

Ein geladener Körper (z.B. die Kugel unseres Bandgenerators) übt auf andere geladene Körper Kräfte aus. Diese sind anziehend oder abstoßend, je nach Ladungstyp. Die Größe der Kraft hängt dabei von der Größe der Ladungen und ihrem gegenseitigen Abstand ab. Die Eigenschaft des Raumes um den geladenen Körper herum wird durch seine Anwesenheit also verändert. Diesen (neuen) Zustand nennen wir Feld.

Schaut man sich die Kraftvektoren auf kleine Probeladungen an ganz vielen Punkten in der Umgebung einer Ladung an, so ergibt sich in der Regel eine klar erkennbare Struktur des Feldes. Um diese Struktur leichter zeichnen zu können, verbindet man aufeinander folgende Kraftvektoren mit durchgängigen Feldlinien (das ist jetzt etwas vereinfacht ausgedrückt).

Worin unterscheidet sich das Feldlinienbild einer negativen Ladung davon? → Lösung

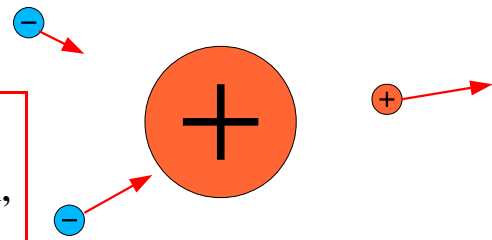
Eine passende Simulationsapp gibt's von der University of Colorado (phet.colorado.edu/de/simulations oder Suchbegriff „phet simulation“) unter dem Namen „Ladungen und Felder“. Läuft ohne Installation im Browser.

Bei mehr als einer feldgebenden Ladung wird die Struktur des Feldes ziemlich schnell kompliziert, da ja alle feldgebenden Ladungen an unserer Probeladung zerren. Die Krafrichtung kann dann gar nicht mehr so einfach angegeben werden, man muss sie ausrechnen. Computerprogramme erleichtern uns hier die Arbeit. **Zeichne die Feldlinien für die beiden nebenstehenden Beispiele, die Du bei der Vorführung gesehen hast.**

