

IV. Elektrizität und Magnetismus

IV.1 Elektrostatik und Magnetostatik

Elektrizität und Magnetismus

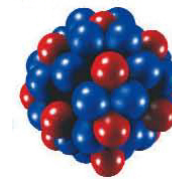
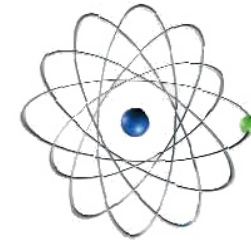


- Die eng miteinander verknüpften Gebiete von **Elektrizität und Magnetismus** sind verantwortlich für viele Naturphänomene und bilden die Grundlage für viele technische Anwendungen

Die vier fundamentale Kräfte in der Natur

Bisher in der Vorlesung behandelt:

- **Gravitation** (Massenanziehung)
verantwortlich z.B. für den Aufbau
des Planetensystems;
Quelle der Gravitationskraft: **Masse**
- In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit
der **elektromagnetischen Wechselwirkung**;
(Kräfte zwischen Ladungen und von
Magnetfeldern); verantwortlich z.B.
für den Aufbau der Atome;
Quelle der elektrischen Kraft: **elektrische Ladung**
- Im letzten Teil der Vorlesung werden wir uns
befassen mit der
starken Wechselwirkung
verantwortlich für den Aufbau der Atomkerne
schwachen Wechselwirkung
verantwortlich für die Radioaktivität



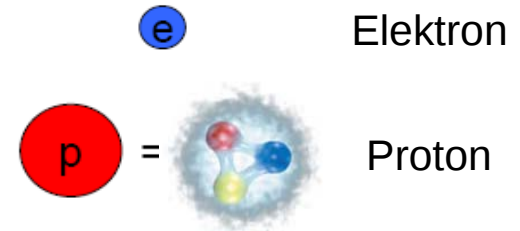
Elektrische Ladungen

- die Grundbausteine der Materie tragen eine **elektrische Ladung**

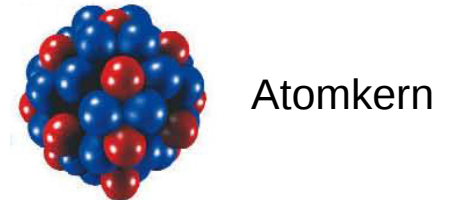
- es gibt 2 Arten von Ladungen:

negative Ladung: z.B. Ladung des Elektrons

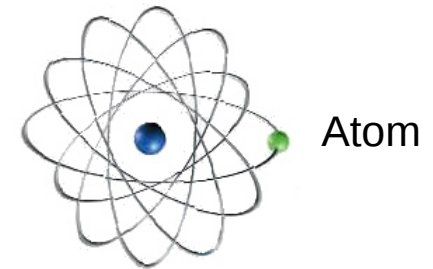
positive Ladung: z.B. Ladung des Protons
(das Proton besteht aus 3 Quarks)



- Der Atomkern besteht aus positiv geladenen Protonen und **elektrisch neutralen** Neutronen und ist daher positiv geladen



- ein Atom ist **elektrisch neutral**;
(Gesamtladung = 0) es besteht aus dem positiv geladenen Atomkern und der negativ geladenen Elektronenhülle



- als **Elementarladung** bezeichnet man den Betrag der Ladung des Elektrons: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
dies ist die kleinste Ladungseinheit (abgesehen von Quarkladungen)
Quantelung der Ladung: alle in der Natur vorkommenden **freien** Ladungen sind **ganzzahlige Vielfache der Elementarladung**

Elementarladung

- Entdeckung und Messung der Elementarladung durch R.A. Millikan

$$e = 1,60217653(14) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Einheit der Ladung: $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
(Definition Ampère später)

