

Grundlagen der Elektrotechnik



Elektrisches Feld

TH-Köln 2020

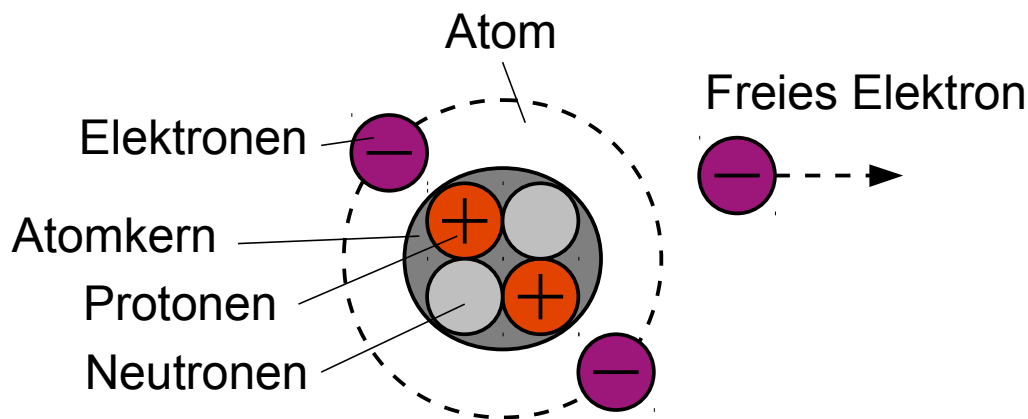
Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt

Inhalt der heutigen Veranstaltung

- Elektrische Ladung
- Kraft auf Ladungen
- Elektrisches Feld
- Elektrisches Potential
- Stromdichte

Elektrische Ladung

- Elektrizität beruht auf der Wirkung von **elektrischer Ladung**
- Es gibt **positive** und **negative** elektrische Ladung
- Elektrische Ladung kann transportiert werden durch **Ladungsträger**
- **Elementarteilchen** sind Ladungsträger
- Freie Elektronen sind bewegliche Ladungsträger



Formelsymbol: q, (e)

Physikalische Einheit:

C = Coulomb

oder

As = Amperesekunden

Elementarladung:

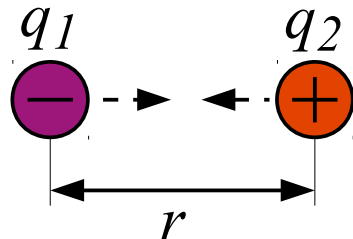
$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Kraftwirkung der elektrischen Ladung

- Es gibt **positive** und **negative** elektrische Ladung
- Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab



- Gegensätzliche Ladungen ziehen sich an:



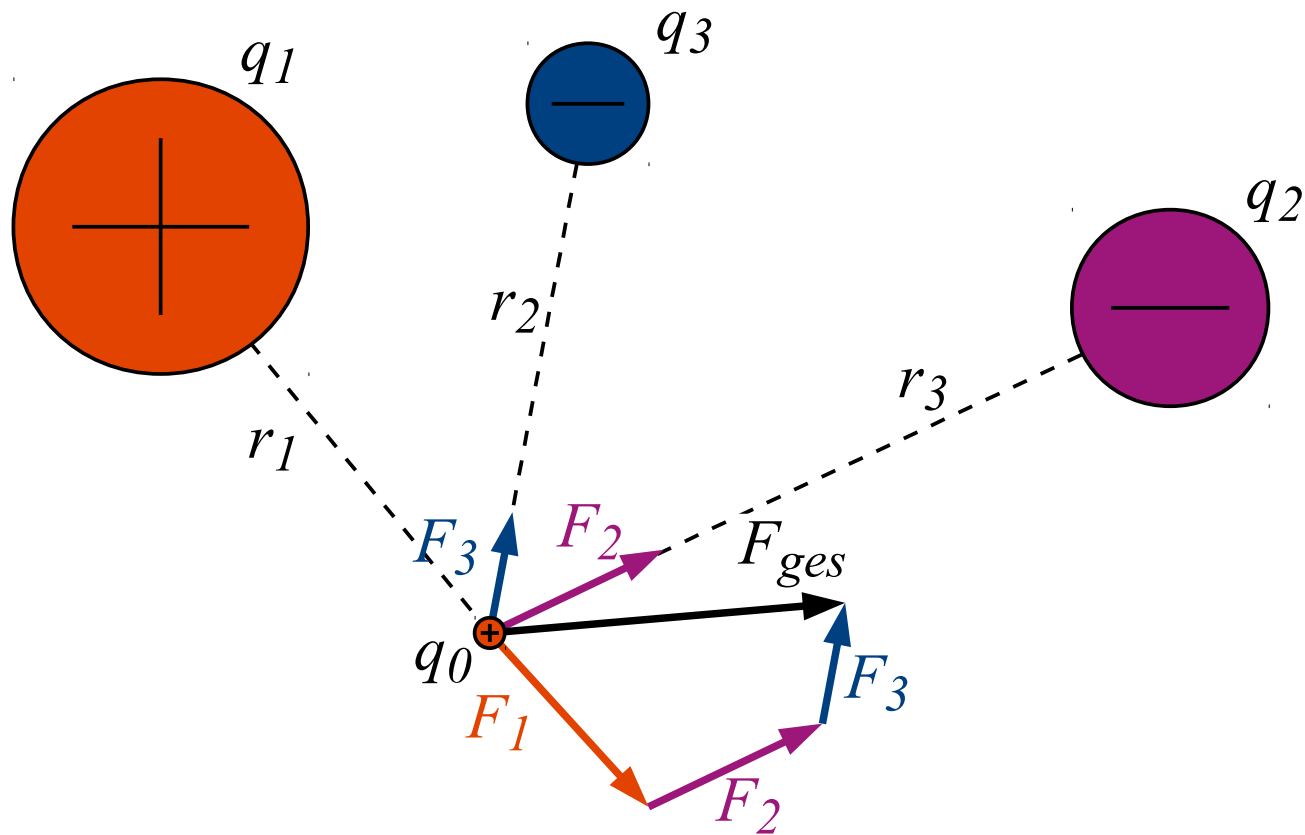
Kraft F zwischen zwei Ladungen:

