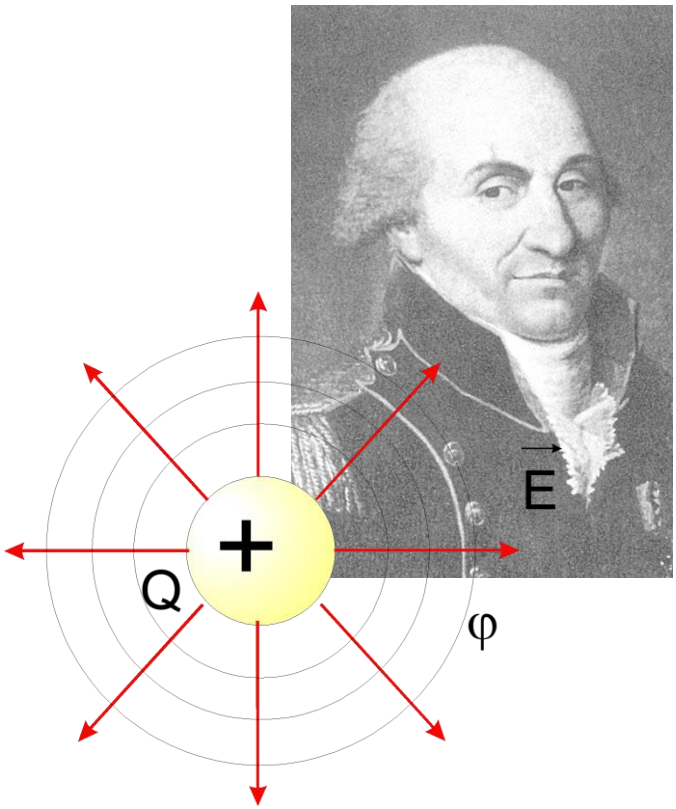
PHYSIK KLASSE 11 (LK)



ELEKTRODYNAMIK 2

Arbeit, Energie und Potential des elektrischen Feldes

2.4.2 LSA FLP 2019

2022-2023

H. Knopf

LSA FLP 2019

Dieses Material ist ausschließlich für den unterrichtsbegleitenden Einsatz bestimmt. Dieses Dokument stellt keinen Ersatz für den Unterricht dar. Die Teilnahme an den Unterrichtsveranstaltungen ist zwingend erforderlich. Die Lektüre der im Anhang angegebenen Literatur wird dringend empfohlen. Jede weitere Nutzung – insbesondere Vervielfältigung jeglicher Art – bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des Autors.
Wie jede Publikation ist auch diese nicht gänzlich frei von Fehlern. Die Benutzung erfolgt auf eigene Gefahr und ohne Gewähr für die Folgen.

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Titelbild: Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806)

9. ELEKTRODYNAMIK 2 – ARBEIT, ENERGIE UND POTENTIAL DES ELEKTRISCHEN FELDES4

9.1. DIE ARBEIT IM ELEKTRISCHEN FELD 4
9.1.1. Wiederholung: Die mechanische Arbeit 4
9.1.2. Die Arbeit im elektrostatischen Radialfeld 5
9.1.3. Die Unabhängigkeit der Arbeit vom Weg im elektrischen Feld 8
9.1.4. Die Arbeit im elektrostatischen homogenen Feld 9
9.1.5. Anwendungsaufgaben 10
9.2. DIE POTENTIELLE ENERGIE DES ELEKTRISCHEN FELDES 11
9.2.1. Das elektrostatische Potential 15
9.2.2. Potentialflächen 17
9.3. DIE ELEKTRISCHE SPANNUNG 18
9.3.1. Die Spannung am Plattenkondensator 19
9.3.2. Die Spannung im Radialfeld 21
9.3.3. Anwendungsaufgaben 22
9.4. REGISTER: ELEKTRODYNAMIK 2 – ARBEIT, ENERGIE UND POTENTIAL DES ELEKTRISCHEN FELDES 23
9.5. VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN, TABELLEN: ELEKTRODYNAMIK 2 – ARBEIT, ENERGIE UND POTENTIAL DES ELEKTRISCHEN FELDES 24
9.6. QUELLEN: ELEKTRODYNAMIK 2 – ARBEIT, ENERGIE UND POTENTIAL DES ELEKTRISCHEN FELDES 25

© H. Knopf

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

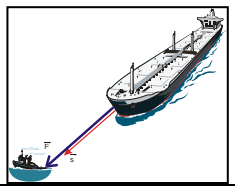
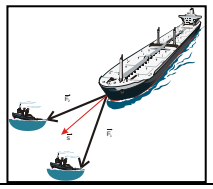
9. Elektrodynamik 2 – Arbeit, Energie und Potential des elektrischen Feldes[1]

9.1. Die Arbeit im elektrischen Feld

9.1.1. Wiederholung: Die mechanische Arbeit

In der Mechanik wurde bereits der Begriff der Arbeit benutzt. Dabei wurden unterschieden, wie die auftretende Kraft wirkt (mit konstantem oder veränderlichem Betrag) bzw. in welche Richtung. Hierbei traten folgende Fälle auf:

Tabelle 1: Fallunterscheidung für die Berechnung der mechanischen Arbeit

I.	**Gleichung 1** $W = Fs$ Bedingungen: • Kraft und Weg gleichgerichtet • Betrag der Kraft konstant	**Abbildung 1** 
II.	**Gleichung 2** $W = \vec{F} \circ \vec{s} = \left\|\vec{F}\right\| \cdot \left\|\vec{s}\right\| \cdot \cos\left(\angle \vec{F}, \vec{s}\right) = Fs \cdot \cos\alpha$ Bedingungen: • Kraft und Weg **nicht** gleichgerichtet • Betrag der Kraft konstant	**Abbildung 2** 
III.	**Gleichung 3** $W = \int_{s_A}^{s_E} F(s)\,ds$ Bedingungen: • Kraft und Weg gleichgerichtet • Betrag der Kraft **nicht** konstant	
IV.	**Gleichung 4** $W = \int_{s_A}^{s_E} \overrightarrow{F(s)} \circ d\vec{s}$ $W = \int_{s_A}^{s_E} \left\|\vec{F}\right\| \cdot \cos\left(\angle \vec{F}, \vec{s}\right) d\left\|\vec{s}\right\|$ $W = \int_{s_A}^{s_E} \left\|\vec{F}\right\| \cdot \cos\alpha \cdot d\left\|\vec{s}\right\|$ Bedingungen: • Kraft und Weg **nicht** gleichgerichtet • Betrag der Kraft **nicht** konstant	

[1] Nach Fachlehrplan LSA FLP 2019.

© H. Knopf

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

9.1.2. Die Arbeit im elektrostatischen Radialfeld

Wenn eine Ladung in einem elektrischen Feld bewegt wird, so ist je nach Ladungsart und –betrag oder Bewegungsrichtung ein gewisser Betrag an Arbeit aufzuwenden.

a) Bewegung auf einer Kreisbahn um die Zentralladung

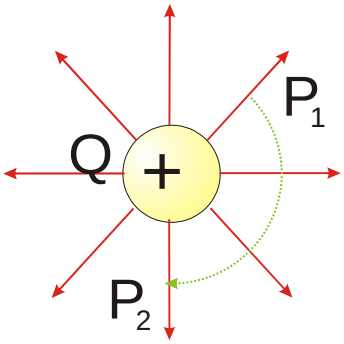


Abbildung 3: Bewegung auf der Kreisbahn

Wenn wir eine Ladung vom Punkt P_1 zum Punkt P_2 auf einer Kreisbahn bewegen, ändert sich der Betrag der Kraft nicht und sie steht immer senkrecht zur Bewegungsrichtung. Daher gilt nach Gleichung 2:

Gleichung 5

$$W = \vec{F} \circ \vec{s} = \left|\vec{F}\right| \cdot \left|\vec{s}\right| \cdot \cos\left(\angle \vec{F}, \vec{s}\right) = Fs \cdot \cos 90° = Fs \cdot 0 = 0$$

D.h. Zum Bewegen einer Ladung auf einer Kreisbahn um eine Zentralladung ist keine Arbeit zu verrichten.

b) Bewegung auf einer Feldlinie

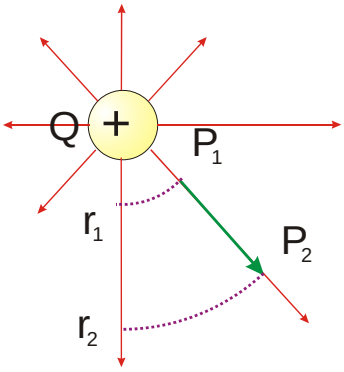


Abbildung 4: Bewegung auf der Feldlinie

Wenn eine Ladung auf einer Feldlinie bewegt wird, so muss man entweder Kraft aufwenden für die Bewegung, da die Feldkräfte hindernd wirken oder das Feld verrichtet Arbeit, so dass die Ladung durch das Feld bewegt wird.

Der Winkel zwischen Weg und Kraft ist jetzt Null, d.h. es gilt

Gleichung 6: Bedingungen für den Winkel

$$\angle\left(\vec{F}, \vec{s}\right) = 0°$$

$$\cos\left(\angle \vec{F}, \vec{s}\right) = 1$$

Da die Bewegung entlang der Feldlinie verläuft, gilt:

Gleichung 7

$$\left|W_{12}\right| = \int_{s_A}^{s_E} \overrightarrow{F(s)} \circ d\vec{s} = \begin{cases} \int_{r_1}^{r_2} \overrightarrow{F(r)} \circ d\vec{r} \xrightarrow{\text{wenn}} r_1 < r_2 \\ -\int_{r_2}^{r_1} \overrightarrow{F(r)} \circ d\vec{r} \xrightarrow{\text{wenn}} r_1 > r_2 \end{cases}$$

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit werden wir den Fall nehmen, dass $r_1<r_2$ gilt.
Für den Betrag der Arbeit kann man nun folgendes sagen (Gleichung 4, Gleichung 6):

$$|W_{12}| = \int_{r_1}^{r_2} \left|\overrightarrow{F(r)}\right| d\left|\vec{r}\right|$$ und laut der Definition der Feldstärke

