DEIN LERNTAG · MITTWOCH, 11. NOVEMBER 2026

Physik Q12: verstehen, üben, sicher anwenden

Für deine Schulaufgabe am **Freitag, 13. November 2026**. Dieses Heft folgt deinen 24 PDF-Seiten Unterrichtsmitschrift und den Hinweisen zur 1. Schulaufgabe vom 05.11.2026.

Ladung → Feld und Kraft → Arbeit und Energie → Potential und Spannung → Kondensator

So lernst du heute damit

Runde	Was du machst	Orientierung
1 · Grundlagen	S. 3-6 verstehen; Aufgaben 1-4 auswählen.	ca. 40-50 min
2 · Energie und Potential	S. 7-10 durcharbeiten; Aufgaben 5-8 rechnen.	ca. 55-70 min
3 · Kondensatoren	S. 11-13 durcharbeiten; Aufgaben 9-12 rechnen.	ca. 50-65 min
4 · Selbsttest	Formelübersicht abdecken, Fehler erklären; bei Bedarf Probeklausur.	20 min + optional 45 min

Die Zeiten sind Richtwerte. Mache zwischen den Runden kurze Pausen. Lies einen Abschnitt, schließe das Heft und erkläre ihn mit eigenen Worten. Rechne zuerst selbst und schaue erst danach in den Lösungsteil.

Was gehört dazu?

Ausdrücklich genannt: Feldlinien, Aufladung und Influenz, Elektroskop, Feldstärke, Kräftezerlegung, Arbeit und Wegunabhängigkeit, Potential, Kapazität und Plattenkondensatoren. Teilchenbewegung und Schweben werden mitbehandelt, weil sie in deinen Übungsblättern vorkommen.

Ausgeschlossen: das Coulomb-Gesetz (Buch S. 48 f.) sowie Aufladung und Entladung des Kondensators einschließlich Strom-Zeit-Diagrammen. Die letzte Einschränkung folgt deiner Klarstellung. Kondensatorschaltungen stehen im Heft, aber nicht ausdrücklich in den Klausurhinweisen: dazu gibt es am Ende einen kurzen Zusatz.

Wegweiser: Erklärungen S. 2-14 · neue Übungsaufgaben S. 15-17 · Probeklausur S. 18-19 · Lösungen S. 20-24. Neue Aufgaben sind angelehnt an den Unterricht, keine Vorhersage der Klausur.

WERKZEUGE

Größen und Einheiten

Größe	Bedeutung	Einheit
q bzw. Q	elektrische Ladung	C = A·s
E	elektrische Feldstärke	N/C = V/m
F	Kraft	N
W, E_{pot}, E_{kin}	Arbeit, potentielle und kinetische Energie	J = N·m
φ, U	Potential und Spannung	V = J/C
C	Kapazität (hier Größenzeichen)	F = C/V

Der Buchstabe **C** kann eine Größe oder eine Einheit sein: In C = Q/U steht er für Kapazität. In Q = 5 C steht er für die Einheit Coulomb. Die Kapazität wird in Farad gemessen.

Umrechnen, bevor du einsetzt

Vorsilben	Längen, Flächen und Massen
k = 10^3 · m = 10^{-3} · μ = 10^{-6} · n = 10^{-9} · p = 10^{-12}	1 cm = 10^{-2} m · 1 mm = 10^{-3} m
Beispiel: 2,5 μC = 2,5 · 10^{-6} C	1 cm^2 = 10^{-4} m^2 · 1 dm^2 = 10^{-2} m^2
Beispiel: 4 mN = 4 · 10^{-3} N	1 mg = 10^{-6} kg · 1 km^2 = 10^6 m^2

$\varepsilon_0 \approx 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m · e ≈ $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
g ≈ 9,81 N/kg · Elektron: q = −e

Dein Ablauf bei jeder Rechenaufgabe

- Skizze: Welche Platte ist positiv? Wohin zeigen E, Kraft und Bewegung?
- Gegeben und gesucht notieren, alle Einheiten umrechnen.
- Passendes Gesetz auswählen und zuerst nach der gesuchten Größe umstellen.
- Werte mit Einheiten einsetzen; Ergebnis mit Richtung oder Vorzeichen erklären.

Taschenrechner: Bei sin, cos und tan für Winkel in Grad den DEG-Modus verwenden. Behalte beim Rechnen mehrere Stellen und runde am Ende passend zu den Angaben.

Ladungen und elektrische Felder

Was eine elektrische Ladung bedeutet

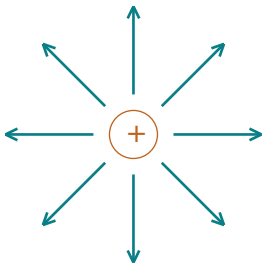
Materie enthält positive und negative Ladungen. Ein neutraler Körper besitzt insgesamt gleich viel von beiden. Bei der Aufladung fester Körper werden meistens **Elektronen übertragen**: Elektronenüberschuss bedeutet negativ, Elektronenmangel positiv. Die Atomkerne werden dabei nicht zwischen den Körpern ausgetauscht.

Beim Reiben geeigneter Materialien können Elektronen von einem Material zum anderen wechseln. Ladung wird getrennt; die Gesamtladung beider Körper bleibt erhalten. **Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.**

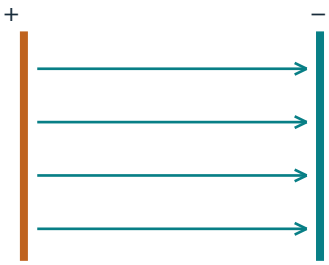
Ein Feld beschreibt die Kraftwirkung im Raum

Eine geladene Quelle erzeugt in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld. Eine kleine Probeladung erfährt dort eine Kraft, auch ohne Kontakt. Die Probeladung soll das untersuchte Feld möglichst wenig verändern.

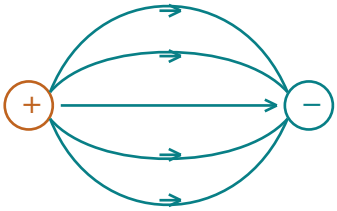
Einzelne positive Kugel



Plattenkondensator



Dipol (schematisch)



So liest und zeichnest du Feldlinien

• Die Pfeilrichtung ist die Kraftrichtung auf eine **positive** Probeladung: von Plus nach Minus (oder ins bzw. aus dem Unendlichen).

• Die Tangente an eine Feldlinie zeigt die örtliche Feldrichtung. Bei einer negativen Probeladung zeigt die Kraft entgegengesetzt.

• Dicht gezeichnete Feldlinien bedeuten ein starkes Feld. Feldlinien schneiden sich nicht: An einem Punkt hat das Feld nur eine Richtung.

• Homogenes Feld: parallele, gleichmäßig dichte Feldlinien; E ist nach Betrag und Richtung gleich. Zwischen großen Platten gilt das näherungsweise fern der Ränder.

Typische Bilder: Kugel: radial/punktsymmetrisch. Dipol: gekrümmte Linien von Plus nach Minus. Kondensator: in der Mitte annähernd homogen, an den Rändern gekrümmt.

Wiederholung ohne Nachsehen: Warum bleibt das Feldlinienbild gleich, wenn du statt einer positiven eine negative Probeladung hineinsetzt?

Influenz, Elektroskop und Leiter

Influenz: trennen statt übertragen

In einem Metall sind Elektronen beweglich. Näherst du einem neutralen Metallkörper einen positiv geladenen Stab, wandern Elektronen zur nahen Seite. Dort entsteht ein negativer Überschuss, auf der fernen Seite ein positiver. **Ohne Berührung oder Erdung bleibt die Gesamtladung null.** Entfernst du den Stab, verteilt sich die Ladung wieder.

Trennst du zwei sich berührende Metallkörper **noch im äußeren Feld**, können die getrennten Ladungen erhalten bleiben. Nahe am positiven Stab: negativ; weiter weg: positiv. Erdung ermöglicht dagegen Elektronenfluss zur Erde oder von ihr.

Warum ein Elektroskop ausschlägt

Bei einem Zeigerelektroskop tragen der bewegliche Zeiger und der feste leitende Träger gleichnamige Ladung. Sie stoßen sich ab. Bei Berührung mit einem geladenen Leiter kann Ladung übertragen werden. Der Ausschlag allein zeigt keine sichere Ladungsart an.

