

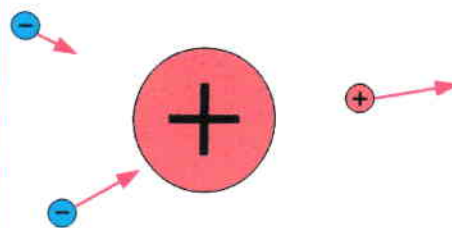
Ein geladener Körper übt auf andere geladene Körper Kräfte aus, diese können anziehend oder abstoßend sein. Die Größe der Kraft hängt dabei von der Größe der Ladungen und ihrem Abstand ab. Man kann sagen, die Anwesenheit einer Ladung verändert den Raum.

1. Elektrische Felder

1.1 Beschreibung elektrischer Felder

Begriff: Elektrisches Feld

Der ... Zustand des Raumes um einen geladenen Körper herum, der sich darin äußert, dass auf andere Körper ... Kräfte ausgeübt werden, nennen wir **elektrisches Feld**.

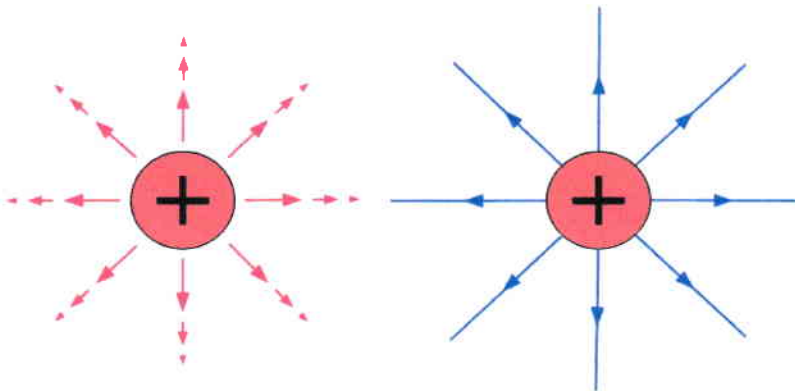


Zeichnet man die Kraftpfeile auf kleine Probeladungen in der Umgebung einer Ladung, so entsteht eine erkennbare Struktur des Feldes. Um den Aufwand für die Zeichnung zu verringern, verbindet man aufeinanderfolgende Kraftpfeile zu durchgängigen Feldlinien. Eine schöne Simulation findest Du auf phet.colorado.edu/de/simulations unter "Ladungen und Felder".

Worin unterscheidet sich das Bild für eine negative Ladung?

→ Feldlinien gehen auf neg. Ladung zu

Feldlinien (hier radiales Feld):



Vereinbarung: Feldlinien zeigen die Richtung der Kraft an, die auf eine positive Probeladung wirkt.

12 Elektrische Felder 1.1 Beschreibung elektrischer Felder

1

Aus den Eigenschaften von Ladungen ergeben sich Regeln für unsere modellhafte Beschreibung durch Feldlinien.

Regeln für Feldlinien:

1. Feldlinien beginnen bei positiven und enden bei negativen Ladungen.
2. Je dichter die Feldlinien, desto stärker ist dort das Feld.
3. Feldlinien können sich nicht verzweigen.
4. Feldlinien treffen immer senkrecht auf leitende Oberflächen.

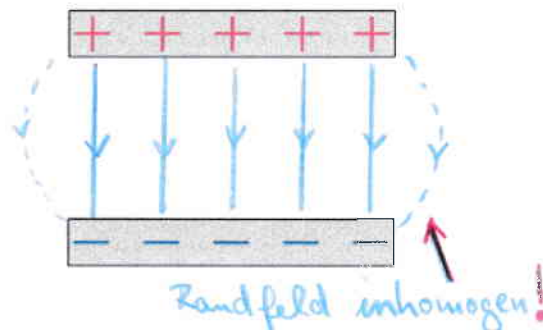
Anmerkungen hierzu:

- zu 1: Eine pos. Probeladung wird von einer pos. Ladung abgestoßen, die Feldlinie läuft also weg von der pos. Ladung.
- zu 2: Der gegenseitige Abstand der Feldlinien nimmt mit der Entfernung von der Ladung ab, das Feld ist dort schwächer.
- zu 3: Die Kraftrichtung auf eine Probeladung wäre im Verzweigungspunkt nicht bestimmt.

Sonderfall: Homogenes Feld

Als homogen wird ein Feld bezeichnet, das an jeder Stelle

... gleich stark ist. Das funktioniert nur, wenn seine Feldlinien ... parallel verlaufen.



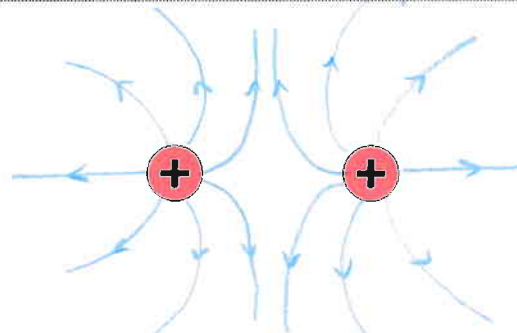
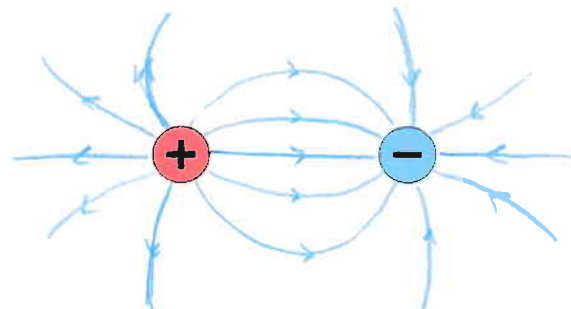
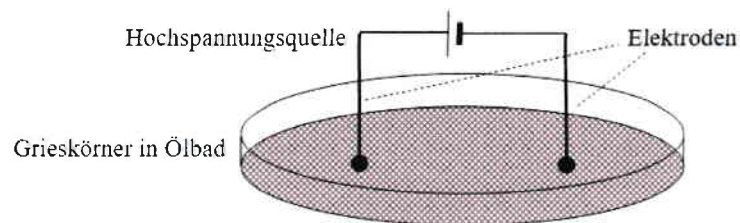
Beschreibe den Zusammenhang zwischen dem Feldlinienbild auf der ersten Folie und den Regeln 1 und 2.

