

# physik321 | Notizen

Jonas Wortmann

November 7, 2023

# Contents

<b>1</b>	<b>Überblick Elektrodynamik</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Statische Felder</b>	<b>4</b>
2.1	Elektrostatik . . . . .	4
2.1.1	Coulomb'sche Gesetz . . . . .	5
2.1.2	Das elektrische Feld . . . . .	5
2.1.3	Beispiel: Homogen geladene Kugel . . . . .	6
2.2	Mittlere Quelldichte – Satz von GAUSS . . . . .	7
2.2.1	Beispiel: Bestimmung von $E$ mit GAUSS'schem Satz . . . . .	9
2.3	Integraldarstellung – Satz von STOKES . . . . .	10
2.4	Punktladungen . . . . .	11
2.4.1	Beispiel: Kugeloberfläche . . . . .	11
2.5	Feldverhalten an Grenzflächen . . . . .	11
2.5.1	GAUSS'sche Fläche . . . . .	11
2.5.2	STOKES'sche Fläche . . . . .	12
2.6	Elektrostatische Feldenergie . . . . .	12
2.6.1	Energie von $N$ Punktladungen . . . . .	12
2.6.2	Beispiel: 2 Punktladungen . . . . .	13
2.7	Multipolentwicklung . . . . .	14
2.8	Randwertproblem in der $E$ -Statik . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Green'sche Funktion</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Kugelflächenfunktion</b>	<b>16</b>
4.1	Entwicklung von Funktionen . . . . .	17
4.2	Lösung der LAPLACE-Gleichung . . . . .	17
4.3	Beispiel: Ladung einer Hohlkugel . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Dielektrika</b>	<b>19</b>
5.1	Makroskopische Feldgrößen . . . . .	19
5.2	Randwertprobleme . . . . .	20
5.3	Beispiel: Grenzfläche . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Magnetostatik</b>	<b>22</b>
6.1	Beispiel: Draht mit verschiedenen Querschnittsflächen; KIRCHHOFF'sche Knotenregel . . . . .	23
6.2	Elektrische Leitfähigkeit und Leistung . . . . .	23
6.3	Grundgleichungen . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Delta-Distribution</b>	<b>26</b>

<b>8</b>	<b>Flächenintegrale</b>	<b>27</b>
8.1	Beispiel: Kugeloberfläche . . . . .	27

# 1 Überblick Elektrodynamik

Das Ziel ist die Untersuchung der Ursache und Wirkung von elektrischen ( $\vec{E}$ ) und magnetischen ( $\vec{B}$ ) Feldern auf elektrische Ladungen ( $q$ ).

Aus der experimentellen Beobachtung ist bekannt, dass auf elektrisch geladene Körper eine elektromagnetische Kraft

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right), \quad (1.1)$$

mit  $\vec{v}$  der Geschwindigkeit des geladenen Teilchens, wirkt. Diese Kraft führt zu einer Bewegungsänderung

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right]. \quad (1.2)$$

Der Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern und (bewegten) Ladungen sind die **Maxwell–Gleichungen**

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad c^2 \operatorname{rot} \vec{B} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\vec{j}}{\varepsilon_0}. \quad (1.4)$$

Zusammen mit Randbedingungen an **Grenzflächen** bestimmen sie alle Effekte der Elektrodynamik.

## 2 Statische Felder

Die MAXWELL-Gleichungen für statische Felder sind

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \operatorname{rot} \vec{E} = 0 \qquad (2.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \qquad c^2 \operatorname{rot} \vec{B} = \frac{\vec{j}}{\varepsilon_0}. \qquad (2.2)$$

Man kann sehen, dass die Gleichungen für statische Felder entkoppeln und sie sich in **Elektrostatik** und **Magnetostatik** aufteilen.

### 2.1 Elektrostatik

Die Grundgrößen der klassischen Mechanik sind die Masse, Länge und Zeit. Eine wichtige Grundgröße in der Elektrostatik ist die elektrische Ladung. Aus der experimentellen Beobachtung ist bekannt, dass Körper in einen elektrischen Zustand versetzt werden können (z.B. können geladene Körper andere geladene Körper anziehen). Dieses Phänomen ist mechanisch nicht erklärbar. Dieser Zustand ist auch auf andere Körper übertragbar, woraus folgt, dass es sich um eine substanzartige Größe handeln muss.

Diese Größe ist die **elektrische Ladung**  $q$ . Bei der Übertragung fließt ein elektrischer Strom  $I$ . Die Ladung des Elektrons ist negativ, also  $q < 0$ . Zudem ist sie additiv, es existiert also die Gesamtladung  $Q = \sum_i q_i$ . In abgeschlossenen Systemen ist die Summe aus positiven und negativen Ladungen konstant. Die Ladungen sind **gequantelt**, es existiert also eine nicht teilbare Elementarladung  $e$ , also gilt immer, dass  $q = n \cdot e, n \in \mathbb{Z}$

Elektron :  $n = -1$

Proton :  $n = +1$

Neutron :  $n = 0$

Atomkern :  $n = Z$ .

In der Elektrodynamik wird dieses Prinzip allerdings verallgemeinert. Man führt die Ladungsdichte  $\rho(\vec{r})$  ein, also  $Q = \int_V \rho(\vec{r}) \, d^3r$ . Für Punktladungen gilt dann  $\rho(\vec{r}) = q\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$ .

Befinden sich zwei Ladungen  $q_1$  und  $q_2$  im Abstand von einem Meter im Vakuum, dann wirkt eine Kraft von

$$F = \frac{10^{12}}{4\pi \cdot 8,854} \text{ N}. \qquad (2.3)$$

Dann haben  $q_1$  und  $q_2$  eine Ladung von  $|q_1| = |q_2| = 1 \text{ C}$ . Die Elementarladung ist  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

### Stromdichte

Für bewegte Ladungen existiert die Stromdichte  $\vec{j}$ . Sie gibt die Ladung pro Zeiteinheit durch eine Flächeneinheit senkrecht zur Stromrichtung an. Betrachte als Beispiel eine homogene Ladungsverteilung von  $N$  Teilchen mit Ladung  $q$  und Geschwindigkeit  $\vec{v}$ , dann ist die Ladungsdichte  $\vec{j} = \frac{N}{V} q \vec{v}$ . Die Stromstärke  $I$  ist dann  $I = \int_{\mathcal{F}} \vec{j}(\vec{r}) \cdot d\vec{f} = \int_{\mathcal{F}} \vec{j}(\vec{r}) \cdot \vec{n}(\vec{r}) \, df$ . Die Einheit ist 1 A, was einem Ladungstransport von 1 C in einer Sekunde entspricht.

### Ladungserhaltung

Die Ladungserhaltung kann mit Hilfe der **Kontinuitätsgleichung** beschrieben werden

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{j}. \quad (2.4)$$

#### 2.1.1 Coulomb'sche Gesetz

Zwei Ladungen  $q_1$  und  $q_2$  befinden sich im Abstand  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$  zum Ursprung. Der Abstand zwischen diesen Ladungen ist  $\vec{r}_{12}$ . Dieser Abstand soll viel größer sein also die Ausdehnung von  $q_1$  und  $q_2$ . Die Kraft zwischen diesen Ladungen ist

$$\vec{F}_{12} = k q_1 q_2 \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} = -\vec{F}_{21}. \quad (2.5)$$

Sie ist also direkt proportional zu  $q_1$  und  $q_2$ ,  $|\vec{F}_{12}| \propto |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^{-2}$ , sie wirkt entlang von  $\vec{r}_{12}$ . Diese Kraft gilt nur für **ruhende** Ladungen.

### Experimentelle Tatsachen

Die Proportionalitätskonstante ist  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ .