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Naturkonstante

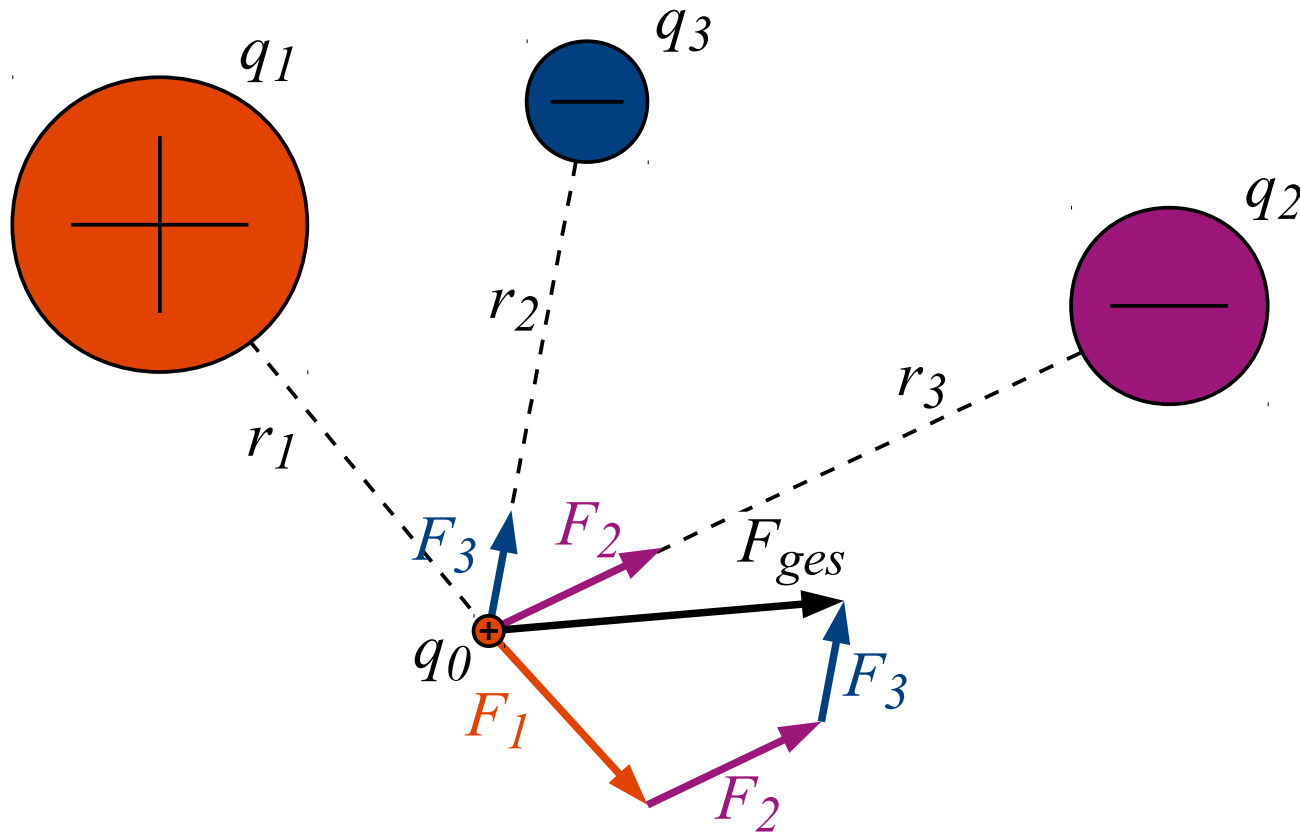
$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