Welche Auswirkung hätte es, wenn Regel 3 nicht gelten würde? (Zeichne ein Bildchen)

Ein besonders einfaches Feld lernst Du hier kennen. Wir werden noch oft damit arbeiten. Experimentell dargestellt wird es durch den Plattenkondensator. **Zeichne das Feldlinienbild.**

Eine beliebte Darstellung von Feldlinien im Experiment gelingt mit Grieskörnern, die in einem Ölbad schwimmen. Das elektrische Feld erzeugt man durch geladene Elektroden, die in das Ölbad eintauchen. Die Grieskörner richten sich dabei entlang der Feldlinien aus und bilden lange Ketten. siehe auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Ladungen und Felder Mittelstufe - Versuche - Darstellung von elektrischen Feldlinien sowie Ladungen und Felder Mittelstufe - Feldlinien.

Darstellung von Feldlinien mit Hilfe von Grieskörnern im Ölbad



12 Elektrische Felder 1.1 Beschreibung elektrischer Felder

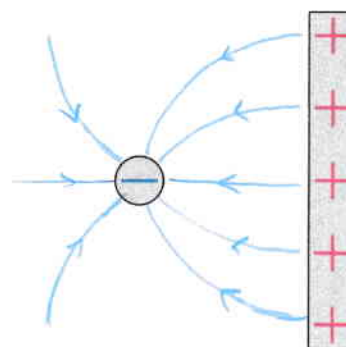
3

Zeichne die Feldlinienbilder für die zwei (klassischen) Beispiele von ungleichnamigen und gleichnamigen Punktladungen (die zweite Variante ist mit den Grieskörnern schwer darstellbar, gelingt aber mit der App. aus der 1. Folie).

Das erste Beispiel ist eine Kombination aus dem letzten Beispiel mit den Punktladungen und dem Plattenkondensator. Beginne mit den Feldlinien an der Punktladung wie gewohnt und beachte beim Auftreffen auf die Platte die 4. Regel für Feldlinien.

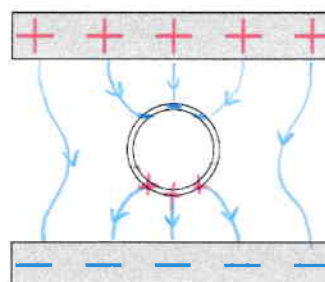
Das zweite Beispiel stammt aus einem früheren Abitur. Ein Ring (dreidimensional Hohlkugel) befindet sich im homogenen Feld eines Plattenkondensators. Dadurch trennen sich im neutralen Ring die Ladungen und wandern an die Ränder, die zu den Platten zeigen.

Training: Weitere Feldformen



das Feldlinienbild entspricht der Hälfte des Bildes auf Folie 3 (Prinzip der Spiegelladung)

Spiegelladung



- in metallischen Ring trennen sich die Ladungen (Anziehung von den Platten)
- im Inneren des Ringes kein Feld (Faraday-Käfig)

Selbst-Check:

- Feld und Feldlinien
- Regeln für Feldlinien
- Grieskörnermethode
- typische Feldformen

Übungsmöglichkeiten:

Viele Informationen und Bilder zum Thema gibt es auf Leifiphysik an den bereits zitierten Stellen (siehe Folie 3). Spielmöglichkeiten bietet vor allem die App von der University of Colorado (siehe Folie 1).

Im letzten Kapitel haben wir gelernt, elektrische Felder durch Bilder darzustellen. Um zu quantifizieren, wie stark ein Feld ist, führen wir die physikalische Größe Feldstärke ein. Wir nutzen hierzu eine Überlegung (Gedankenexperiment), Gründe für dieses Vorgehen später.

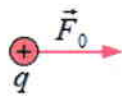
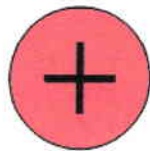
Folgere die Kraft auf die zwei Ladungen zusammen im zweiten Beispiel und verallgemeinere Deine Folgerung. Welche typische mathematische Eigenschaft ergibt sich daraus für die Größen q und F ?

Wir nutzen diese Folgerung für eine Definition unserer Zielgröße Feldstärke.

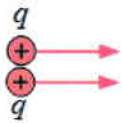
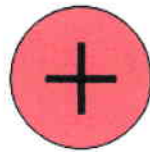
Vorsicht: Der Großbuchstabe E bietet Verwechslungsgefahr mit der Größe "Energie".

1.2 Feldstärke

Gedankenversuch zur Kraft auf Probeladungen



In die Nähe einer großen Ladung, die um sich herum ein Feld erzeugt, bringen wir zum Testen des Feldes eine kleine Probeladung q und messen an ihr eine elektrostatische Kraft F_0 .



Nun bringen wir eine zweite, identische Probeladung q in den gleichen Abstand zur feldgebenden Ladung und binden die beiden zusammen (sie würden sich sonst abstoßen). Die gesamte Kraft auf das Bündel beträgt dann $2 \cdot F_0$.

Verallgemeinerung: $F \sim q \rightarrow \frac{F}{q} = \text{const.}$

Definition:

Wir verwenden den konstanten Quotienten aus der Ladung q und der Kraft F , die auf diese Ladung q wirkt, als Maß für die elektrische Feldstärke E . Diese hat dieselbe Richtung, in die F wirkt.

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

Einheit: $1 \frac{N}{C} = 1 \frac{V}{m}$

Bemerkung: Diese Definition funktioniert im inhomogenen Feld ebenso wie im homogenen Feld.

12 Elektrische Felder 1.2 Feldstärke

1

In der Definition sind zwei verschiedene Einheiten für die Feldstärke angegeben, man kann sie ineinander umrechnen.