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{q}\vec{F}$$

Das führt zu

Gleichung 8

$$|W_{12}| = \int_{r_1}^{r_2} F(r)dr$$

Gleichung 9

$$|W_{12}| = \int_{r_1}^{r_2} qE(r)dr$$

Gleichung 10

$$|W_{12}| = q\int_{r_1}^{r_2} E(r)dr$$

c) Beliebige Bewegung

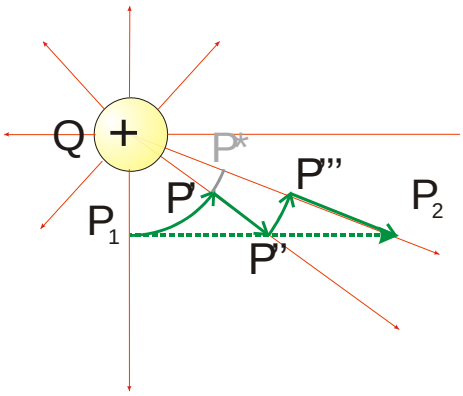


Abbildung 5: beliebige Bewegung

Wenn eine Ladung auf beliebigen Wege von P_1 nach P_2 bewegt wird, so kann man sich diese Bewegung als eine zusammengesetzte Bewegung vorstellen:

Von P_1 geht es nach P'. Von dort über P'' nach P''' und dann nach P_2.
Das spiegelt zwar nicht den korrekten Weg wieder, aber für eine Zerlegung des Weges in immer feinere Abschnitte stellt diese Zusammensetzung aus Kreis- und Feldlinienbewegungen immer besser die wirkliche Bewegung dar.
Für die Arbeit gilt dann

Gleichung 11

$$W_{12} = \lim_{n\to\infty} \sum_{i=1}^{n} \left(W(L)_i + W(K)_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \left(W(L)_i + W(K)_i\right)$$

© H. Knopf

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

$W(L)_i$ stellt den i-ten Weg entlang einer Feldlinie dar und $W(K)_i$ den i-ten Weg entlang eines Kreises
Wie wir bereits gezeigt haben, kann man auf den Anteil der Arbeit, die am Kreis entsteht verzichten, da es den Wert Null ergibt.

Gleichung 12

$$W_{12} = \lim_{n \to \infty} \sum_{i=1}^{n} W(L)_i = \sum_{i=1}^{\infty} W(L)_i$$

Einfacher könnte man es sich so vorstellen: Zunächst wird die Ladung auf einer Kreisbahn zum Punkt P* verschoben. Dann bewegt sich die Ladung entlang der Feldlinie zum Punkt P_2.

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

9.1.3. Die Unabhängigkeit der Arbeit vom Weg im elektrischen Feld

Aus Gleichung 12 kann man das Fundamentale dieser Aussage folgern:

Die Arbeit zum Verschieben von Ladungen im elektrischen Feld ist vom zurückgelegten Weg unabhängig. Nur Start- und Endpunkt bestimmen den Betrag der Arbeit.

Wenn man z.B. eine Ladung vom Punkt P beliebig bewegt und zu P zurückkehrt, so wird einerseits Arbeit aufgewendet und andererseits Arbeit vom Feld verrichtet, so keinerlei Arbeit gewonnen wird oder verloren geht.
Mathematisch drückt sich dies in einem sogenannten Umlaufintegral aus:

Gleichung 13

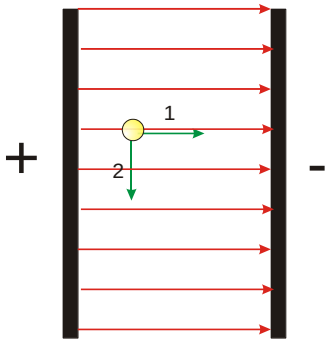
$$\oint_P \vec{F} d\vec{s} = 0$$

Man nennt Felder, für die dies gilt wirbelfrei.
Zur Illustration, was eine wirbelfreies Feld bedeutet, stelle man sich einen Schwimmer vor, der auf einem Teich ohne Strömung schwimmt und im Vergleich dazu einen Schwimmer, der einen Fluss mit Strudeln zu durchqueren versucht.

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

9.1.4. Die Arbeit im elektrostatischen homogenen Feld

In einem Plattenkondensator befinde sich eine Probeladung, die bewegt werde soll.



In diesem Falle wird der Aufwand, die notwendige Arbeit zu bestimmen wesentlich einfacher.

Abbildung 6: Arbeit im homogenen Feld

Die Arbeit im Falle einer Bewegung in Richtung 2 (Abbildung 6) wird **keine Arbeit** verrichtet.

Bei einer Bewegung in Richtung 1 wird (je nach Ladungsart) Arbeit vom Feld verrichtet (falls die Probeladung positiv ist) oder man muss entgegen den Feldkräften Arbeit aufwenden (falls die Probeladung negativ ist).

Da die Feldkraft konstant ist und die Bewegung parallel zur Kraftrichtung erfolgt, kann die Arbeit mit

Gleichung 14: Betrag der Arbeit im Plattenkondensator

$$W = 0 \text{ falls } \vec{F} \perp \vec{s}$$
$$W = \vec{F} \circ \vec{s} = q\vec{E} \circ \vec{s} \text{ falls } \vec{F} \parallel \vec{s}$$

berechnet werden.