Influenz-Beispiel aus eurem Unterricht: Ein neutrales Elektroskop ist mit einer Metallplatte verbunden. Eine zweite, positive Platte wird angenähert. Elektronen wandern zur angeschlossenen Platte; am Zeiger fehlt negative Ladung. Zeiger und Träger werden positiv: Ausschlag. Das Gesamtsystem bleibt neutral.

Geladenes Elektroskop: Ein negativer Stab nähert sich einem positiven Elektroskop. Elektronen werden zum Zeigerbereich verdrängt; der positive Ladungsüberschuss dort und der Ausschlag nehmen zunächst ab. Bei genügend starker Influenz kann der Zeigerbereich negativ werden und der Ausschlag wieder wachsen. Bei bloßer Annäherung wird keine Ladung übertragen.

Warum Feldlinien senkrecht auf Metalloberflächen stehen

Eine tangentiale Feldkomponente würde freie Elektronen entlang der Oberfläche bewegen. Im elektrostatischen Gleichgewicht verteilen sie sich so, dass diese Komponente verschwindet. Deshalb steht das äußere Feld senkrecht zur Oberfläche. Im Inneren des Leitermaterials ist $E = 0$; der Leiter hat überall dasselbe Potential.

Der metallisierte Tischtennisball zwischen den Platten

Bei Berührung übernimmt der Ball Ladung der Platte, wird von ihr abgestoßen und von der anderen angezogen. Dort wird er umgeladen und bewegt sich zurück. **Mit Spannungsquelle** werden die Plattenladungen nachgeliefert. **Ohne Spannungsquelle** transportiert der Ball Ladung zwischen den Platten; Spannung und Feld nehmen ab und die Bewegung klingt ab.

Auch ein neutraler Leiter kann von einem geladenen Körper angezogen werden: Durch Influenz entsteht auf der näheren Seite die entgegengesetzte Ladung. Ihre Anziehung überwiegt die Abstoßung der weiter entfernten gleichnamigen Ladung.

Elektrische Feldstärke

Die Feldstärke sagt, wie viel Kraft pro Ladung an einem Ort wirkt. Sie charakterisiert das Feld und hängt im idealen Probeladungsmodell nicht davon ab, welche kleine Probeladung du verwendest.

$$E = F / |q| \text{ und } F = |q| \cdot E$$
$$\text{Mit Richtungen: } \vec{F} = q \cdot \vec{E} \cdot 1\ \text{N/C} = 1\ \text{V/m}$$

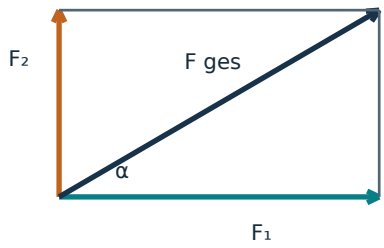
Für $q > 0$ zeigt die Kraft in Feldrichtung. Für $q < 0$ zeigt sie gegen die Feldrichtung. Die Betragsformel liefert immer einen positiven Kraftbetrag.

Durchgerechnetes Beispiel

Eine Probeladung $q = +2{,}5\ \mu C$ erfährt $F = 3{,}8$ mN nach rechts. Dann ist $E = (3{,}8 \cdot 10^{-3}\ N)/(2{,}5 \cdot 10^{-6}\ C) =$ **$1{,}52 \cdot 10^{3}$ N/C nach rechts**. Auf $q = -1{,}0\ \mu C$ wirkt in demselben Feld die Kraft $F = 1{,}52$ mN **nach links**.

Mehrere Feldquellen: Kräfte vektoriell addieren

Die Einzelkräfte bzw. Einzelfeldstärken werden als Pfeile addiert. Zeichne zuerst jede Kraftrichtung. Nur Kräfte in derselben Richtung darfst du einfach betragsmäßig addieren. Gegenläufige Kräfte werden subtrahiert; bei schrägen Kräften brauchst du Vektoraddition.



Kräfte werden als Pfeile addiert.

Bei 90°: $F_{ges} = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2)}$

$\tan \alpha = F_2 / F_1$

Für $q < 0$: Kraft entgegen der Feldrichtung

Beispiel: 4,0 mN nach rechts und 3,0 mN nach oben ergeben $F = 5{,}0$ mN. Der Winkel oberhalb der Waagerechten ist $\alpha = \arctan(3/4) \approx 36{,}9°$. Für eine positive Probeladung ist das auch die Feldrichtung.

Wie E im Versuch bestimmt wird

Ihr messt die Kraft auf einen geladenen Probekörper und seine Ladung. Bei unverändertem Feld gilt $F \propto |q|$: Halbierst du q, halbiert sich F. Der Quotient $F/|q|$ bleibt gleich. Wird die Kraft durch eine Feder oder einen Torsionsmechanismus ausgeglichen, folgt F aus der kalibrierten Rückstellkraft; dann berechnest du E.

Merke: Ein starkes Feld muss auf eine sehr kleine Ladung keine große Kraft ausüben. Feldstärke und Kraft sind unterschiedliche Größen.

Kräfte zerlegen und Gleichgewicht

Ein ruhender Körper hat nicht zwingend keine Kräfte

Ruhe bzw. Schweben bedeutet: Die **Vektorsumme** aller Kräfte ist null. Zeichne jede Kraft einzeln: Gewichtskraft nach unten, elektrische Kraft entsprechend q und E, eventuell Faden- oder Federkraft.

$F_G = m \cdot g$ · Schweben bei nur zwei Kräften: $|q| \cdot E = m \cdot g$

Beispiel: negativ geladenes Teilchen schwebt

m = 2,0 mg, E = 4,0 · 10^4 N/C. Die Gewichtskraft ist 2,0 · 10^{-6} kg · 9,81 N/kg = 1,962 · 10^{-5} N. Die elektrische Kraft muss nach oben zeigen. Weil q negativ ist, muss **das Feld nach unten** zeigen: obere Platte positiv, untere negativ.

$|q| = m \cdot g / E = 4{,}91 \cdot 10^{-10}$ C
Mit Ladungsart: $q = -4{,}91 \cdot 10^{-10}$ C

Komponenten einer Kraft

Ist α der Winkel zwischen einer Kraft F und der x-Achse, dann gilt $F_x = F \cos \alpha$ und $F_y = F \sin \alpha$. Der Kosinus gehört zur anliegenden Seite des rechtwinkligen Dreiecks. Entscheidend ist, **von welcher Achse der Winkel gemessen wird**.

Beispiel: geladene Kugel am Faden

Ein waagerechtes Feld lenkt eine Kugel um α aus der **Vertikalen** aus. Im Gleichgewicht gilt für die Fadenkraft T: T cos α = mg und T sin α = |q|E. Durch Division verschwindet T:

$\tan \alpha = |q| \cdot E / (m \cdot g) \rightarrow |q| = m \cdot g \cdot \tan \alpha / E$

m = 0,50 g, E = 2,0 · 10^4 N/C, α = 12°. Damit ist |q| ≈ 5,21 · 10^{-8} C. Zeigt E nach rechts und wird die Kugel nach rechts ausgelenkt, ist q positiv.

Wenn kein Gleichgewicht herrscht

Dann gilt $\vec{F}_{ges} = m \vec{a}$. Bei rein elektrischer Kraft folgt a = |q|E/m. Falls Gewichtskraft oder andere Kräfte mitzählen, musst du sie zuerst mit ihren Richtungen addieren.

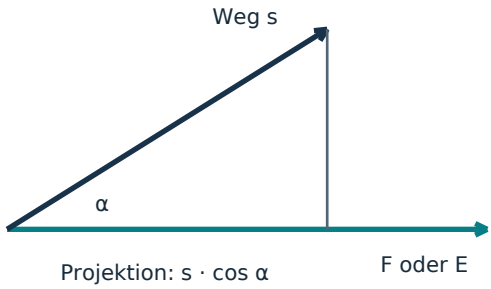
Wiederholung: Kann ein negativer Körper in einem nach oben gerichteten Feld allein durch elektrische Kraft schweben? Nein: elektrische Kraft und Gewichtskraft zeigen dann beide nach unten.

Arbeit: die Richtung zählt

Eine Kraft verrichtet Arbeit, wenn sie eine Komponente entlang der Bewegung hat. Für eine konstante Kraft und einen geraden Weg gilt:

$$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha = F_{\text{parallel}} \cdot s$$

α: Winkel zwischen genau dieser Kraft und dem Weg



Nur die Komponente in Wegrichtung zählt.