Kraft auf Ladungen



Kräfte auf Ladung addieren sich vektoriell

Elektrische Feldstärke



$$\vec{F}_1 = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_0 \cdot q_1}{r_1^2} \cdot \vec{e}_{10}$$

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_0 \cdot q_2}{r_2^2} \cdot \vec{e}_{20}$$

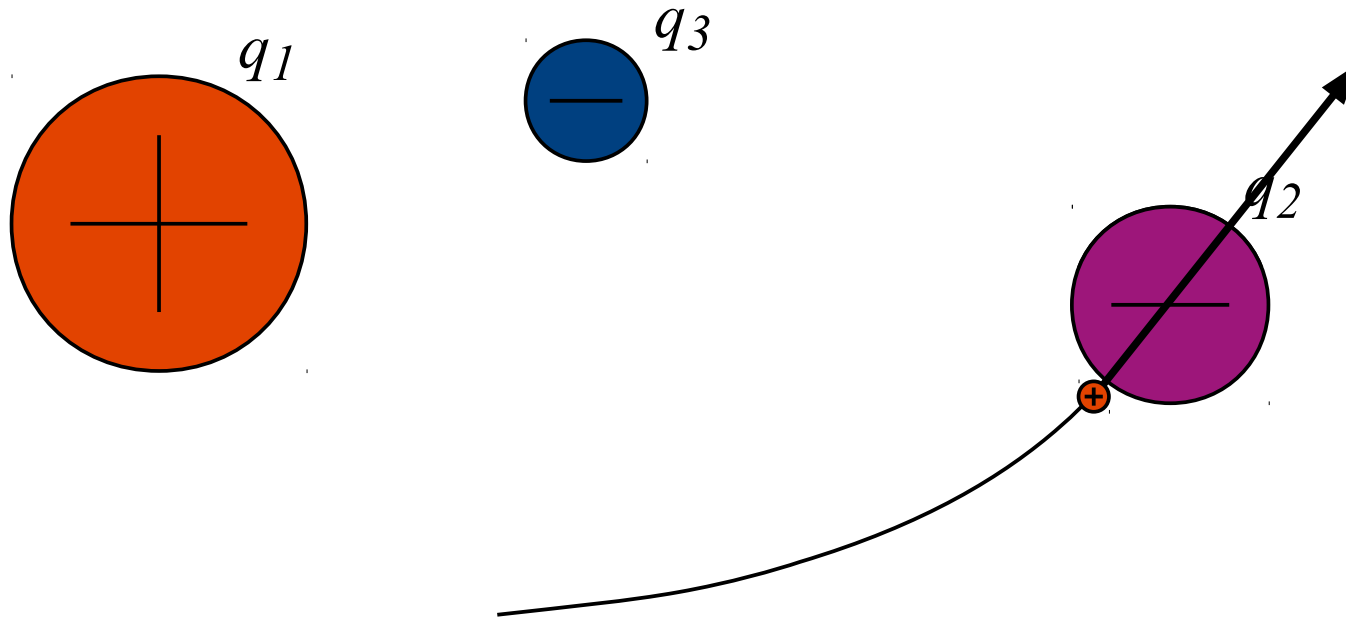
$$\vec{F}_3 = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_0 \cdot q_3}{r_3^2} \cdot \vec{e}_{30}$$

$$\vec{F}_{ges} = q_0 \cdot \left[\frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{q_1}{r_1^2} \cdot \vec{e}_{10} + \frac{q_2}{r_2^2} \cdot \vec{e}_{20} + \frac{q_3}{r_3^2} \cdot \vec{e}_{30} \right) \right]$$