9.1.5. Anwendungsaufgaben

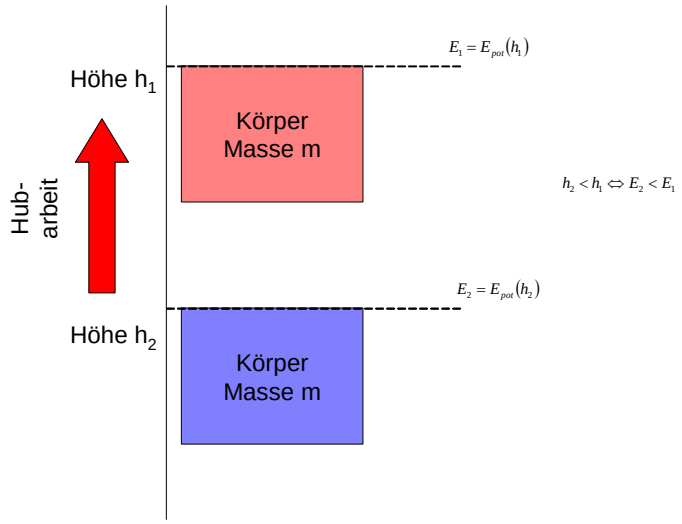
...

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

9.2. Die potentielle Energie des elektrischen Feldes

Da die Verschiebung von Ladungen in einem elektrischen Feld mit der Verrichtung von Arbeit verbunden sein kann, sollte man sich auch über den Begriff der Energie im elektrischen Feld Gedanken machen.

Abbildung 7: Arbeit und Energie im Gravitationsfeld



In der Mechanik oder in der Thermodynamik führt das Verrichten von Arbeit dazu, dass sich die Energie des Systems ändert. Zum Beispiel erhöht sich die potentielle Energie eines Körpers, wenn er angehoben wird.

Die Arbeit zum Bewegen eines Körpers von P_1 nach P_2 im Gravitationsfeld laut

Gleichung 15: Arbeit im Gravitationsfeld

$$|W_{12}| = \int_{P_1}^{P_2} \vec{F}(\vec{s}) \circ d\vec{s}$$

Im elektrischen Feld kann Gleichung 15 durch

Gleichung 16

$$|W_{12}| = \int_{P_1}^{P_2} q\vec{E}(\vec{s}) \circ d\vec{s} = q\int_{P_1}^{P_2} \vec{E}(\vec{s}) \circ d\vec{s}$$

ausgedrückt werden.
Die Energie des Systems verändert sich dabei genau um folgenden Betrag

Gleichung 17: Änderung der Systemenergie

$$\Delta E = W$$

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Potentielle Energie sollte nicht automatisch mit Lageenergie gleichgesetzt werden, da z.B. auch die Energie einer gespannten Feder potentielle Energie darstellt. Während „potentiell“ sonst den Sinn von „möglich“ oder „denkbar“ hat, wird in der Physik die Energie, die ein Körper aufgrund seiner Lage in einem Kraftfeld besitzt, potentielle Energie genannt.

In Analogie zur Mechanik gibt es für das elektrische Feld ebenfalls eine potentielle Energie.

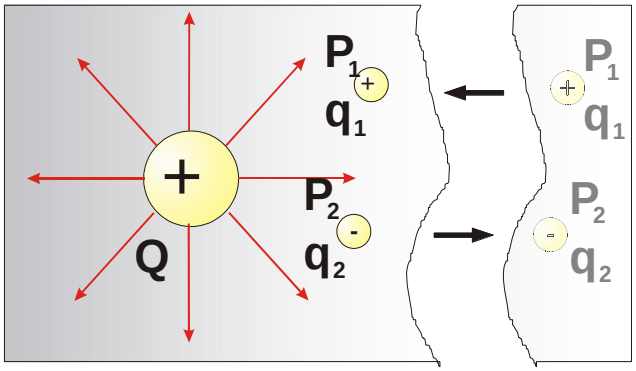


Abbildung 8: Definition des Begriffs potentielle Energie

Um die positive Ladung q_1 aus dem Unendlichen an den Punkt P_1 zu holen muss Energie aufgewendet werden, da die felderzeugende Ladung die Probeladung abstößt (Abbildung 8). Gleiches gilt für die negative Ladung q_2, wenn man sie vom Punkt P_2 ins Unendliche bringen will.

Wenn man für die Unendlichkeit festlegt, dass dort die potentielle Energie Null ist, so erhält man aus Gleichung 17:

Gleichung 18

$$|E_{pot}| \hat{=} |W|$$

Definition 1: potentielle Energie des elektrischen Feldes

Die potentielle Energie $E_{pot}(P)$ an einem Punkt P, ist die Energie, die notwendig ist, um eine Ladung q aus dem Unendlichen zum Punkt P zu bringen oder von diesem Punkt ins Unendliche zu bewegen.

Gleichung 19

$$E_{pot}(P) = \int_{P}^{\infty} \vec{F}(\vec{s}) \circ d\vec{s} = -\int_{\infty}^{P} \vec{F}(\vec{s}) \circ d\vec{s}$$

Gleichung 20

$$E_{pot}(P) = q\int_{P}^{\infty} \vec{E}(\vec{s}) \circ d\vec{s} = -q\int_{\infty}^{P} \vec{E}(\vec{s}) \circ d\vec{s}$$

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Beispiel:
Berechnen Sie die potentielle Energie einer Probeladung $q = 10^{-8} C$ im Feld einer Zentralladung $Q = 10^{-6} C$ im Abstand r=20cm von der Zentralladung.