Das Superpositionsprinzip erlaubt es die Kraft auf mehrere Ladungen zu berechnen

$$\vec{F}_1 = k q_1 \sum_{j=2}^n q_j \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_j}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_j|^3}. \quad (2.6)$$

#### 2.1.2 Das elektrische Feld

Das elektrische Feld, bzw. die Feldlinien, erlauben eine Abstraktion der Kraftwirkung. Für Punktladungen ist das Feld

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^n q_j \frac{\vec{r} - \vec{r}_j}{|\vec{r} - \vec{r}_j|^3}. \quad (2.7)$$

Für kontinuierliche Ladungsverteilungen gilt

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \rho(r') \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}. \quad (2.8)$$

Der Integrand kann umgeschrieben werden als

$$\frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = -\vec{\nabla} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}, \quad (2.9)$$

also ist  $\vec{E}$  ein Gradientenfeld des skalaren Potentials

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r' \quad \vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}). \quad (2.10)$$

Die Poisson-Gleichung ist

$$\operatorname{div} \vec{E} = -\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (2.11)$$

Die Lösung dieser Gleichung ist das Grundproblem der Elektrostatik.

Die Äquipotentialflächen sind konstant, also  $\varphi(\vec{r}) = \text{const.}$ . Die Coulomb-Kraft ist konservativ  $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ . Da die Kraft  $\vec{F} = -\vec{\nabla}V$  ist das Potential  $V(\vec{r}) = q\varphi(\vec{r})$ .

Das Linienintegral über  $\vec{E}$  ist wegababhängig

$$\varphi(\vec{r}) - \varphi(\vec{r}_0) = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}(\vec{r}') d\vec{r}' = U(\vec{r}, \vec{r}_0). \quad (2.12)$$

Für  $n$  Punktladungen gilt

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \frac{\sum_{j=1}^n q_j \delta(\vec{r}' - \vec{r}_j)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad \rho(\vec{r}) = \sum_{j=1}^n q_j \delta(\vec{r} - \vec{r}_j). \quad (2.13)$$

### 2.1.3 Beispiel: Homogen geladene Kugel

Der Ursprung wird in das Zentrum der geladenen Kugel mit Radius  $R$  gelegt. Eine Probeladung befindet sich im Abstand  $\vec{r}$  zum Zentrum. Die Ladungsdichte der Kugel ist

$$\rho(\vec{r}') = \begin{cases} \rho_0 & \text{für } |\vec{r}'| = r' \leq R \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (2.14)$$

Das Potential ist dann

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{\mathcal{K}(R)} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r' \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \int_0^R r'^2 dr' \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^\pi \sin\theta' d\theta' \frac{1}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos\theta'}} \\ &= \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} 2\pi \int_0^R r'^2 dr' \frac{1}{rr'} \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos\theta'} \Big|_0^\pi \\ &= \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi}{r} \int_0^R r' dr' [|r + r'| - |r - r'|] \\ &= \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi}{r} \int_0^R dr' \begin{cases} 2rr' & , r \leq r' \\ 2r'^2 & , r > r' \end{cases}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Für  $\vec{r}$  außerhalb von  $\mathcal{K}(R)$ , also  $r > R$

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi}{r} \int_0^R 2r'^2 dr' = \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{4\pi R^3}{3} \frac{1}{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}. \quad (2.17)$$

Für  $\vec{r}$  innerhalb von  $\mathcal{K}(R)$ , also  $r < R$

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi}{r} \left[ \int_0^r 2r'^2 dr' + \int_r^R 2rr' dr' \right] = \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi}{r} \left[ \frac{2r^3}{3} + r(R^2 - r^2) \right] \quad (2.18)$$

$$= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} (3R^2 - r^2) \frac{1}{2R^3}. \quad (2.19)$$

Das elektrische Feld außerhalb ( $r > R$ ) bzw. innerhalb ( $r < R$ ) ist

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \vec{\nabla} \frac{1}{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3} \quad \vec{E}(\vec{r}) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{2R^3} \vec{\nabla} (3R^2 - r^2) \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r}{R^3} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \\ &= \frac{Q(r)}{4\pi\epsilon_0} \frac{r^3}{R^3} \frac{\vec{r}}{r^3}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

## 2.2 Mittlere Quelldichte – Satz von Gauss

Sei ein Volumen mit den Kanten  $\Delta x, \Delta y$  und  $\Delta z$ . Der Mittelpunkt ist  $\vec{r}_0(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ . Die Flächennormalen sind  $\Delta \vec{f}_1, \dots, \Delta \vec{f}_6$  ( $\vec{f}_1$  zeigt entlang der  $\Delta x$ -Achse)

$$\Delta \vec{f}_1 = \Delta y \Delta x \vec{e}_x = -\Delta \vec{f}_2 \quad (2.22)$$

$$\Delta \vec{f}_3 = \Delta x \Delta z \vec{e}_y = -\Delta \vec{f}_4 \quad (2.23)$$

$$\Delta \vec{f}_5 = \Delta x \Delta y \vec{e}_z = -\Delta \vec{f}_6. \quad (2.24)$$



Das elektrische Feld, welches den Quader durchsetzt ist

$$\oint \vec{E}(\vec{r}) \, d\vec{f} = \iint dy \, dz \left[ E_x \left( x_0 + \frac{\Delta x}{2}, y, z \right) - E_x \left( x_0 - \frac{\Delta x}{2}, y, z \right) \right] \quad (2.25)$$

$$+ \iint dx \, dz \left[ E_y \left( x, y_0 + \frac{\Delta y}{2}, z \right) - E_y \left( x, y_0 - \frac{\Delta y}{2}, z \right) \right] \quad (2.26)$$

$$+ \iint dx \, dy \left[ E_z \left( x, y, z_0 + \frac{\Delta z}{2} \right) - E_z \left( x, y, z_0 - \frac{\Delta z}{2} \right) \right]. \quad (2.27)$$

Mit Hilfe einer Taylorentwicklung (da  $\Delta x, \Delta y$  und  $\Delta z$  klein sind),

$$= \int dy \, dz \left( \frac{\partial E_x}{\partial x} (x_0, y, z) \Delta x + \mathcal{O}(\Delta x^3) \right) \quad (2.28)$$

$$+ \int dx \, dz \left( \frac{\partial E_y}{\partial y} (x, y_0, z) \Delta y + \mathcal{O}(\Delta y^3) \right) \quad (2.29)$$

$$+ \int dx \, dy \left( \frac{\partial E_z}{\partial z} (x, y, z_0) \Delta z + \mathcal{O}(\Delta z^3) \right). \quad (2.30)$$

Der Mittelwertsatz der Integralrechnung besagt

$$\frac{1}{\Delta V} \oint_{S(V)} \vec{E} \, d\vec{f} = \partial_x E_x(x_0, y_1, z_1) + \mathcal{O}(\Delta x^2) \quad (2.31)$$

$$+ \partial_y E_y(x_2, y_0, z_2) + \mathcal{O}(\Delta y^2) \quad (2.32)$$

$$+ \partial_z E_z(x_3, y_3, z_0) + \mathcal{O}(\Delta z^2). \quad (2.33)$$

Der Limes von  $\Delta V \rightarrow 0$  gibt dann

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_{S(V)} \vec{E} \, d\vec{f} = \operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}_0). \quad (2.34)$$

Beliebige Volumina können mit Quadern ausgeschöpft werden. Flächenintegrale über gemeinsame Grenzflächen heben sich auf. Am Ende bleibt nur die äußere Grenzfläche übrig. Damit ist der Satz von GAUSS

$$\oint_{S(V)} \vec{E}(\vec{r}) \, d\vec{f} = \int_V \operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) \, dV. \quad (2.35)$$