$$\vec{F}_{ges} = q_0 \cdot \vec{E}$$

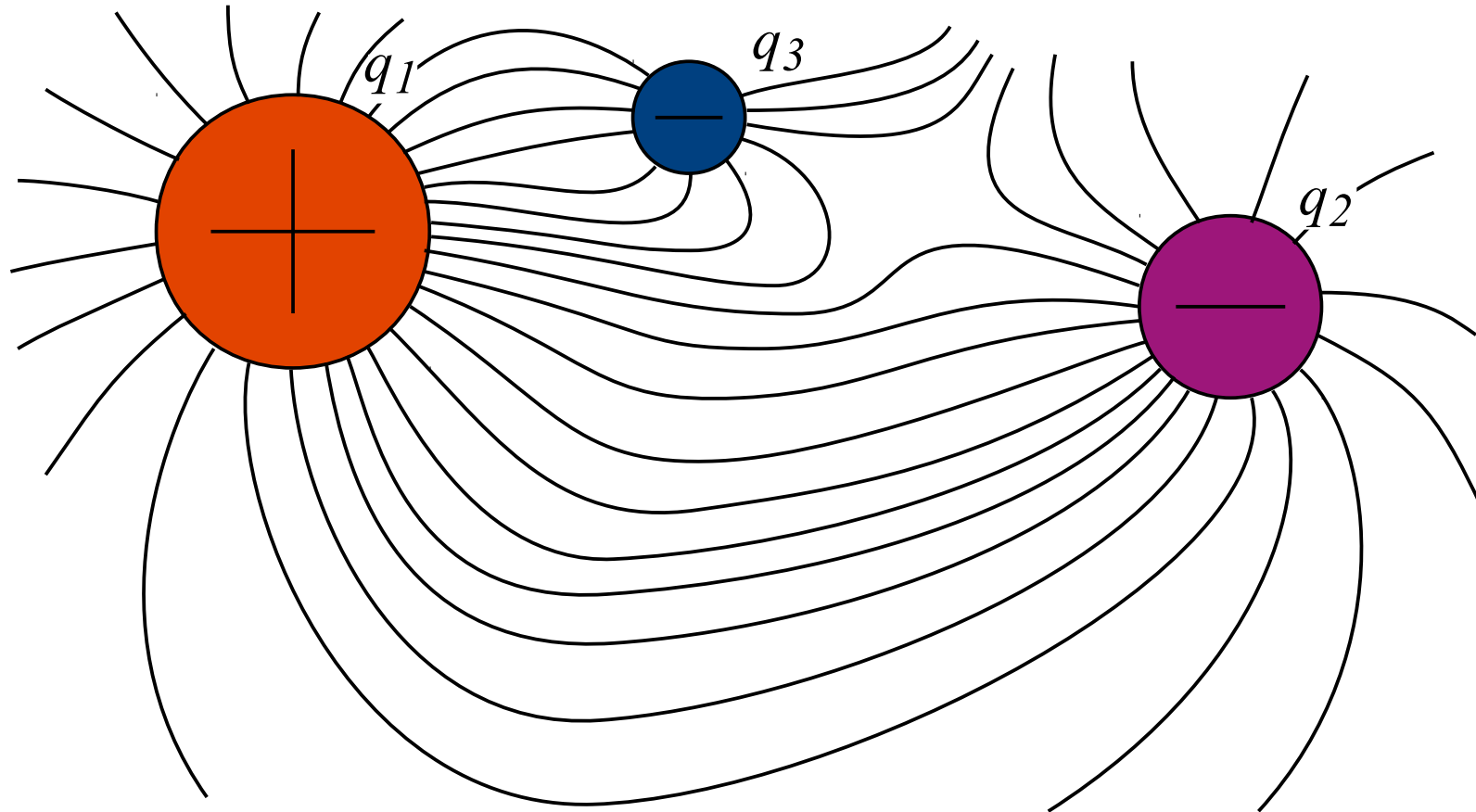
Elektrische Feldstärke
 Betrag *und* Richtung
 Einheit: V/m

Elektrische Feldlinien



Ladung bewegt sich entlang der **Feldlinien**

Elektrisches Feld



Die Feldlinien bilden ein Vektorfeld, das **elektrische Feld**

Elektrisches Feld

Die Kraft F , die auf eine Ladung q wirkt, wird beschrieben durch das *elektrische Feld* E

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

E ist definiert als *Vektor*

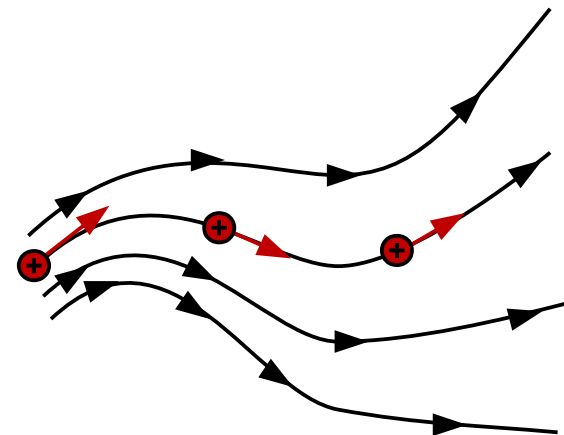
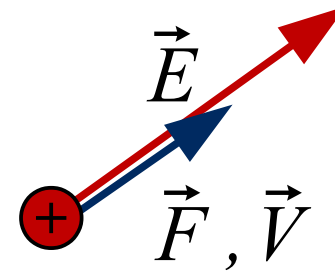
Die *Feldstärke* beschreibt die Größe der Kraft
= Betrag des Vektors (Länge des Pfeils)