1.2 Beschreibung elektrischer Felder

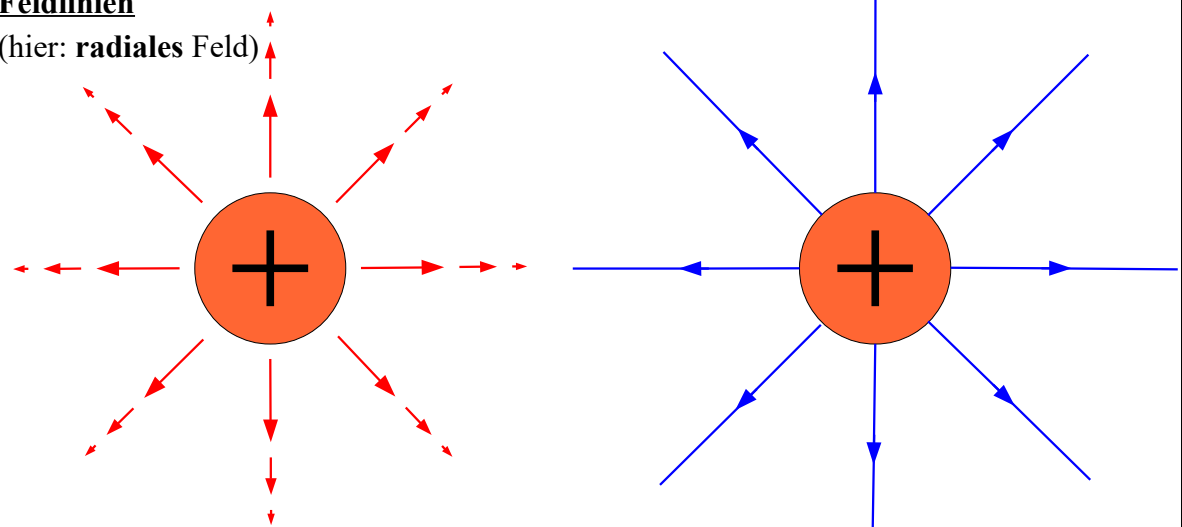
Begriff: Elektrisches Feld

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



Feldlinien

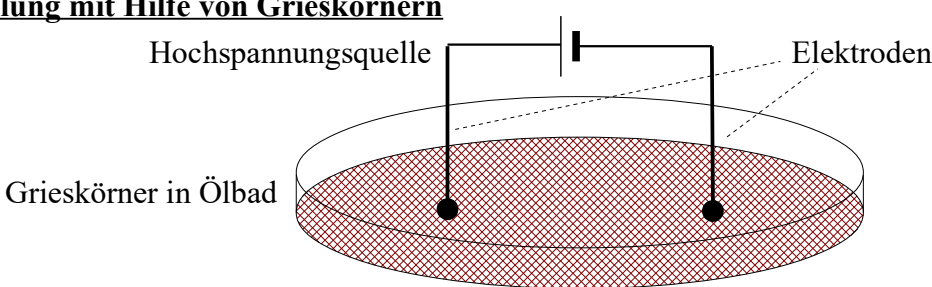
(hier: **radiales** Feld)





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

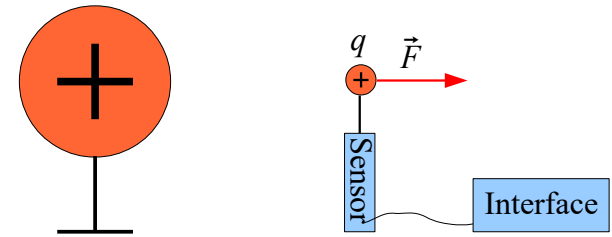
Kompliziertere Feldformen



<p><i>Aus den physikalischen Eigenschaften von Ladungen ergeben sich Regeln für unsere modellhafte Beschreibung durch Feldlinien.</i></p>	<p><u>Regeln für Feldlinien</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Feldlinien beginnen bei positiven und enden bei negativen Ladungen. 2. Je dichter die Feldlinien, umso stärker ist dort das Feld (und umgekehrt). 3. Feldlinien können sich nicht verzweigen. 4. Feldlinien treffen immer senkrecht auf leitende Oberflächen.
<p><i>Welche Aussage auf der vorhergehenden Seite führt zu Regel 1? Notiere dort „→ Regel 1“.</i> <i>Welches Bild auf der vorhergehenden Seite motiviert Regel 2? Notiere dort „→ Regel 2“.</i> <i>Welche Konsequenz hätte es für eine Probeladung, wenn Regel 3 nicht zuträfe? Zeichne ein Bildchen.</i></p>	<p>Zu Regel 3:</p>
<p><i>Welche Forderung ergibt sich aus dieser Definition für den Verlauf der Feldlinien in einem homogenen Feld? Stelle das zeichnerisch dar. → Lösung</i></p>	<p><u>Homogenes Feld</u></p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Als homogen wird ein Feld bezeichnet, das an jeder Stelle gleich stark ist.</p> </div>
<p><i>Eine beliebte Darstellung von Feldlinienbildern im Experiment erfolgt mit Grieskörnern, die in Öl schwimmen. Das elektrische Feld wird dabei mit geladenen Elektroden (Hochspannung) erzeugt. Bilder zum Versuch findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre – Ladungen und Felder Mittelstufe – Versuche – Darstellung von elektrischen Feldlinien.</i></p>	<p><u>Darstellung mit Hilfe von Grieskörnern</u></p> 
<p><i>Selbst-Check:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Feld und Feldlinien</i> • <i>Regeln für Feldlinienbild</i> • <i>Typische Feldformen</i> 	<p>Die Aufgabe S.44/2 eignet sich gut dazu, Dir Gedanken über die Regeln für Feldlinien zu machen. Aufgabe S.44/3 bringt noch einen weiteren interessanten Aspekt zu den Feldlinien, den wir im Unterricht noch nicht behandelt haben. In S.44/7 gibt's noch weitere Bildchen.</p>

