

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**

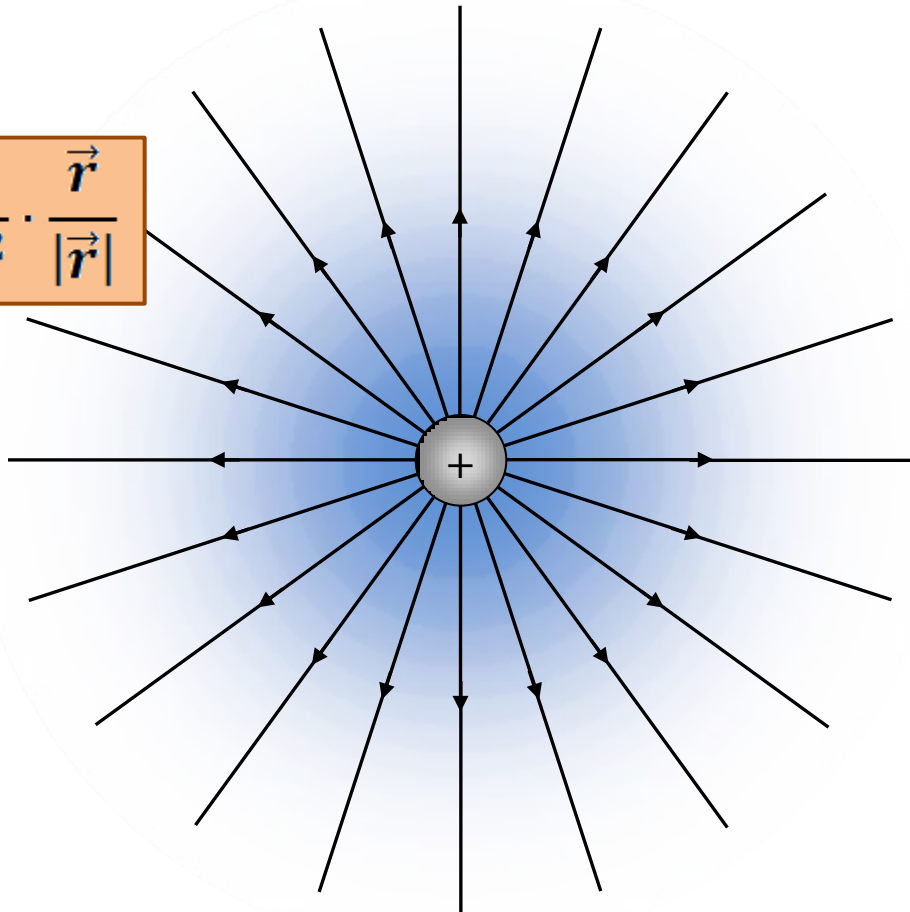
„Coulomb-Kraft“

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

# Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

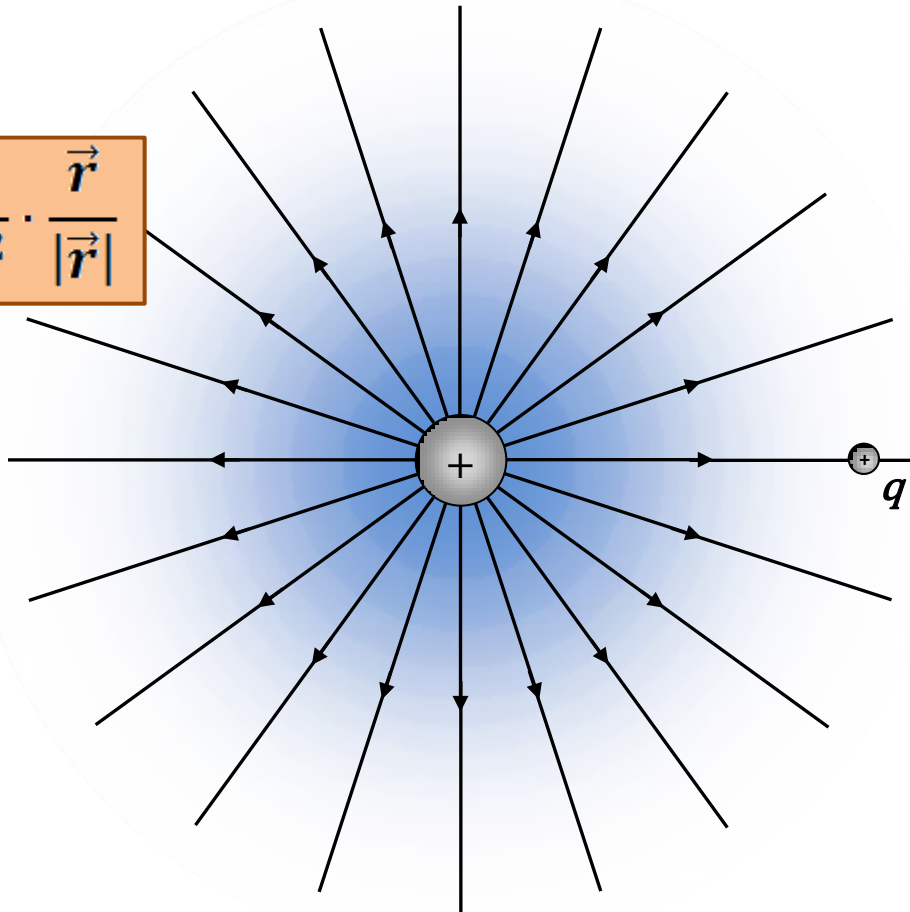
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$



