

Felder zum Anfassen

Unterschiedliche Kraftgesetze

Peter Schmälzle



**STAATLICHES SEMINAR für Didaktik und
Lehrerbildung (Gymnasien) KARLSRUHE**

04.07.2016

Unterschiedliche Kraftgesetze

Anliegen dieser Veranstaltung:

Felder als eigenständige Gebilde ernst nehmen

Wie gut gelingt das bei der Beschreibung von Kräften in der Elektrizitätslehre?

Unterschiedliche Kraftgesetze

Erste qualitative Beschreibung:

Anziehung und **Abstoßung** geladener Körper

Gleichnamig geladene Körper stoßen sich ab;
ungleichnamig geladen Körper ziehen sich an

Anziehung und **Abstoßung** bei Magneten

Gleichartige Magnetpole stoßen sich ab;
ungleiche Magnetpole ziehen sich an

Unterschiedliche Kraftgesetze

Quantitative Beschreibung dieser Betrachtungsweise:



„Coulomb-Kraft“

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Unterschiedliche Kraftgesetze

Quantitative Beschreibung dieser **Betrachtungsweise**:

Fernwirkung!
Felder gibt es dabei nicht

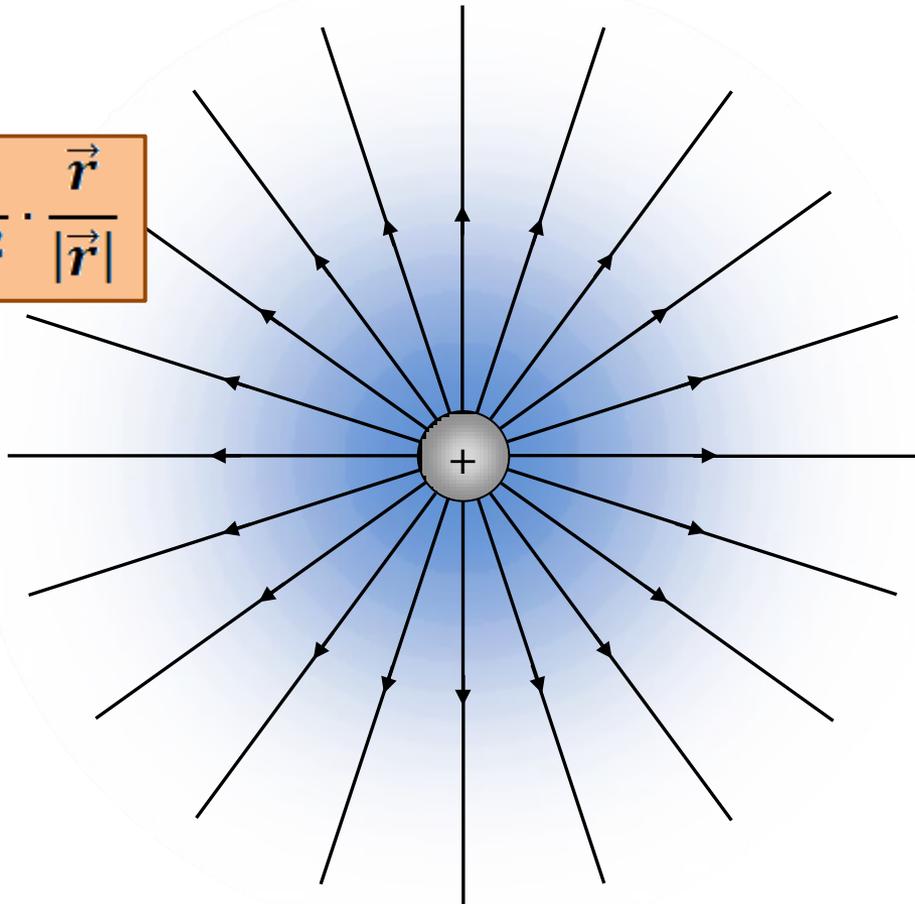
„Coulomb-Kraft“

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

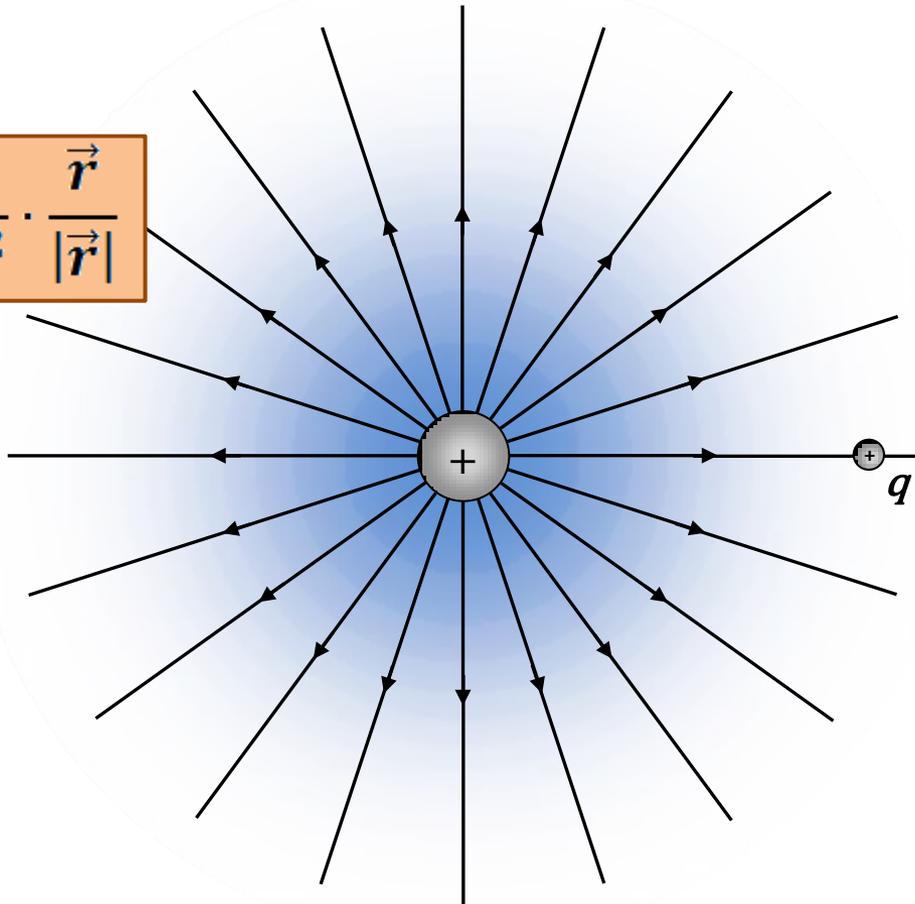
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$



Unterschiedliche Kraftgesetze

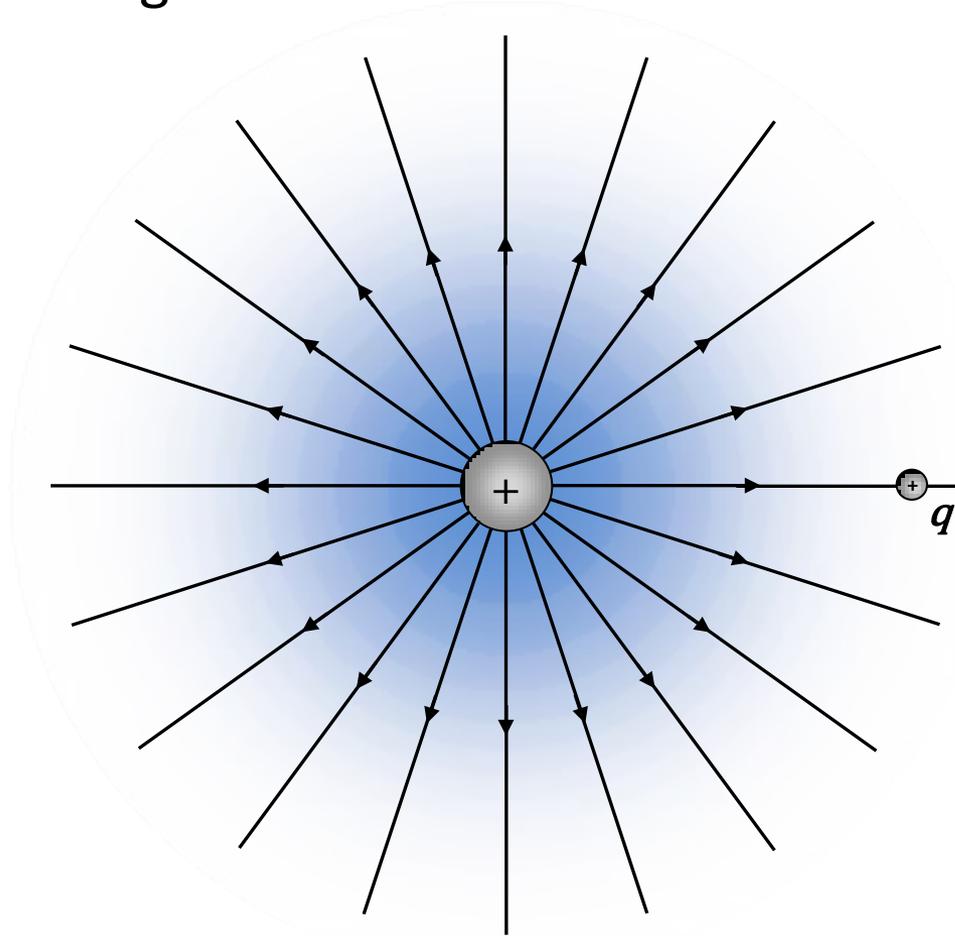
Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$