Wendet man diesen Satz auf die Elektrostatik an, folgt

$$\oint_{S(V)} \vec{E}(\vec{r}) \, d\vec{f} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\vec{r}') \, d^3r' \int_{S(V)} d\vec{f} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad (2.36)$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\vec{r}') \, d^3r' \int_{S(V)} d\vec{f} \left( -\operatorname{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) \quad (2.37)$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\vec{r}') \, d^3r' \int_V d^3r \operatorname{div} \operatorname{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}. \quad (2.38)$$

Es gilt  $\Delta \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = -4\pi\delta(\vec{r} - \vec{r}')$ . Damit kann geschrieben werden

$$= \frac{1}{\varepsilon_0} \int \rho(\vec{r}') d^3r' \int_V \delta(\vec{r} - \vec{r}') dV \quad (2.39)$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_0} \int \rho(\vec{r}) d^3r = \frac{1}{\varepsilon_0} Q(V) \quad (2.40)$$

$$= \int_V \operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) d^3r. \quad (2.41)$$

Aus diesem Ausdruck lässt sich für beliebige Volumina  $V$  sagen

$$\int_V \left( \operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) - \frac{\rho(\vec{r})}{\varepsilon_0} \right) d^3r = 0. \quad (2.42)$$

Daraus folgen die MAXWELL'schen Gleichungen

$$\operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) = \frac{\rho(\vec{r})}{\varepsilon_0} \quad \oint_{S(V)} \vec{E}(\vec{r}) d\vec{f} = \frac{Q(V)}{\varepsilon_0}. \quad (2.43)$$

Da  $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi$  ein Gradientenfeld ist, gilt

$$\operatorname{rot} \operatorname{grad} \varphi = 0 \Rightarrow \operatorname{rot} \vec{E} = 0. \quad (2.44)$$

### 2.2.1 Beispiel: Bestimmung von $E$ mit Gauss'schem Satz

Sei eine homogen geladene Kugel mit Radius  $R$  und einem elektrischem Feld von

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_r(r, \varphi, \theta) \vec{e}_r + E_\varphi(r, \varphi, \theta) \vec{e}_\varphi + E_\theta(r, \varphi, \theta) \vec{e}_\theta. \quad (2.45)$$

Die MAXWELL-Gleichung besagt,

$$\oint_{S(V)} \vec{E}(\vec{r}) d\vec{f} = \frac{q(V)}{\varepsilon_0} \quad (2.46)$$

Die Kugel ist rotationssymmetrisch um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse, also unabhängig von  $\theta$  und  $\varphi$ .

Das Feld ist also nur noch von Radius  $r$  abhängig.

Wird an der  $x$ - $y$ -Ebene gespiegelt, wird  $\theta$  zu  $\pi - \theta$ , also  $E_z = E_r(r) \cos \theta - E_\theta(r) \sin \theta$ . Zudem gilt  $\cos(\pi - \theta) = -\cos(\theta)$  und  $\sin(\pi - \theta) = \sin(\theta)$ . Aus dieser Spiegelung folgt, dass  $E_z \rightarrow -E_z$  und  $E_\theta = 0$ . Aus den Spiegelungen an der  $x$ - $z$ - und  $y$ - $z$ -Ebene kann man analog sagen, dass  $E_\varphi = 0$ .

Für das gesamte Feld folgt dann

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_r(r) \vec{e}_r. \quad (2.47)$$

Jetzt kann der Satz von GAUSS angewendet werden

$$\int_{S(V_r)} \vec{E}(\vec{r}) \, d\vec{f} = E_r 4\pi r^2 = \frac{q(V_r)}{\varepsilon_0} = \begin{cases} \frac{Q}{\varepsilon_0} & , r > R \\ \frac{Q}{\varepsilon_0} \frac{r^3}{R^3} & , r < R \end{cases}. \quad (2.48)$$

Das Feld ist also

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \begin{cases} \frac{1}{r^2} & , r > R \\ \frac{r}{R^3} & , r < R \end{cases} \vec{e}_r. \quad (2.49)$$

## 2.3 Integraldarstellung – Satz von Stokes

Für die Integraldarstellung der MAXWELL'schen Gleichungen wird die Zirkulation eines Vektorfeldes  $\vec{a}(\vec{r})$  entlang einer geschlossenen Kurve  $C$  verwendet

$$Z = \oint_C \vec{a}(\vec{r}) \, d\vec{r}. \quad (2.50)$$

Sei ein geschlossener Weg in der  $xy$ -Ebene mit Mittelpunkt  $\vec{r}_0$ . Die Fläche ist  $\Delta F = \Delta x \Delta y$  und die Normale  $\vec{n} = \vec{e}_z$

$$Z = \int_{x_0 - \frac{\Delta x}{2}}^{x_0 + \frac{\Delta x}{2}} \left[ a_x \left( x, y_0 - \frac{\Delta y}{2}, z_0 \right) - a_x \left( x, y_0 + \frac{\Delta y}{2}, z_0 \right) \right] dx \quad (2.51)$$

$$+ \int_{y_0 - \frac{\Delta y}{2}}^{y_0 + \frac{\Delta y}{2}} \left[ a_y \left( x_0 - \frac{\Delta x}{2}, y, z_0 \right) - a_y \left( x_0 + \frac{\Delta x}{2}, y, z_0 \right) \right] dy \quad (2.52)$$

$$= \int_{x_0 - \frac{\Delta x}{2}}^{x_0 + \frac{\Delta x}{2}} \left[ -\partial_y a_x(x, y_0, z_0) \Delta y + \mathcal{O}(\Delta y^3) \right] dx \quad (2.53)$$

$$= \int_{y_0 - \frac{\Delta y}{2}}^{y_0 + \frac{\Delta y}{2}} \left[ -\partial_x a_y(x_0, y, z_0) \Delta x + \mathcal{O}(\Delta x^3) \right] dy. \quad (2.54)$$

Betrachtet man dann die Fläche

$$\lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \frac{Z}{\Delta F} = (\partial_x a_y(\vec{r}_0) - \partial_y a_x(\vec{r}_0)) \quad (2.55)$$

$$= (\text{rot } \vec{a}(\vec{r}_0))_z. \quad (2.56)$$

Daraus folgt der **Satz von STOKES**

$$\oint_{\partial F} \vec{a}(\vec{r}) \, d\vec{r} = \int_F \text{rot}(\vec{a}(\vec{r})) \, d\vec{f}. \quad (2.57)$$

Mit diesem Satz sind die MAXWELL'schen Gleichungen dann

$$\text{rot } \vec{E} = 0 \qquad \oint_C \vec{E}(\vec{r}) \, d\vec{r} = 0. \quad (2.58)$$

## 2.4 Punktladungen

Die Ladungsdichte einer Punktladung kann mit Hilfe der Delta-Distribution dargestellt werden (kartesische oder Kugelkoordinaten)

$$\rho(\vec{r}) = q\delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \quad \rho(\vec{r}) = q \frac{1}{r_0^2 \sin(\theta_0)} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \delta(\theta - \theta_0). \quad (2.59)$$

Das Potential lässt sich schreiben als

$$\varphi(\vec{r}) = \int_{\mathbb{R}^3} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \delta(\vec{r}_0 - \vec{r}') d^3r' \quad (2.60)$$

$$= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_0|}. \quad (2.61)$$

### 2.4.1 Beispiel: Kugeloberfläche

Sei eine Kugeloberfläche mit Ladungsdichte  $\rho(\vec{r}) = \sigma$ . Die Gesamtladung in Kugelkoordinaten im Abstand  $R$  vom Zentrum ist

$$Q = \int_{\mathbb{R}^3} \delta(r - R) \sigma r^2 \sin\theta d\theta d\varphi dr = 2\pi 2\sigma R^2 = 4\pi R^2 \sigma. \quad (2.62)$$