Einheitenumrechnung in obiger Definition:

$$1 \frac{N}{C} = 1 \frac{\frac{J}{m}}{As} = 1 \frac{\frac{Ws}{m}}{As} = 1 \frac{\frac{VAs}{m}}{As} = 1 \frac{V}{m}$$

Training: Berechnung der elektrostatischen Kraft

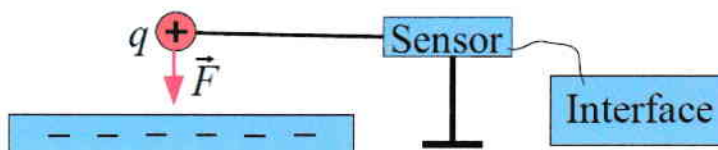
$$E = \frac{F}{q} \rightarrow F = E \cdot q$$

$$\frac{VAs}{m} = \frac{Ws}{m} = \frac{J}{m} = \frac{Nm}{m} = N$$

$$F = 2000 \frac{V}{cm} \cdot 25 nC = 2 \cdot 10^3 \frac{V}{cm} \cdot 25 \cdot 10^{-9} C$$

$$= 2 \cdot 10^5 \frac{V}{m} \cdot 25 \cdot 10^{-9} As = 50 \cdot 10^{-4} \frac{VAs}{m} = \underline{\underline{5,0 \cdot 10^{-3} N}}$$

Experiment: geladene Kugel im Feld eines Plattenkondensators



Ladung	q	$0,5 q$	$0,25 q$
Kraft in mN			

\rightarrow näherungsweise $F \sim q$
Beachte: die Kräfte sind winzig, 1mN entspricht Gewichtskraft auf 0,1g

12 Elektrische Felder 1.2 Feldstärke

2

Ein typischer Wert für die Feldstärke in unserem Plattenkondensator ist 2000 V/cm. Auf kleine Kugeln können wir etwa 25 nC aufbringen. Berechne daraus die Kraft auf eine Kugel im Kondensator.

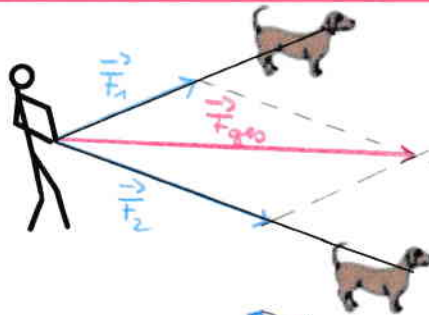
Dieses Experiment ist ein semiquantitatives Pendant zum Messexperiment im Buch. Wir messen hier die Ladung nicht explizit, sondern halbieren die Ladung im Verlauf der Messreihe mehrfach. Dies erreichen wir dadurch, dass wir die Probekugel im Kondensator mit einer gleich großen, neutralen Kugel berühren, so dass sich die Ladung auf beide Kugeln verteilt.

Das Superpositionsprinzip ist ein allgemeines Prinzip in der Physik, das Du schon mehrfach kennengelernt hast. Bei der Interferenz überlagern sich z.B. zwei Wellen, Wellenberge addieren sich, Berge und Täler löschen sich aus. Auch die Addition von Kräften war ein Beispiel für Superposition. Der obere Hund zieht mit 20 N, der untere mit 30 N, konstruiere die Gesamtkraft.

Hier kam die geometrische Addition von Pfeilen zur Anwendung, die wir auch bei Feldstärken nutzen werden. Die Ladungen Q_1 und Q_2 erzeugen jeweils Felder, die sich überlagern. Die Feldstärken an den gezeichneten Punkten betragen:
 $E_{P1} = 30 \text{ V/m}$, $E_{P2} = 6 \text{ V/m}$,
 $E_{S1} = 8 \text{ V/m}$, $E_{S2} = 13 \text{ V/m}$,
 $E_{T1} = 4 \text{ V/m}$, $E_{T2} = 28 \text{ V/m}$.
 Konstruiere jeweils die Gesamtfeldstärke.

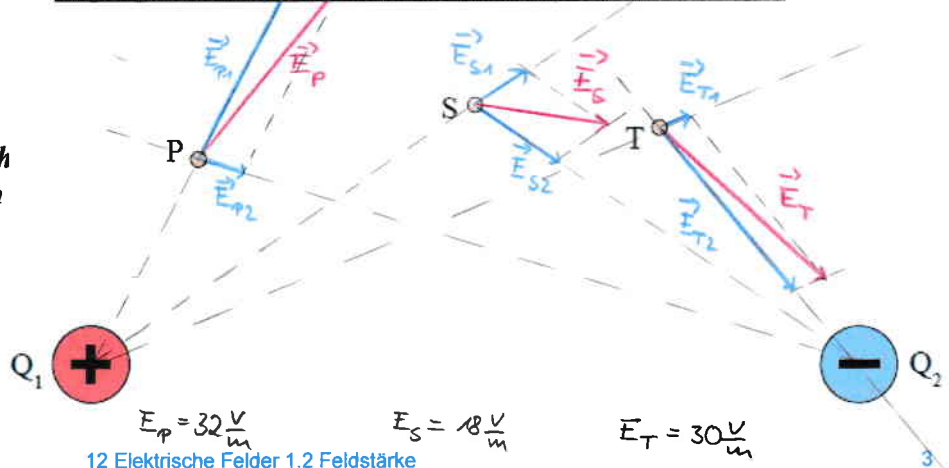
Das Superpositionsprinzip

Die Überlagerung gleichartiger physikalischer Größen, die sich dabei nicht stören, heißt Superposition.



$$F_{ges} = 48 \text{ N (ca.)}$$

Superposition von Feldstärken bei zwei Punktladungen



12 Elektrische Felder 1.2 Feldstärke

Mit dieser Formel lässt sich ganz leicht die Feldstärke in einem Plattenkondensator ermitteln, wir werden sie später noch herleiten.

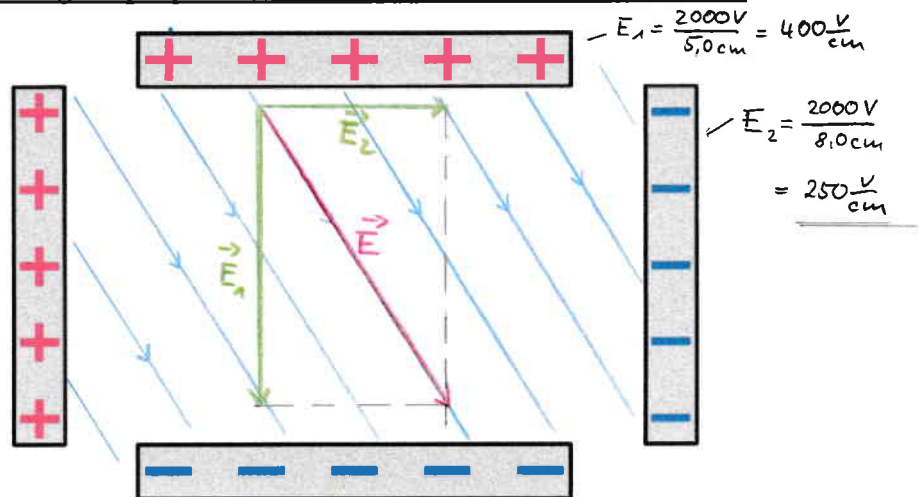
Formel: Feldstärke im homogenen Feld des Plattenkondensators