Unterschiedliche Kraftgesetze

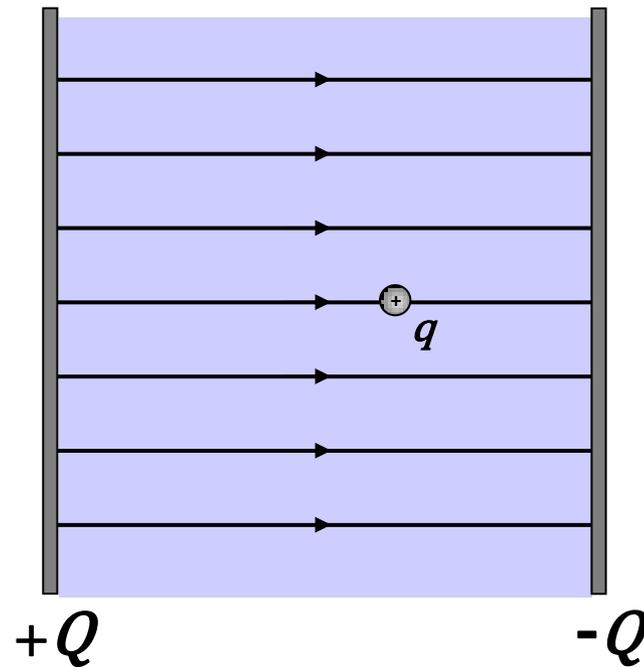
Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:



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

Unterschiedliche Kraftgesetze

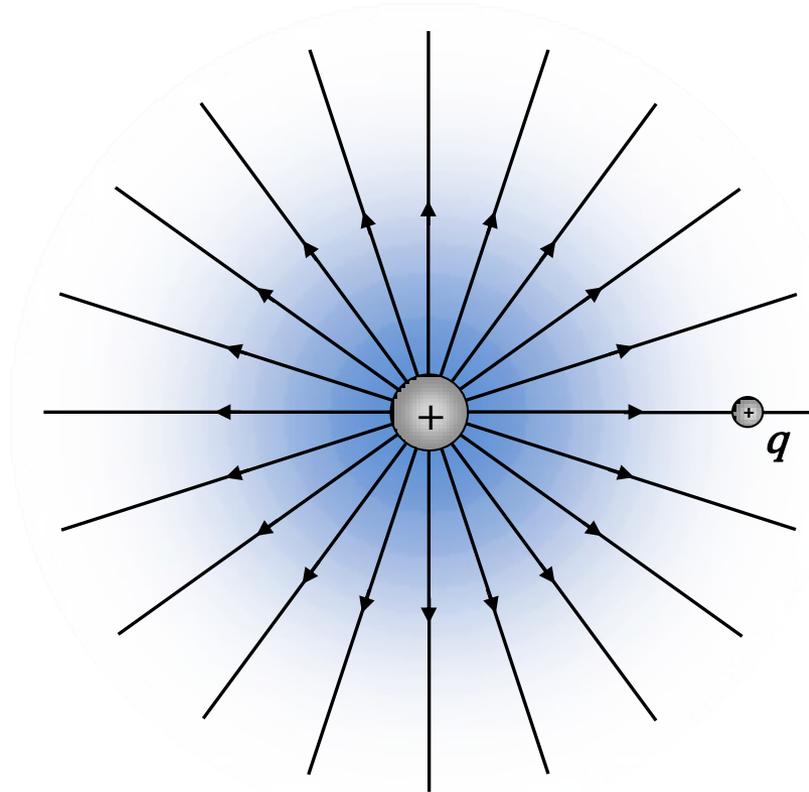
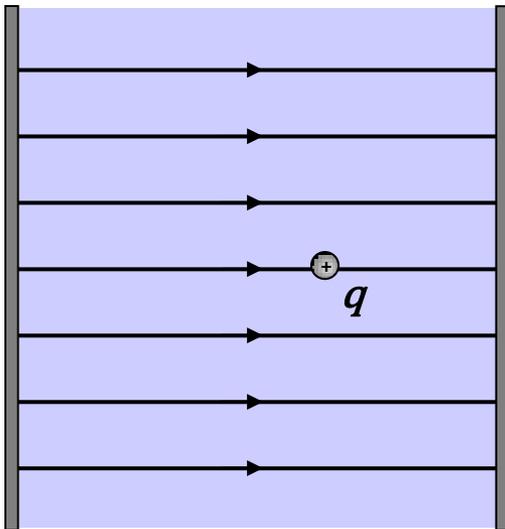
Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:



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

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

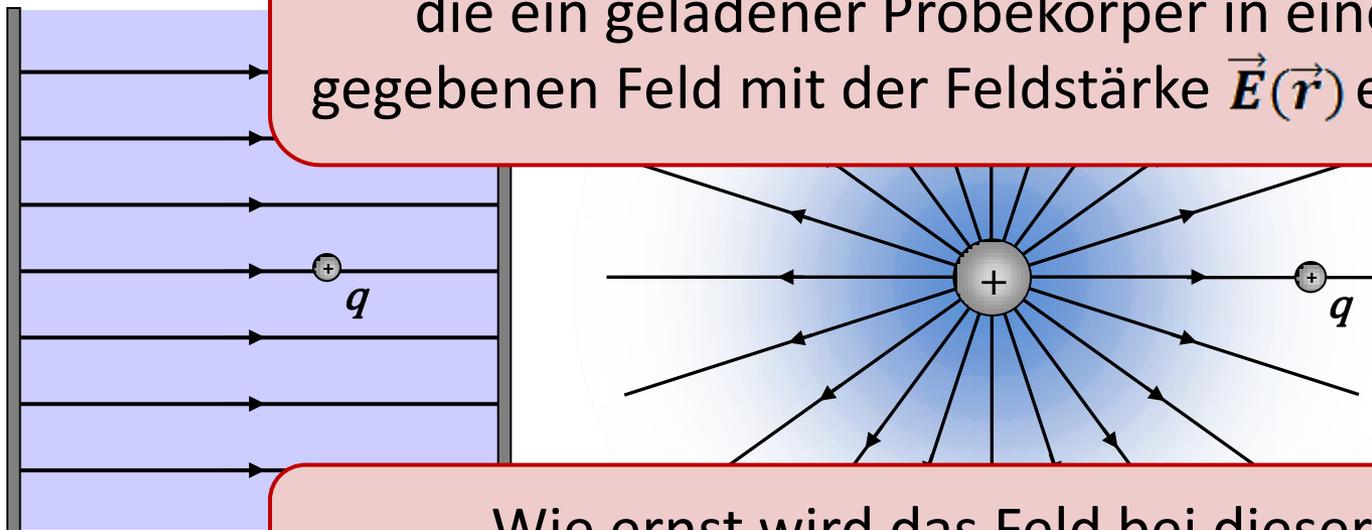


$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

Das Kraftgesetz beschreibt lokal die Kraft $\vec{F}(\vec{r})$, die ein geladener Probekörper in einem gegebenen Feld mit der Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ erfährt.



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

Wie ernst wird das Feld bei dieser Betrachtungsweise genommen?

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

Das Kraftgesetz beschreibt lokal die Kraft $\vec{F}(\vec{r})$, die ein geladener Probekörper in einem gegebenen Feld mit der Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ erfährt.



Anschaulich: Das Feld greift am Probekörper an.

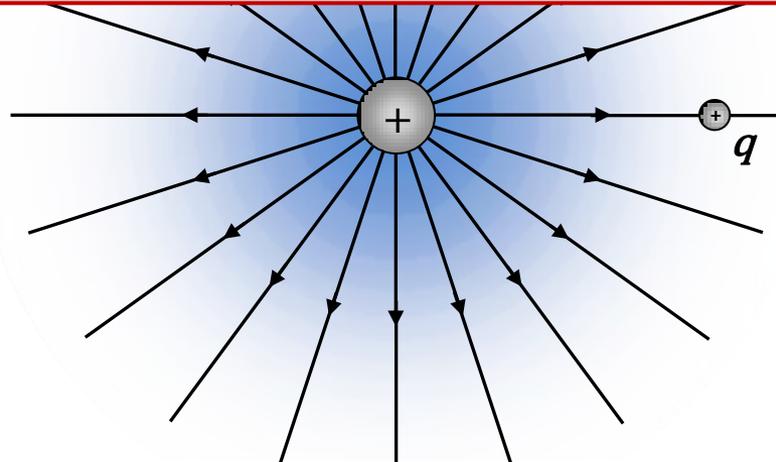
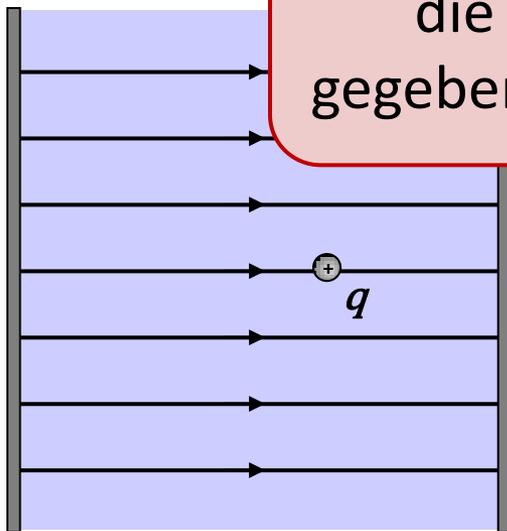
Damit greift der Probekörper auch am Feld an!

Die Gegenwart eines Probekörpers verändert das Feld!