Die Ladung einer Punktladung in Kugelkoordinaten ist

$$\int_{\mathbb{R}^3} q \frac{1}{r_0^2 \sin\theta_0} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \delta(\theta - \theta_0) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi dr = q \frac{1}{r_0^2 \sin\theta_0} r_0^2 \sin\theta_0 \quad (2.63)$$

$$= q. \quad (2.64)$$

## 2.5 Feldverhalten an Grenzflächen

### 2.5.1 Gauss'sche Fläche

Man betrachtet ein GAUSS'sches Kästchen mit der Höhe von  $\Delta x$  auf einer Grenzfläche mit Normale  $\vec{n}$  eines elektrischen Feldes. Die Normalen  $d\vec{f}$  des Kästchens sind orthogonal zu der Grenzfläche. Es existiert ein Feld außerhalb der Fläche  $\vec{E}_a$  und innerhalb der Fläche  $\vec{E}_i$ . Auf der Grenzfläche befindet sich die Flächenladungsdichte  $\sigma$ . Hier wird der Satz von GAUSS verwendet

$$\int_{\Delta V} \operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) d^3r = \int_{S(\Delta V)} \vec{E} d\vec{f} \rightarrow \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta F \vec{n} (\vec{E}_a - \vec{E}_i). \quad (2.65)$$

Wird  $\Delta x$  gegen 0, dann bleibt nur noch die Fläche  $\Delta F \vec{n} (\vec{E}_a - \vec{E}_i)$  übrig.

$$\int_{\Delta V} \operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) d^3r = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\Delta V} \rho(\vec{r}) d^3r = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \Delta F. \quad (2.66)$$

Insgesamt ist also

$$E_a^n - E_i^n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \quad (2.67)$$

Die Normalkomponente an der Grenzfläche ist unstetig, macht also einen Sprung, wenn  $\sigma \neq 0$ .

### 2.5.2 Stokes'sche Fläche

Man betrachtet jetzt eine STOKES'sche Fläche auf der selben Grenzfläche. Die Höhe der Fläche ist  $\Delta x$ . Die Breite der Fläche ist  $\Delta l_i$  und  $\Delta l_a$ . Die Normale  $\Delta \vec{F} = \vec{t} \Delta F$  der Fläche liegt in der Grenzfläche. Es gilt  $\Delta \vec{l}_a = \Delta l (\vec{t} \times \vec{n}) = -\Delta \vec{l}_i$ . Der STOKES'sche Satz besagt

$$0 = \int_{\Delta F} \text{rot } \vec{E}(\vec{r}) d\vec{f} = \int_{\partial \Delta F} \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r} \rightarrow \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta l (\vec{t} \times \vec{n}) (\vec{E}_a - \vec{E}_i) = 0. \quad (2.68)$$

Daraus folgt, dass die Tangentialkomponenten des  $\vec{E}$ -Feldes stetig durch die Grenzflächen gehen. Eine Oberflächenladungsdichte spielt für das  $\vec{E}$ -Feld keine Rolle.

## 2.6 Elektrostatische Feldenergie

Die Krafteinwirkung auf eine Punktladung ist  $\vec{F}(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r})$ . Verschiebt man diese Punktladung von  $A$  nach  $B$  muss eine Arbeit verrichtet werden

$$W_{AB} = - \int_B^A \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} = q(\varphi(A) - \varphi(B)). \quad (2.69)$$

$W_{AB} > 0$ , wenn Arbeit am System verrichtet wird. Die Energie einer Ladungsverteilung wird als die Arbeit bezeichnet, um die Ladungen aus dem Unendlichen zusammenzuziehen.

### 2.6.1 Energie von $N$ Punktladungen

Punktladungen  $q_j$  befinden sich an den Punkten  $\vec{r}_j$ . Da mit jeder weiteren „zusammengezogenen“ Ladung das Feld verändert wird, wird nur die  $i-1$ te Ladung betrachtet. Die Arbeit für diese Ladung ist die Summe aus allen Ladung bis zur  $i-1$ ten Ladung

$$\varphi(\vec{r}_i) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^{i-1} \frac{q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \quad W_i = q_i \varphi(\vec{r}_i). \quad (2.70)$$

Die Summation über alle Ladungen  $i = 1, \dots, N$  ist

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \quad (2.71)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{i,j=1; i \neq j}^N \frac{q_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}. \quad (2.72)$$

Dieser Ausdruck kann für eine kontinuierliche Ladungsverteilung  $\rho$  verallgemeinert werden

$$W_c = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r \int d^3r' \frac{\rho(\vec{r}) \rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (2.73)$$

$$= \frac{1}{2} \int d^3r \rho(\vec{r}) \varphi(\vec{r}) \quad \left| -\Delta\varphi = \frac{\rho}{\epsilon_0} \right. \quad (2.74)$$

$$= -\frac{\epsilon_0}{2} \int d^3r (\Delta\varphi(\vec{r})) \varphi(\vec{r}) \quad (2.75)$$

$$= -\frac{\epsilon_0}{2} \int d^3r \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}) \varphi(\vec{r})) + \frac{\epsilon_0}{2} \int d^3r \overbrace{(-\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}))}^{\vec{E}} (-\vec{\nabla}\varphi(\vec{r})) \quad (2.76)$$

$$= -\frac{\epsilon_0}{2} \oint d\vec{f} (\vec{\nabla}\varphi(\vec{r})) \varphi(\vec{r}) + \frac{\epsilon_0}{2} \int d^3r |\vec{E}(\vec{r})|^2. \quad (2.77)$$

Für Ladungen im Unendlichen wird das erste Integral gleich null, da  $\varphi(\vec{r}) \propto \frac{1}{r}$  und  $\varphi \vec{\nabla}\varphi \propto \frac{1}{r^3}$ . Das Flächenintegral im Unendlichen ist damit

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \oint_{K_r} d\vec{f} (\vec{\nabla}\varphi(\vec{r})) \varphi(\vec{r}) \propto \lim_{r \rightarrow \infty} \int d\Omega \frac{1}{r^3} r^2 = 0. \quad (2.78)$$

Für die Energiedichte bleibt dann

$$w_c = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}(\vec{r})|^2 \geq 0 \text{ positiv-semidefinit.} \quad (2.79)$$

Das Problem bei der kontinuierlichen Ladungsdichte ist, dass sie die Selbstenergie der Ladung enthält.

### 2.6.2 Beispiel: 2 Punktladungen

Das elektrische Feld für zwei Punktladungen ist

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1(\vec{r} - \vec{r}_1)}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^3} + \frac{q_2(\vec{r} - \vec{r}_2)}{|\vec{r} - \vec{r}_2|^3} \right). \quad (2.80)$$

Die Energiedichte berechnet sich dann zu

$$w_{2\text{pt.}} = \frac{1}{32\pi^2\epsilon_0} \left( \frac{q_1^2}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^4} + \frac{q_2^2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|^4} \right) + \frac{1}{16\pi^2\epsilon_0} \left( \frac{q_1 q_2 (\vec{r} - \vec{r}_1) (\vec{r} - \vec{r}_2)}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^3 |\vec{r} - \vec{r}_2|^3} \right). \quad (2.81)$$

Sie jetzt eine unendlich große unendlich verdünnte Ladungswolke. Diese Ladungswolke kann man als homogen geladene Kugel mit Radius  $R$  und Gesamtladung  $q$  darstellen. Für die Arbeit, um alle Ladungen auf den Punkt in der Mitte zusammenzuziehen, gilt

$$W_{\text{Kugel}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{3}{5} \frac{1}{R}. \quad (2.82)$$

Um eine Punktladung darzustellen wird  $R \rightarrow 0$ . Dabei wird aber die Arbeit unendlich. Physikalisch ist dies aber kein Problem, da die Selbstenergie selbst keinen Effekt hat. Nur die Energiedifferenz bzw. der wechselwirkungsanteil ist von Relevanz.