Lösung:
Zunächst ermittelt wir den Betrag der Energie. Die Feldstärke im elektrischen Feld erhalten wir aus dem Coulombschen Gesetz.

$$\left|E_{pot}(P)\right| = q\int_r^{\infty} E(r) \circ dr \qquad E(r) = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

$$\left|E_{pot}(P)\right| = q\int_r^{\infty}\left(\frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}\right)dr$$

$$\left|E_{pot}(P)\right| = \frac{qQ}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \int_r^{\infty}\left(\frac{1}{r^2}\right)dr$$

$$\left|E_{pot}(P)\right| = \frac{qQ}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left[-\frac{1}{r}\right]_r^{\infty}$$

$$\left|E_{pot}(P)\right| = \frac{qQ}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\lim_{r\to\infty}\left(-\frac{1}{r}\right) - \left(-\frac{1}{r}\right)\right)$$

$$\left|E_{pot}(P)\right| = \frac{qQ}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(0 + \frac{1}{r}\right)$$

Gleichung 21

$$\left|E_{pot}(P)\right| = \frac{qQ}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

Da nicht nur der Betrag sondern auch die Frage der Aufnahme bzw. der Abgabe von Energie in einem System wichtig ist, soll an dieser Stelle wieder daran erinnert werden, dass die Energieaufnahme eines Systems ein positives und die Abgabe ein negatives Vorzeichen hat.

Gleichung 21 wird entsprechend der vorherigen Festlegungen für das Vorzeichen jetzt konkretisiert.

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Die Probeladung q ist positiv. Für das Heranbewegen einer positiven Ladung an Q, welches ebenfalls positiv ist, muss wegen der Abstoßungskräfte Arbeit gegen das Feld verrichtet werden, d.h. es wird Energie zugeführt. D.h. die Energie muss positiv sein.
Die Gleichung 21 liefert für den Fall q>0, Q>0 einen positiven Wert.

Für den Fall ungleichartigen Ladungen, wird vom Feld Arbeit verrichtet, so dass die Energie negativ sein muss.
Die Gleichung 21 liefert für den Fall q<0, Q>0 oder q>0, Q<0 einen negativen Wert.

Folglich kann man die Betragsstriche weg lassen und man bekommt eine Formel für die Energie, die auch das Vorzeichen korrekt angibt.

Gleichung 22: potentielle Energie im Radialfeld

$$E_{pot}(P) = \frac{qQ}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

q	Probeladung
Q	Zentralladung
r	Abstand des Punktes P zur Zentralladung Q

Für die Beispielwerte ergibt sich für die Energie folgendes Ergebnis:

$$E_{pot}(P) = \frac{10^{-6}\,As \cdot 10^{-8}\,As}{4\pi \cdot 8{,}854187 \cdot 10^{-12}\,\frac{As}{Vm}} \cdot \frac{1}{0{,}2m}$$

$$E_{pot}(P) = 4{,}493776 \cdot 10^{-4}\,J \approx 4{,}5 \cdot 10^{-4}\,J$$

Die potentielle Energie liefert eine neue Betrachtungsmöglichkeit des elektrischen Feldes: die energetische Beschreibung.

9.2.1. Das elektrostatische Potential

Leider ist die potentielle Energie keine besonders gute Beschreibung des elektrischen Feldes, da sie auch von Faktoren abhängt, die keine Feldeigenschaften sind.

$$E_{pot} = E_{pot}(q, Q, r)$$

Probeladung Feldgrößen

Die Lösung des Problems, dass die potentielle Energie nur unvollkommen das elektrische Feld beschreibt, liegt darin, dass man eine neue Größe sucht, die nur Feldeigenschaften enthält und nicht mehr von der Probeladung abhängt.
Diese Größe ist das elektrostatische Potential φ.

Diese Entkopplung von Ladung und Feld erfolgt dadurch, dass man die aufgewendete Arbeit bzw. die potentielle Energie durch die verwendete Probeladung dividiert.

Definition 2: elektrostatisches Potential

Das Potential eines Punktes P gibt an, wie viel Arbeit je Ladungseinheit verrichtet werden muss, um eine Probeladung aus dem Unendlichen zum Punkt P zu verschieben

Gleichung 23: elektrostatisches Potential (1)

$$\varphi = \frac{W}{q}$$

Gleichung 24: elektrostatisches Potential (2)

$$\varphi(P) = \frac{W}{q} = -q\int_{\infty}^{P} \vec{E}(\vec{s}) \circ d\vec{s}$$

© H. Knopf

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Beispiel:

Wie groß ist das Potential in 20 cm Entfernung von einer Ladung der Größe $Q = 10^{-6}\,As$?

Lösung:

$$\varphi(P) = \frac{W}{q}$$

$$\varphi(r) = -\int_{\infty}^{r} \vec{E}\left(\vec{r}\right) \circ d\vec{r}$$

$$\varphi(r) = -\int_{\infty}^{r} \left(\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \right) dr \qquad [\varphi] = \frac{As}{\frac{As}{Vm}} \cdot \frac{1}{m}$$

$$\varphi(r) = \frac{-Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \int_{\infty}^{r} \left(\frac{1}{r^2} \right) dr \qquad = \frac{As}{As} \cdot \frac{Vm}{m}$$

$$= V$$

$$\varphi(r) = \frac{-Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \left[-\frac{1}{r} \right]_{\infty}^{r}$$

$$\varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

$$\varphi(r) = 44.937{,}76V$$

9.2.2. Potentialflächen

Wenn man alle Orte verbindet, die das gleiche Potential besitzen, so erhält man Linien bei zweidimensionaler Darstellung bzw. Flächen bei dreidimensionaler Darstellung, auf denen eine Bewegung ohne Verrichtung von Arbeit möglich ist. Diese Linien bzw. Flächen heißen Äquipotentiallinien bzw. -flächen.