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

Das Kraftgesetz beschreibt lokal die Kraft $\vec{F}(\vec{r})$, die ein geladener Probekörper in einem gegebenen Feld mit der Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ erfährt.



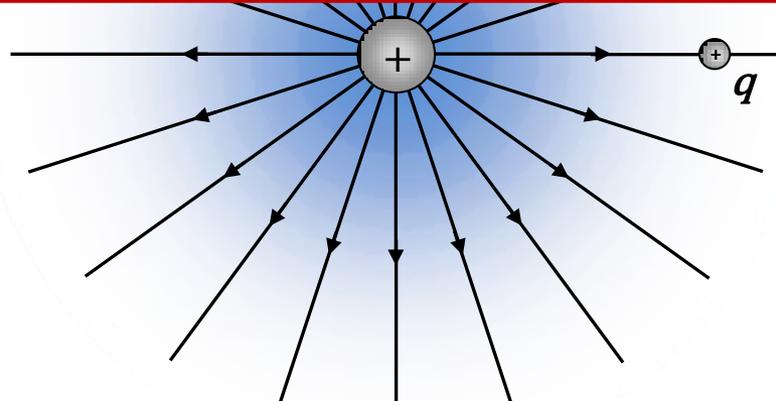
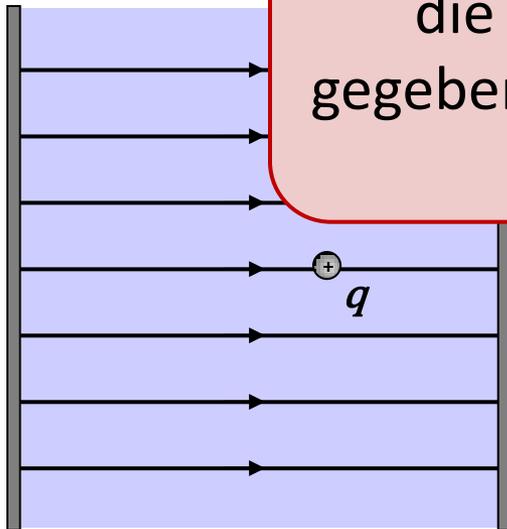
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

Die Gegenwart eines Probekörpers verändert das Feld!

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

Das Kraftgesetz beschreibt lokal die Kraft $\vec{F}(\vec{r})$, die ein geladener Probekörper in einem gegebenen Feld mit der Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ erfährt. erfahren würde



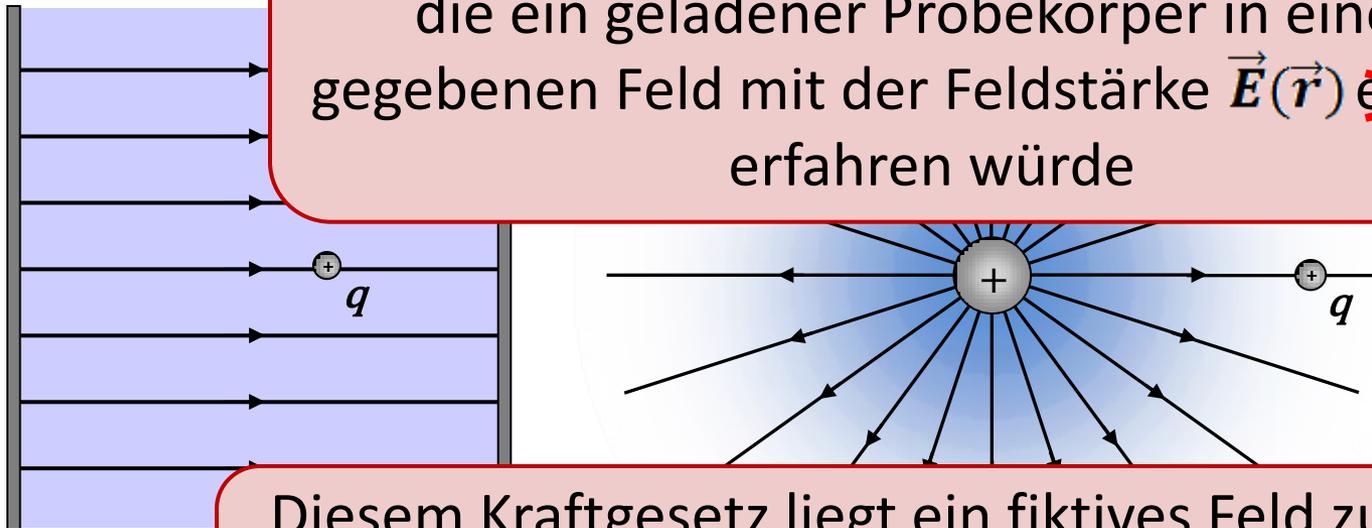
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

Die Gegenwart eines Probekörpers verändert das Feld!