F parallel = F · cos α

W = F · s · cos α

Senkrecht zur Kraft: W = 0

Winkel	Arbeit dieser Kraft	Deutung
0°	W = +F·s	Kraft unterstützt die Bewegung.
90°	W = 0	Kraft senkrecht zur Bewegung.
180°	W = −F·s	Kraft wirkt gegen die Bewegung.

Zwei Arbeiten, die du auseinanderhalten musst

Bewegt das **Feld** eine Ladung in Richtung ihrer elektrischen Kraft, gibt es potentielle Energie ab: W_{Feld} ist positiv, ΔE_{pot} negativ. Transportierst du sie dagegen langsam **gegen die elektrische Kraft**, verrichtet eine äußere Kraft positive Arbeit: Die potentielle Energie steigt.

$$\Delta E_{\text{pot}} = -W_{\text{Feld}}$$

Bei langsamem Transport ohne Reibung: $W_{\text{außen}} = \Delta E_{\text{pot}}$

Beispiel: q = +2,0 nC, E = 3,0 · 10³ N/C. Der Weg ist 8,0 cm lang und bildet mit E einen Winkel von 60°. F = qE = 6,0 µN. $W_{\text{Feld}} = qEs\cos 60° =$ **$+2{,}4 \cdot 10^{-7}$ J**. Also $\Delta E_{\text{pot}} = -2{,}4 \cdot 10^{-7}$ J.

Wichtig für eure Schreibweise: Im Heft bezeichnet W häufig die aufzubringende Arbeit. Formuliere in der Klausur ausdrücklich, ob du die Arbeit des Feldes oder die äußere Arbeit meinst. So vermeidest du ein unbemerktes Vorzeichenproblem.

Wegunabhängigkeit und Bewegung

Warum ein Umweg nicht mehr elektrische Arbeit kostet

Im homogenen Feld zählt nur die Verschiebung in Feldrichtung. Ein seitlicher Wegabschnitt steht senkrecht zu E und trägt keine elektrische Arbeit bei. Bei einem schrägen Weg zählt die Projektion s cos α. Deshalb ist die elektrische Arbeit zwischen denselben Anfangs- und Endpunkten gleich, auch bei einem Umweg.

$$W_{Feld} = q \cdot E \cdot \Delta x \text{ (x-Achse in Feldrichtung)}$$
$$\Delta E_{pot} = -q \cdot E \cdot \Delta x$$

Allgemein ist das elektrostatische Feld konservativ: Für einen geschlossenen Weg ist die gesamte elektrische Arbeit null. Zusätzliche Reibungsarbeit gehört nicht dazu.

Von potentieller zu kinetischer Energie

Beschleunigt nur die elektrische Kraft das Teilchen und gibt es keine Verluste, bleibt $E_{kin} + E_{pot}$ konstant. Mit $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ folgt:

$$\Delta E_{kin} = W_{Feld} = -\Delta E_{pot}$$
$$v_2 = \sqrt{(v_1^2 + 2W_{Feld}/m)}$$

Beispiel: Beschleunigung im homogenen Feld

q = +1,0 nC, m = 1,0 mg, E = 2,0 · 10³ N/C. Das Teilchen fliegt 7,0 cm **in Feldrichtung**; $E_{kin,1} = 1{,}0 \cdot 10^{-7}$ J. Dann gilt:

F = qE = 2,0 · 10⁻⁶ N; a = F/m = **2,0 m/s²**.
$W_{Feld} = qEs = 1{,}4 \cdot 10^{-7}$ J, also $\Delta E_{pot} =$ **$-1{,}4 \cdot 10^{-7}$ J**.
$E_{kin,2} = 2{,}4 \cdot 10^{-7}$ J und $v_2 = \sqrt{(2E_{kin,2}/m)} \approx$ **0,693 m/s**.

Bremsen und Umkehren

Startet ein Teilchen gegen seine elektrische Kraft, nimmt seine kinetische Energie ab. Am Umkehrpunkt ist sie null. Im homogenen Feld, wenn die Kraft genau entgegen der Bewegung wirkt, gilt:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = |q| \cdot E \cdot s_{Stopp}$$
$$s_{Stopp} = mv_0^2 / (2|q|E)$$

Prüfe anschließend, ob der berechnete Umkehrpunkt überhaupt zwischen den Platten liegt. Das Vorzeichen der Ladung allein sagt nicht, ob das Teilchen schneller oder langsamer wird: Es kommt auf Kraft und Bewegungsrichtung an.

Potential und Spannung verstehen

Die potentielle Energie hängt davon ab, **wie viel Ladung** sich am Ort befindet. Das Potential beschreibt die elektrische Lage des Ortes pro Ladung. Du wählst zuerst einen Bezugspunkt mit $\varphi = 0$.

$$E_{pot} = q \cdot \varphi \text{ bzw. } \varphi = E_{pot} / q$$
$$\Delta E_{pot} = q \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot 1\ V = 1\ J/C$$

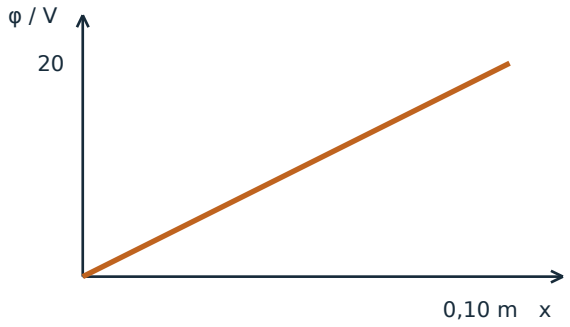
Hier ist E_{pot} relativ zum gewählten Nullniveau gemeint. Physikalisch entscheidend sind Unterschiede. Eine positive Ladung hat bei höherem Potential mehr potentielle Energie; bei einer negativen Ladung ist es umgekehrt.

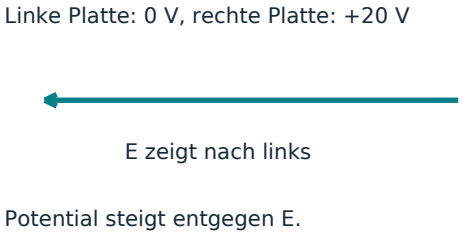
Spannung ist ein Potentialunterschied

In diesem Heft schreiben wir **$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$** für den Unterschied beim Weg 1 → 2. Die Spannung zwischen Kondensatorplatten verwenden wir als positiven Betrag $U = \varphi_+ - \varphi_-$. Bei U mit zwei Ortsindizes musst du die festgelegte Reihenfolge beachten.

$$\Delta E_{pot} = q \cdot \Delta\varphi \cdot W_{Feld} = -q \cdot \Delta\varphi$$
$$\text{Homogenes Feld: } U = E \cdot d \text{ bzw. } E = U / d$$

d ist der senkrechte Plattenabstand. Für zwei beliebige Punkte zählt ihr Abstand **in Feldrichtung**, nicht die Länge eines Umwegs.





Beispiel: Zwischen den Platten liegen 20 V bei 0,10 m Abstand, also E = 200 V/m. Von links (0 V) nach rechts (+20 V) gilt für q = +3,0 nC: ΔE_{pot} = +60 nJ. Für q = −3,0 nC gilt ΔE_{pot} = −60 nJ.

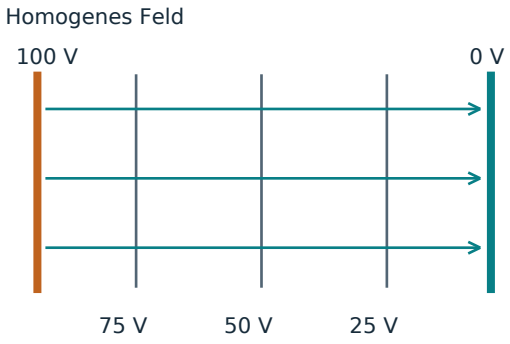
Was der Potentialgraph verrät

Bei einer x-Achse entlang des Feldes fällt φ linear. Entgegen der Feldrichtung steigt φ linear. Je steiler der Graph, desto größer die Feldstärke. Für ein homogenes Feld ist E der Betrag der Steigung: $E = |\Delta\varphi/\Delta x|$.