Die *Richtung* des Vektors beschreibt
die Richtung der Bewegung

Eine *positive* Ladung bewegt sich
in Richtung des Vektors

Die Ladung bewegt sich entlang von *Feldlinien*

Die Feldlinien bilden ein Vektorfeld, das *elektrische Feld*

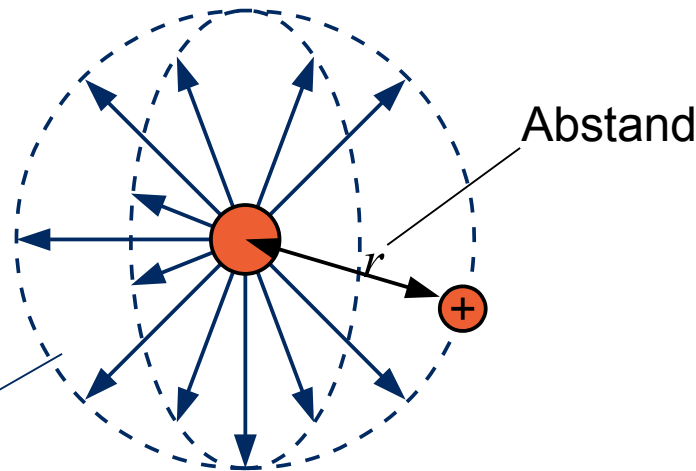


Eigenschaften des elektrischen Felds

- Elektrische Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld
- Ladungen:
 - Feldlinien beginnen auf positiven Ladungen und enden auf negativen Ladungen (Quellenfeld).
 - Die Feldlinien einer einzelnen Ladung enden im Unendlichen.
- Feldlinienverlauf:
 - Je dichter die Feldlinien verlaufen, desto größer ist die Feldstärke
 - Es gibt keine in sich geschlossenen elektrischen Feldlinien
 - Feldlinien können sich nie überkreuzen.
- Elektrische Leiter:
 - Feldlinien stehen senkrecht auf allen Leiteroberflächen (insbesondere metallischen).
 - Das Innere elektrisch leitender Körper ist feldfrei.
- Homogenes Feld:
 - Die Feldstärke hat überall die gleiche Richtung und Stärke.
 - Die Feldlinien verlaufen parallel und mit gleichem Abstand.

Elektrisches Feld von Ladungen

Punktladung



$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{\vec{e}_r}{r^2}$$

Einheitsvektor in kugelradialer Richtung

Konstanten, siehe nächste Folie

Elektrische Feldstärken von Ladungen addieren sich vektoriell

Dielektrizitätskonstante

Elektrische Feldkonstante

$$\varepsilon_0 = 8.854 \dots \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

Gesprochen: Epsilon Null

= Naturkonstante

Relative Permittivität oder relative Dielektrizitätskonstante:

$$\varepsilon_r = 1 \text{ für Vakuum oder Luft}$$

> 1 für die meisten Materialien

= Materialkonstante, siehe Anhang

Werden zusammengefasst zur

Permittivität (oder Dielektrizitätskonstante):

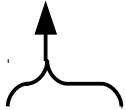
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

Elektrisches Potential

Maß für Energiegewinn einer Ladung

Energie (oder Arbeit): Kraft mal Weg

$$W = F \cdot l$$



$$W = q \cdot E \cdot l$$

Für homogenes Feld

$$W = \int_l \vec{F}(x) dx$$

$$W = q \cdot \int_l \vec{E}(x) dx$$

Definiert als elektrisches Potential φ

$$\varphi = E \cdot l$$

$$\varphi = \int \vec{E}(x) dx$$

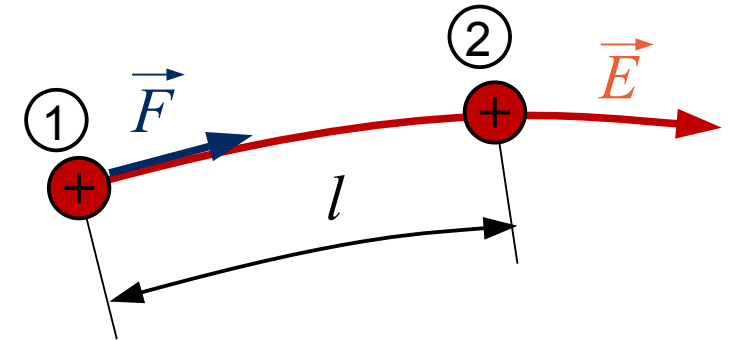
egal auf welchem Weg!

Jedem Punkt im Raum ist ein elektrisches Potential zugeordnet.

Es gilt:

$$\int_{\textcircled{1}}^{\textcircled{2}} \vec{E}(x) dx = \varphi_2 - \varphi_1 = U$$