# Unterschiedliche Kraftgesetze

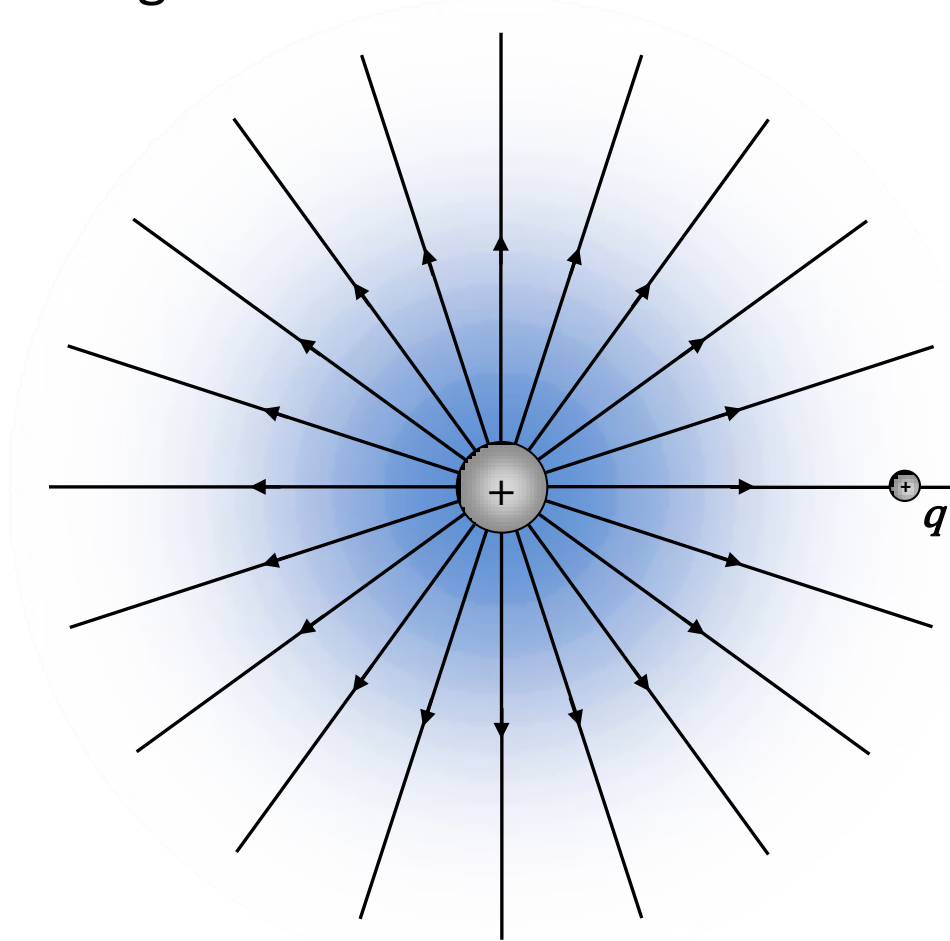
Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