Äquipotentiallinien und Messung

Eine Äquipotentiallinie verbindet Punkte mit gleichem Potential. Im Raum spricht man von Äquipotentialflächen. Bewegt sich eine Ladung auf einer solchen Linie, gilt $\Delta\varphi = 0$: Es wird **keine elektrische Arbeit** verrichtet.

Feldlinien stehen senkrecht auf Äquipotentiallinien.
E zeigt vom höheren zum niedrigeren Potential.





Aus einer Potentialkarte das Feld gewinnen

• Verbinde Punkte gleichen Potentials zu glatten Linien; verschiedene Potentiallinien schneiden sich nicht.

• Zeichne Feldlinien senkrecht zu den Potentiallinien, mit Pfeilen zu kleineren φ-Werten.

• Vergleiche Abstände nur bei gleichem Potentialschritt: Kleine Abstände bedeuten großes E. Lokal gilt näherungsweise $E \approx |\Delta\varphi|/\Delta s$.

Beispiel: Zwei benachbarte Linien unterscheiden sich um 20 V. Bei 5,0 mm Abstand ist $E \approx 4{,}0 \cdot 10^3$ V/m. Bei nur 2,0 mm Abstand ist $E \approx 1{,}0 \cdot 10^4$ V/m.

Metalloberfläche und Spitzen

Ein zusammenhängender Leiter ist im elektrostatischen Gleichgewicht eine Äquipotentialfläche. Das äußere Feld steht senkrecht auf seiner Oberfläche. An scharfen Spitzen kann das Feld besonders stark sein: Bei gleicher Spannungsdifferenz liegen die Potentialflächen dort dicht beieinander. Das passt zu euren Skizzen zu Gewitter und Spitzen.

Euer Versuch mit dem Potentialtrog

Elektroden werden auf feuchtes Papier gedrückt und an eine Spannungsquelle angeschlossen. Eine Messleitung bleibt am Bezugspunkt, mit der anderen sucht man Punkte gleicher Spannung. Man markiert und verbindet diese Punkte. So entstehen Potentiallinien; die Feldlinien ergänzt man senkrecht dazu.

Zwischen parallelen Elektroden sind die Potentiallinien im mittleren Bereich annähernd parallel und gleichmäßig verteilt. Bei runden oder gebogenen Elektroden verändert sich der Verlauf. **Das Voltmeter misst immer einen Unterschied zwischen zwei Punkten.**

Kapazität: Ladung pro Spannung

Ein Kondensator besteht aus zwei voneinander isolierten Leitern. Die Platten tragen gleich große entgegengesetzte Ladungen +Q und −Q. Mit Q in der Kapazitätsformel ist der **Betrag der Ladung einer Platte** gemeint; die Summe der beiden Ladungen ist null.

$$C = Q / U \cdot Q = C \cdot U \cdot U = Q / C$$
$$1\ F = 1\ C/V$$

Die Kapazität beschreibt, wie viel Ladung pro Volt getrennt werden kann. Bei gleichem Aufbau und gleichem Material ist C konstant: Q ist proportional zu U. Im Diagramm mit U auf der waagerechten und Q auf der senkrechten Achse ist C die Steigung.

Plattenkondensator

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A / d$$

A ist die überlappende Fläche **einer** Platte, d der Plattenabstand, ε_r die relative Permittivität des vollständig eingefüllten Isoliermaterials. Für Luft gilt näherungsweise $\varepsilon_r = 1$. Die Formel gilt für große Platten mit kleinem Abstand, wenn Randeffekte vernachlässigt werden.

Änderung	Folge für die Kapazität
Doppelte überlappende Fläche A	C verdoppelt sich.
Doppelter Plattenabstand d	C halbiert sich.
Vollständig eingefülltes Dielektrikum mit $\varepsilon_r = 4$ statt Luft	C vervierfacht sich.

Durchgerechnetes Beispiel

A = 200 cm² = 0,0200 m², d = 2,0 mm = 0,0020 m und Luft. Daraus folgt $C = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}0200/0{,}0020$ F = **88,5 pF**.

Bei U = 300 V sitzt auf jeder Platte der Ladungsbetrag Q = CU = **26,6 nC**. Das Feld beträgt E = U/d = **$1{,}50 \cdot 10^5$ V/m**.

Typischer Fehler: Eine Angabe wie A = 200 cm² darf nicht als $200 \cdot 10^{-2}$ m² eingesetzt werden. Du musst den Umrechnungsfaktor der Länge quadrieren.

Was bleibt konstant: U oder Q?

Beginne jede Änderungsaufgabe mit der Frage, ob die Spannungsquelle angeschlossen bleibt. Danach gehst du immer in derselben Reihenfolge vor: **Aufbau → C → konstante Größe → Q bzw. U → E.**

Situation	Spannungsquelle angeschlossen	Spannungsquelle abgetrennt
Was bleibt konstant?	U; die Quelle kann Ladung liefern oder aufnehmen.	Q; ideal isolierte Platten können keine Ladung abgeben.
Abstand d verdoppelt	C halbiert; Q halbiert; E halbiert.	C halbiert; U verdoppelt; E bleibt gleich.
Fläche A verdoppelt	C verdoppelt; Q verdoppelt; E bleibt gleich.	C verdoppelt; U halbiert; E halbiert.
Dielektrikum $\varepsilon_r = 4$ statt Luft vollständig eingefüllt	C vierfach; Q vierfach; U und E gleich.	C vierfach; U und E jeweils ein Viertel.

Beispiel: Abstand verdoppeln

Ein luftgefüllter Kondensator hat anfangs $C_1 = 100\ \text{pF}$, $U_1 = 200\ \text{V}$ und $d_1 = 2{,}0\ \text{mm}$. Also $Q_1 = 20{,}0\ \text{nC}$ und $E_1 = 1{,}0 \cdot 10^5\ \text{V/m}$. Nach Verdopplung von d gilt $C_2 = 50{,}0\ \text{pF}$.

Quelle bleibt angeschlossen: $U_2 = 200\ \text{V}$. $Q_2 = 10{,}0\ \text{nC}$; 10,0 nC Ladungsbetrag fließen zur Quelle zurück. $E_2 = 5{,}0 \cdot 10^4\ \text{V/m}$.

Quelle wird vorher abgetrennt: $Q_2 = 20{,}0\ \text{nC}$. $U_2 = Q_2/C_2 = 400\ \text{V}$. $E_2 = 400\ \text{V}/0{,}0040\ \text{m} = 1{,}0 \cdot 10^5\ \text{V/m}$. Das Feld bleibt gleich.

Was ein Dielektrikum bewirkt

Das Isoliermaterial wird polarisiert: Gebundene Ladungen verschieben sich geringfügig oder Dipole richten sich aus. Ihr Feld schwächt bei gleicher freier Plattenladung das Feld zwischen den Platten. Deshalb sinkt bei konstantem Q die Spannung. Bleibt U durch die Quelle konstant, muss die Quelle zusätzliche freie Ladung auf die Platten bringen.

Nachfließende Ladung: Gesucht ist oft $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ und nicht Q_2. Beim Faktor 4 gilt $Q_2 = 4Q_1$, aber $\Delta Q = 3Q_1$. Werden Platten verändert, immer über die neue überlappende Fläche rechnen.

Feld, Spannung und Arbeit verbinden

In euren Aufgaben werden häufig mehrere Beziehungen miteinander kombiniert. Du musst dafür keine neue Formel lernen: C beschreibt den Aufbau, U die Potentialdifferenz, E die Feldstärke und qU die Energieänderung beim Transport einer Probeladung zwischen den Platten.

Ein Beispiel wie auf eurem Kondensator-Übungsblatt

Ein luftgefüllter Kondensator hat A = 600 cm², d = 1,0 mm und U = 120 V. Seine Quelle wird anschließend abgetrennt und der Zwischenraum vollständig mit einem Dielektrikum mit $\varepsilon_r = 3$ gefüllt. Eine sehr kleine positive Probeladung q = 2,0 pC soll jeweils langsam von der negativen zur positiven Platte bewegt werden. Ihre Rückwirkung auf den Kondensator vernachlässigen wir.

1. Ausgangszustand

A = 0,0600 m² und d = 0,0010 m. Daher $C_0 = \varepsilon_0 A/d =$ **531 pF**. $Q_0 = C_0 U_0 =$ **63,8 nC**. $E_0 = U_0/d$ = **$1{,}20 \cdot 10^5$ V/m**.

$$W_{\text{außen},0} = q \cdot U_0 = 2{,}0 \cdot 10^{-12}\ \text{C} \cdot 120\ \text{V}$$
$$= +2{,}40 \cdot 10^{-10}\ \text{J}$$

Von Minus nach Plus steigt das Potential. Eine positive Probeladung gewinnt potentielle Energie; diese Energie muss von außen aufgebracht werden.