Potentialdifferenz entspricht einer **Spannung!**

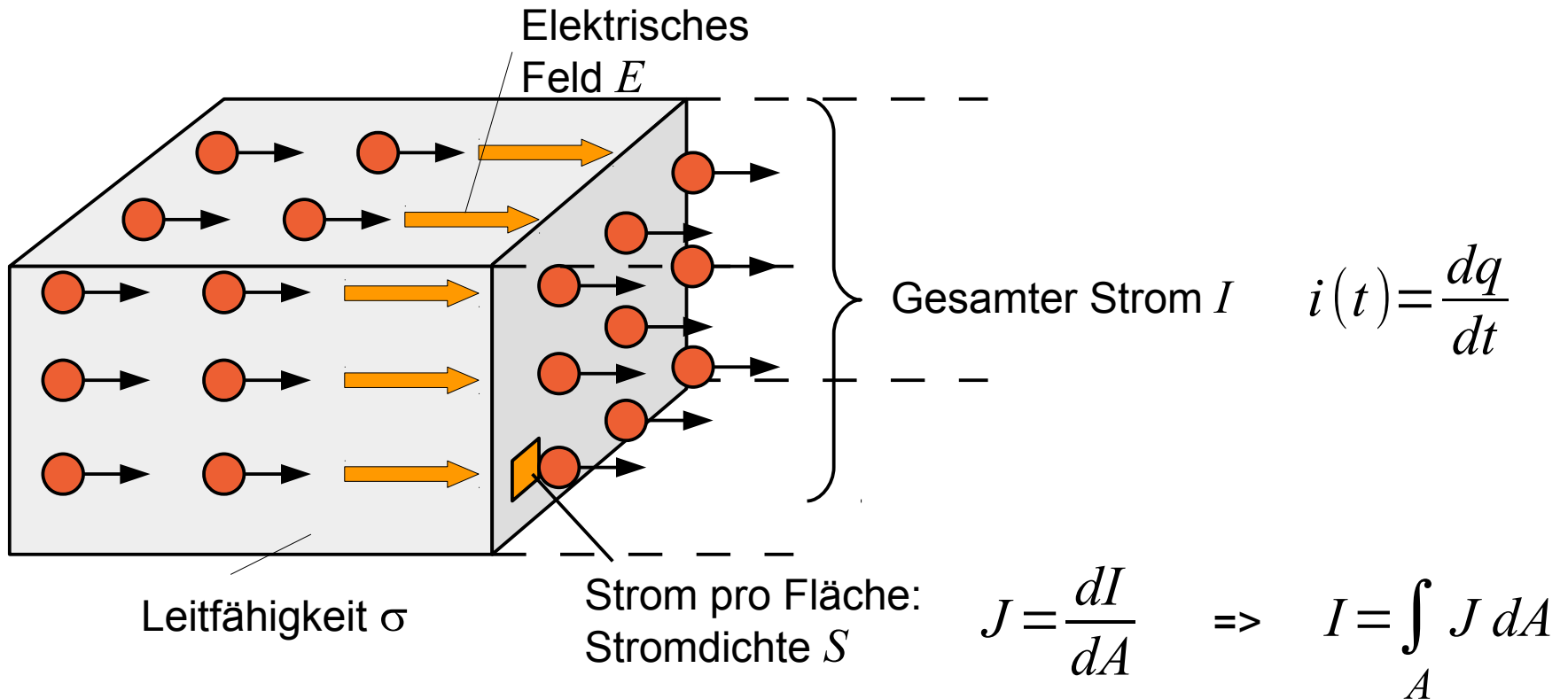


Griechischer Buchstabe phi, gesprochen „fi“.

Definition:

Flächen mit gleichem Potential heißen **Äquipotentialflächen**

Elektrische Stromdichte



Ohmsches Gesetz für Feldgrößen:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$$[J] = \frac{A}{m^2}$$

Kontakt

Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt

Professur Elektrische Netze

Institut für Elektrische Energietechnik,
Fakultät für Informations-, Medien- und
Elektrotechnik (F07)

Technische Hochschule Köln

Betzdorferstraße 2, Raum ZO 9-19

50679 Köln, Deutschland

Tel. +49 221 8275 2020

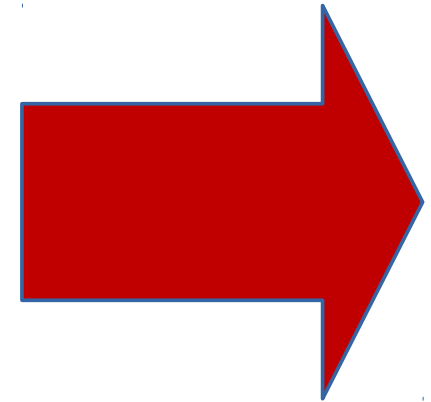
eberhard.waffenschmidt@th-koeln.de

<https://www.th-koeln.de/>

[personen/eberhard.waffenschmidt/](https://www.th-koeln.de/personen/eberhard.waffenschmidt/)