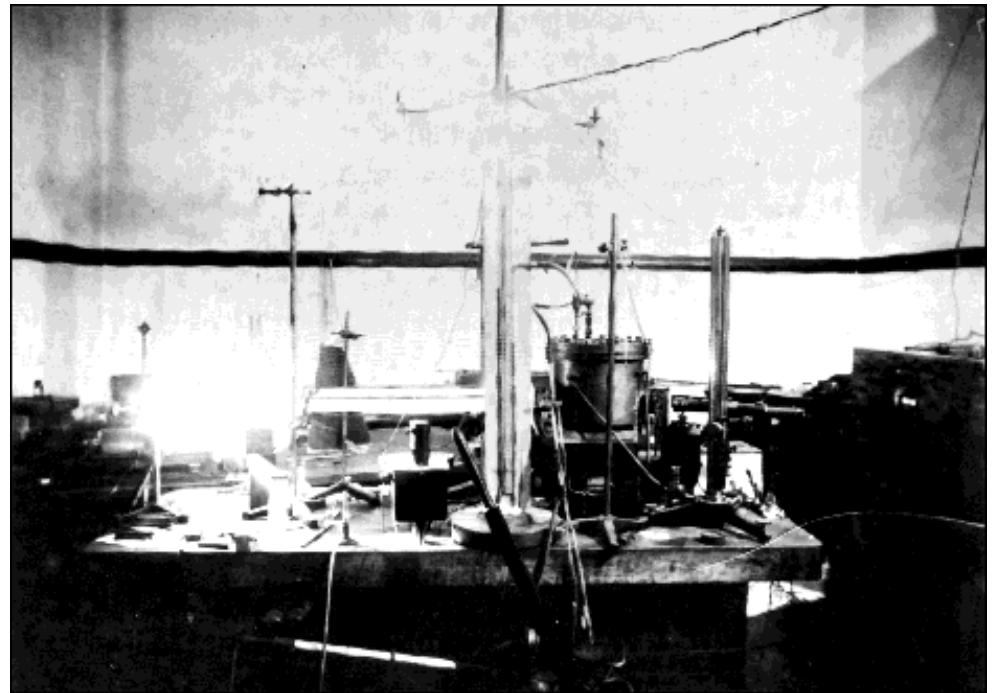


Nobel Preis für Physik 1923

für seine Arbeiten über die elektrische Elementarladung sowie den photoelektrischen Effekt



1968 - 1953



Coulombsches Gesetz

- das **Coulombsche Gesetz** beschreibt die Kraft zwischen zwei Punktladungen Q_1 und Q_2 im Abstand r voneinander. Für den Betrag gilt

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

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

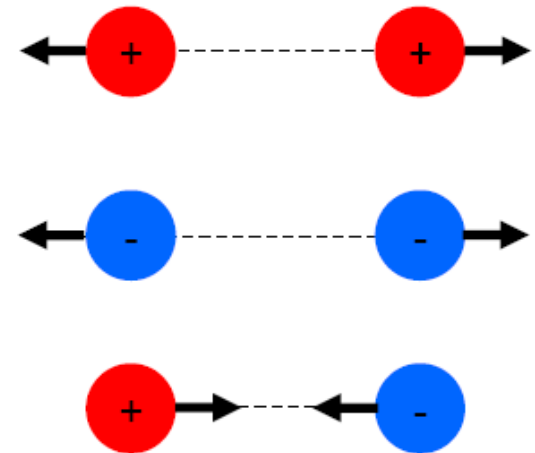
Dielektrizitätskonstante des Vakuums

(gleiche Struktur wie Gravitationsgesetz !!)

- Kraftrichtung entlang der Verbindungslinie der Ladungen:
 - gleichnamige Ladungen stoßen sich ab
 - ungleichnamige Ladungen ziehen sich an
- actio = reactio: gleicher Betrag der Kräfte auf Q_1 und Q_2



Charles Augustin Coulomb
1736 - 1806

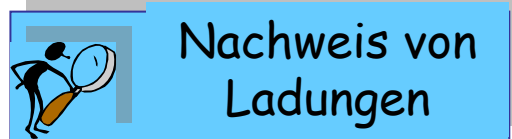
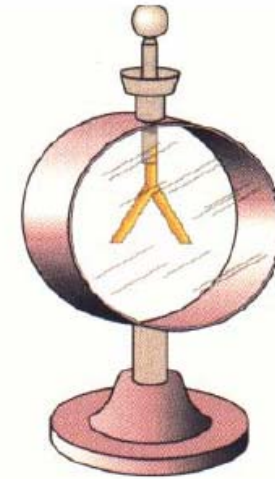


Messung von Ladungen

- Ladungen werden mit **Elektrometern** gemessen; dabei wird die Beweglichkeit und Übertragbarkeit von Ladungen ausgenutzt

Beispiel: Goldblatt Elektroskop

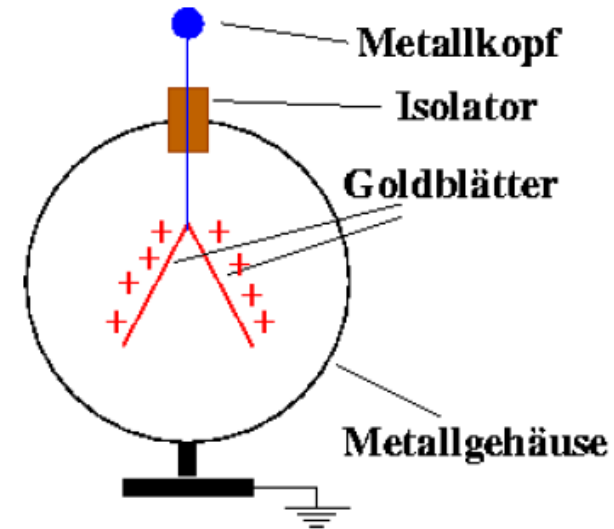
wird Ladung auf den Metallkopf aufgebracht, so werden die Goldblätter aufgeladen, die sich dann aufgrund der Coulombwechselwirkung zwischen gleichnamigen Ladungen abstoßen



Nachweis von
Ladungen



Kräfte zwischen
Ladungen



Menschliches Elektroskop



Vergleich Coulomb - Gravitationskraft

- beide Kräfte sind umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes und proportional zum Produkt der Quellen (Masse bzw. el. Ladung)

Coulomb-Kraft

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

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Dielektrizitätskonstante des Vakuums

Gravitationskraft

$$F_g = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Gravitationskonstante

Beispiel: Ein Elektron und ein Proton ziehen sich aufgrund ihrer Masse an, ebenso aber aufgrund ihrer ungleichnamigen Ladungen. Welche Kraft ist stärker? Annahme: Abstand: 10^{-10} m (Dimension eines Atoms)

$$|Q_e| = |Q_p| = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_p = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; \quad m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} F_C &= 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(10^{-10} \text{ m})^2} \\ &= 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_g &= 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}^2}{(10^{-10} \text{ m})^2} \\ &= 9,7 \cdot 10^{-48} \text{ N} \end{aligned}$$