## 2.7 Multipolentwicklung

Die Annahme ist eine räumlich begrenzte (Radius  $R$ ) Ladungsverteilung  $\rho$  und keine Randbedingungen im Endlichen. Von Interesse ist hier der Effekt im Unendlichen, also die **Fernzone**. Das allgemeine Potential ist  $\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$ . Man sucht das Potential für  $r \gg R$ . Dafür wird eine TAYLOR-Entwicklung um  $\frac{r'}{r} \ll 1$  angesetzt.

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = e^{-\vec{r}' \cdot \vec{\nabla}} \frac{1}{r} = \frac{1}{r} + \frac{\vec{r}' \cdot \vec{r}}{r^3} + \frac{3(\vec{r}' \cdot \vec{r})^2 - r^2 r'^2}{r^5} + \dots \quad (2.83)$$

Damit ist das Potential dann

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \int d^3r' \rho(\vec{r}') + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3} \int d^3r' \vec{r}' \rho(\vec{r}') + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \frac{3(\vec{r}' \cdot \vec{r})^2 - r^2 r'^2}{r^5} \rho(\vec{r}') + \dots \quad (2.84)$$

Wenn die Terme ab inklusive  $\frac{1}{r^3}$  wegfallen (da sie so klein sind), vereinfacht sich das Potential zu  $\varphi(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$ . Die Momente der Ladungsverteilungen sind dann

$$\text{Monopol : } \vec{p}_M = \int d^3r' \rho(\vec{r}') \propto \frac{1}{r} \quad (2.85)$$

$$\text{Dipol : } \vec{p}_D = \int d^3r' \vec{r}' \rho(\vec{r}') \propto \frac{1}{r^2} \quad (2.86)$$

$$\text{Quadrupol : } \vec{p}_Q = \int d^3r' (3r'_i r'_j - \delta_{ij} r'^2) \rho(\vec{r}') \propto \frac{1}{r^3}. \quad (2.87)$$

Wenn  $Q \neq 0$ , dann ist der Monopolterm dominant in der Fernzone. Wenn  $Q = 0$ , dann ist der Dipolmoment dominant. Für zwei entgegengerichtete gleichgroße Ladungen ist das Dipolmoment  $\vec{p} = q\vec{d}$ . Der Dipol in einem Punkt ist  $\vec{p}(\vec{r}) = \lim_{d \rightarrow 0, q \rightarrow \infty} q\vec{d}$ , sodass  $\vec{p}$  endlich wird. Das Potential des Dipols lässt sich dann mit dem Dipolmoment schreiben:  $\varphi_D(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p}_D \cdot \vec{r}}{r^3}$ .

Wenn  $Q = 0$  und  $\vec{p} = 0$ , dann dominiert der Quadrupolmoment. Das Potential ist  $\varphi_Q(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i,j} Q_{ij} \frac{r_i r_j}{r^5}$ . Ein Quadrupol kann durch zwei antiparallele Dipole realisiert werden.

## 2.8 Randwertproblem in der E-Statik

Falls es keine Randbedingungen gibt, ist die Lösung der POISSON-Gleichung das POISSON-Integral

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \frac{\rho(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = \varphi(\vec{r}). \quad (2.88)$$

Oft ist aber  $\rho(\vec{r})$  in einem Raumgebiet  $V$  und  $\varphi$ , oder  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = (\vec{n} \cdot \vec{\nabla}) \varphi = -E^{(n)}$  auf  $S(V)$  gegeben.

### 3 Green'sche Funktion

*Vorlesung 6 (26.10.) fehlt*



## 4 Kugelflächenfunktion

Der LAPLACE-Operator  $\Delta$  kann als eine Funktion verstanden werden, die

$$\Delta : f \mapsto \Delta f(\vec{r}) = \sum_{i=1}^3 \partial_{r_i}^2 f(\vec{r}). \quad (4.1)$$

Es ist also möglich, dass  $\Delta$  Eigenwerte besitzt, für die  $\Delta f(\vec{r}) = \lambda f(\vec{r})$ .

Man sucht nun nach Eigenfunktionen auf einer Kugeloberfläche. Es gilt bereits

$$\Delta f = \frac{1}{r^2} \partial_r (r^2 \partial_r f) + \frac{1}{r^2} \Delta_{\theta, \varphi} f, \quad (4.2)$$

mit dem Winkelanteil

$$\Delta_{\theta, \varphi} f = \frac{1}{\sin \theta} \partial_\theta (\sin \theta \partial_\theta f) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \partial_\theta^2 f. \quad (4.3)$$

Die Eigenfunktionen von  $\Delta_{\theta, \varphi}$  sind die **Kugelflächenfunktionen**

$$y_{lm}(\theta, \varphi) := \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad (4.4)$$

mit  $l = 0, 1, 2, \dots$  und  $m = -l, -l+1, -l+2, \dots, l-2, l-1, l$ . Beispiele sind

$$y_{00}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \quad y_{11}(\theta, \varphi) = -\sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{i\varphi} \quad y_{10}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta. \quad (4.5)$$

Die Funktion  $P_l^m$  sind die zugeordneten LEGENDRE-Polynome. Sie sind Lösungen der verallgemeinerten LEGENDRE-Gleichung

$$\frac{d}{dz} \left( (1-z^2) \frac{dP_l^m}{dz} \right) + \left( l(l+1) - \frac{m^2}{1-z^2} \right) P_l^m(z) = 0 \quad z = \cos \theta. \quad (4.6)$$

Wendet man den LAPLACE-Operator auf die Kugelflächenfunktion an erhält man die Eigenfunktionen auf der Kugeloberfläche (ohne Radialteil)

$$\Delta_{\theta, \varphi} y_{lm}(\theta, \varphi) = -l(l+1) y_{lm}(\theta, \varphi). \quad (4.7)$$

Diese Funktion ist orthogonal. Es gilt

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin \theta d\theta y_{l'm'}^*(\theta, \varphi) y_{lm}(\theta, \varphi) = \delta_{ll'} \delta_{mm'}. \quad (4.8)$$

Zudem ist sie vollständig, also

$$\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l y_{lm}^*(\theta', \varphi') y_{lm}(\theta, \varphi) = \underbrace{\delta(\cos \theta' - \cos \theta)}_{\delta(z' - z)} \delta(\varphi - \varphi'). \quad (4.9)$$

## 4.1 Entwicklung von Funktionen

Eine Funktion kann entwickelt werden, indem

$$f(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l R_{lm}(r) y_{lm}(\theta, \varphi), \quad (4.10)$$

mit  $R_{lm}(r)$  dem Radialanteil,

$$R_{lm}(r) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin \theta d\theta f(r, \theta, \varphi) y_{lm}^*(\theta, \varphi). \quad (4.11)$$

## 4.2 Lösung der Laplace-Gleichung

Der Ansatz für die Lösung der Gleichung  $\Delta\varphi = 0$  ist

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi(r, \theta, \varphi) = \sum_{l,m} R_{lm}(r) y_{lm}(\theta, \varphi). \quad (4.12)$$

Damit folgt

$$0 = \Delta\varphi = \sum_{l,m} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \frac{dR_{lm}}{dr} + \frac{R_{lm}}{r^2} \Delta_{\theta,\varphi} \right] y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (4.13)$$

$$= \sum_{l,m} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dR_{lm}(r)}{dr} - \frac{R_{lm}(r) l(l+1)}{r^2} \right) \right] y_{lm}. \quad (4.14)$$

Der Term

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dR}{dr} \right) - \frac{l(l+1)}{r^2} R = 0 \quad (4.15)$$

ist der **Radialanteil**. Mit dem Ansatz  $R(r) = \frac{1}{r} u(r)$

$$\left( \frac{d^2}{dr^2} - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) u(r) = 0 \quad (4.16)$$

$$Ar^{l+1} + Br^{-l} = u(r) \quad (4.17)$$

$$Ar^l + Br^{-(l+1)} = R(r). \quad (4.18)$$

Die allgemeine Lösung der LAPLACE-Gleichung ist dann

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_{l,m} (A_{lm} r^l + B_{lm} r^{-(l+1)}) y_{lm}(\theta, \varphi), \quad (4.19)$$

mit  $A_{lm}$  und  $B_{lm}$  aus den Randbedingungen.