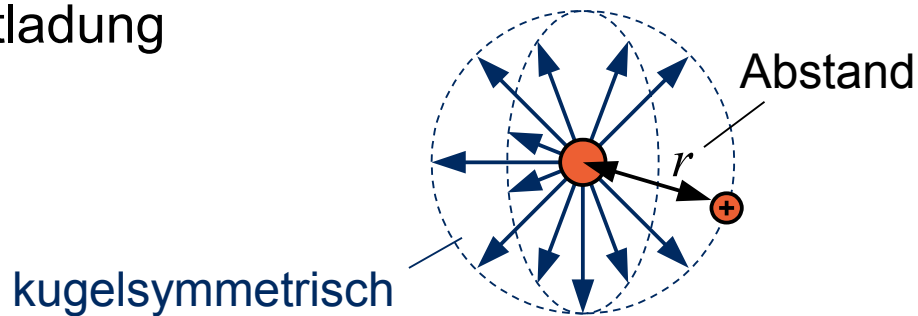


Anhang



Elektrisches Feld von Ladungen

Punktladung

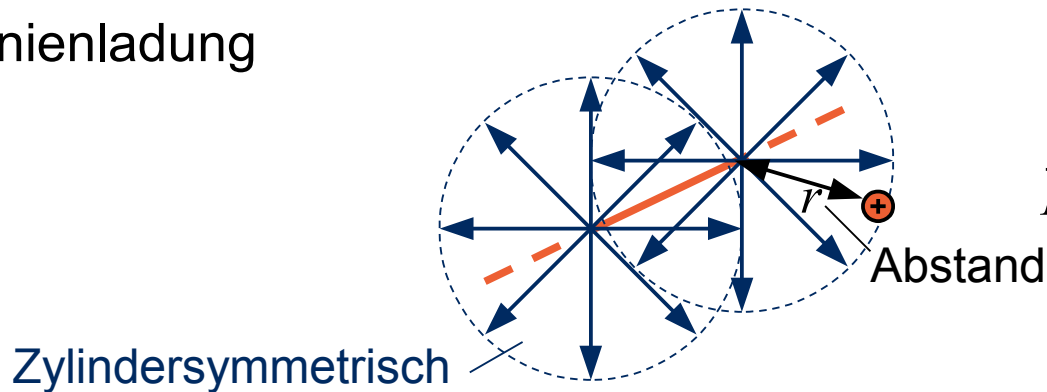


$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{\vec{e}_r}{r^2}$$

Einheitsvektor in kugelradialer Richtung

Konstanten, siehe folgende Seite

Linienladung

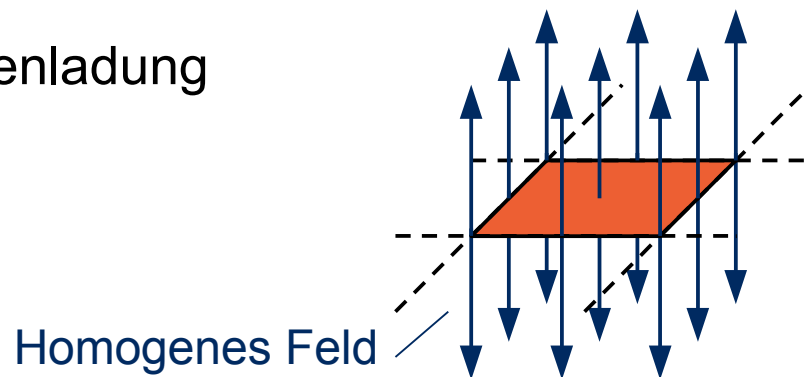


$$\vec{E} = \frac{q/l}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{\vec{e}_r}{r}$$