Coulombkraft >> Gravitationskraft

um 40 Größenordnungen

Coulomb – Gesetz: Superposition von Kräften

- Hat man mehrere Ladungen, die miteinander wechselwirken können, so addieren sich die Kräfte vektoriell

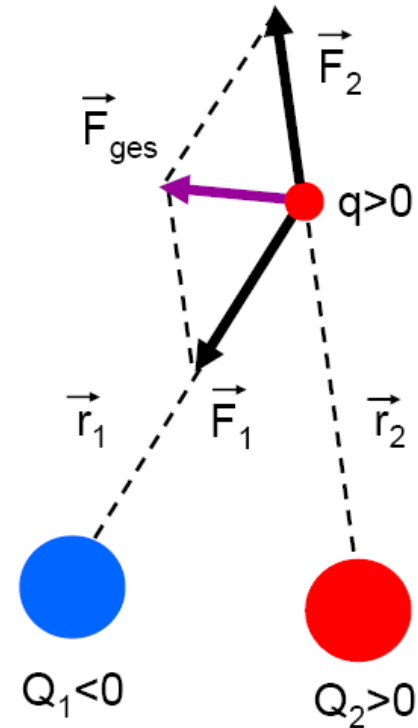
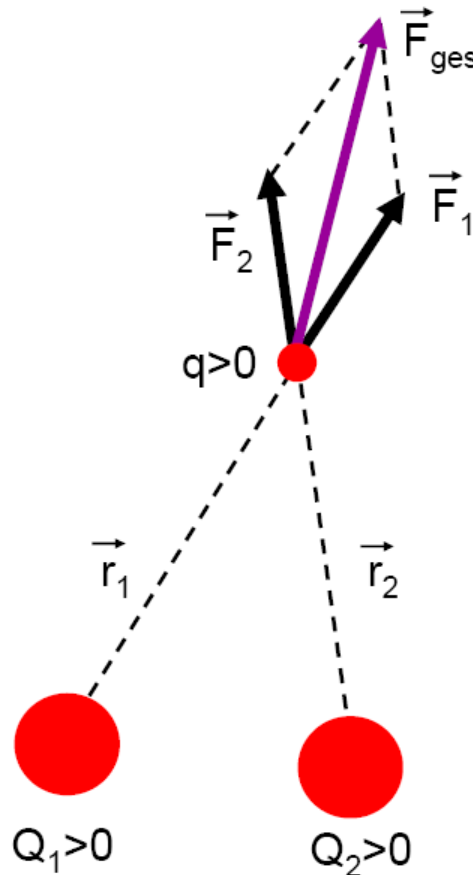
Beispiel: Kraft durch zwei ortsfeste Ladungen Q_1 und Q_2 auf eine Probeladung q

$$\vec{F}_1 = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q_1}{r_1^2} \vec{r}_{01}$$

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q_2}{r_2^2} \vec{r}_{02}$$

Einheitsvektoren : $\vec{r}_{0i}$

$$\vec{F}_{\text{ges}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$



Elektrisches Feld

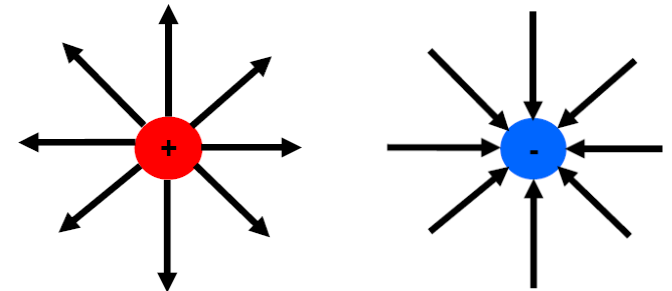
Man betrachte ein System von vielen Punktladungen $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$

- Eine Probeladung q erfährt dann eine Kraft $\vec{F}$ durch das von den Ladungen $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ erzeugte **elektrische Feld** $\vec{E}$
- Die Stärke eines elektrischen Feldes an irgendeinem Punkt $\vec{r}$ ist definiert als die Kraft auf die Ladung q , dividiert durch diese Ladung

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}$$

Beispiel: elektrisches Feld einer Punktladung Q : $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{r}_0$

- **Feldlinien** verdeutlichen Richtung und Stärke des elektrischen Feldes im Raum
 - Feldlinien geben die Richtung der Kraft auf eine positive Ladung wieder
 - Die Stärke des Feldes wird durch die Dichte der Feldlinien repräsentiert
- elektrische Feldlinien starten und enden immer an Ladungen