$$E = \frac{U}{d}$$

mit U = Spannung und d = Plattenabstand

In diesem Beispiel überlagern sich die Felder von zwei Plattenkondensatoren, die um 90° verdreht angeordnet sind, so dass sich ihre Felder kreuzen. An beiden Kondensatoren ist eine Spannung von 2000 V angelegt. Die senkrecht stehenden Platten haben einen Abstand von 8,0 cm, die waagrecht liegenden Platten von 5,0 cm. Berechne die einzelnen Feldstärken, stelle sie mit jeweils einem Pfeil dar und bestimme die Gesamtfeldstärke. Begründe, dass das Gesamtfeld homogen ist und zeichne ein Feldlinienbild.

Training: Superposition bei gekreuzten homogenen Feldern



$$E_1 = \frac{2000 \text{ V}}{5,0 \text{ cm}} = 400 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

$$E_2 = \frac{2000 \text{ V}}{8,0 \text{ cm}} = 250 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

Selbst-Check:

- Feldstärke, Definition und Herleitung
- Experiment
- Superposition von Feldern (geometr.)

E_1 und E_2 sind an jeder Stelle gleich groß (homogene Felder), damit ist auch E an jeder Stelle gleich groß \rightarrow Gesamtfeld homogen (außer am Rand!)

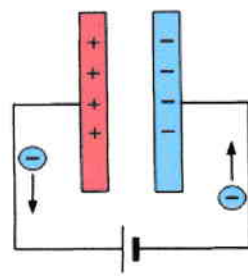
Übungsmöglichkeiten:

Aufgaben hierzu gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Ladungen und elektrisches Feld - Überlagerung elektrischer Felder Aufgaben. Gut passt "Feldüberlagerung". Mit dem Quiz kannst Du auch das vorige Kapitel wiederholen. Auch Buchkapitel 1.2 und 1.3 jeweils Aufg. 1 passen sehr gut.

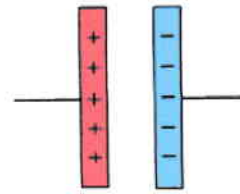
In den letzten Kapiteln haben wir das homogene Feld des Plattenkondensators kennengelernt. Kondensatoren sind als Ladungsspeicher wichtige Bauteile in Elektrik und Elektronik. Diese Fähigkeit untersuchen wir hier in einem Messexperiment. Mit einer Stromquelle können wir einen Kondensator aufladen, durch einen Verbraucher wieder entladen.

1.3 Kondensator

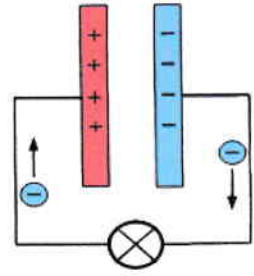
Versuchsprinzip



Aufladen

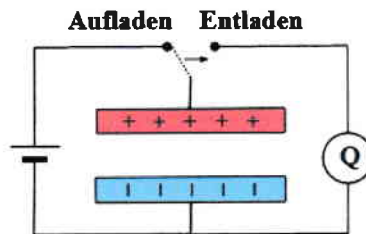


Speichern

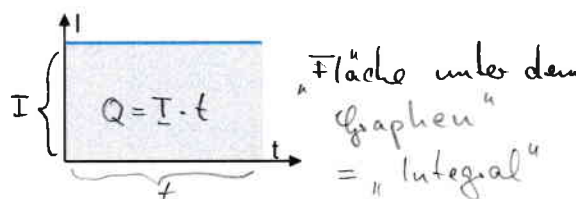


Entladen

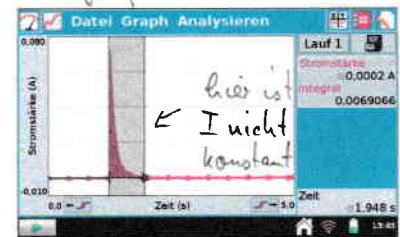
Experiment:



Prinzip Ladungsmessung Q:



das Messgerät Q misst die Stromstärke über die Zeit und bestimmt damit die transportierte Ladungsmenge $Q = I \cdot t$ (falls $I = \text{const.}$), das entspricht der Fläche unter dem Graphen $I(t) \rightarrow$ „Integral“



Im ersten Versuch laden wir den Kondensator mit unterschiedlichen Spannungen und messen beim Entladen jeweils die gespeicherte Ladungsmenge.

Ladungsmenge Q in Abhängigkeit von Ladespannung U:

U in V	0	50	100	150	200	250
Q in nC	0	17	35	52	70	87

Zeichne ein U - Q - Diagramm. Welcher Zusammenhang besteht zwischen den beiden Größen?



Fast immer, wenn wir in der Physik auf einen solchen Zusammenhang stoßen, bekommt der auftretende Quotient eine physikalische Bedeutung. Hier dient er als Maß für die Speicherefähigkeit eines Kondensators.

Anmerkung: Ein entsprechendes Experiment wirst Du noch selbst durchführen.

Damit ist der Quotient $\frac{Q}{U}$ konstant, wir nennen ihn Kapazität C, also $C = \frac{Q}{U}$

Einheit: $1 \frac{C}{V} = 1 F$ (Farad, nach dem Physiker Faraday)

Wir führen weitere Messungen durch, bei denen wir den Plattenabstand sowie die Plattenfläche (durch ein anderes Plattenpaar) verändern. Wir bestimmen jeweils die Ladungsmenge Q bei 100 V Ladespannung. Da hier technisch bedingt nur wenige Messungen möglich sind, verzichten wir auf eine Messkurve und vergleichen nur die Messergebnisse (das ist physikalisch nicht ganz sauber).

Die zwei Erkenntnisse aus dieser Folie fassen wir zu einer Formel für die Kapazität des Plattenkondensators zusammen.

Die Formel gilt für Vakuum oder Luft zwischen den Platten, füllt man den Zwischenraum mit Material, so wird die Kapazität in der Regel deutlich größer.