### 4.3 Beispiel: Ladung einer Hohlkugel

Sie eine Kugel mit Radius  $R$  und Ladungsverteilung  $\sigma(\theta, \varphi)$  auf der Hülle. Im Inneren und im Äußeren ist die Ladung  $\rho_i$  und  $\rho_a$  gleich null. Das Potential lässt sich dann mit der allgemeinen Lösung für die Kugelflächenfunktion lösen

$$\phi_i(\vec{r}) = \sum_{l,m} (A_{lm}^i r^l + B_{lm}^i r^{-(l+1)}) y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (4.20)$$

$$\phi_a(\vec{r}) = \sum_{l,m} (A_{lm}^a r^l + B_{lm}^a r^{-(l+1)}) y_{lm}(\theta, \varphi). \quad (4.21)$$

Die Randbedingungen sind,

i)  $\phi_a(\vec{r}) = 0$  für  $r \rightarrow \infty$ .  $\Rightarrow A_{lm}^a = 0 \forall l, m$ .

ii) Bei  $r = 0$  soll  $\phi_i$  eine reguläre Funktion sein (sie soll nicht divergieren).  $\Rightarrow B_{lm}^i = 0 \forall l, m$ .

Damit ist die Lösung vorerst

$$\phi(\vec{r}) = \begin{cases} \sum_{l,m} A_{lm}^i r^l y_{lm}(\theta, \varphi) & , r \leq R \\ \sum_{l,m} B_{lm}^a r^{-(l+1)} y_{lm}(\theta, \varphi) & , r > R \end{cases}. \quad (4.22)$$

iii)  $\phi_i(R, \theta, \varphi) = \phi_a(R, \theta, \varphi) \forall \theta, \varphi$ . Es muss dann  $\forall l, m$  gelten, dass  $A_{lm}^i R^l = B_{lm}^a R^{-(l+1)}$ .  
Damit ist  $B_{lm}^a = A_{lm}^i R^{2l+1}$ .

iv)  $\sigma(\theta, \varphi)$  existiert auf  $S(K_R)$ . Damit ist das  $\vec{E}$ -Feld nicht stetig, also  $\partial_r \phi_i - \partial_r \phi_a = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ .  
Entwickelt man  $\sigma(\theta, \varphi)$  in  $y_{lm}$  folgt,  $\sigma(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} \sigma_{lm} y_{lm}(\theta, \varphi)$ . Daraus folgt  $A_{lm}^i = \frac{\sigma_{lm}}{2(l+1)\epsilon_0} \frac{1}{R^{l+1}}$ .

## 5 Dielektrika

### 5.1 Makroskopische Feldgrößen

Im Wesentlichen werden für makroskopische Feldgrößen mikroskopische Felder  $f(\vec{r})$  geglättet, also  $\langle f(\vec{r}) \rangle = \frac{1}{v(\vec{r})} \int_{v(\vec{r})} f(\vec{r}') d^3r'$ .  $\langle f(\vec{r}) \rangle$  ist ein kontinuierliches Feld. Man macht die Annahme, dass  $\langle \text{grad } f(\vec{r}) \rangle = \text{grad } \langle f(\vec{r}) \rangle$ . Analog betrachtet man das  $\vec{E}$ -Feld als  $\vec{E}(\vec{r}) = \langle \vec{E}_{\text{mikroskop.}}(\vec{r}) \rangle$ . Damit sind die MAXWELL-Gleichungen

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\langle \rho_m \rangle}{\varepsilon_0} \quad \text{rot } \vec{E} = 0. \quad (5.1)$$

Weiterhin ist  $\langle \vec{E}_m \rangle = -\langle \text{grad } \varphi_m \rangle = -\text{grad } \langle \varphi_m \rangle$ .

Sei ein  $j$ -tes Teilchen an Punkt  $\vec{R}_j$ , insgesamt neutral geladen mit **Überschussladungen** am Rand. Man betrachtet sein Potential am Punkt  $\vec{r}$ . Die Gesamtladung ist  $q_j = \sum_n^{(j)} q_n^{(j)}$ , mit der Ladungsdichte  $\rho_j(\vec{r}) = \sum_n^{(j)} q_n^{(j)} \delta(\vec{r} - \vec{r}_n)$ .  $j$  ist hierbei das Teilchen mit  $n$  Ladungsträgern.

Wenn ein  $\vec{E}$ -Feld anliegt, werden Ladungen aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt, wodurch Multipole induziert werden. Das Dipolmoment ist also  $\vec{p}_j = \int d^3r \rho_j(\vec{r}) (\vec{r} - \vec{R}_j)$ . Man nimmt an, dass  $|\vec{r} - \vec{R}_j| \gg$  als die Abstände im Raum des Teilchens  $j$  sind. Für die Multipolentwicklung befindet man sich also in der Fernzone. Das Potential des  $j$ -ten Teilchens mit Dipolmoment ist dann

$$\varphi_j(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left[ \frac{q_j}{|\vec{r} - \vec{R}_j|} + \frac{\vec{p}_j \cdot (\vec{r} - \vec{R}_j)}{|\vec{r} - \vec{R}_j|^3} \right]. \quad (5.2)$$

Für  $N$  Teilchen kann eine **effektive Ladungsdichte** bzw. **effektive Dipoldichte** verwendet werden,

$$\rho_e(\vec{r}) = \sum_{j=1}^N q_j \delta(\vec{r} - \vec{R}_j) \quad \vec{\Pi}_e(\vec{r}) = \sum_{j=1}^N \vec{p}_j \delta(\vec{r} - \vec{R}_j). \quad (5.3)$$

Damit lässt sich das **effektive Potential** schreiben,

$$\varphi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int d^3r' \left[ \frac{\rho_e(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} + \vec{\Pi}_e(\vec{r}') \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \right]. \quad (5.4)$$

Die Mittelung für makroskopische Ladungsdichte ist  $\rho(\vec{r}) = \langle \rho_e(\vec{r}) \rangle$ . Sie stellt die **Überschussladungen** dar, da alle anderen Ladung im Mittel neutral sind.

Aus der Dipoldichte lässt sich die **makroskopische Polarisation** herleiten

$$\vec{P}(\vec{r}) = \langle \vec{\Pi}_e(\vec{r}) \rangle = \frac{1}{v(\vec{r})} \sum_{j \in v(\vec{r})} \vec{p}_j. \quad (5.5)$$

Damit lässt sich das gemittelte Potential schreiben als

$$\varphi(\vec{r}) = \langle \varphi_m(\vec{r}) \rangle = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \left[ \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} + \vec{P}(\vec{r}') \cdot \text{grad}_{\vec{r}} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right], \quad (5.6)$$

bzw. das elektrische Feld

$$\text{div } \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \left( \rho(\vec{r}) - \text{div } \vec{P}(\vec{r}) \right) = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho + \rho_P), \quad (5.7)$$

mit  $\rho_P = \text{div } \vec{P}(\vec{r})$ , der Polarisationsladungsdichte.

Man definiert die **dielektrische Verschiebung** und erhält die MAXWELL-Gleichungen in einem Medium

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \text{div } \vec{D} = \rho \quad \text{rot } \vec{E} = 0. \quad (5.8)$$

Daraus folgt, dass die Quellen von  $\vec{D}$  Überschussladungen sind. Das elektrische Feld hängt von der Materie ab.