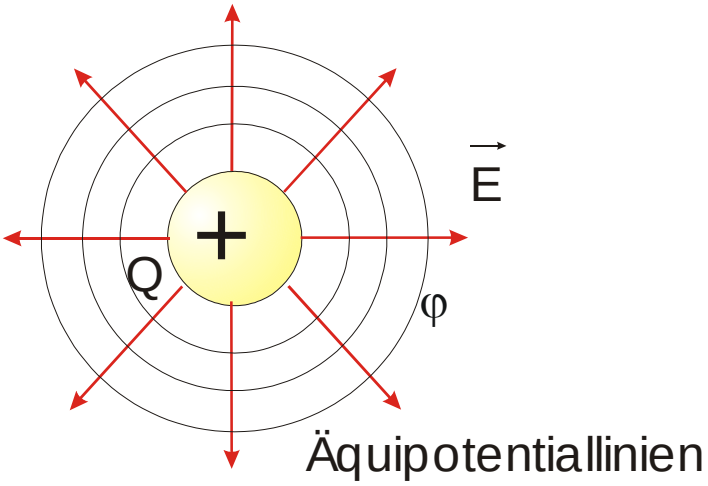


Abbildung 9: Äquipotentiallinien

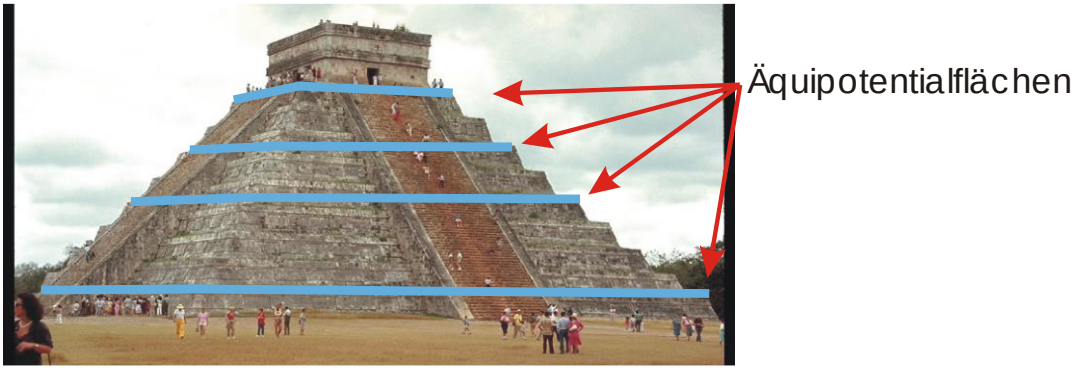
Die Feldlinien stehen stets senkrecht zu den Äquipotentialflächen bzw. -linien.

Da die Bewegung auf diesen Flächen bzw. Linien ohne Aufwand von Energie möglich ist, sind sie von großer Bedeutung.

Besonders gut kann man sich das klar machen, wenn man an die Äquipotentialflächen bzw. -linien in der Mechanik denkt.

Wenn ein Tourist das Bauwerk in der Abbildung 10 nur auf einer Ebene besucht, wird ihm das nicht beschwerlich vorkommen, da er stets auf einer Äquipotentialfläche bleibt (Abbildung 10). Verlässt er eine Äquipotentialfläche in Richtung eines höheren Energieniveaus, so muss er beim Steigen Arbeit verrichten.

Abbildung 10: Äquipotentiallinien in der Mechanik



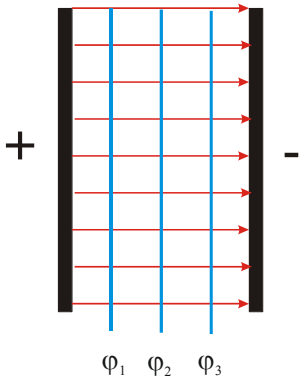
© H. Knopf

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Steigt er hingegen auf ein niedrigeres Niveau hinab, so gibt er wieder Energie ab.

Besonders einfach ist die Situation am Plattenkondensator Abbildung 11.