Berechne aus der letzten Messung ϵ_0

Im Schülerexperiment verwendest Du einen relativ kleinen Elektrolyt-Kondensator mit $47 \mu\text{F}$ Kapazität. Berechne die Plattenfläche, die nötig wäre, um bei einem Plattenkondensator (2 mm Plattenabstand) die gleiche Kapazität zu erreichen.

Eine Wolke in 1,2 km Höhe hat eine horizontale Ausdehnung von $5,0 \text{ km}^2$. Die Feldstärke zwischen Wolke und Erde beträgt 150 kV/m . Berechne Kapazität und Ladung dieses Kondensators. Wie lange dauert eine Blitzentladung mit $5,0 \text{ kA}$ mittlerer Stromstärke?

Selbst-Check:

- Experiment
- Definition Kapazität
- Abhängigkeiten beim Plattenkondensator
- Formel für Kapazität des Plattenkondensators

Ladungsmenge Q in Abhängigkeit vom Plattenabstand d (bei $U = 100 \text{ V}$ und $A = 800 \text{ cm}^2$)

d in mm	2	4
Q in nC	35	17
C in nF	0,35	0,17

Kapazität und Plattenabstand sind *umgekehrt proportional*

Ladungsmenge Q in Abhängigkeit von der Plattenfläche A (bei $U = 100 \text{ V}$ und $d = 2 \text{ mm}$)

A in cm^2	400	800
Q in nC	17	35
C in nF	0,17	0,35

Kapazität und Plattenfläche sind *direkt proportional*

Kapazität eines Plattenkondensators (Zusammenfassung):

Wir bauen die Ergebnisse in eine Formel zusammen:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

mit A = Plattenfläche, d = Plattenabstand und der

Proportionalitätskonstanten $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$

$$\epsilon_0 = \frac{C \cdot d}{A} = \frac{0,35 \cdot 10^{-9} \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot 0,002 \text{ m}}{800 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 8,75 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{Vm}}$$

12 Elektrische Felder 1.3 Kapazität

3

Vergleich von Plattenkondensator und Elektrolyt-Kondensator

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \rightarrow A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0}$$

$$A = \frac{47 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 0,002 \text{ m Vm}}{8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As}} = 10,617 \text{ m}^2 \approx 1 \text{ ha}$$

das entspricht der Fläche eines Fußballfeldes

Training: Kondensator-Modell für das System Wolke - Erde



1,2 km

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{5 \cdot 10^6 \text{ m}^2}{1,2 \cdot 10^3 \text{ m}} = 36,9 \text{ nF}$$

$$E = \frac{U}{d} \rightarrow U = E \cdot d = 150 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 1,2 \cdot 10^3 \text{ m} = 180 \text{ MV} \quad (1,8 \cdot 10^8 \text{ V})$$

$$Q = C \cdot U = 36,9 \cdot 10^{-9} \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot 1,8 \cdot 10^8 \text{ V} = 6,64 \text{ C}$$

$$T = \frac{Q}{I} \rightarrow t = \frac{Q}{I} = \frac{6,64 \text{ As}}{5,0 \cdot 10^3 \text{ A}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 1,3 \text{ ms}$$

Übungsmöglichkeiten:

Aufgaben hierzu gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Kondensator und Kapazität - Kondensator und Kapazität Aufgaben sowie - Kapazität eines Plattenkondensators Aufgaben. Sinn machen vor allem die leichten (grünen) Aufgaben und das Quiz. Auch die Arbeitsaufträge im Buchkapitel 2.1 passen gut (inklusive Musteraufgabe).

12 Elektrische Felder 1.3 Kapazität

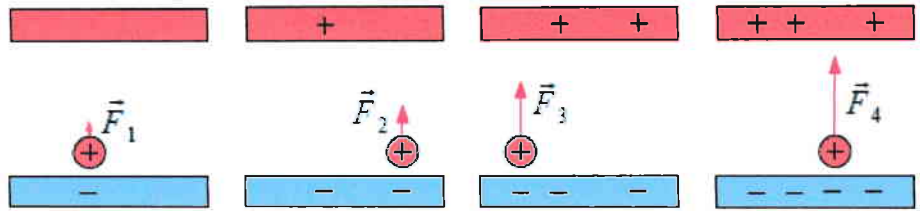
4

In der Technik nutzen wir Kondensatoren auch, um Energie zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Hier ähneln sie den wohl bekannten Akkus, weichen aber in einigen Eigenschaften von diesen ab. Generell kann man sagen, dass sich Kondensatoren eher für kleinere Energiemengen eignen, diese aber im Vergleich zu Akkus sehr schnell aufnehmen und abgeben können. Um eine Formel für die gespeicherte Energie zu finden, modellieren wir den Ladevorgang dadurch, dass wir in Gedanken einzelne Ladungen (elektromechanisch) von einer Kondensatorplatte zur anderen transportieren. **Ergänze die Lücken im Text.** Bei der Umschreibung der Formel nutzen wir die Definition für die Stromstärke $I = Q/t$.

1.4 Energie im Kondensator

Gedankenexperiment:

Wir laden einen Kondensator auf, indem wir eine Ladung q nach der anderen von einer Platte entnehmen und zur anderen Platte transportieren.



Bei jeder weiteren Ladung benötigen wir mehr Kraft, da wir sie gegen das Feld des bereits teilgeladenen Kondensators bewegen müssen.

Arbeit bei der Bewegung der Ladung gegen das Feld:

In der Mechanik gilt für die verrichtete Arbeit generell $W = F \cdot s$,

das bedeutet, die Arbeit wird mit jeder weiteren Ladung größer.

In der Mittelstufe haben wir für die elektrische Arbeit eine Formel

kennengelernt: $W = U \cdot I \cdot t$ und $I \cdot t = q$

Diese lässt sich umschreiben zu: $W = U \cdot q$

Während Akkus während des gesamten Lade- bzw. Entladevorganges eine fast gleichbleibende Spannung aufweisen (sonst wären sie für viele Anwendungen gar nicht geeignet), verändert sich die Spannung bei Kondensatoren während des Ladens und Entladens ganz erheblich (hier rot dargestellt, Achtung: die Kurve zeigt die Entwicklung nicht zeit-, sondern ladungsabhängig). Das Problem bei der Berechnung der Gesamtarbeit (= Gesamtenergie) liegt hier darin, dass sich beim Laden die Spannung permanent ändert. Die Berechnungsmethodik, die wir hier anwenden, ist mathematisch betrachtet wieder eine Integration (so wie bei Stromkurve und Ladungsmenge).