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



# Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

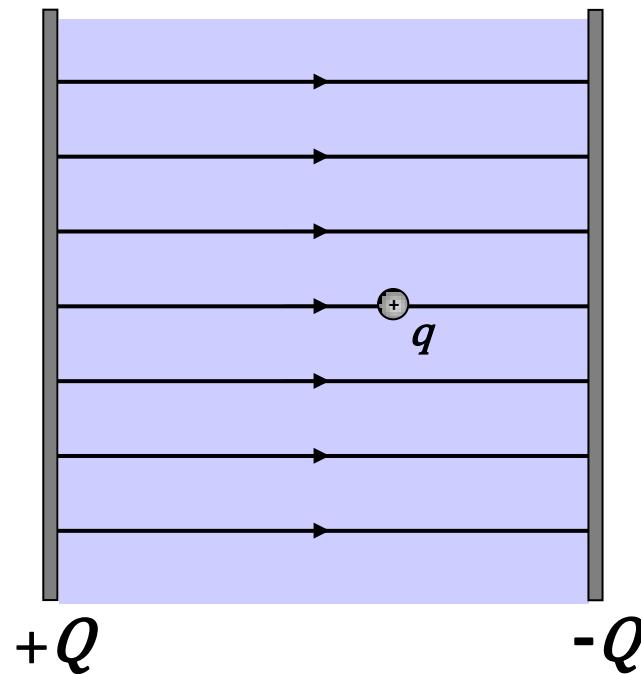


$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$



# Unterschiedliche Kraftgesetze

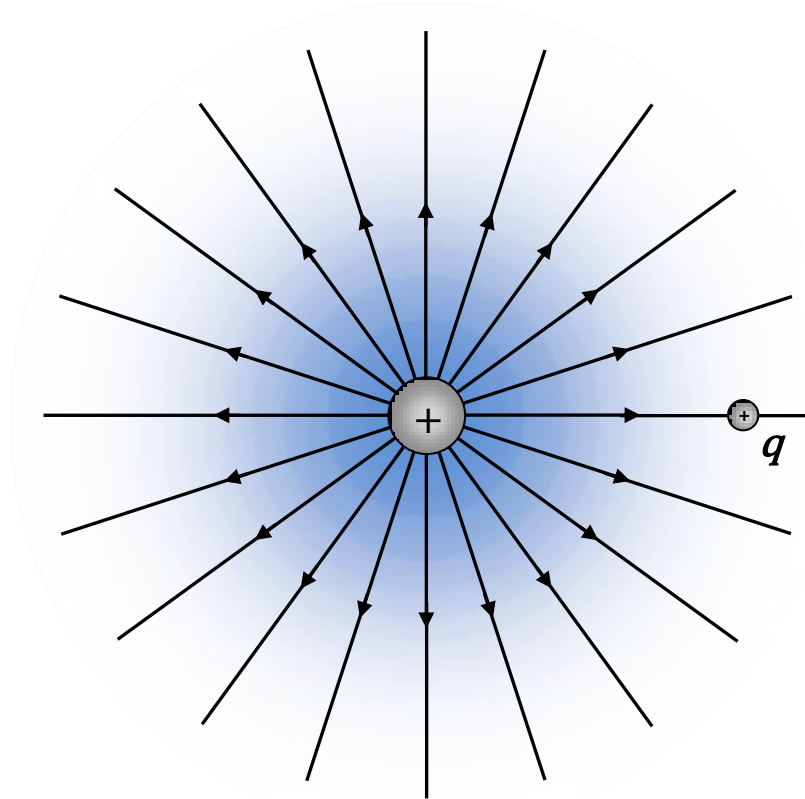
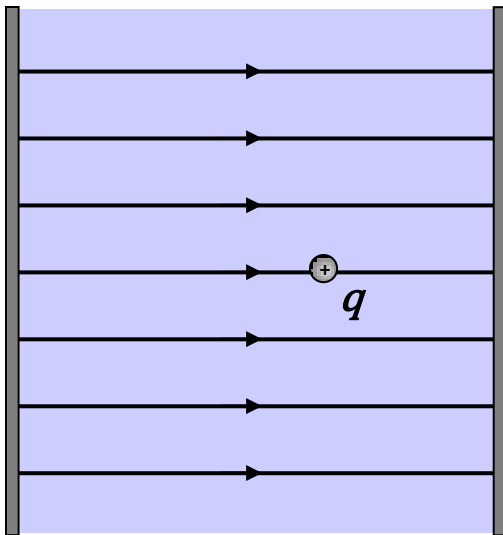
Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:



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

# Unterschiedliche Kraftgesetze

Beschreibung mit Hilfe des elektrischen Feldes:

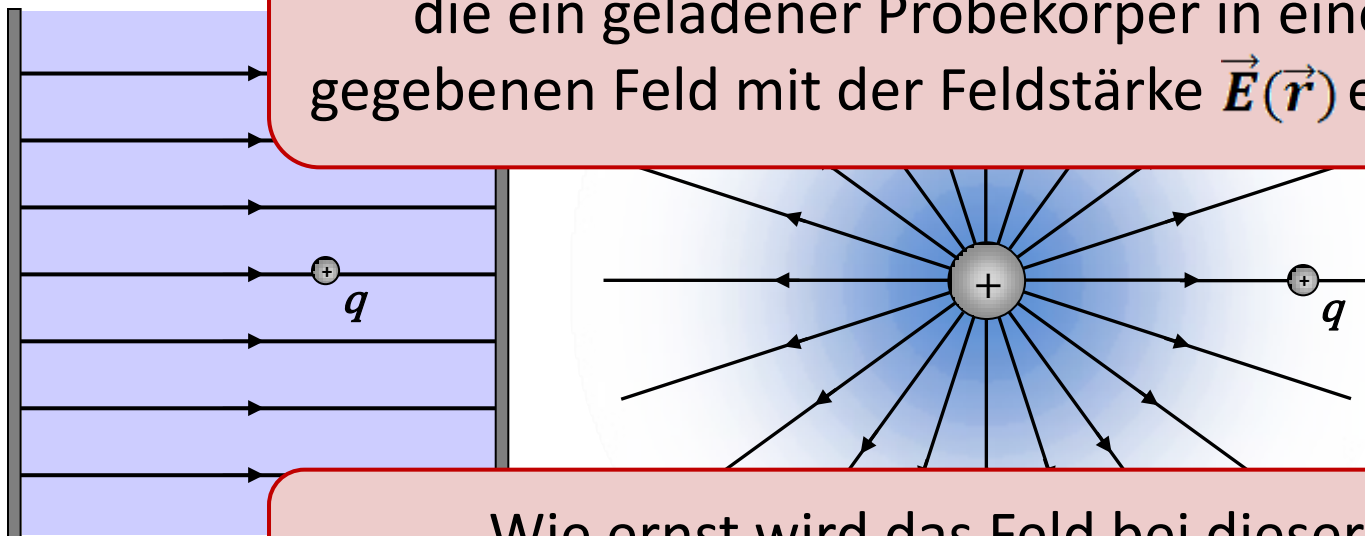


$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

# 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.

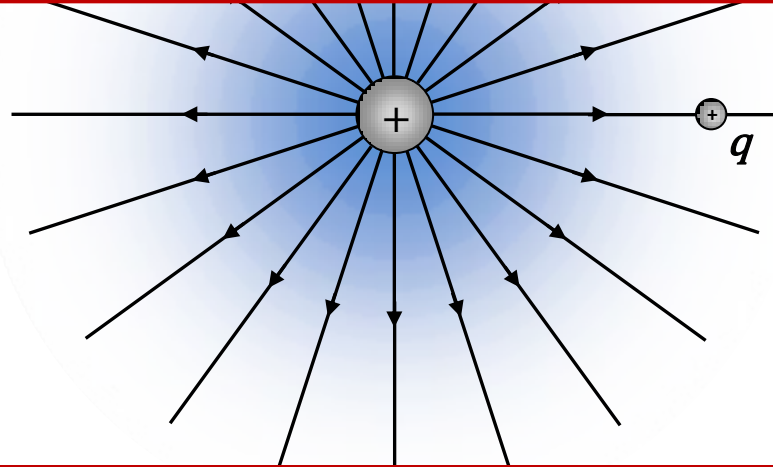
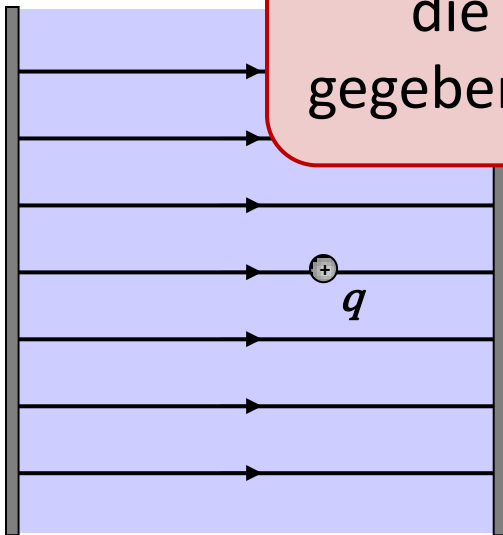
Damit greift der Probekörper auch am Feld an!

