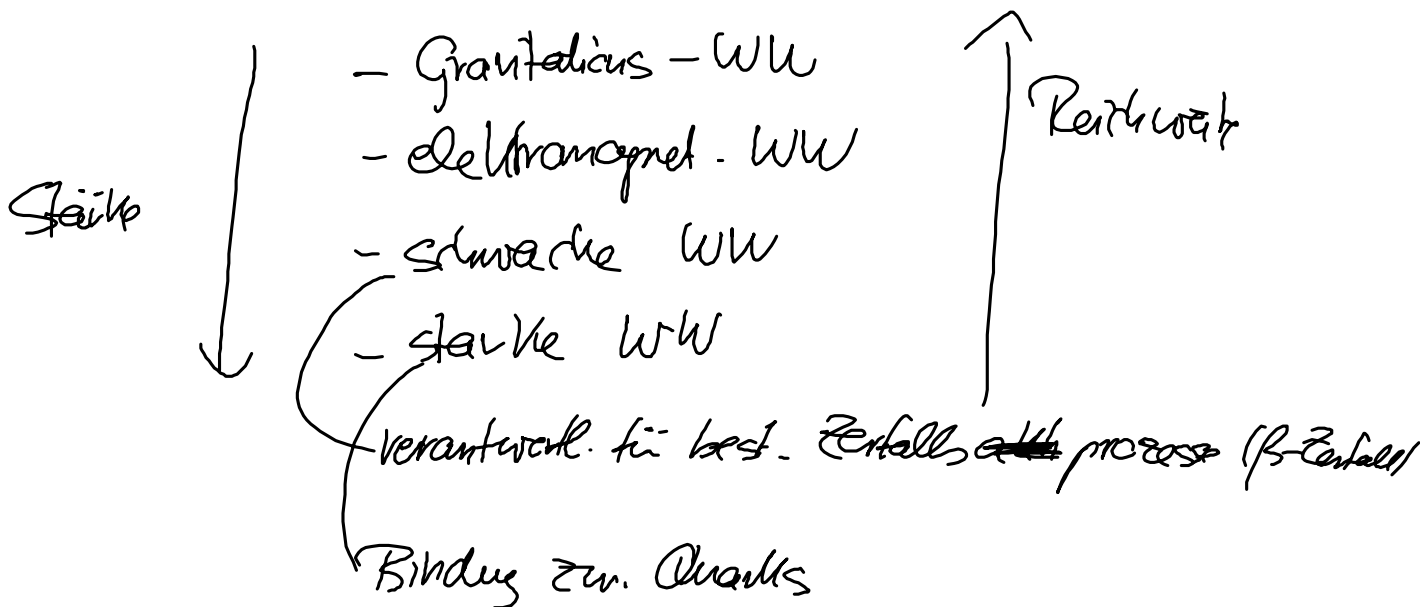
z.B. Erzeugung von Teilchen durch elektromagnet. Felder

Weitere 1965 = ~~Halle~~ Nobelpreis Physik: R. Feynman, J. Schwinger, S. Tomonaga
Wichtige Beiträge = Arbeiten von Dirac, Heisenberg

70-er Jahre

Vereinheitlichung des elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung

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



I.2. Elektrodynamik als Feldtheorie

Drei wesentl. Größen zur Beschreibung elektromagnet. Phänomene sind die (Vektor-)felder

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

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

\uparrow \uparrow
Ort Zeit

→ Elektrodynamik ist eine Feldtheorie!