Die zweite Formel ergibt sich mit $Q = C \cdot U$.

Spannung eines Kondensators in Abhängigkeit von der Ladungsmenge

Beim Aufladen eines Kondensators wächst seine Spannung

proportional zu seiner Ladungsmenge, das lässt sich an der

Formel $C = \frac{Q}{U} \rightarrow U = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot Q$ erkennen.

Berechnung der Gesamtenergie für das Laden eines Kondensators

Da sich beim betrachteten Vorgang (1. Folie) die Spannung des Kondensators (rote Kurve) mit jeder zusätzlichen Ladung vergrößert,

müssen wir auch die aufgewendete Arbeit für jede Ladung neu berechnen. Das Produkt $W = U \cdot q$ entspricht dabei der

Fläche eines Rechtecks (s.u. W_0 beibehalten)

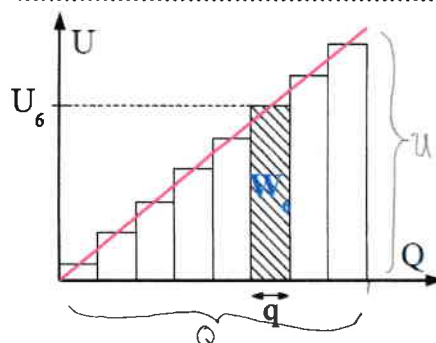
unter der Spannungskurve. Die gesamte Arbeit ist dann die

Summe aller Rechteckflächen,

näherungsweise entspricht das der

Fläche des Dreiecks

unter der Kurve.



Energie im Kondensator:

$$E_{el} = \frac{1}{2} Q \cdot U$$

oder:

$$E_{el} = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

Gute Fahrradbeleuchtungen mit Dynamo warten mit einer Standlichtfunktion am Rücklicht auf. Zur Energieversorgung nutzt man hier hochkapazitive Kondensatoren (Highcaps). **Berechne für einen 0,33 F-Highcap die gespeicherte Energie bei 6,0 V. Welche Leuchtdauer berechnet man für eine LED mit 50 mW Leistung? Diskutiere die vereinfachte Berechnung und bewerte den Nutzen dieser Technik. Welche Vorteile haben hier Kondensatoren im Vergleich zu Akkus?**

Defibrillatoren können bei Herzstillstand oder Kammerflimmern durch einen Elektroschock das Herz wieder zum richtigen Rhythmus anregen. **Berechne die Kapazität eines Pufferkondensators, der bei 4,0 kV gerade die maximal zulässige Energiemenge von 360 J bereitstellt.**

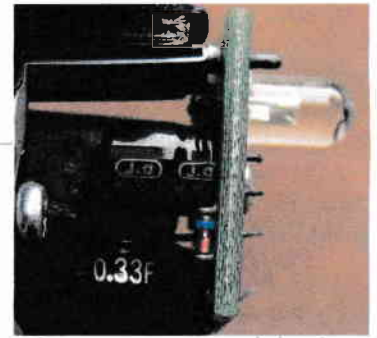
Anwendung: Fahrradrücklicht mit Standlichtfunktion

$$E_{el} = \frac{1}{2} C U^2 \quad | \quad VAs = Ws = J$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 0,33 \frac{As}{V} \cdot (6,0V)^2 = 5,94 J$$

$$P = \frac{E_{el}}{t} \rightarrow t = \frac{E_{el}}{P}$$

$$= \frac{5,94 Ws}{0,050 W} = 119 s = 2,0 \text{ min}$$



Gegen Ende der Entladung ist die Spannung zu klein, um die LED zum Leuchten zu bringen. → Zeit kürzer
Standlicht erhöht die Sicherheit bei Nacht, z.B. wenn man an einer Ampel steht, der Kondensator kann in kurzer Zeit beim Fahren schon wieder voll aufgeladen werden, funktioniert auch bei Kälte und altes kann.

Anwendung: Defibrillator

$$E_{el} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad | \quad \frac{As}{V} = F$$

$$\rightarrow C = \frac{2 \cdot E_{el}}{U^2} = \frac{2 \cdot 360 VAs}{(4000 V)^2} = 45 \mu F$$

Verändert man die Platten-geometrie (insbesondere den Plattenabstand d), so ändert sich auch seine Kapazität (siehe Formel in 1.3). Dies wird sehr gerne in kniffligen Aufgaben genutzt, die sich mit Hilfe dieser beiden Regeln aber leicht bearbeiten lassen.

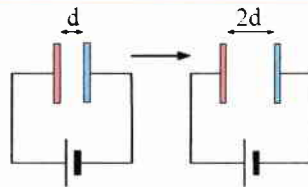
Der Plattenabstand wird verdoppelt, im ersten Beispiel mit angeschlossener Stromquelle, im zweiten Beispiel bei abgeklemmter Stromquelle. Erläutere die Auswirkungen, die dies auf die Größen Kapazität C , Ladungsmenge Q , Spannung U und Feldstärke E , sowie auf die gespeicherte Energie E_{el} hat. Argumentiere mit den bekannten Formeln.

Selbst-Check:

- Gedankenexperiment
- Berechnung der Energie durch Integration
- Anwendungen
- Veränderung der Plattengeometrie

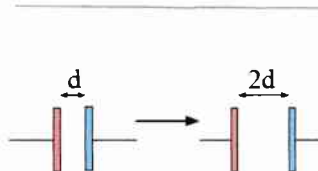
Kondensatorspielereien: Veränderung der Plattengeometrie

Verändert man die Kapazität bei angeschlossener Stromquelle, so bleibt die **Spannung gleich**. Verändert man die Kapazität bei abgeklemmter Stromquelle, so bleibt die **Ladungsmenge gleich**.