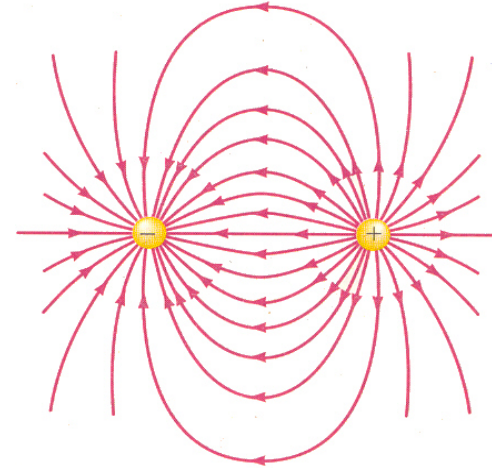
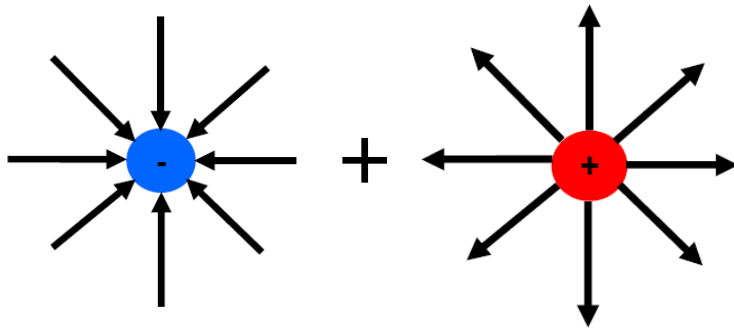


elektrisches Feld einer Punktladung

Weitere Beispiele für elektrische Feldlinien

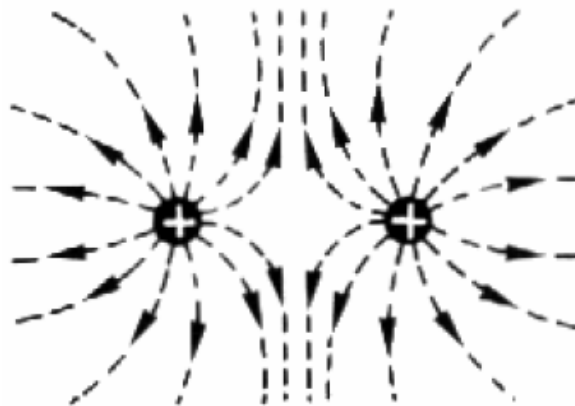
- Elektrischer Dipol:

zwei entgegengesetzte Ladungen in geringem Abstand

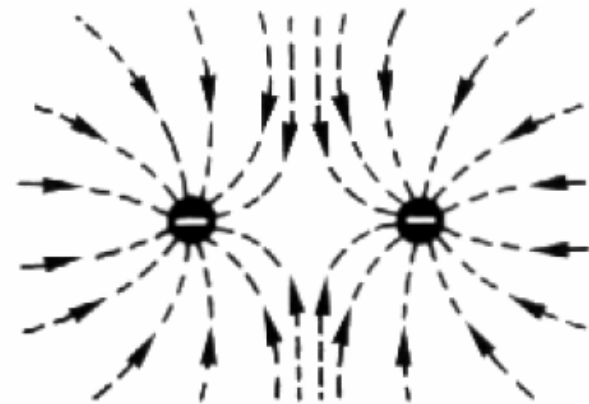


elektrische Feldlinien eines Dipols,

Feldverlauf bei
zwei
gleichnamigen
Ladungen



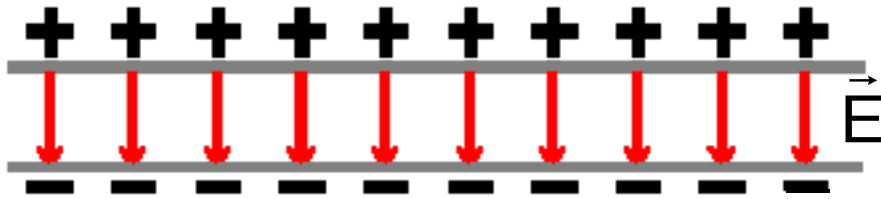
2 positive Ladungen



2 negative Ladungen

Elektrische Felder an Leiteroberflächen

- Elektrisches Feld zwischen zwei Metall (Leiter) platten

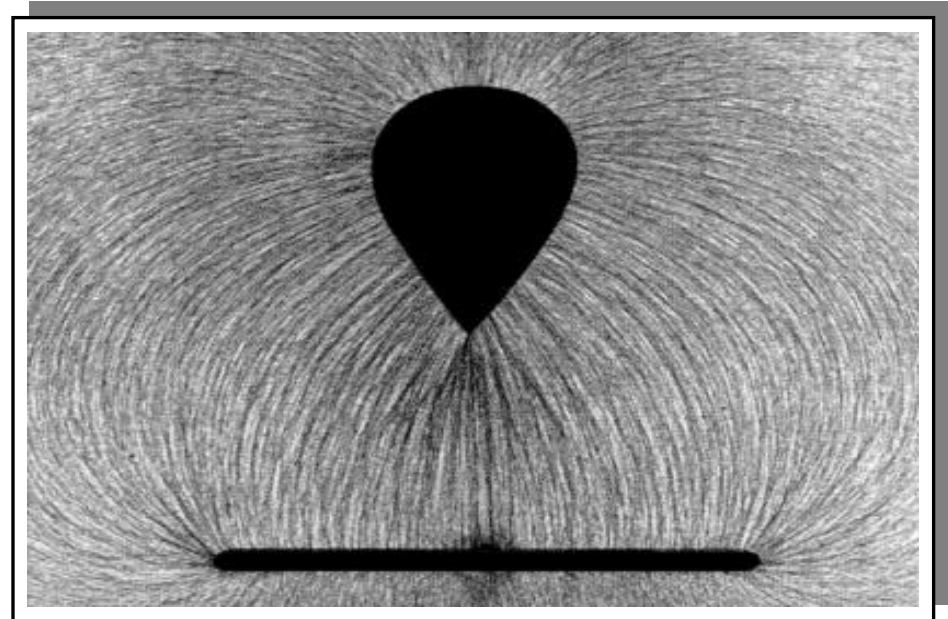


Das elektrische Feld $\vec{E}$ zwischen den Platten ist homogen, d.h. unabhängig vom Ort