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

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

z.B. Divergenz, Rotation, Integralsätze

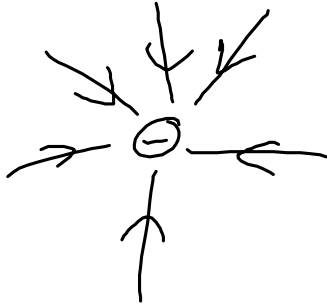
ausführl. Behandlung in der VL „Mathematische Methoden“ bzw. in Büchern

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 $\underline{A}(\underline{r}, t) \rightarrow \varphi(\underline{r}, t)$
Skalarfeld

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

Antwort: Betrachte Richtungsableitung (Gradient)

Nabla-Operator $\nabla \varphi(\underline{r}) \vec{=}$ $\begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{pmatrix}$ in kartesischen Koordinaten

• 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 $\underline{r} \stackrel{!}{=} \text{Divergenz von } \underline{A}$

Definition
 betrachte eine feste Zeit t

$$\text{div } \underline{A}(\underline{r}) := \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_{\overline{\Delta V}} d\underline{F} \cdot \underline{A}(\underline{r}') \quad \text{Fluss von } \underline{A} \text{ durch die Oberfläche } \overline{\Delta V}$$

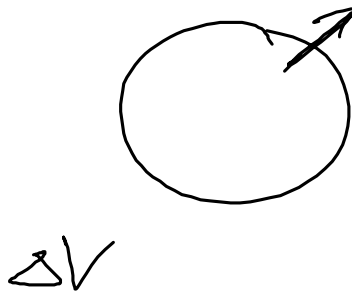
Integral über die geschlossene Oberfläche eines kleinen Volumens ΔV

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

(Normalenvektor
 (Einheitsvektor, zeigt nach außen))

Interpretation
 \Rightarrow die Divergenz
 ist ein Maß

für die durch
 die Oberfläche $\overline{\Delta V}$
 strömenden
 Feldlinien

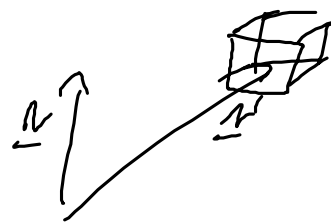


beachte: Die Divergenz ist ein Skalar!

Weitere

Folgerungen aus der Definition:

— Auswertung für einen Würfel
 in kartesischen Koordinaten



man findet

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

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \nabla \cdot \underline{A}(\underline{r}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}$$

- Wende die Definition auf eine Vielzahl miteinander verbundener Flächen an

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

geschlossene Oberfläche
 über das Gesamtvolumen

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

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

Gauß'sche
 Integralsatz

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

Beispiel für Wichtigkeit der Divergenz

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

$$= \frac{1}{\epsilon_0} \rho(\underline{r}, t)$$

↑
gesamte Ladungsdichte
am Ort \underline{r}

man sagt:

Das elektr. Feld ist ein „Quellenfeld“.

Die Quellen sind die elektrische Ladungen.

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

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

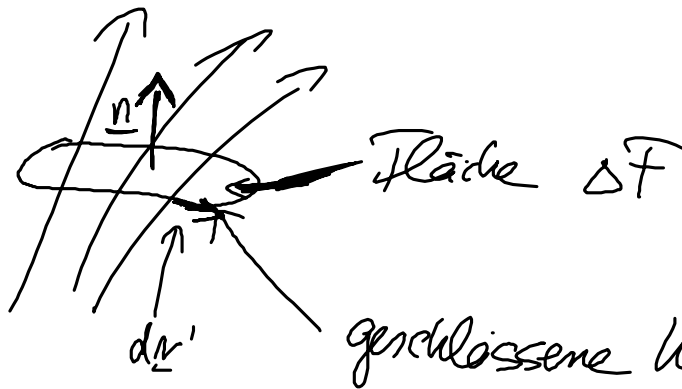
Antwort: Berechne die sogenannte „Wirbel dichte“
von \underline{A} am Ort \underline{r}

(
Rotation !

Definition:

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

geschlossenes Kurvenintegral über Kurve $C_{\Delta F}$
 $d\underline{r}'$, Wegedelement



geschlossene Kurve $C_{\Delta F}$ um die Fläche ΔF

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

Folgerungen

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

$$\begin{aligned} \text{rot } \underline{A}(\underline{r}) &= \nabla \times \underline{A}(\underline{r}) \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} \end{aligned}$$