Das Polarisationsfeld induziert eine Oberflächenladung  $\sigma_P = \vec{P} \vec{n}$ .

Es gibt verschiedene Arten von Dielektrika, z.B. eigentliche Dielektrika, Paraelektrika oder Ferroelektrika.

### Typen von Polarisation

Man unterscheidet zwei Typen von Polarisation,  $\vec{P} = \vec{P}(\vec{E})$  und  $\vec{P}(0) = 0$ .

$$\vec{P}(\vec{E})_i = \sum_k \gamma_{ik} E_k - \sum_{k,l} \beta_{ikl} E_k E_l + \dots \quad (5.9)$$

Man vereinfacht diesen Ausdruck zu  $P_i = \gamma E_i$ . Es handelt sich um ein isotropes Medium, mit  $\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E}$ . Die dielektrische Verschiebung ist dann

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (\chi_e + 1) \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}. \quad (5.10)$$

## 5.2 Randwertprobleme

Von Interesse sind die Bedingungen an Grenzflächen verschiedener Dielektrika, mit  $\epsilon_r^1$  und  $\epsilon_r^2$ . Mit Hilfe des GAUSS-schen Satzes folgt dann für die Normalkomponente

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \sigma, \quad (5.11)$$

bzw. für die Tangentialkomponente

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = 0. \quad (5.12)$$

Daraus folgt, dass

$$D_1^n = D_2^n \quad E_1^n = \frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r^1} E_2^n \quad E_1^t = E_2^t \quad D_1^t = \frac{\varepsilon_r^1}{\varepsilon_r^2} D_2^t. \quad (5.13)$$

### 5.3 Beispiel: Grenzfläche

Seien zwei Dielektrika mit  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ . Auf der  $z$ -Achse sei eine Punktladung  $q$  in Medium  $\varepsilon_1$  im Abstand  $d$  zu Medium  $\varepsilon_2$ . Auf der Grenzfläche ist  $\sigma = 0$ . Es gilt

$$\varepsilon_1 \operatorname{div} \vec{E} = \rho(z > 0) = q\delta(\vec{r} - d\vec{e}_z). \quad (5.14)$$

Für das andere Medium gilt

$$\varepsilon_2 \operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad z < 0, \quad (5.15)$$

mit  $\varepsilon_i \operatorname{div} \vec{E} = \operatorname{div} \vec{D}$ .  $\forall z$  gilt  $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ .

Die Randbedingungen sind

$$\lim_{z \rightarrow 0} D_z^1(-z) = \lim_{z \rightarrow 0} D_z^1(z). \quad (5.16)$$

Diese Bedingung ist gleichbedeutend mit

$$\lim_{z \rightarrow 0} \varepsilon_2 E_z^2(-z) = \lim_{z \rightarrow 0} \varepsilon_1 E_z^1(z). \quad (5.17)$$

Zudem ist

$$\lim_{z \rightarrow 0} E_{x,y}^2(-z) = \lim_{z \rightarrow 0} E_{x,y}^1(z). \quad (5.18)$$

Der Ansatz ist, dass die Ladung  $q$  eine Spiegelladung bzw. Bildladung  $q'$  bei  $-d$  hat. Weiter hat die Ladung  $q'$  eine Bildladung  $q''$  im Medium 1, welche die Randbedingungen an der Grenzfläche simulieren.

Die Potentiale sind

$$z > 0 : \varphi^1(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r^1} \left[ \frac{q}{|\vec{r} - d\vec{e}_z|} + \frac{q'}{|\vec{r} + d\vec{e}_z|} \right] \quad (5.19)$$

$$z < 0 : \varphi^2(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r^2} \left[ \frac{q''}{|\vec{r} - d\vec{e}_z|} \right]. \quad (5.20)$$

## 6 Magnetostatik

In der Elektrostatik sind die Quellen der Felder nur ruhende Ladungen. In der Magnetostatik sind die Quellen der Felder allerdings stationäre Ströme. Der große Unterschied zur Elektrostatik ist, dass keine freien magnetischen Ladungsträger bzw. magnetische Monopole existieren. Die Grundeinheit in der Magnetostatik ist das Dipolmoment  $\vec{m}$ . Der Nachweis des Feldes erfolgt über das Drehmoment  $M$  eines Magnetfeldes auf einen Dipol

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}, \quad (6.1)$$

mit  $\vec{B}$  der **magnetischen Induktion**.

Es gibt verschiedene Arten von elektrischen Strom.

- i) Die Bewegung geladener Körper.
- ii) Eine Potentialdifferenz zwischen Leiterenden.

Bei der Potentialdifferenz existiert eine Kraftwirkung auf die Ladungsträger. Sie bewegen sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$ . Die zeitlich konstante und homogene Teilchendichte ist  $n = \frac{N}{V}$ . Die Ladung ist  $q$ . Die Querschnittsfläche des Leiters ist  $F$ . Durch den Leiterquerschnitt fließt in einem Zeitraum von  $dt$  die Ladung

$$dQ = Fv dt nq \quad I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = Fvnq \quad [I] = A = C s^{-1}. \quad (6.2)$$

$I$  ist die **Stromstärke**.  $\vec{j}(t, \vec{r})$  ist die **Stromdichte**; sie ist die senkrecht zum Querschnitt transportierte Ladung

$$\vec{j} = \frac{I}{F} = nq\vec{v} \quad I = \int_{\mathcal{F}} \vec{j} \cdot d\vec{f} = \int_{\mathcal{F}} \vec{j} \cdot \vec{n} df. \quad (6.3)$$

Sei ein Volumen  $\mathcal{V}$  in dem sich Ladungen  $Q$  bewegen. Der Fluss durch den Rand  $\partial\mathcal{V}$  muss also gleich der Abnahme der Ladung im Volumen sein

$$\int_{\partial\mathcal{V}} \vec{j} \cdot d\vec{f} = -\frac{dQ(t)}{dt} \quad (6.4)$$

$$= -\frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \rho(t, \vec{r}) d^3r \quad (6.5)$$

$$= -\int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho(t, \vec{r})}{\partial t} d^3r \quad (6.6)$$

$$= \int_{\mathcal{V}} \operatorname{div} \vec{j} d^3r. \quad (6.7)$$

Daraus folgt, dass

$$\frac{\partial \rho(t, \vec{r})}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}(t, \vec{r}) = 0. \quad (6.8)$$

Betrachtet man den stationären Fall, also zeitunabhängig, ist  $\frac{\partial \rho(t, \vec{r})}{\partial t} = 0$ . Deshalb ist

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (6.9)$$

Die Stromdichte ist also auch quellenfrei. Das bedeutet, dass Ladungen nicht spontan verschwinden oder auftauchen.

## 6.1 Beispiel: Draht mit verschiedenen Querschnittsflächen; Kirchhoff'sche Knotenregel

Sei ein Draht mit Querschnittsflächen  $F_1$  und  $F_2$  auf dem Rand  $\partial \mathcal{V}$ . Es gilt

$$0 = \int_{\mathcal{V}} \operatorname{div} \vec{j} \, d^3r = \int_{\partial \mathcal{V}} \vec{j}(\vec{r}) \cdot d\vec{f} \quad (6.10)$$

$$= I_1 - I_2. \quad (6.11)$$

Das bedeutet, dass der Strom im ganzen Leiter gleich ist, also  $I_1 = I_2$ .