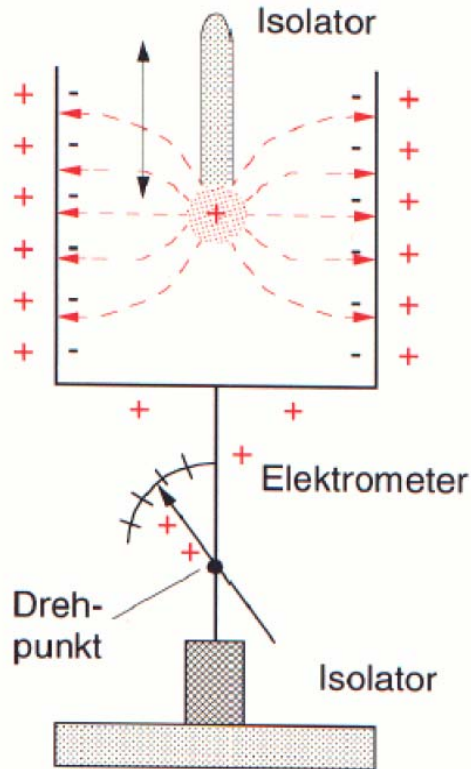
- wird ein Leiter aufgeladen, dann verteilen sich die Ladungen grundsätzlich an der Oberfläche des Leiters; **im Innern bleibt der Leiter feldfrei**
- Die Feldlinien verlaufen stets senkrecht zur Leiteroberfläche
- je kleiner der Krümmungsradius, desto größer die elektrische Feldstärke und die Ladungsdichte (Ladung pro Fläche)



Feldlinien an
Metallplatte



Faraday-Becher



- Löffeln von Ladungen:



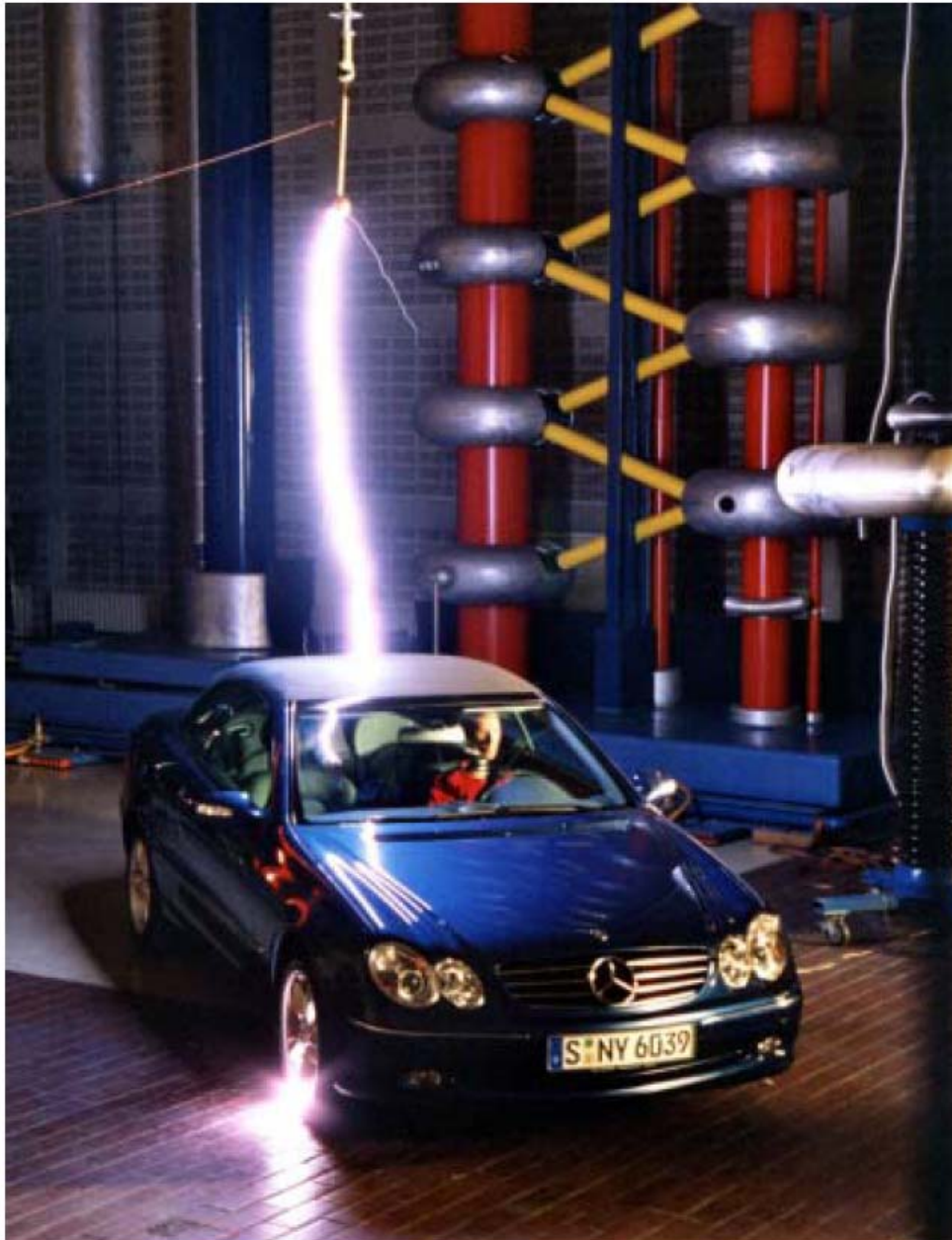
Löffeln von
Ladungen



Michael Faraday
1791- 1867

- mit dem Ladungslöffel können Ladungen in den Becher gebracht werden; sie fließen sofort auf die äußere Oberfläche des Bechers.
- Das Innere des Bechers bleibt ladungsfrei;
- im Innern einer geschlossenen Metallfläche kann kein elektrisches Feld existieren, wenn sich im Innenraum keine Ladungen befinden

Auto als Faraday-Käfig

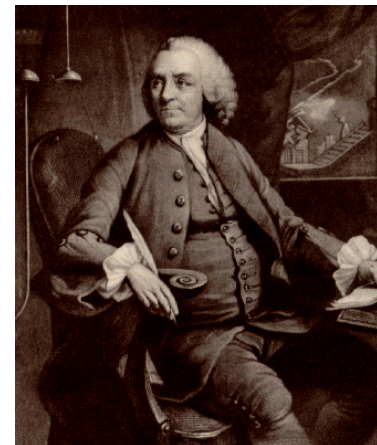


Faraday-Käfig

Schutz vor Blitzen

Blitzableiter:

Ausnutzen des extrem hohen elektrischen Feldes an Spitzen (kleiner Krümmungsradius; auf Dächern montiert), um Ladung über definierten Weg abfließen zu lassen.



Benjamin Franklin
1706 - 1790

Flugzeug als Faraday-Käfig

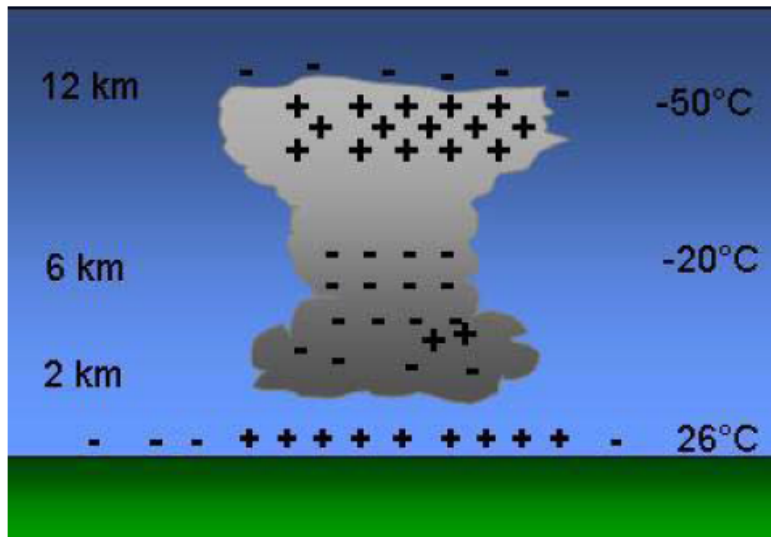


Blitz gleitet am Flugzeug entlang

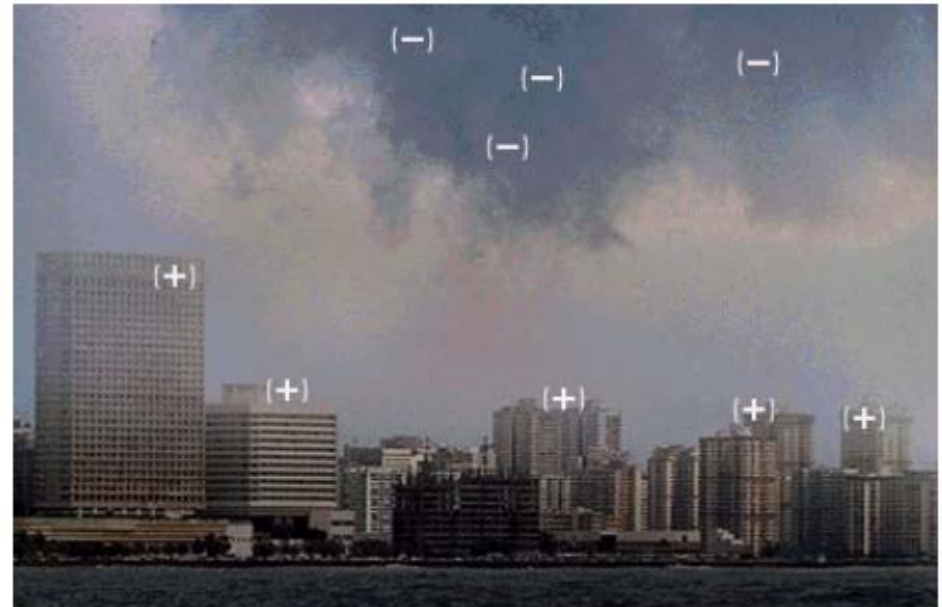
Wie entstehen Blitze ?