<p>Um zu quantifizieren, wie stark ein Feld an einer bestimmten Stelle ist, führen wir die physikalische Größe Feldstärke ein. Aus Gründen, die wir im folgenden noch besprechen, verwenden wir hierzu kein Experiment sondern eine Überlegung (Gedankenversuch).</p> <p>Ergänze den letzten Satz.</p>	<p>Elektrische Feldstärke</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>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.</p> </div> </div> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>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</p> <p>.....</p> </div> </div>
<p>Formuliere physikalisch knapp den Zusammenhang zwischen der Größe der Probeladung und der auf sie wirkenden Kraft. Wie könnte man diesen Zusammenhang bei Messwerten rechnerisch nachprüfen?</p>	<p>Erkenntnis:</p>
<p>Der konstante Wert der Quotienten hat dabei meist eine physikalische Bedeutung, z.B. $v = \frac{s}{t}$, $R = \frac{U}{I}$</p> <p>Hilfe zur Einheitenumrechnung:</p> $1 \frac{N}{C} = 1 \frac{\frac{J}{m}}{As} = 1 \frac{\frac{Ws}{m}}{As} = 1 \frac{\frac{VAs}{m}}{As} = 1 \frac{V}{m}$	<p>Wir verwenden den Quotienten aus der Ladung q und der elektrostatischen Kraft F, die auf diese Probeladung q wirkt, als Maß für die elektrische Feldstärke E. Die Feldstärke hat dabei auch eine Richtung, die sich aus der Richtung der Kraft ergibt:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ <p>Einheit: $1 \frac{N}{C} = 1 \frac{V}{m}$</p> </div> <p>Bemerkung: Diese Definition funktioniert im homogenen Feld (E überall gleich) ebenso wie im inhomogenen Feld (E hat an jeder Stelle einen anderen Wert). Die Konstanz bezieht sich immer auf eine bestimmte Stelle des Feldes.</p>
<p>Ein typischer Wert für Feldstärke, die wir in unseren Schulexperimenten erreichen können, liegt bei etwa 500000 V/m oder 5000 V/cm. Berechne die Kraft auf eine Ladung von 100 nC (passt auf eine kleine Kugel). Vergleiche mit der Gewichtskraft auf eine Masse. (Lsg)</p>	

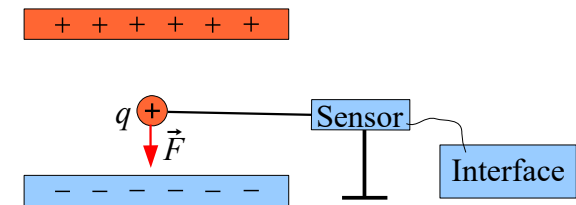
In allen neuen Schulbüchern findet man das abgebildete Experiment, bei dem für verschiedene Probeladungen jeweils die Kraft mithilfe eines sehr feinen Kraftsensors gemessen wird. Warum kann mit diesem Experiment die Proportionalität von Kraft und Ladung nicht gezeigt werden? → Lösung



*In diesem Experiment tritt zwar derselbe Effekt auf, wirkt sich aber nicht (oder zumindest weniger) auf das Messergebnis aus. **Erläutere den Unterschied.** → Lösung*

Die Halbierung der Ladung lässt sich dadurch realisieren, dass man (außerhalb des Feldes) die Kugel mit einer gleich großen ungeladenen Kugel berührt, die Ladung verteilt sich dann gleichmäßig auf beide Kugeln.

Alternativexperiment mit Plattenkondensator (homogenes Feld)



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

Selbst-Check:

- **Gedankenversuch zu Kraft und Ladung**
- **Definition der Feldstärke**
- **Experimente: was geht, was geht nicht?**

Aufgaben und ein Quiz gibt's auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre – Ladungen und elektrisches Feld – Überlagerung elektrischer Felder Aufgaben**. (Manche Fragen liegen außerhalb unserer Betrachtung).

Ein besonders einfacher Zugang zu diesen eigentlich schwierigen, weil abstrakten Begriffen gelingt besonders leicht durch den Vergleich mit der Hubarbeit in der Mechanik. Die kennen wir bereits seit der 8. Klasse und im Prinzip funktioniert's bei der elektrischen Arbeit im Plattenkondensator genauso.

Beachte: Der Weg muss dabei parallel zu den Feldlinien gemessen werden. Die Höhe würden wir ja auch nicht schräg messen.

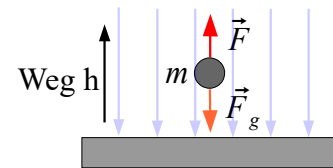
Stelle in einer Minutabelle entsprechende Größen aus den beiden Beispielen gegenüber, z.B. „Masse ↔ ...“

In der Mechanik haben wir in diesem Bereich dann die Größe Energie eingeführt, die sich für Berechnungen als sehr hilfreich erwiesen hat. Für das elektrische Feld funktioniert das natürlich auch.

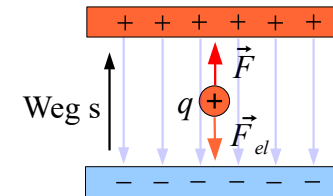
Die elektrische potentielle Energie hängt natürlich von der Ladungsmenge q ab (so wie die mechanische potentielle Energie von der Masse abhängt). Deshalb taucht q als Faktor in der Formel auf. Der Rest beschreibt den Einfluss des Feldes. Für diesen Rest führen wir hier einen eigenen Namen ein → Potential.