$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \rightarrow \text{wenn } d \text{ verdoppelt wird,}$$

- dann halbiert sich C
- U bleibt gleich (siehe Kasten)
- $C = \frac{Q}{U} \rightarrow Q = C \cdot U \rightarrow Q$ wird halbiert
- $E = \frac{U}{d} \leftarrow \text{bleibt}$ $\frac{U}{d} \leftarrow \text{verdoppelt}$ E wird halbiert
- $E_{el} = \frac{1}{2} C U^2$ wird halbiert, da U gleich



- C halbiert wie oben
- Q bleibt (siehe Kasten)
- $C = \frac{Q}{U} \rightarrow U = \frac{Q}{C} \leftarrow \text{gleich}$ $C \leftarrow \text{halbiert}$ $\rightarrow U$ wird verdoppelt
- $E = \frac{U}{d} \leftarrow \text{verdoppelt}$ $d \leftarrow \text{verdoppelt}$ $\rightarrow E$ bleibt
- $E_{el} = \frac{1}{2} C U^2$ wird verdoppelt

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik gehen jetzt zusätzlich zu den im letzten Kapitel genannten auch die unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre - Kondensator und Kapazität - Elektrische Energie im geladenen Kondensator Aufgaben, auch das Quiz dort**. Sinn machen vor allem die leichten (grünen) Aufgaben. Auch die **Arbeitsaufträge im Buchkapitel 2.2** passen dazu (inklusive Musteraufgabe).

Wenn wir Probeladungen gegen die Kraft in einem elektrischen Feld bewegen, verrichten wir Arbeit. Um hierfür ein Rechenmodell zu entwickeln, vergleichen wir das mit der Hubarbeit im Gravitationsfeld, die wir gut aus der Mittelstufe kennen. **Stelle die auftretenden Größen in einer Minitablelle gegenüber, z.B. "Masse" entspricht ...**

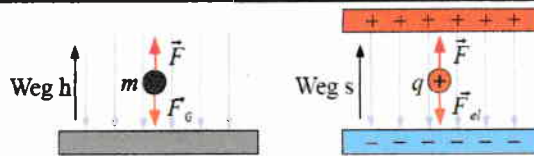
Die Begriffe Arbeit und Energie sind eng miteinander gekoppelt, das zeigt schon ihre gemeinsame Einheit J. Wenn wir einen Nullpunkt für die Energie festlegen, nutzen wir die Formeln synonym.

Weil die Probeladung jetzt separat steht, eignet sich das Potential perfekt, um die Struktur des Feldes quantitativ zu beschreiben.

Die Abbildung zeigt drei Positionen a) - c) in einem homogenen Feld. Ordne die Potentiale φ_a - φ_c der Größe nach (beim größten Potential beginnend). Markiere mit grünen Linien alle Positionen, an denen das Potential jeweils den gleichen Wert hat, diese heißen Äquipotentiallinien. Wir vergleichen nun den neuen Begriff mit einem altbekannten. Berechne hierzu zunächst die Einheit des Potentials. Im nächsten Schritt verwenden wir zur Berechnung der Arbeit alternativ eine Formel aus der Mittelstufe und vergleichen (tatsächlich ist diese physikalisch vollständige Definition von Spannung vollkommen kompatibel mit der vorläufigen Definition aus der Mittelstufe). Jetzt bewegen wir eine Ladung von der negativen bis zur positiven Platte (dann ist der Weg s = Plattenabstand d).

1.5 Energie und Potential im Feld

Vergleich Hubarbeit versus Arbeit im elektrischen Feld:



Hubarbeit berechnen wir mit der Formel $W = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$, wobei F_G die konstante Kraft ist, mit der wir ziehen und h der Weg, den wir bewältigen müssen.

Elektrische Arbeit berechnen wir mit $W = F_{el} \cdot s = q \cdot E \cdot s$, wobei F_{el} die konstante Kraft ist, mit der wir ziehen und s der Weg, den wir bewältigen müssen.

Masse entspricht Ladung
Erdbeschleunigung entspricht Feldstärke

Arbeit und Energie:

In der Mittelstufe haben wir gelernt: Arbeit = *Energieänderung*, also: $W = \Delta E_{pot} = E_{pot,1} - E_{pot,0}$

Einfacher wird es, wenn man einen Nullpunkt für die Energie festlegt, im elektrischen Feld wählt man in der Regel dafür die negative Platte. Dann ist die potentielle Energie in der "Höhe" s gleich:

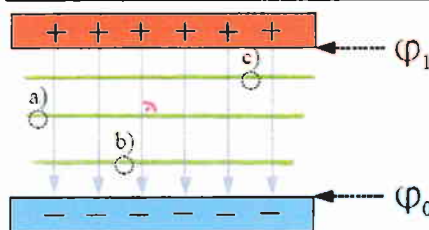
$$W = E_{pot} = q \cdot E \cdot s \quad (\text{für } E_{pot,0} = 0)$$

Potential:

Den Term $E \cdot s = \varphi$ nennen wir "Potential φ ". Damit lässt sich die potentielle Energie schreiben als: $E_{pot} = q \cdot \varphi$

Das Potential hängt im Gegensatz zur potentiellen Energie *nicht* von der Probeladung q , sondern *nur* vom Feld ab.

Potential im homogenen Feld (Plattenkondensator)



$$\varphi_c > \varphi_a > \varphi_b$$

Merke:

Äquipotentiallinien und Feldlinien schneiden sich immer

senkrecht

Spannung und Potential

Einheit Potential:

$$[\varphi] = [E] \cdot [s] = 1 \frac{V}{m} \cdot 1m = 1V$$

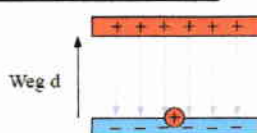
Alternative Berechnung für elektrische Arbeit:

$$W = U \cdot I \cdot t = U \cdot q \quad \text{da} \quad q = I \cdot t \rightarrow U = \frac{W}{q}$$

$$\text{mit (1)} \rightarrow U = \frac{E_{pot,1} - E_{pot,0}}{q} = \frac{E_{pot,1}}{q} - \frac{E_{pot,0}}{q} = \varphi_1 - \varphi_0$$

Spannung = Potentialdifferenz

Hilfreiche Formel:



$$W = U \cdot q = q \cdot E \cdot d \quad | : q$$

$$U = E \cdot d \quad | : d$$

$$E = \frac{U}{d}$$

für homogenes Feld

Eine Probeladung der Größe $+4,0 \text{ nC}$ befindet sich im homogenen Feld eines Plattenkondensators (Plattenabstand $d = 8,0 \text{ cm}$), der mit 200 V geladen wurde.