- Durch Vorgänge in den Gewitterwolken werden negative und positive elektrische Ladungen getrennt $\Rightarrow$ elektrische Spannung. Überschreitet die Spannung einen Grenzwert (einige MV) gibt es einen Durchbruch, den **Blitz**

Wolkenbasis: negative Ladung
Erdboden: positive Ladung



Gewitterwolke

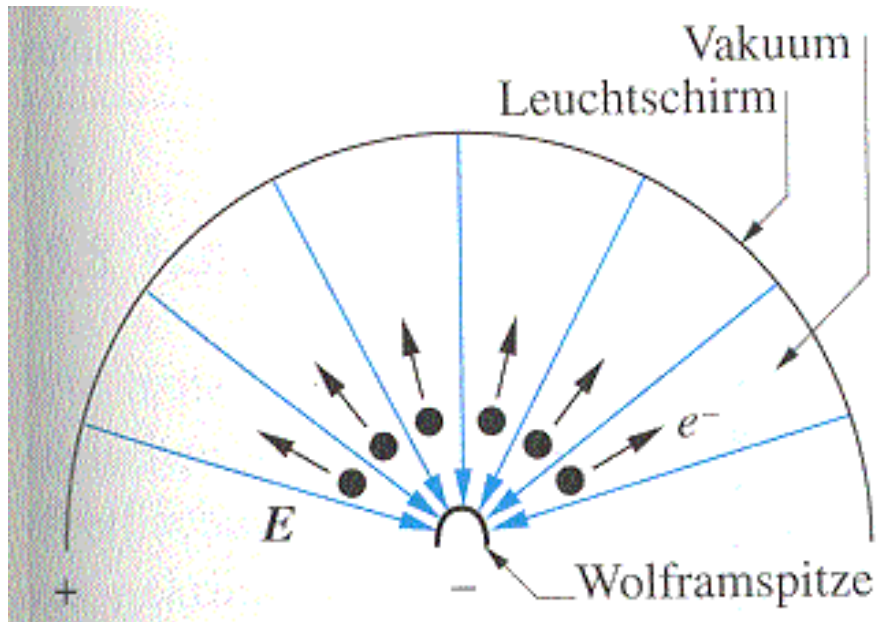


Blitze



Feldemissionsmikroskop

Ausnutzen des extrem hohen elektrischen Feldes an Spitzen zur Feldemission von Elektronen

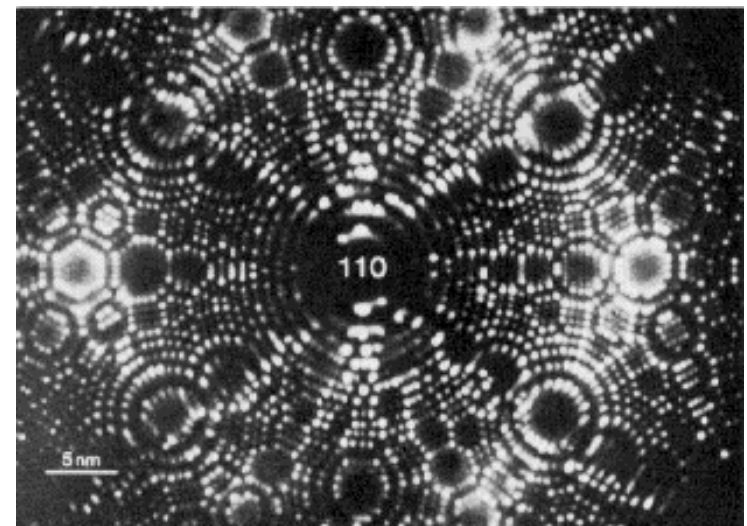


Abstand Spitze – Leuchtschirm:
 $R = 10 \text{ cm}$

Wolframspitze mit Radius
 $r \approx 10^{-6} \text{ cm}$

Vergrößerung: $R/r \approx 10^7$

Sichtbarmachung der
Kristallstruktur (Atomanordnung)

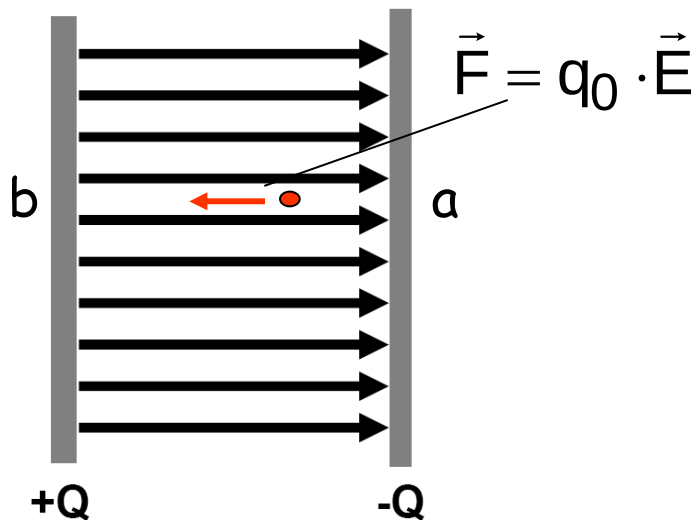


Arbeit im elektrischen Feld

- Aus der Mechanik bekannt: Begriff **Arbeit**;
Wird ein Körper gegen eine Kraft bewegt, so wird Arbeit verrichtet
- Im einfachsten Fall bei konstanter Kraft $\vec{F}$ und Verschiebung um die Strecke $\vec{s}$