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

Das Kraftgesetz beschreibt lokal die Kraft $\vec{F}(\vec{r})$, die ein geladener Probekörper in einem gegebenen Feld mit der Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ ~~erfährt~~ erfahren würde



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

Diesem Kraftgesetz liegt ein fiktives Feld zugrunde – nämlich das Feld, das ohne den Probekörper vorhanden ist bzw. wäre.

Unterschiedliche Kraftgesetze

Zwischenbilanz:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Fernwirkungsvorstellung;
Idee des Feldes bleibt unberücksichtigt

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

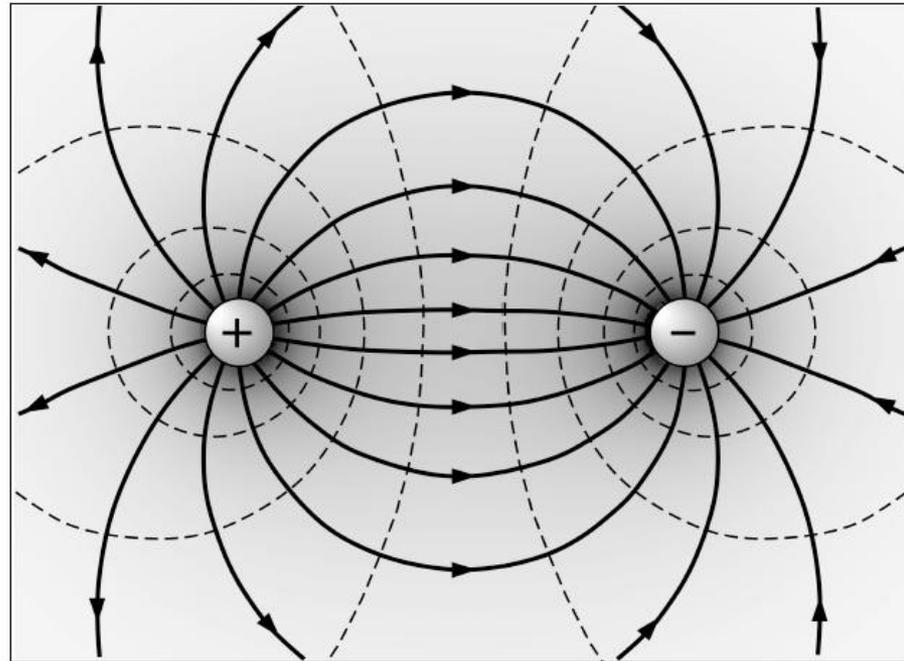
Idee des Feldes wird zwar aufgegriffen -
aber nur bedingt ernst genommen.

Eine konsequente Nahwirkungsbetrachtung sollte die Frage aufgreifen:
Wie greifen Felder an (ausgedehnten) Körpern an?

Anstelle eines fiktiven Feldes ist dazu das vorhandene Gesamtfeld zu untersuchen.

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:
„Dipolfeld“



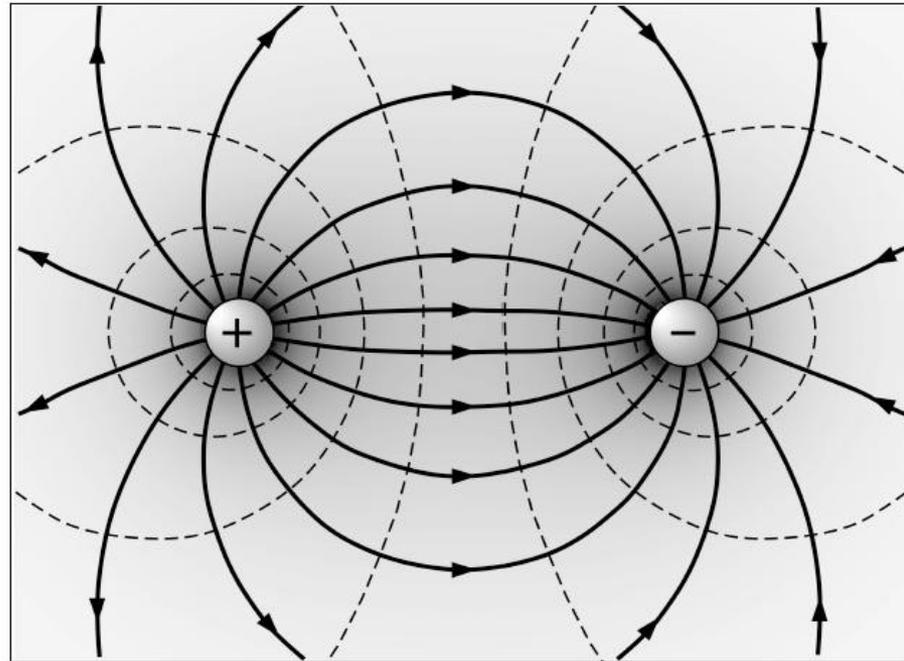
Im elektrischen Feld herrscht in Feldlinienrichtung eine Zugspannung. Wenn Feldlinien an geladenen Körpern beginnen oder enden, zieht das Feld an diesen Körpern.