2. Dielektrikum nach Abtrennen der Quelle

Die freie Ladung auf den Kondensatorplatten bleibt konstant. Die neue Kapazität ist dreimal so groß: $C_1 = 3C_0 =$ **1,59 nF**. Deshalb sinkt U auf ein Drittel: $U_1 = Q_0/C_1 =$ **40,0 V**. $E_1 = U_1/d$ = **$4{,}00 \cdot 10^4$ V/m**.

$$W_{\text{außen},1} = q \cdot U_1 = +8{,}00 \cdot 10^{-11}\ \text{J}$$
Auch die Transportarbeit sinkt auf ein Drittel.

3. Vergleich: Die Quelle bliebe angeschlossen

Dann blieben U = 120 V und E = $1{,}20 \cdot 10^5$ V/m konstant. C wäre ebenfalls dreimal so groß, aber die Plattenladung würde auf $3Q_0$ steigen. Für den Transport der Probeladung wäre wieder $W_{\text{außen}} = +2{,}40 \cdot 10^{-10}$ J erforderlich.

Wichtig: Q bezeichnet hier die große Ladung auf einer Kondensatorplatte; q die kleine transportierte Probeladung. In C = Q/U und W = qU setzt du verschiedene Ladungen ein.

WIEDERHOLUNG

Die Formeln mit ihren Bedingungen

Zusammenhang	Wann du ihn verwendest
$\vec{F} = q\vec{E}$; $F = \lvert q \rvert E$	Kraft auf eine Probeladung; Vorzeichen bestimmt Richtung.
$\Sigma \vec{F} = 0$; $F_G = mg$	Ruhe/Schweben; alle beteiligten Kräfte einzeichnen.
$\vec{a} = \vec{F}_{ges}/m$	Beschleunigung aus der resultierenden Kraft.
$W = Fs \cos \alpha$	Konstante Kraft; α zwischen Kraft und geradem Weg.
$\Delta E_{pot} = -W_{Feld}$	Elektrische potentielle Energie.
$W_{außen} = \Delta E_{pot}$	Langsamer Transport ohne Reibung und ohne Änderung von E_{kin}.
$\Delta E_{kin} = W_{Feld}$; $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$	Nur die elektrische Kraft verrichtet Arbeit.
$E_{pot} = q\varphi$; $\Delta E_{pot} = q\Delta\varphi$	Potential auf festgelegtes Nullniveau bezogen.
$E = U/d$	Homogenes Feld; d entlang der Feldrichtung.
$C = Q/U$; $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/d$	Allgemeine Kapazität; zweite Formel speziell für Platten.

Sechs typische Klausurfehler

- Feldrichtung mit der Kraftrichtung auf eine negative Ladung verwechseln.
- Den gesamten schrägen Weg einsetzen, obwohl nur die Projektion zählt.
- W_{Feld} und aufzubringende Arbeit mit demselben Vorzeichen behandeln.
- Bei abgetrennter Quelle U konstant halten; richtig ist Q konstant.
- cm^2 wie cm umrechnen oder mg mit 10^{-3} kg verwechseln.
- Die Ladung Q auf einer Kondensatorplatte mit der kleinen Probeladung q verwechseln.

Selbsttest: Erkläre jeden Punkt ohne Nachlesen. Wenn du die Begründung nicht in ein oder zwei Sätzen sagen kannst, lies die entsprechende Erklärseite erneut und rechne eine passende Aufgabe.

ÜBEN · ERST SELBST RECHNEN

Aufgaben 1-4: Felder und Kräfte

Bearbeite die Aufgaben auf extra Papier. Fertige auch dann Skizzen an, wenn sie nicht ausdrücklich verlangt werden. Richtwert für diese Seite: 30-40 Minuten. Lösungen ab S. 20.

1. Feldlinien und Leiter

Betrachte eine einzelne positive Kugel, einen Dipol und zwei parallele entgegengesetzt geladene Platten.

a) Skizziere jeweils einige Feldlinien mit Pfeilen. Wo ist das Feld näherungsweise homogen?

b) Erkläre, warum Feldlinien sich nicht schneiden und auf einer Metalloberfläche senkrecht stehen.

c) Eine negative Probeladung befindet sich zwischen den Platten. Vergleiche ihre Kraftrichtung mit der Feldrichtung.

2. Influenz und Elektroskop

Ein positiv geladener Stab wird einem neutralen Metallkörper genähert. Der Körper berührt den Stab nicht und ist nicht geerdet.

a) Beschreibe die Ladungsverteilung und die Gesamtladung. Was passiert beim Entfernen des Stabes?

b) Zwei sich berührende Metallkugeln stehen hintereinander in Richtung zum Stab. Sie werden im Feld getrennt. Welche Ladung hat die nahe und welche die ferne Kugel?

c) Ein neutraler Elektroskop-Zeiger und sein Träger sind leitend mit einer Metallplatte verbunden. Eine positive zweite Platte wird angenähert. Erkläre den Ausschlag.

3. Feldstärke und Vektoraddition

Auf $q = +3{,}0\ \text{nC}$ wirkt am Ort P eine Kraft von 12 µN nach rechts. Eine zweite Feldquelle erzeugt dort auf dieselbe Probeladung zusätzlich 9,0 µN nach oben.

a) Berechne die Feldstärke der ersten Quelle.

b) Bestimme Betrag und Richtung der Gesamtkraft und der gesamten Feldstärke.

c) Die Probeladung wird durch $q = -6{,}0\ \text{nC}$ ersetzt. Wie ändern sich Gesamtfeld und Gesamtkraft?

4. Schweben und Auslenkung

Ein Teilchen der Masse 0,80 mg schwebt zwischen waagerechten Platten. $E = 2{,}0 \cdot 10^4\ \text{V/m}$ zeigt nach unten.

a) Welche Ladungsart muss es haben? Zeichne die Kräfte und berechne q.

b) Unabhängiger Fall: Eine Kugel mit $m = 0{,}30\ \text{g}$ hängt in einem waagerechten Feld mit $E = 1{,}5 \cdot 10^4\ \text{N/C}$ am Faden. Der Faden ist 15° gegen die Vertikale geneigt. Bestimme $|q|$.

ÜBEN · ERST SELBST RECHNEN

Aufgaben 5-8: Arbeit und Potential

Für die folgenden Aufgaben sind die Felder homogen. Reibung und Gewichtskraft werden bei Bewegungen vernachlässigt. Richtwert: 35-45 Minuten. Lösungen S. 21.

5. Gerader Weg, schräger Weg, Umweg

$E = 4{,}0 \cdot 10^3$ N/C zeigt nach rechts. Die Ladung $q = +5{,}0$ nC wird von A nach B transportiert; B liegt 6,0 cm rechts und 8,0 cm oberhalb von A.

a) Berechne die Arbeit des Feldes auf dem direkten Weg. Bestimme dazu auch Weglänge und Winkel.

b) Rechne dieselbe Arbeit für den Weg erst 8,0 cm nach oben, dann 6,0 cm nach rechts.

c) Bestimme ΔE_{pot} und die äußere Arbeit bei langsamem Transport. Wie ändern sich die Vorzeichen für $q = -5{,}0$ nC?

6. Potentialkarte und Spannung

Bei $x = 0$ liegt $\varphi = 120$ V, bei $x = 6{,}0$ cm liegt $\varphi = 0$ V. Der Potentialverlauf dazwischen ist linear.

a) Gib Richtung und Betrag des elektrischen Feldes an. Skizziere $\varphi(x)$ und drei Äquipotentiallinien.

b) Bestimme φ bei $x = 2{,}0$ cm und bei $x = 5{,}0$ cm.

c) Ein Teilchen mit $q = -2{,}0$ nC bewegt sich von $x = 2{,}0$ cm nach $x = 5{,}0$ cm. Berechne ΔE_{pot} und W_{Feld}.

d) Eine andere Potentialkarte hat 10 V Unterschied zwischen benachbarten Linien. Einmal beträgt ihr Abstand 2,0 mm, einmal 5,0 mm. Vergleiche E.