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.



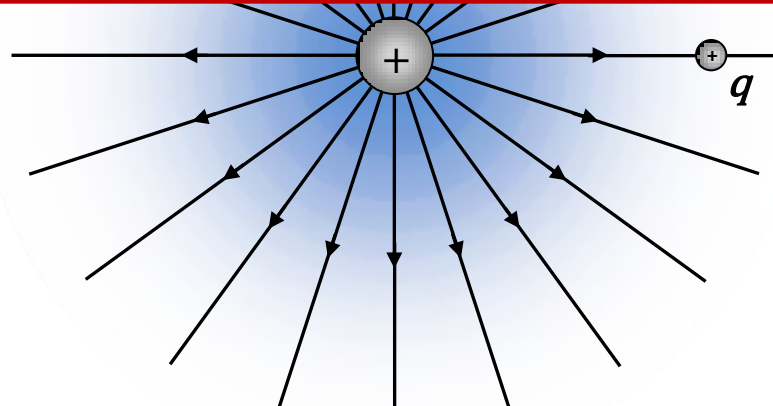
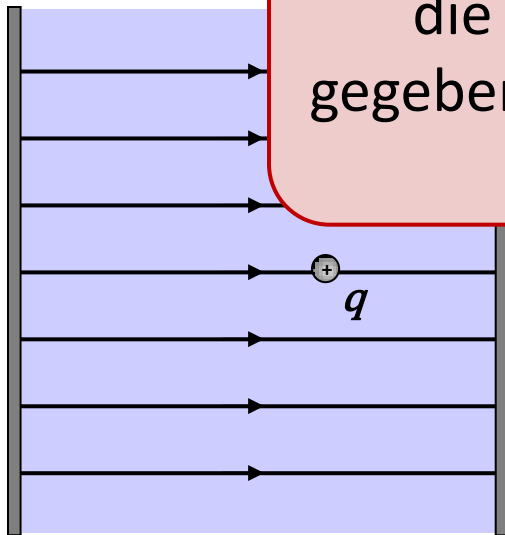
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

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



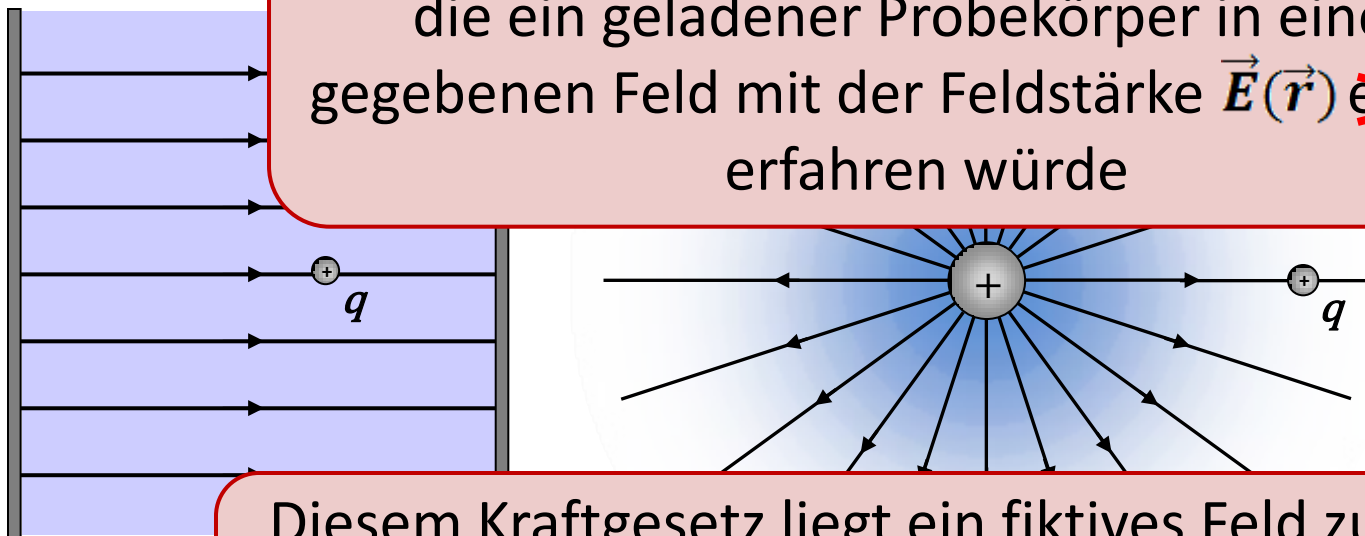
$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