Seien vier Leiter mit Strömen  $I_1, I_2, I_3$  und  $I_4$ , wobei  $I_1$  und  $I_2$  das Volumen  $\mathcal{V}$  verlassen und  $I_3$  und  $I_4$  in das Volumen eintreten. Es gilt

$$0 = \int_{\mathcal{V}} \operatorname{div} \vec{j}(\vec{r}) \, d^3r = \oint_{\partial \mathcal{V}} \vec{j}(\vec{r}) \cdot d\vec{f} \quad (6.12)$$

$$= -I_1 - I_2 + I_3 + I_4. \quad (6.13)$$

Die KIRCHHOFF'sche Knotenregel besagt also, dass Summe von Zufluss und Abfluss immer null ist.

## 6.2 Elektrische Leitfähigkeit und Leistung

Die Stromdichte ist proportional zu dem elektrischen Feld mit der Proportionalitätskonstante der **elektrischen Leitfähigkeit**

$$\vec{j}(\vec{r}) = \sigma(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}). \quad (6.14)$$

Das Inverse der elektrischen Leitfähigkeit ist der **spezifischer Widerstand**.

Man betrachte einen **Stromfaden**; ein linienförmiger Strom entlang eines Weges  $\mathcal{C}$ . Tangential an der Kurve ist  $d\vec{r}$ . Dieser setzt sich zusammen aus dem Tangentialvektor  $\vec{t}$  und dem Wegelement  $ds$ . Die Stromdichte in einem Volumen ist dann

$$\vec{j} \, d^3r = j \cdot \vec{t} \, ds \cdot d\vec{f} = I \, d\vec{r}. \quad (6.15)$$

Die **elektrische Leistung** ist

$$dW = \vec{F}(\vec{r}) \, d\vec{r} = q \vec{E}(\vec{r}) \, d\vec{r} \quad P = \frac{dW}{dt} = q \vec{E}(\vec{r}) \cdot \vec{v} \quad [P] = V A = W. \quad (6.16)$$



Die **Leistungsdichte** ist

$$dP = (\rho(\vec{r}) d^3r) \vec{E}(\vec{r}) \vec{v}(\vec{r}) = \vec{j} \vec{E} d^3r. \quad (6.17)$$

Damit kann die Gesamtleistung auch geschrieben werden als

$$P = \int \vec{E}(\vec{r}) \vec{j}(\vec{r}) d^3r = I \int \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r} = IU. \quad (6.18)$$

### 6.3 Grundgleichungen

Die Grundgleichungen der Magnetostatik kommen aus dem AMPÈRE'schen Gesetz. Es beschreibt die Wechselwirkung von zwei Stromfäden.

Der Vektor  $\vec{r}_1$  zeigt vom Ursprung zum Linienelement  $d\vec{r}_1$  der ersten Leiterschleife (analog  $\vec{r}_2$ ). Der Verbindungsvektor zwischen den Linienelementen ist  $\vec{r}_1 - \vec{r}_2$ . Die Kraft auf die Leiterschleifen ist

$$\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{r}_1 \times (d\vec{r}_2 \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_2))}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3}. \quad (6.19)$$

$\mu_0$  ist die **magnetische Feldkonstante**  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs A}^{-1} \text{m}^{-1}$ . Es gilt zudem  $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$ , mit  $c$  der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Mit  $d\vec{r}_1 \times (d\vec{r}_2 \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)) = d\vec{r}_2 (d\vec{r}_1 \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)) - (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) (d\vec{r}_1 \cdot d\vec{r}_2)$  folgt

$$\oint_{C_1} d\vec{r}_1 \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} = - \oint_{C_1} d\vec{r}_1 \cdot \text{grad} \frac{1}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \quad (6.20)$$

$$= \int_{\partial C_1} \text{rot grad} \frac{1}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} d\vec{f} \quad (6.21)$$

$$= 0. \quad (6.22)$$

Die Kraft lässt sich also schreiben als

$$\vec{F}_{12} = -\frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} d\vec{r}_1 \cdot d\vec{r}_2 \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} = -\vec{F}_{21}. \quad (6.23)$$

Da beide Leiter unendlich lang sind, würde auch eine unendlich große Kraft auf jedes Leiterstück wirken. Man betrachtet also nur die Kraft eines Stücks des Leiters

$$d\vec{F}_{12} = -\frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} dz_1 \int_{-\infty}^{\infty} dz_2 \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3}. \quad (6.24)$$

In Zylinderkoordinaten ist  $\vec{r}_1 = r_1 \vec{e}_r + z_1 \vec{e}_z$  (analog  $\vec{r}_2$ ), also

$$d\vec{F}_{12} = -\frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} dz_1 \int_{-\infty}^{\infty} dz_2 \frac{-a \vec{e}_x - (z_2 - z_1) \vec{e}_z}{[a^2 + (z_2 - z_1)^2]^{3/2}} \quad (6.25)$$

$$= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} dz_1 a \vec{e}_x \int_{-\infty}^{\infty} dz_2 \frac{1}{[a^2 + (z_2 - z_1)^2]^{3/2}} \quad (6.26)$$

$$= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} dz_1. \quad (6.27)$$

Die Kraft pro Längeneinheit ist dann

$$\vec{f}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \vec{e}_x. \quad (6.28)$$

## 7 Delta-Distribution

$$\delta(\vec{r} - \vec{r}_0) = 0 \forall \vec{r} \neq \vec{r}_0. \quad (7.1)$$

$$\int_V \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \, d^3r = \begin{cases} 1 & , \vec{r}_0 \in V \\ 0 & , \vec{r}_0 \notin V \end{cases} \quad (7.2)$$

$$\int_V f(\vec{r}) \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \, d^3r = \begin{cases} f(\vec{r}_0) & , \vec{r}_0 \in V \\ 0 & , \vec{r}_0 \notin V \end{cases} \quad (7.3)$$

## 8 Flächenintegrale

Sei die Fläche  $\mathcal{F} := \{\vec{r}(u, v) \mid (u, v) \in D\}$ . Der Normalenvektor zur Fläche ist  $d\vec{f} = d\vec{a} \times d\vec{b}$ , mit

$$d\vec{a} = \vec{r}(u, v + dv) - \vec{r}(u, v) \approx \partial_v \vec{r}(u, v) dv \quad (8.1)$$

$$d\vec{b} = \vec{r}(u + du, v) - \vec{r}(u, v) \approx \partial_u \vec{r}(u, v) du \quad (8.2)$$

$$d\vec{f} = \partial_v \vec{r}(u, v) \times \partial_u \vec{r}(u, v) du dv. \quad (8.3)$$

Die Vektoren  $\partial_v \vec{r}$  und  $\partial_u \vec{r}$  spannen die Tangentialebene in  $\vec{r}(u, v)$  auf.

Der Fluss eines Vektorfeldes  $\vec{a}(\vec{r})$  durch eine Fläche  $S$ , bzw. eine geschlossene Fläche  $S(V)$  mit  $d\vec{f}$  als Flächennormale ist gegeben durch

$$\varphi_S(\vec{a}) = \int_S \vec{a}(\vec{r}) \cdot d\vec{f} = \int_S \vec{a}(\vec{r}) \cdot \vec{n}(\vec{r}) df \quad (8.4)$$

$$\varphi_{S(V)}(\vec{a}) = \oint_{S(V)} \vec{a}(\vec{r}) \cdot d\vec{f} = \oint_{S(V)} \vec{a}(\vec{r}) \cdot \vec{n}(\vec{r}) df. \quad (8.5)$$

### 8.1 Beispiel: Kugeloberfläche

Sei eine Kugel mit dem Radius  $R$ , dann sind die Kugelkoordinaten

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} R \cos \varphi \sin \theta \\ R \sin \theta \sin \varphi \\ R \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (8.6)$$

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta} = R \vec{e}_\theta \quad \frac{\partial \vec{r}}{\partial \varphi} = R \sin \theta \vec{e}_\varphi. \quad (8.7)$$

Das Flächenelement ist dann

$$d\vec{f} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial \varphi} = R^2 \sin \theta \vec{e}_r \quad (8.8)$$