Längenspezifische Ladung

Einheitsvektor in zylinderradialer Richtung

Flächenladung



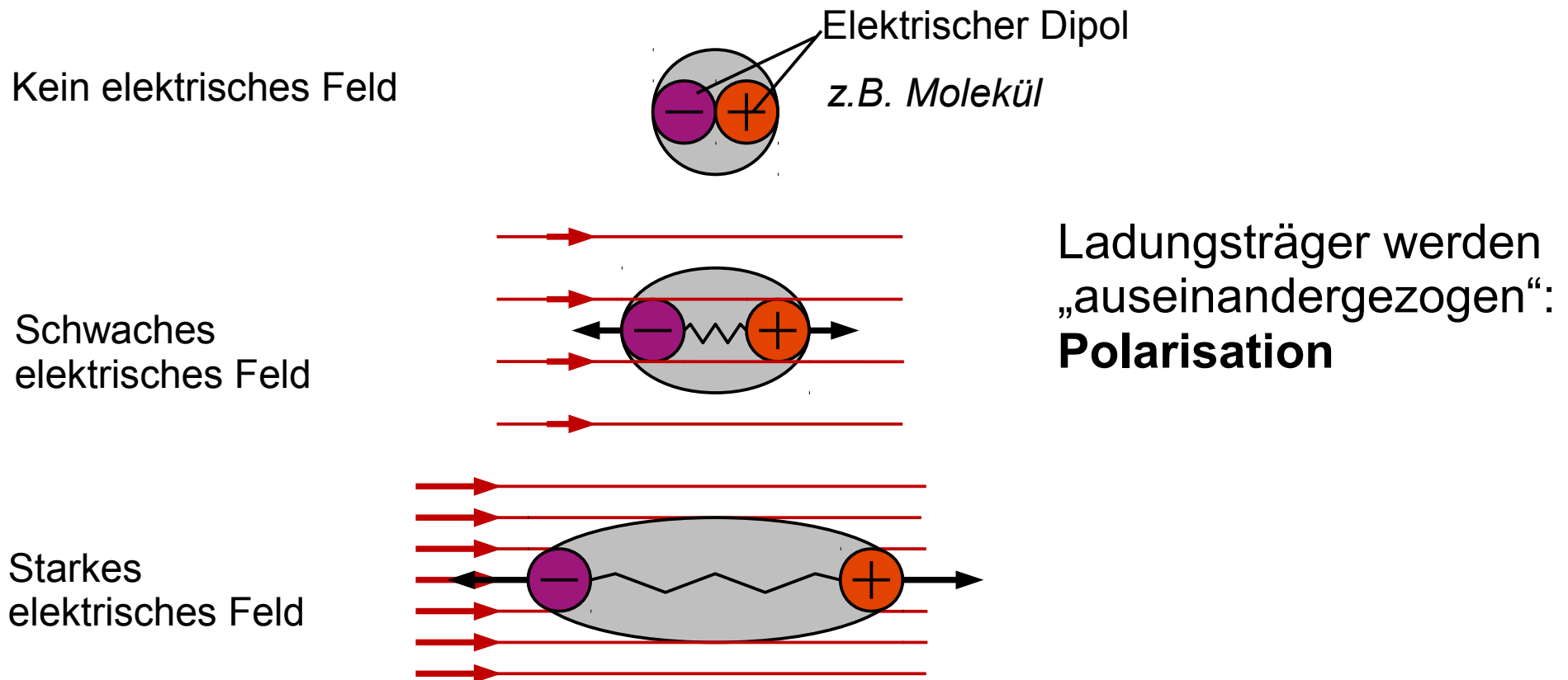
$$\vec{E} = \frac{q/A}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

Flächenspezifische Ladung

Die Felder mehrerer Ladungen addieren sich vektoriell!

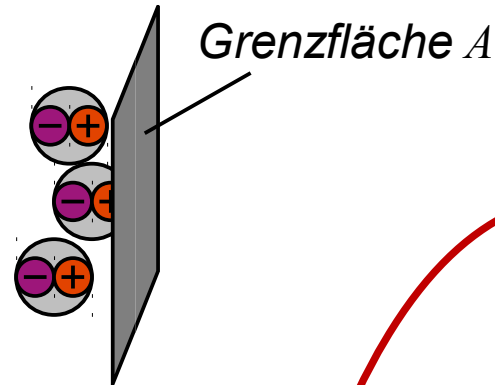
Polarisation und Verschiebungsstrom

Elektrisches Feld im Isolator

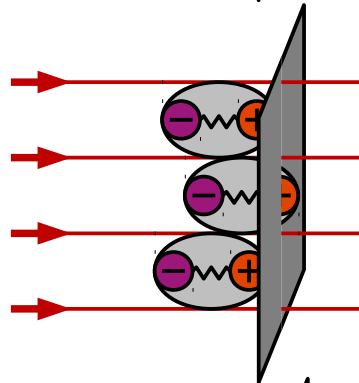


Polarisation und Verschiebungsstrom

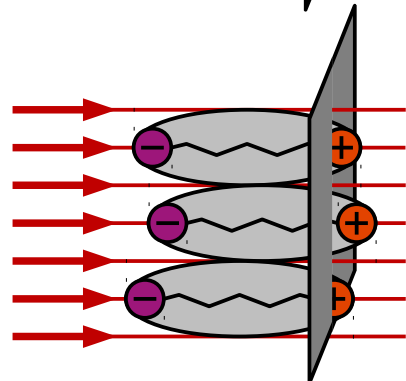
Kein
elektrisches Feld:
Keine Ladung
durch Grenzfläche



Schwaches
elektrisches Feld:
Wenig Ladung durch
Grenzfläche



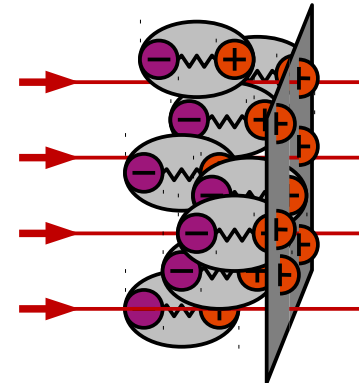
Starkes
elektrisches Feld
Mehr Ladung durch
Grenzfläche



Elektrische *Fluß*dichte
(Displacement):

$$D = \frac{q}{A}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \vec{E}$$



Anderes Material:
Viel Ladung durch
Grenzfläche:

Hier: Stromfluss nur bei Änderung der
elektrischen Feldstärke *E* und
entsprechend der Flußdichte *D*:

$$J = \frac{d D(t)}{dt}$$

Verschiebungsstrom
(*Displacement current*)