Nebenstehende Abbildung zeigt drei verschiedene Positionen im homogenen Feld eines Plattenkondensators. **Ordne die Positionen nach der Größe der potentiellen Energie, die eine positive Probeladung dort hätte. Zeichne grün alle Positionen ein, an denen das Potential genauso groß ist wie an der Stelle a), für b) und c) ebenso.** → Lösung

Arbeit und Potential im homogenen 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 die konstante Kraft ist, mit der wir ziehen und s der Weg, den wir bewältigen müssen.

$$W = \Delta E_{pot} = E_{pot,1} - E_{pot,0} \quad (1)$$

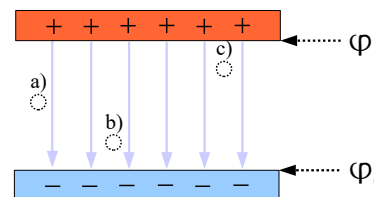
Üblicherweise setzt man die potentielle Energie an der negativen Platte gleich 0. Dann ist die potentielle Energie in einem bestimmten Abstand s von dieser Platte gerade:

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

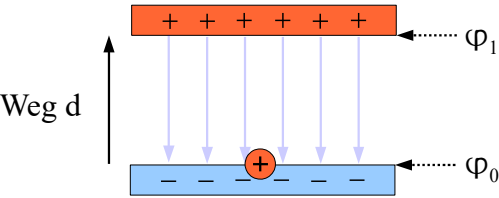
Den Term $E \cdot s = \varphi$ nennen wir Potential.

Damit lässt sich die potentielle Energie schreiben als $E_{pot} = q \cdot \varphi \quad (2)$

Das Potential hängt nur vom Feld, nicht aber von unserer Probeladung ab. Deshalb können wir jedem Punkt in einem Feld einen festen Wert für das Potential zuordnen, unabhängig davon, mit welcher Probeladung wir im Feld operieren.



Linien gleichen Potentials heißen Äquipotentiallinien (vgl. Höhenlinien auf der Landkarte).

<p>Die Ermittlung der Einheit unserer neuen Größe führt zur Begegnung mit einer alten Bekannten. Bestimme sie.</p>	
<p>Jetzt schließt sich der Kreis zur Mittelstufe. Folgende Umformung ist lediglich der Zusammenbau der Formeln aus der Mittelstufe.</p>	$W = U \cdot I \cdot t = U \cdot q \quad \text{da} \quad q = I \cdot t \quad \rightarrow \quad U = \frac{W}{q}$ <p>mit (1) $\rightarrow \quad U = \frac{E_{\text{pot},1} - E_{\text{pot},0}}{q} = \frac{E_{\text{pot},1}}{q} - \frac{E_{\text{pot},0}}{q} = \varphi_1 - \varphi_0$</p>
<p>Das ergibt nun eine saubere, wenn auch schwierige Definition des so häufig gebrauchten Begriffes <i>Spannung</i>.</p>	<p>Die Spannung zwischen zwei Punkten ist die Potentialdifferenz dieser Punkte bezüglich des zugehörigen Feldes:</p> $U = \varphi_1 - \varphi_0 = \Delta \varphi \quad (3)$
<p>Jetzt wenden wir das alles mal an, dann wird es klarer. Wir bewegen eine positive Probeladung q von der negativen bis zur positiven Platte. Dazu müssen wir Arbeit verrichten. Berechne diese Arbeit mit Hilfe der Gleichungen (1), (2), und (3). Vergleiche das Resultat mit der Gleichung im Einführungsteil dieses Kapitels (vorherige Seite oben). Ermittle daraus eine einfache Formel für die Feldstärke im Plattenkondensator. → Lösung</p>	
<p>Selbst-Check:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Arbeit im homogenen elektrischen Feld</i> • <i>Potential</i> • <i>Spannung</i> 	<p>Mit der Aufgabe S.45/10 kannst Du prüfen, ob Du dieses neue und nicht ganz einfache Konzept verstanden hast, eventuell hilft die Musteraufgabe S.29. außerdem S.45/11-14. Auf Leifiphysik zum Thema unter Teilgebiet Elektrizitätslehre – Ladungen und elektrisches Feld – Potentielle Energie im homogenen Feld Aufgaben.</p>