- Berechne die Feldstärke sowie die Kraft auf die Ladung.
- Berechne die Potentiale φ_2 und φ_4 in $2,0 \text{ cm}$ und $4,0 \text{ cm}$ Entfernung von der negativen Platte. Wie ändert sich der Potentialwert pro cm Abstand von der negativen Platte?
- Erstelle eine Zeichnung des Kondensators (Platten senkrecht, etwa 3 cm hoch, negative Platte links) im Maßstab 1:1 und zeichne für φ_2 und φ_4 die Äquipotentiallinien ein. Beurteile die Qualität des Modells für diese Geometrie.
- Zeichne darunter ein $s - \varphi$ -Diagramm, dessen s -Achse ihren Nullpunkt auf Höhe der negativen Platte hat.
- Man bewegt nun die Ladung von der Position 2 zur Position 4. Berechne die Arbeit hierbei.

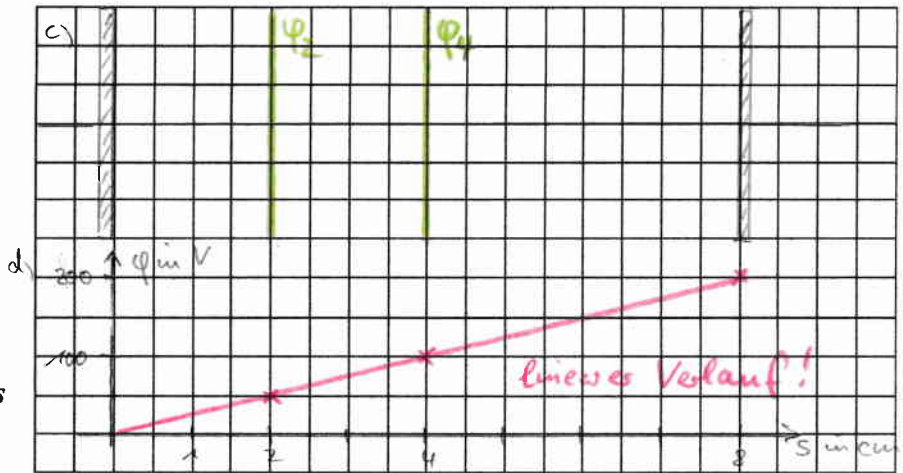
Musteraufgabe: Potential im homogenen Feld

$$a) E = \frac{U}{d} = \frac{200 \text{ V}}{8,0 \text{ cm}} = 25 \frac{\text{V}}{\text{cm}} = 2,5 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$$

$$F = q \cdot E = 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 2,5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{VAs}}{\text{m}} = 10 \mu\text{N}$$

$$b) \varphi_2 = E \cdot s_2 = 25 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot 2,0 \text{ cm} = 50 \text{ V}, \quad \varphi_4 = 25 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot 4,0 \text{ cm} = 100 \text{ V}$$

Potentialdifferenz pro cm beträgt 25 V ($200 \text{ V} : 8 \text{ cm}$)



zu c) Durch den großen Abstand der schmalen Platten werden sich die Randverformungen stark bemerkbar machen (inhomogen!)

$$e) \Delta\varphi = \varphi_4 - \varphi_2 = 100 \text{ V} - 50 \text{ V} = 50 \text{ V} \quad (\text{oder } 2 \text{ cm} \cdot 25 \text{ V/cm})$$

$$W = q \cdot \Delta\varphi = 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 50 \text{ V} = 200 \cdot 10^{-9} \text{ VAs} = 200 \text{ nJ}$$

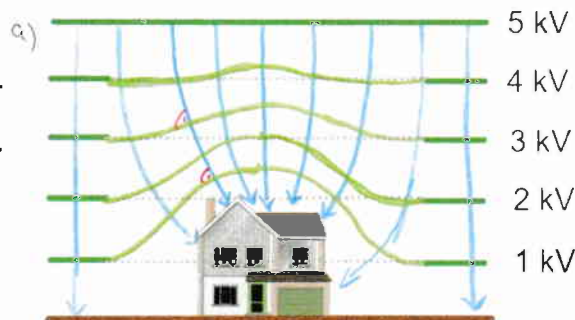
12 Elektrische Felder 1.5 Energie und Potential im Feld

3

Ein allgegenwärtiger Kondensator ist der Bereich zwischen dem Erdboden und den oberen Atmosphärenschichten (Ionosphäre). Sein Feld ist annähernd homogen, Erhebungen am Boden nehmen aber das Erdpotential an und verformen so die Äquipotentiallinien.

- Vervollständige den Verlauf der teilweise dargestellten Linien im Bereich um das Haus und beschreibe deren Abstände. Erläutere die Änderung der Feldstärke hierdurch.
- Zeichne auch die Feldlinien in diesem Bereich und nutze deren Verlauf bei Deiner Argumentation.
- Beurteile den Einfluss dieses Effekts auf die Gefährdung durch Blitzeinschläge.

Elektrisches Potential und Feldstärke in der Atmosphäre



Äquipotentiallinien werden nach oben gedrückt, ihre Abstände werden kleiner \rightarrow Feldstärke wird größer ($E = \frac{U}{d}$)

- Die Feldlinien werden zum Haus hin gebogen. Ihre Abstände in Hausnähe sind dadurch kleiner \rightarrow stärkeres Feld (Kap 1.1, 2. Feldregel)

- Durch das stärkere Feld in Hausnähe können Ladungen leichter überspringen \rightarrow Risiko für Blitzeneinschlag größer \rightarrow Blitzableiter sinnvoll

Verhaltensregeln im Gewitter für Fußgänger:
niedrige Position einnehmen (in die Hocke gehen), in Gefäßen stehen

Selbst-Check:

- Vergleich Hubarbeit und elektrische Arbeit
- elektrisches Potential
- Spannung und Potential
- Äquipotentiallinien
- Formel für Feldstärke

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik findest Du passende Aufgaben in Teilgebiet Elektrizitätslehre - Ladungen und elektrisches Feld - Potential und elektrische Spannung Aufgaben. Sehr gut passen "Äquipotentiallinien", "Elektrisches Feld und Potential" sowie "Potentialsonde". Auch die Arbeitsaufträge im Buchkapitel 3.1 passen dazu (beachte auch die Musteraufgabe dort, die unsere Betrachtungen ergänzt).

12 Elektrische Felder 1.5 Energie und Potential im Feld

4