Abbildung 11: Äquipotentialflächen am Plattenkondensator



Die Stärke des elektrischen Feldes ist konstant, so kann man auf das Integrieren verzichten und die Berechnung des Potentials ist besonders einfach.

$$\varphi = -q\int_{\infty}^{P}\vec{E}\left(\vec{s}\right)\circ d\vec{s}$$

$$\Downarrow$$

$$\varphi = \vec{E}\circ\vec{s}$$

$$\Downarrow$$

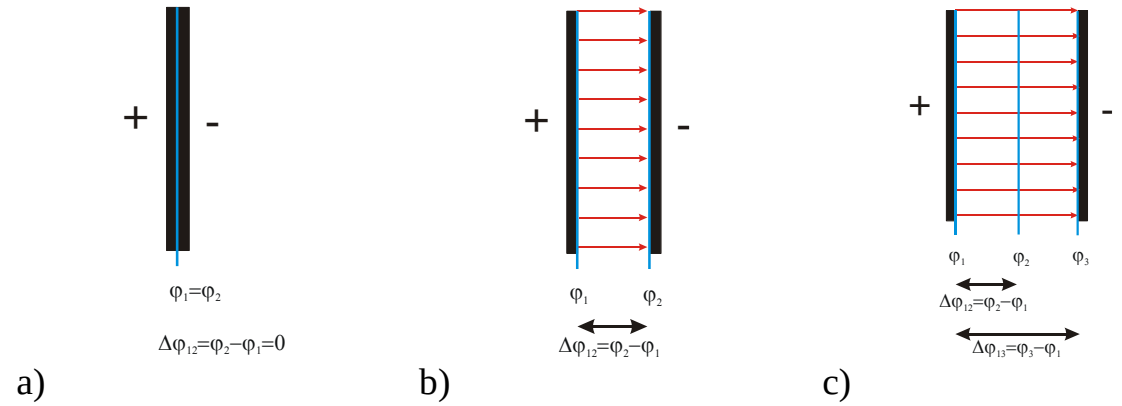
Gleichung 25: Potential am Plattenkondensator

$$\varphi = Es$$

9.3. Die elektrische Spannung

Wenn man zwei unterschiedlich geladene Platten eines Plattenkondensators trennen will, so muss zur Trennung der Ladung Energie aufgewendet werden, damit die notwendige Arbeit verrichtet werden kann.

Abbildung 12: Ladungstrennung und Potentialdifferenz



eAFN / LK nach LSA FLP 2019

Während in Abbildung 12(a) noch keine Differenzen der Potentiale festzustellen ist, nimmt die Differenz in den beiden anderen Bildern zu. Die aufzuwendenden Energie für die Arbeitsverrichtung nimmt ebenfalls zu. Dabei gilt für die Potentialdifferenz:

Gleichung 26

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

$$\Delta\varphi = \frac{E_{pot,2}}{q} - \frac{E_{pot,1}}{q}$$

Die Veränderung der Energie des Feldes ist mit einer Verrichtung von Arbeit verbunden: $\Delta E = W$.
Die Gleichung 26 nimmt dann diese Form an:

Gleichung 27: Potentialdifferenz

$$\Delta\varphi = \frac{1}{q}W$$

Definition 3: Potentialdifferenz und Spannung

Werden Ladungen unter Verrichtung von Arbeit getrennt, so ändert sich das Potential. Diese Potentialdifferenz heißt elektrische Spannung U.

Gleichung 28

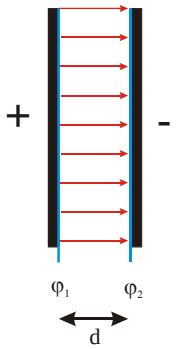
$$U = \Delta\varphi$$

$$U = \varphi_2 - \varphi_1$$

9.3.1. Die Spannung am Plattenkondensator

Da die elektrische Feldstärke im Plattenkondensator konstant ist, lässt sich die Spannung dort sehr leicht ermitteln.

Abbildung 13: Spannung am Plattenkondensator



Wenn wir einen Plattenkondensator mit der konstanten Feldstärke E und dem Plattenabstand d haben, so gilt für das Potential bzw. seine Differenz:

$$\varphi(P) = \int_{P}^{\infty} \vec{E}(\vec{s}) d\vec{s}$$

$$\varphi(P) = \vec{E}(\vec{s}) \circ \vec{s}$$

Gleichung 29

$$\varphi(P) = Es$$

Durch Anwendung von Gleichung 29 auf die Potentialdifferenz ergibt sich mit Gleichung 30 eine einfache Beziehung:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

$$\Delta\varphi = Es_2 - Es_1$$

$$\Delta\varphi = E(s_2 - s_1)$$

Gleichung 30: Spannung am Plattenkondensator

$$\Delta\varphi = Ed$$

$$U = Ed$$

Beispiel: Bei einer Spannung von 230 V und einem Plattenabstand von 0,5 cm tritt eine Feldstärke von $E = 46.000 \frac{V}{m}$ auf.

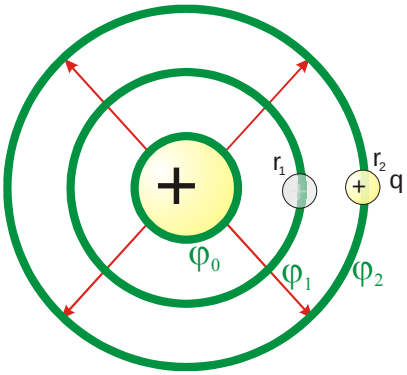
eAFN / LK nach LSA FLP 2019

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

9.3.2. Die Spannung im Radialfeld

Wenn eine Ladung vom Abstand r_1 zum Abstand r_2 bewegt wird, so baut sich dadurch eine Spannung auf.

Abbildung 14: Spannung im Radialfeld



Hierbei gilt:

Gleichung 31

$$U = \varphi_2 - \varphi_1$$

$$U = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Beispiel: Wenn im Zentralfeld einer Ladung $Q = 10^{-8} C$ eine andere Ladung von 10 cm auf 20 cm entfernt wird, so entsteht eine Spannung von -449,4 V.