7. Beschleunigtes Teilchen

$q = +2{,}0$ nC, $m = 0{,}50$ mg und $E = 3{,}0 \cdot 10^3$ N/C. Das Teilchen startet mit $v_0 = 0{,}40$ m/s und bewegt sich 8,0 cm in Feldrichtung.

a) Bestimme F und a.

b) Berechne Anfangsenergie, Änderung der potentiellen Energie und Endgeschwindigkeit.

8. Umkehrpunkt

Ein negativ geladenes Teilchen ($q = -4{,}0 \cdot 10^{-11}$ C; $m = 1{,}0 \cdot 10^{-12}$ kg) fliegt mit 100 m/s nach rechts in einen Kondensator. Das Feld zeigt nach rechts; $U = 1{,}0$ kV, $d = 10$ cm.

a) Warum wird es abgebremst? Bestimme E.

b) In welchem Abstand vom Eintrittspunkt kehrt es um? Liegt dieser Punkt zwischen den Platten?

ÜBEN · ERST SELBST RECHNEN

Aufgaben 9-12: Kondensatoren

Für Luft gilt $\varepsilon_r = 1$. Die Kondensatoren werden idealisiert, Randfelder und Ladungsverluste werden vernachlässigt. Richtwert: 35-45 Minuten. Lösungen S. 22.

9. Platten auseinanderziehen

$A = 300\ \text{cm}^2$, $d_1 = 1{,}5\ \text{mm}$, $U_1 = 150\ \text{V}$, Luft. Ausgangszustand ist jeweils derselbe.

a) Berechne C_1, Q_1 und E_1.

b) Die Quelle bleibt angeschlossen und d wird auf 3,0 mm vergrößert. Bestimme C_2, Q_2, U_2 und E_2.

c) Nun wird die Quelle vor derselben Abstandsänderung abgetrennt. Bestimme die vier Größen erneut.

10. Dielektrikum einsetzen

Ein luftgefüllter Kondensator hat $C_0 = 250\ \text{pF}$ und $U_0 = 120\ \text{V}$. Er wird vollständig mit einem Dielektrikum mit $\varepsilon_r = 5$ gefüllt; die Geometrie bleibt gleich.

a) Bei angeschlossener Quelle: Bestimme C, Q und die nachfließende Ladung ΔQ. Was passiert mit E?

b) Bei vorher abgetrennter Quelle: Bestimme C, Q, U und das Verhältnis E/E_0.

11. Arbeit beim Transport einer Probeladung

Ein luftgefüllter Plattenkondensator hat $A = 500\ \text{cm}^2$, $d = 2{,}0\ \text{mm}$ und $U_0 = 80\ \text{V}$. Eine sehr kleine positive Probeladung $q = 3{,}0\ \text{pC}$ wird langsam von der negativen zur positiven Platte transportiert. Ihre Rückwirkung auf das Feld wird vernachlässigt.

a) Berechne C_0, Q_0, E_0 und die aufzubringende Arbeit.

b) Die Quelle wird vor dem Transport abgetrennt und ein Dielektrikum mit $\varepsilon_r = 4$ vollständig eingefüllt. Bestimme die neue Spannung, die Feldstärke und die Transportarbeit.

c) Erkläre, warum ein schräger Weg zwischen denselben Platten für die elektrische Arbeit kein anderes Ergebnis liefert.

12. Wolke und Erdboden

Eine positive Wolke und der Erdboden werden als luftgefüllter Plattenkondensator modelliert: $A = 8{,}0\ \text{km}^2$, $d = 500\ \text{m}$, $U = 1{,}5 \cdot 10^7\ \text{V}$. Das Potential der Erde ist null.

a) Berechne C, den Ladungsbetrag Q auf der Wolke und E. Gib die Feldrichtung an.

b) Wie viel äußere Arbeit ist nötig, um eine kleine positive Ladung $q = 2{,}0\ \text{nC}$ langsam vom Boden zur Wolke zu bringen?

c) ε_r verdoppelt sich bei gleichbleibendem Q und gleicher Geometrie. Wie ändern sich C, U und E?

PROBEKLAUSUR · 45 MINUTEN

Teil A und B

Bearbeite S. 18-19 ohne Lösungsteil. Nutze einen Taschenrechner und die Formeln, die du in der echten Klausur verwenden darfst. Falls du die erlaubten Hilfsmittel nicht weißt, übe zuerst mit der Übersicht auf S. 14. Die 40 Punkte dienen nur deiner Selbstkontrolle.

A · Feld, Leiter und Potential [10 Punkte]

Zwischen zwei senkrechten großen Metallplatten liegen 600 V bei d = 4,0 cm. Links befindet sich die positive Platte, rechts die negative. Setze das Potential der rechten Platte gleich null.

• a) Skizziere Feldlinien und drei Äquipotentiallinien. Begründe deren Ausrichtung an den Platten. [3 P]

• b) Berechne E und die Kraft auf q = −3,0 nC mit Richtungsangabe. [3 P]

• c) Bei A ist φ_A = 150 V, bei B ist φ_B = 450 V. Bestimme ΔE_{pot} und W_{Feld} für den Transport dieser Ladung von A nach B. Wird sie dabei vom Feld beschleunigt oder gebremst? [4 P]

B · Arbeit und Geschwindigkeit [10 Punkte]

In einem unabhängigen homogenen Feld zeigt E = 5,0 · 10³ N/C nach rechts. Ein Teilchen trägt q = +2,0 nC und hat m = 1,0 mg. Es bewegt sich vom Punkt P zum Punkt R, der 4,0 cm rechts und 3,0 cm oberhalb von P liegt.

• a) Berechne die elektrische Arbeit des Feldes beim direkten Weg von P nach R. Gib Weglänge und Winkel zum Feld an. [3 P]

• b) Begründe, warum auf einem gekrümmten Weg zwischen denselben Punkten dieselbe elektrische Arbeit verrichtet wird. [2 P]

• c) Unabhängiger Bewegungsfall mit demselben Teilchen und Feld: Das Teilchen startet aus Ruhe und bewegt sich frei 4,0 cm in Feldrichtung. Berechne die Endgeschwindigkeit. [3 P]

• d) Ein anderes negativ geladenes Teilchen schwebt in einem nach unten gerichteten Feld. Stelle die Beziehung zwischen m, |q| und E auf und benenne die Kräfte. [2 P]

Zeitvorschlag: A etwa 10 min · B etwa 12 min
Auf der nächsten Seite: C und D, zusammen etwa 18 min
Zum Schluss: 5 min für Einheiten, Vorzeichen und Richtungen

Teil C und D

C · Ein Kondensator wird verändert [12 Punkte]

Ein luftgefüllter Plattenkondensator mit $A = 400\ \text{cm}^2$ und $d = 2{,}0\ \text{mm}$ wird auf $U = 200\ \text{V}$ geladen.

• a) Berechne C_0, Q_0 und E_0. [4 P]

• b) Die Spannungsquelle wird abgetrennt. Danach wird ein Dielektrikum mit $\varepsilon_r = 4$ vollständig eingeschoben. Berechne C_1, Q_1, U_1 und E_1. Begründe, welche Größe konstant bleibt. [4 P]

• c) Statt b): Die Quelle bleibt angeschlossen, während dasselbe Dielektrikum eingeschoben wird. Bestimme U_2, Q_2 und die zusätzlich von der Quelle gelieferte Ladung. [4 P]

D · Kräfte und Potentiallinien [8 Punkte]

In einem unabhängigen Feld wirken auf eine positive Probeladung $q = +4{,}0\ \text{nC}$ zwei Einzelkräfte: $F_1 = 8{,}0\ \mu\text{N}$ nach rechts und $F_2 = 6{,}0\ \mu\text{N}$ nach oben.

• a) Zeichne ein Kräfteparallelogramm und bestimme Betrag und Richtung der Gesamtkraft. [3 P]

• b) Bestimme die Gesamtfeldstärke in Betrag und Richtung. Welche Kraft wirkt am selben Ort auf $q_2 = -2{,}0\ \text{nC}$? [3 P]

• c) Auf einer anderen Potentialkarte unterscheiden sich zwei Linien um 30 V und sind örtlich 3,0 mm voneinander entfernt. Schätze E ab. Wie stehen Feldlinien zu diesen Linien? [2 P]

Abschlusskontrolle: Jede Kraft mit Richtung? Jede Ladung mit passender Einheit? Flächen in m^2? ΔQ statt Q? Bei Energieänderungen die richtige Ladung mit ihrem Vorzeichen eingesetzt?