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.

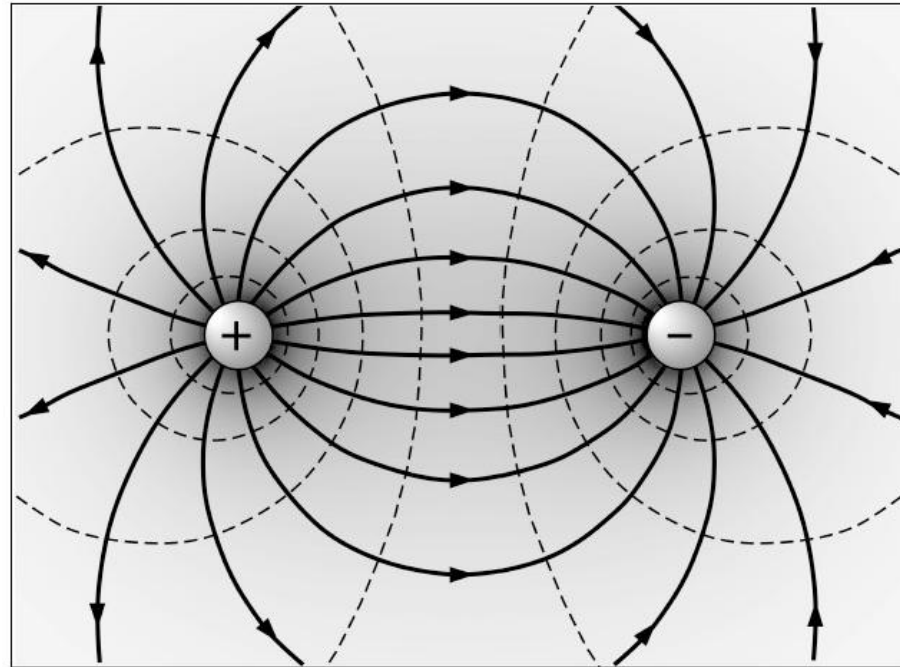
Eine konsequente Nahwirkungsbetrachtung sollte die Frage aufgreifen:  
Wie greifen Felder an (ausgedehnten) Körpern an?

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



# Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:  
„Dipolfeld“



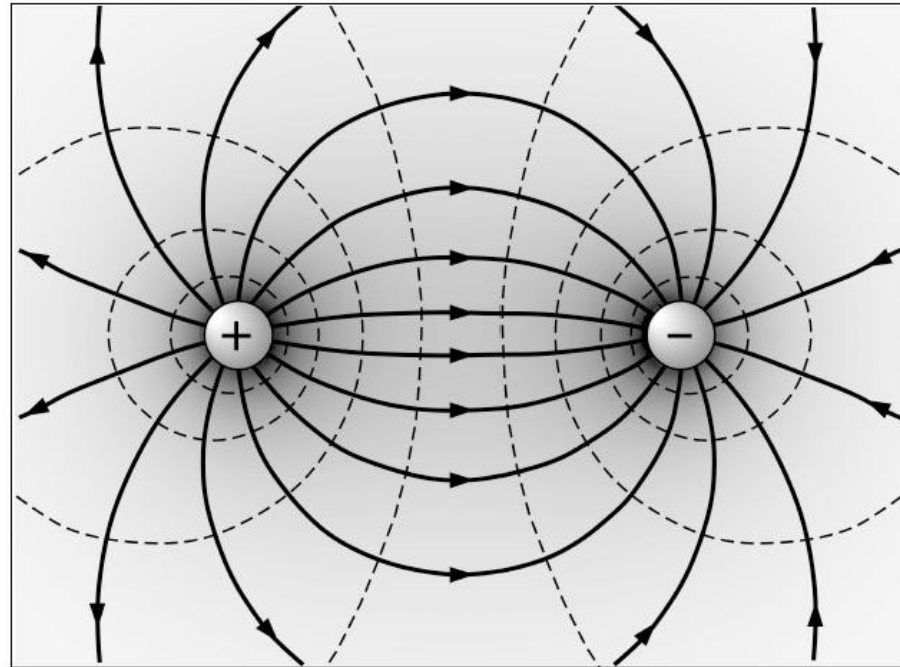
Im elektrischen Feld herrscht in Feldlinienrichtung eine Zugspannung. Wenn Feldlinien an geladenen Körpern beginnen oder enden, zieht das Feld an diesen Körpern.