Die Feldlinienanordnung dieses Dipolfeldes zeigt:

Am linken Körper zieht das Feld stärker nach rechts als nach links;
am rechten Körper zieht das Feld stärker nach links als nach rechts.

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:
„Dipolfeld“



Qualitative Betrachtungen sind im Unterricht problemlos möglich.

Quantitative Betrachtungen hierzu sind oft anspruchsvoll:

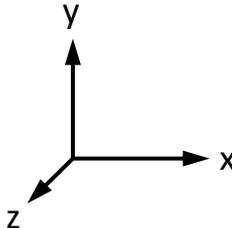
- man benötigt den Maxwellschen Spannungstensor;
- die Kraft auf einen Körper ergibt sich dann als Oberflächenintegral

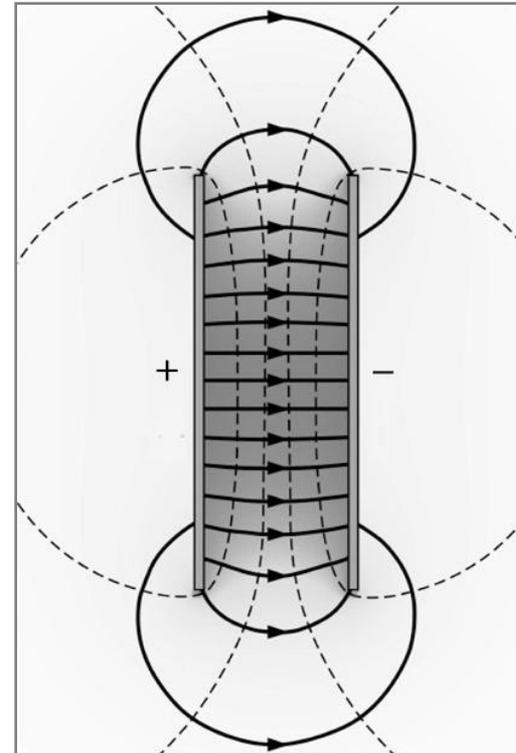
Bei geeigneter Symmetrie kann es aber recht einfach werden!

Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:

Mit welcher Kraft zieht das elektrische Feld an den Platten eines Kondensators?


$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

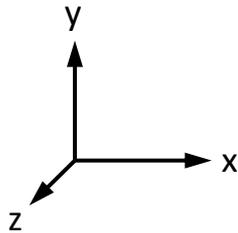


Vereinfachung: Inhomogenitäten werden vernachlässigt

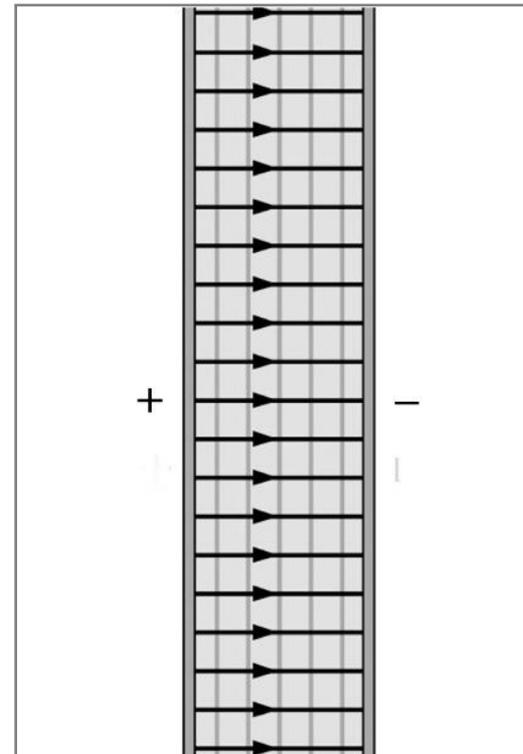
Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:

Mit welcher Kraft zieht das elektrische Feld an den Platten eines Kondensators?



$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

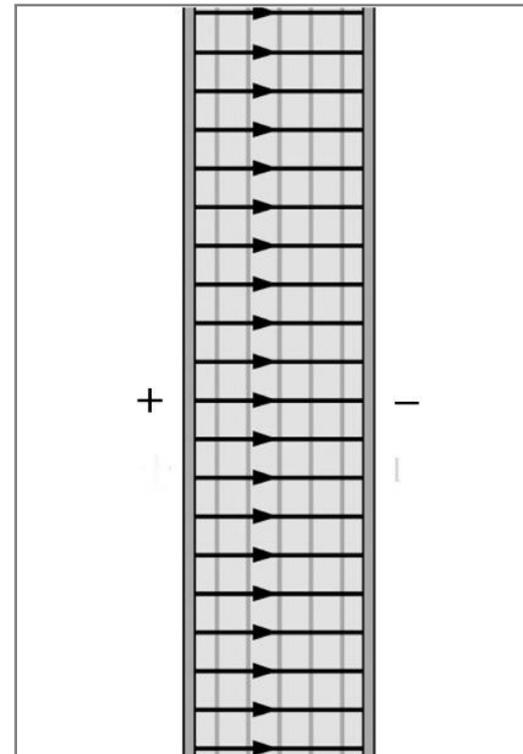


Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:

Mit welcher Kraft zieht das elektrische Feld an den Platten eines Kondensators?

$$\epsilon_0 \cdot \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} |\vec{E}|^2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{2} |\vec{E}|^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{1}{2} |\vec{E}|^2 \end{pmatrix}$$



Unterschiedliche Kraftgesetze

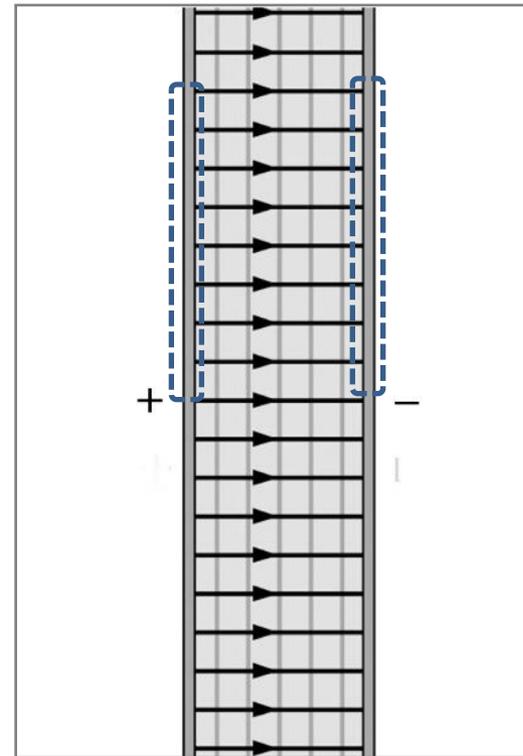
Beispiel:

Mit welcher Kraft zieht das elektrische Feld an den Platten eines Kondensators?

$$\epsilon_0 \cdot \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} |\vec{E}|^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} |\vec{E}|^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} |\vec{E}|^2 \end{pmatrix}$$

Zugspannung σ_{\parallel} in
Feldlinienrichtung

Druckspannung σ_{\perp} senkrecht
zur Feldlinienrichtung



$$\sigma = \frac{F}{A}$$

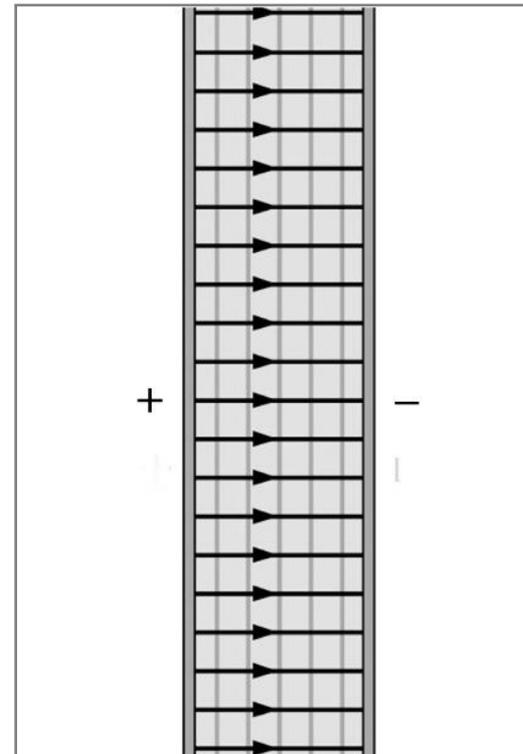
Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:

Mit welcher Kraft zieht das elektrische Feld an den Platten eines Kondensators?

Die Zugspannung im Feld liefert die gesuchte Kraft auf ein Flächenelement A einer Platte:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|^2 \cdot |\vec{A}|$$



allgemein:
$$\vec{F} = \oiint \vec{\sigma} d\vec{A}$$

Unterschiedliche Kraftgesetze

Bilanz:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Fernwirkungsvorstellung;
Idee des Feldes bleibt unberücksichtigt

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

Idee des Feldes wird zwar aufgegriffen -
aber nur bedingt ernst genommen,
indem nicht das vorhandene Gesamtfeld
berücksichtigt wird.

$$|\vec{F}| = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|^2 \cdot |\vec{A}|$$

Nahwirkungsbeschreibung;
Idee des Feldes wird ernst genommen,
indem die Kraft aus den Spannungen
des vorhandenen Gesamtfeldes
ermittelt wird.