Aufgaben 1-4

Lösung 1

a) Positive Kugel: radial nach außen. Dipol: von Plus nach Minus, außerhalb gekrümmt. Platten: in der Mitte von Plus nach Minus, parallel und gleichmäßig dicht; dort näherungsweise homogen.
b) Am Schnittpunkt zweier Feldlinien wäre die Feldrichtung nicht eindeutig. Eine tangentiale Komponente an einem Leiter würde freie Ladungen bewegen; im Gleichgewicht verschwindet sie.
c) Die Kraft auf eine negative Ladung zeigt entgegen E; die Feldlinien selbst ändern ihre Richtung nicht.

Lösung 2

a) Elektronen sammeln sich auf der dem positiven Stab zugewandten Seite. Die ferne Seite hat Elektronenmangel. Gesamtladung null. Nach Entfernen des Stabes verteilt sich die Ladung wieder.
b) Beim Trennen im Feld bleibt die nahe Kugel negativ, die ferne positiv geladen; das Kugelpaar bleibt insgesamt neutral.
c) Elektronen wandern zur verbundenen Platte. Zeiger und Träger haben dann einen positiven Überschuss und stoßen sich ab. Gesamtladung von Platte und Elektroskop bleibt null.

Lösung 3

a) $E_1 = F_1/q = 12 \cdot 10^{-6}/(3{,}0 \cdot 10^{-9}) =$ **$4{,}0 \cdot 10^3$ N/C nach rechts**.
b) $F = \sqrt{(12^2 + 9^2)}$ µN = **15 µN**. $\alpha = \arctan(9/12) =$ **36,9° oberhalb der Richtung nach rechts**. $E = F/q =$ **$5{,}0 \cdot 10^3$ N/C** in derselben Richtung.
c) Das Feld der Quellen bleibt unverändert. q ist negativ und sein Betrag doppelt so groß: F = **30 µN**, genau entgegengesetzt, also nach links unten. Komponenten: −24 µN und −18 µN.

Lösung 4

a) F_G zeigt nach unten, F_{el} nach oben. Weil E nach unten zeigt, ist q negativ. $|q| = mg/E = (0{,}80 \cdot 10^{-6} \cdot 9{,}81)/(2{,}0 \cdot 10^4)$ C $= 3{,}924 \cdot 10^{-10}$ C. Also **$q \approx -3{,}9 \cdot 10^{-10}$ C**.
b) $T \cos 15° = mg$ und $T \sin 15° = |q|E$. Division: $|q| = mg \tan 15°/E = (0{,}30 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81 \cdot \tan 15°)/(1{,}5 \cdot 10^4)$ C $\approx$ **$5{,}3 \cdot 10^{-8}$ C**. Ohne Richtung der Auslenkung relativ zu E ist die Ladungsart nicht bestimmt.

Wenn etwas nicht geklappt hat

Falsche Richtung: S. 3 und 5. Unsicherheit bei Influenz: S. 4. Falscher Winkel in der Fadenaufgabe: S. 6 und ein eigenes rechtwinkliges Kraftdreieck zeichnen.

Aufgaben 5-8

Lösung 5

a) $s = \sqrt{(0{,}06^2 + 0{,}08^2)}\ \text{m} = 0{,}10\ \text{m}$. $\alpha = \arctan(8/6) \approx 53{,}1°$; $\cos\alpha = 0{,}6$. $W_{Feld} = qEs\cos\alpha = 5{,}0 \cdot 10^{-9} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{3} \cdot 0{,}10 \cdot 0{,}6\ \text{J} =$ **+1,2 µJ**.
b) Senkrechter Abschnitt: 0. Waagerechter Abschnitt: $qE \cdot 0{,}06\ \text{m} = +1{,}2\ \mu\text{J}$. Summe gleich.
c) $\Delta E_{pot} = W_{außen} =$ **−1,2 µJ**. Die äußere Kraft entzieht bei langsamem Transport Energie. Für $q = -5{,}0\ \text{nC}$ drehen sich die Vorzeichen um: $W_{Feld} = -1{,}2\ \mu\text{J}$, $\Delta E_{pot} = W_{außen} = +1{,}2\ \mu\text{J}$.

Lösung 6

a) $E = 120\ \text{V}/0{,}060\ \text{m} =$ **2,0 · 10³ V/m nach rechts**. $\varphi(x)$ fällt geradlinig von 120 V auf 0 V. Äquipotentiallinien stehen senkrecht zur x-Richtung.
b) $\varphi(x) = 120\ \text{V} - (2000\ \text{V/m}) \cdot x$. Damit **φ(2 cm) = 80 V**, **φ(5 cm) = 20 V**.
c) $\Delta\varphi = 20\ \text{V} - 80\ \text{V} = -60\ \text{V}$. $\Delta E_{pot} = (-2{,}0 \cdot 10^{-9}\ \text{C}) \cdot (-60\ \text{V}) =$ **+120 nJ**. $W_{Feld} =$ **−120 nJ**. Die Bewegung erfolgt gegen die elektrische Kraft.
d) Bei 2 mm: $E \approx 10/0{,}002 =$ **5000 V/m**. Bei 5 mm: **2000 V/m**. Das erste Feld ist 2,5-mal so stark.

Lösung 7

a) $F = qE =$ **6,0 µN nach vorn**. $a = F/m = (6{,}0 \cdot 10^{-6})/(0{,}50 \cdot 10^{-6})\ \text{m/s}^2 =$ **12 m/s²**.
b) $E_{kin,0} = \tfrac{1}{2} \cdot 0{,}50 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}40^2\ \text{J} =$ **4,0 · 10⁻⁸ J**. $W_{Feld} = qEs = 4{,}8 \cdot 10^{-7}\ \text{J}$, also $\Delta E_{pot} =$ **−4,8 · 10⁻⁷ J**. $E_{kin,2} = 5{,}2 \cdot 10^{-7}\ \text{J}$. $v_2 = \sqrt{(2E_{kin,2}/m)} = \sqrt{2{,}08}\ \text{m/s} \approx$ **1,44 m/s**.

Lösung 8

a) $q < 0$, also zeigt die elektrische Kraft nach links, entgegen der Bewegung. $E = U/d = 1000/0{,}10 =$ **1,0 · 10⁴ V/m**.
b) $E_{kin,0} = \tfrac{1}{2}mv_0^2 = 5{,}0 \cdot 10^{-9}\ \text{J}$. $F = |q|E = 4{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{N}$. Am Umkehrpunkt ist $E_{kin} = 0$: $s = E_{kin,0}/F = 0{,}0125\ \text{m} =$ **1,25 cm**. Das liegt innerhalb der 10 cm breiten Plattenlücke.

Kontrolle der Vorzeichen: Ein negatives q und ein negatives Δφ ergeben eine positive Änderung der potentiellen Energie. Wer nur Beträge einsetzt, übersieht diesen Zusammenhang.

Aufgaben 9-12

Lösung 9

a) $A = 0{,}0300\ m^2$; $d_1 = 0{,}0015\ m$. $C_1 = \varepsilon_0 A/d_1 =$ **177 pF**. $Q_1 = C_1U_1 =$ **26,6 nC**. $E_1 = U_1/d_1 =$ **$1{,}00 \cdot 10^5$ V/m**.
b) $C_2 =$ **88,5 pF**, $U_2 =$ **150 V**, $Q_2 =$ **13,3 nC**, $E_2 =$ **$5{,}00 \cdot 10^4$ V/m**.
c) $C_2 =$ **88,5 pF**, $Q_2 =$ **26,6 nC**, $U_2 = Q_2/C_2 =$ **300 V**, $E_2 =$ **$1{,}00 \cdot 10^5$ V/m**. Das Feld bleibt gleich, weil Spannung und Abstand sich beide verdoppeln.

Lösung 10

Zunächst $Q_0 = 250\ pF \cdot 120\ V =$ **30,0 nC**.
a) $C = 5C_0 =$ **1,25 nF**, $U = 120\ V$. $Q = CU =$ **150 nC**. $\Delta Q = Q - Q_0 =$ **120 nC**. E bleibt bei gleichem U und d unverändert.
b) $C =$ **1,25 nF**, $Q =$ **30,0 nC**. $U = Q/C =$ **24,0 V**. $E/E_0 =$ **1/5**.