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:

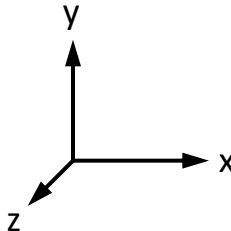
- man benötigt den Maxwellschen Spannungstensor;
- die Kraft auf einen Körper ergibt sich dann als Oberflächenintegral

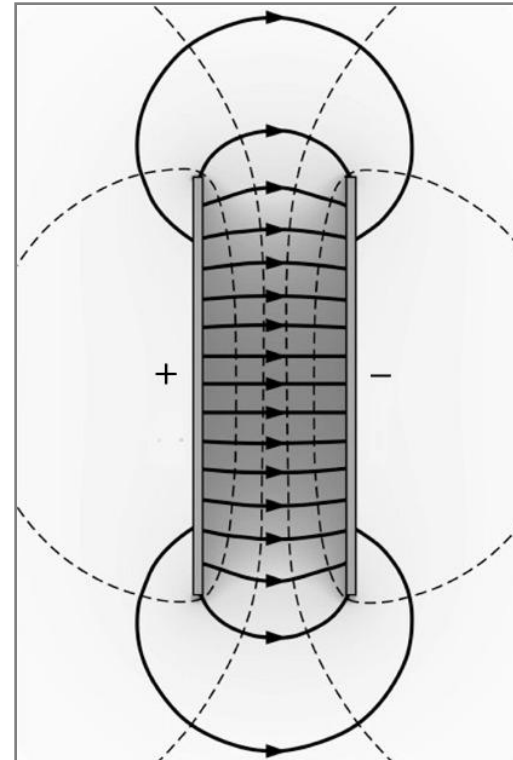
Bei geeigneter Symmetrie kann es aber recht einfach werden!

# Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:

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


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

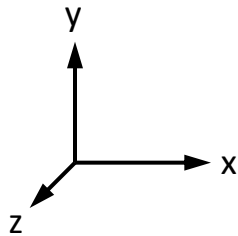


Vereinfachung: Inhomogenitäten werden vernachlässigt

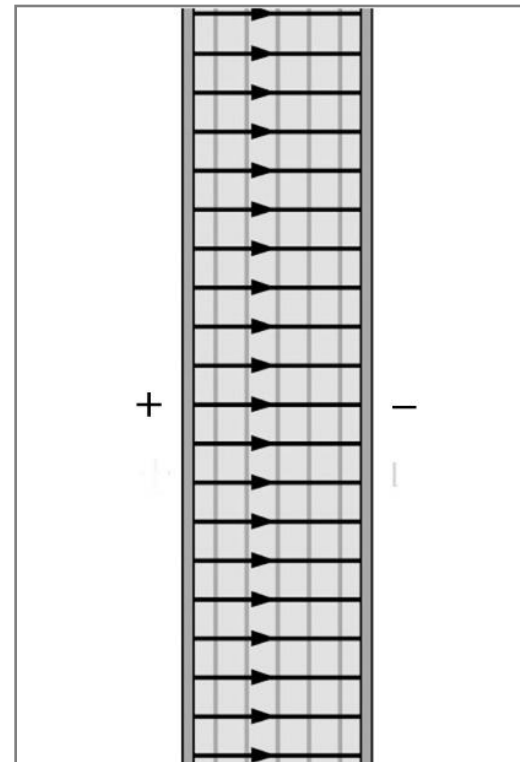
# Unterschiedliche Kraftgesetze

Beispiel:

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



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

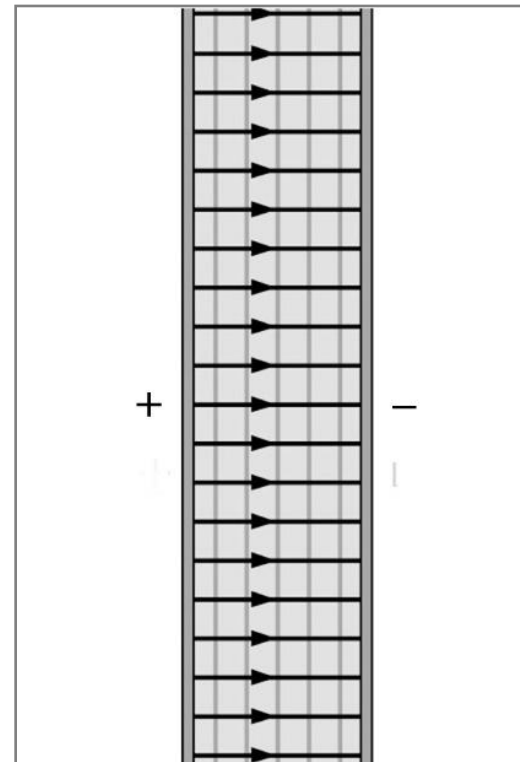


# Unterschiedliche Kraftgesetze

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

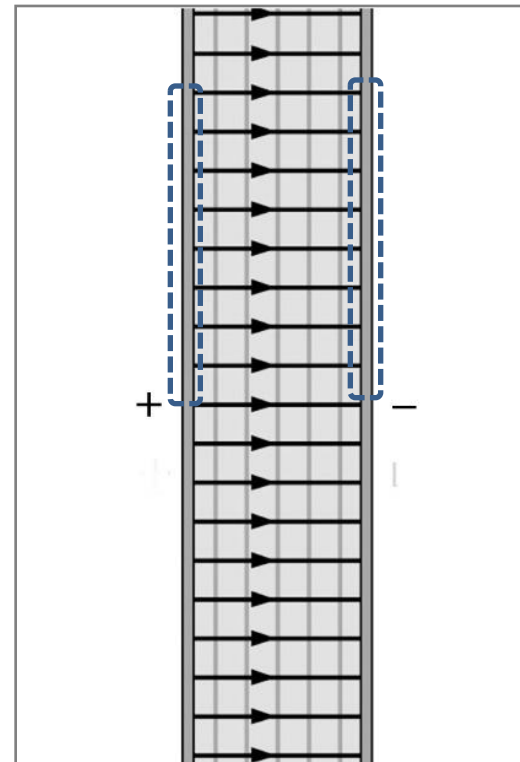
Beispiel:

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  $\sigma_{\parallel}$  in  
Feldlinienrichtung

Druckspannung  $\sigma_{\perp}$  senkrecht  
zur Feldlinienrichtung



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

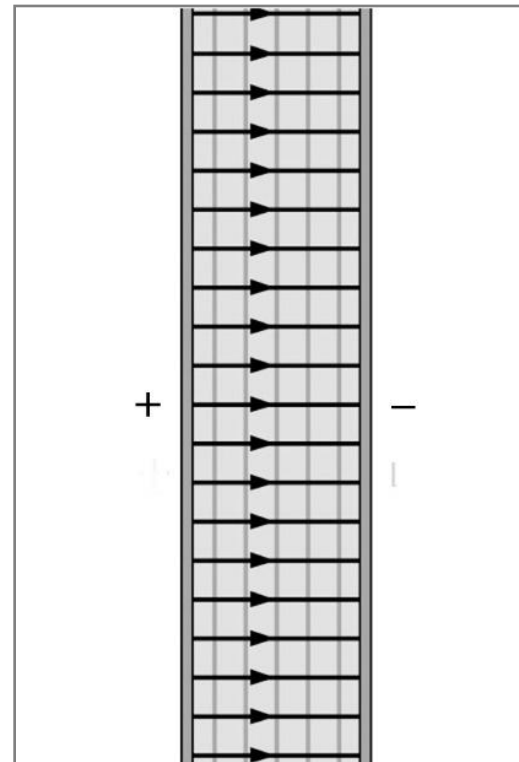
# Unterschiedliche Kraftgesetze

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.