9.3.3. Anwendungsaufgaben

...

© H. Knopf

9.4. Register: Elektrodynamik 2 – Arbeit, Energie und Potential des elektrischen Feldes

Äquipotentialflächen 17, 18
Äquipotentiallinien 17
Arbeit im elektrischen Feld 4, 8, 9, 11, 14
Arbeit, im elektrischen Feld 5
Arbeit, mechanische 4
Coulombsches Gesetz 13
Das elektrische Feld 1
elektrische Spannung 18, 19, 21
Elektrodynamik 4, 23, 24, 25
Energie 1, 4, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 23, 24, 25
Energie, potentielle 11, 12, 13, 14, 15
Feld, elektrisches homogenes 9
Feldkräfte, elektrische 5
Feldlinien, elektrische 5, 7
Gravitationsfeld 11
Kraftfeld 12
Ladungstrennung 18
Lageenergie 12
Mechanik 25
Physik 25
Plattenkondensator 9, 19
Potential, elektrostatisches 15
Potentialdifferenz 18, 19, 20
Probeladung 9, 12, 13, 14, 15
Radialfeld 5, 21
Spannung, elektrische 19
Thermodynamik 25
Umlaufintegral 8
Wirbelfreiheit 8
Zentralladung 5, 13, 14

© H. Knopf

9.5. Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen: Elektrodynamik 2 – Arbeit, Energie und Potential des elektrischen Feldes

Abbildungen:

Abbildung 1 4
Abbildung 2 4
Abbildung 3: Bewegung auf der Kreisbahn 5
Abbildung 4: Bewegung auf der Feldlinie 5
Abbildung 5: beliebige Bewegung 6
Abbildung 6: Arbeit im homogenen Feld 9
Abbildung 7: Arbeit und Energie im Gravitationsfeld 11
Abbildung 8: Definition des Begriffs potentielle Energie 12
Abbildung 9: Äquipotentiallinien 17
Abbildung 10: Äquipotentiallinien in der Mechanik 17
Abbildung 11: Äquipotentialflächen am Plattenkondensator 18
Abbildung 12: Ladungstrennung und Potentialdifferenz 18
Abbildung 13: Spannung am Plattenkondensator 19
Abbildung 14: Spannung im Radialfeld 21

Tabellen:

Tabelle 1: Fallunterscheidung für die Berechnung der mechanischen Arbeit 4
Tabelle 2: Quellen 25
Tabelle 3: Bild-Quellen 26

© H. Knopf

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

9.6. Quellen: Elektrodynamik 2 – Arbeit, Energie und Potential des elektrischen Feldes

Tabelle 2: Quellen

1	H. Knopf	Elektrodynamik in der Sekundarstufe II Manuskript (1994-2003)
2	F. Dittmer, E. Kaminski, Dr. H.-P. Pommeranz, Dr. R. Schülbe, M. Talanow	Fachlehrplan Gymnasium Physik Land Sachsen-Anhalt 2016
3		Formeln und Tabellen für die Sekundarstufe I und II Paetec 1996
4[HLB]	Chr. Gerthsen, H. Vogel (Hersg.)	Gerthsen Physik Springer Verlag 1999
5[HLB]	E. Grimsehl, W. Schallreuter, K. Altenburg (Hersg.)	Grimsehl Lehrbuch der Physik Band 2: Elektrizitätslehre B.G. Teubner Verlagsgesellschaft 1984
6	W. Bredthauer, W. Czech, R. v. Dwingelo-Lütten, u.a.	Groß-Berhag Felder Klett Verlag 1996
7	R. Sexl, I. Raab, E. Streeruwitz (Hersg. K.Jupe, M. Ludwig)	Kursthemen Physik Elektrodynamik Diesterweg Verlag 1996
8	B. Ebert, Chr. Hache, W. Krug, K. Liebers, R. Reichwald, W. Scholz, H.-J. Wilke, R. Winter	Lehrbuch Physik Sekundarstufe II Gesamtband Mechanik, Elektrizitätslehre, Thermodynamik, Optik, Kernphysik, Relativitätstheorie Volk und Wissen Verlag 1995
9	J. Grehn, J. Krause	Metzler Physik Schroedel Verlag 1998
10	G. Boysen, H. Heise, J. Lichtenberger u.a.	Oberstufe Physik Ausgabe E Cornelsen Verlag 2001

eAFN / LK nach LSA FLP 2019

11	F. Dorn, F. Bader	Physik Oberstufe Gesamtband 12/13 Schroedel Verlag 1996
12	H. Lindner	Physikalische Aufgaben Fachbuchverlag Leipzig / Carl Hauser Verlag (24. Auflage 1984, ... , 32. Auflage 2001)
13	O. Höfling	Physikaufgaben Sekundarstufe II Dümmler Verlag 1992 (und spätere Ausgaben)
14[HLB]	I. N. Bronstein, K.A. Semendjajew	Taschenbuch der Mathematik Teubner Verlagsgesellschaft 1985
	HLB	Lehrbuch auf Universitätsniveau

Tabelle 3: Bild-Quellen

15	http://www.spiegel.de/img/0,1020,1216077,00.jpg
16	http://de.wikipedia.org/wiki/Geoid
17	http://sfk.gfz-potsdam.de/images/abb.1.jpg