Lösung 11

a) $A = 0{,}0500\ m^2$. $C_0 = \varepsilon_0 A/d =$ **221 pF**. $Q_0 = C_0U_0 =$ **17,7 nC**. $E_0 = U_0/d =$ **$4{,}00 \cdot 10^4$ V/m**. $W_{außen} = qU_0 =$ **$+2{,}40 \cdot 10^{-10}$ J**.
b) Bei abgetrennter Quelle bleibt Q konstant. C wird vierfach, daher $U = U_0/4 =$ **20,0 V**. $E = U/d =$ **$1{,}00 \cdot 10^4$ V/m**. $W_{außen} = qU =$ **$+6{,}00 \cdot 10^{-11}$ J**.
c) Die elektrische Arbeit ist im elektrostatischen Feld wegunabhängig. Sie hängt nur von q und dem Potentialunterschied der Endpunkte ab. Bei schrägem Weg gleicht die kleinere Kraftkomponente die größere Weglänge aus.

Lösung 12

a) $A = 8{,}0 \cdot 10^6\ m^2$. $C = \varepsilon_0 A/d = 1{,}41664 \cdot 10^{-7}\ F \approx$ **142 nF**. $Q = CU \approx$ **2,12 C**. $E = U/d =$ **$3{,}0 \cdot 10^4$ V/m**, von der positiven Wolke zur Erde, also nach unten.
b) Der Transport erfolgt gegen die elektrische Kraft. $W_{außen} = qU = 2{,}0 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}5 \cdot 10^7\ J =$ **+0,030 J**.
c) C verdoppelt sich, Q bleibt gleich; U und E halbieren sich.

Plausibilität prüfen

Eine reale Wolke ist komplexer als dieses Plattenmodell. In der Aufgabe rechnest du mit dem ausdrücklich vorgegebenen Modell. Bei Änderungsaufgaben kannst du viele Ergebnisse vorab als Faktor bestimmen und anschließend numerisch prüfen.

Teil A und B

A · Feld, Leiter und Potential [10 P]

a) [3 P] Linke Platte +, rechte Platte −. E zeigt waagerecht nach rechts. Die Feldlinien sind im mittleren Bereich parallel und gleichmäßig dicht; Potentiallinien sind parallel zu den Platten und senkrecht zu E. Auf der Metalloberfläche verschwindet im Gleichgewicht jede tangentiale Feldkomponente. Beispiel für Zwischenlinien: 150 V, 300 V und 450 V.

b) [3 P] $E = U/d = 600\ V/0{,}040\ m =$ **$1{,}50 \cdot 10^{4}$ V/m nach rechts**. $F = |q|E = 3{,}0 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}50 \cdot 10^{4}\ N =$ **$4{,}50 \cdot 10^{-5}$ N = 45,0 µN nach links**.

c) [4 P] $\Delta\varphi = 450\ V - 150\ V = +300\ V$. $\Delta E_{pot} = q\Delta\varphi = -3{,}0 \cdot 10^{-9} \cdot 300\ J =$ **$-9{,}0 \cdot 10^{-7}$ J = −0,90 µJ**. $W_{Feld} =$ **+0,90 µJ**. Bei freier Bewegung ohne andere Arbeitsbeiträge nimmt E_{kin} zu: Das Feld beschleunigt die negative Ladung zum höheren Potential.

B · Arbeit und Geschwindigkeit [10 P]

a) [3 P] $s = \sqrt{(4^2 + 3^2)}\ cm = 5{,}0\ cm$; $\alpha = \arctan(3/4) = 36{,}9°$. $W_{Feld} = qEs\cos\alpha = (2{,}0 \cdot 10^{-9})(5{,}0 \cdot 10^{3})(0{,}050)(0{,}8)\ J =$ **$+4{,}0 \cdot 10^{-7}$ J**.

b) [2 P] Es zählt die Verschiebung in Feldrichtung. Senkrechte Abschnitte tragen keine elektrische Arbeit bei, Rück- und Vorwege heben sich entsprechend auf. Anfangs- und Endpunkt legen die Arbeit fest.

c) [3 P] $E_{kin,Ende} = qE \cdot 0{,}040\ m = 4{,}0 \cdot 10^{-7}\ J$. Mit $m = 1{,}0 \cdot 10^{-6}\ kg$ ergibt sich $v = \sqrt{(2E_{kin}/m)} = \sqrt{0{,}80}\ m/s \approx$ **0,894 m/s**.

d) [2 P] Gewichtskraft mg nach unten, elektrische Kraft |q|E nach oben. Im Schwebezustand: **$|q|E = mg$**. Weil q negativ ist, wirkt die elektrische Kraft entgegen dem nach unten gerichteten Feld.

So vergibst du die Punkte

Die Verteilung ist eine Übungshilfe: Gib dir bei Rechenaufgaben Punkte für den richtigen Ansatz, die korrekte Rechnung mit Einheit und die physikalische Aussage. Ein richtiger Folgeansatz kann sinnvoll sein, auch wenn du zuvor einen Zahlenfehler gemacht hast. Das ist kein offizieller Bewertungsmaßstab deiner Lehrkraft.

Teil C und D und dein nächster Schritt

C · Kondensator [12 P]

a) [4 P] A = 0,0400 m² und d = 0,0020 m. $C_0 = \varepsilon_0 A/d$ = **177 pF**. $Q_0 = C_0 \cdot 200\ V$ = **35,4 nC**. E_0 = 200/0,0020 = **1,00 · 10⁵ V/m**.

b) [4 P] Abgetrennte Quelle: **Q bleibt konstant**, da keine Ladung zu- oder abfließen kann. $C_1 = 4C_0$ = **708 pF**; Q_1 = **35,4 nC**; $U_1 = Q_1/C_1$ = **50,0 V**; $E_1 = U_1/d$ = **2,50 · 10⁴ V/m**.

c) [4 P] Angeschlossene Quelle: **U_2 = 200 V**. C_2 = 708 pF. $Q_2 = C_2U_2$ = **142 nC** (ungerundet 141,664 nC). $\Delta Q = Q_2 - Q_0 = 3Q_0$ = **106 nC**. Mit ungerundeten Werten rechnen.

D · Kräfte und Potentiallinien [8 P]

a) [3 P] $F = \sqrt{(8{,}0^2 + 6{,}0^2)}\ \mu N$ = **10,0 µN**. $\alpha = \arctan(6/8) \approx$ **36,9° oberhalb der Richtung nach rechts**.
b) [3 P] $E = F/q = 10{,}0 \cdot 10^{-6}/(4{,}0 \cdot 10^{-9})$ = **2,50 · 10³ N/C** in derselben Richtung. Auf q_2 wirkt der halbe Kraftbetrag entgegengesetzt: **5,0 µN nach links unten**.
c) [2 P] E ≈ 30 V/0,0030 m = **1,00 · 10⁴ V/m**. Feldlinien stehen senkrecht auf Potentiallinien und zeigen zu niedrigeren Potentialen.

Zusatz aus eurem Heft: Kondensatorschaltungen

Nicht ausdrücklich im Erwartungshorizont genannt, aber auf der letzten Heftseite: Parallel addieren sich die Kapazitäten; alle Zweige haben dieselbe Spannung. In Reihe addieren sich die Kehrwerte; bei anfangs ungeladenen idealen Kondensatoren sind die Ladungsbeträge gleich.

$$\text{Parallel: } C_{ges} = C_1 + C_2$$
$$\text{Reihe: } 1/C_{ges} = 1/C_1 + 1/C_2$$

Euer Beispiel: C_2 = 6 µF und C_3 = 5 µF sind parallel: C_{23} = 11 µF. Dieser Block liegt in Reihe mit C_1 = 4 µF. $C_{ges} = (4 \cdot 11)/(4 + 11)\ \mu F \approx$ **2,93 µF**.

Danach: Markiere pro Fehler genau eine Ursache (Verständnis, Ansatz, Einheit oder Rechnung) und löse eine passende Aufgabe erneut. Zurück ins Originalheft: PDF-S. 5 Feld/Influenz; S. 6 und 12 Kraft/Energie; S. 23-24 Kondensator. In den Hinweisen zusätzlich genannt: Buch S. 43/1-3, 47/1-4, 57/1-2, 65/2 und 71/1. Für genau diese Buchaufgaben werden die jeweiligen Seiten benötigt.