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

- diese Arbeit führt zu einer Änderung der potenziellen Energie
- im elektrischen Feld (einfachster Fall: homogenes (konstantes) elektrisches Feld)



wird die Ladung q_0 um eine Strecke s von a nach b entgegen der Feldrichtung bewegt, so leisten wir gegen die Kraft $\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$ die Arbeit

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = q_0 \vec{E} \cdot \vec{s} = q_0 \cdot |\vec{E}| \cdot |\vec{s}| = q_0 \cdot E \cdot s$$

Änderung der potenziellen Energie:

$$\Delta E_{\text{pot}} = q_0 \cdot E \cdot s$$

Das elektrische Potenzial

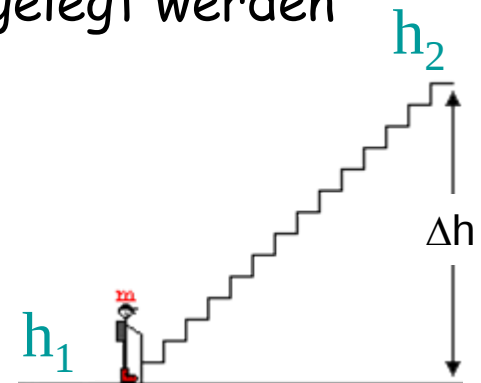
- Um eine von der Ladung unabhängige Größe zu erhalten, die nur vom elektrischen Feld bestimmt wird, definieren wir die **Potenzialdifferenz** zwischen den Orten a und b

$$\Delta \varphi = \varphi_a - \varphi_b = \frac{\Delta E_{\text{pot}}}{q_0} = -E \cdot s$$

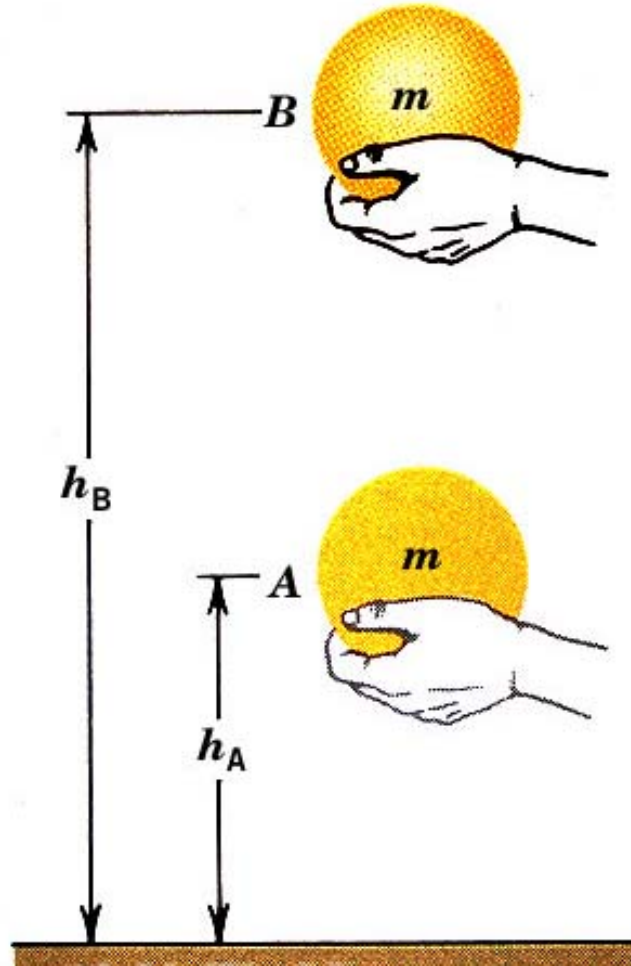
- die Potenzialdifferenz $\varphi_b - \varphi_a$ ist die durch ein elektrisches Feld an einer positiven Ladung verrichtete **Arbeit pro Ladungseinheit**, wenn die Probeladung sich vom Punkt a zum Punkt b bewegt.
(Arbeit und Potenzialdifferenz haben entgegengesetztes Vorzeichen)
- nur die Potenzial**differenzen** spielen eine Rolle;
der Potenzialwert Null kann daher willkürlich festgelegt werden

Analogie: Potenzielle Energie im Gravitationsfeld an der Erdoberfläche:

$$\Delta E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = m \cdot g \cdot \Delta h$$



Analogie: Gravitations $\Leftrightarrow$ elektrisches Potenzial



Anheben einer Masse m gegen die Gravitationskraft der Erde



Anheben einer Ladung q_0 gegen das elektrische Feld zwischen zwei Leiterplatten

Die elektrische Spannung

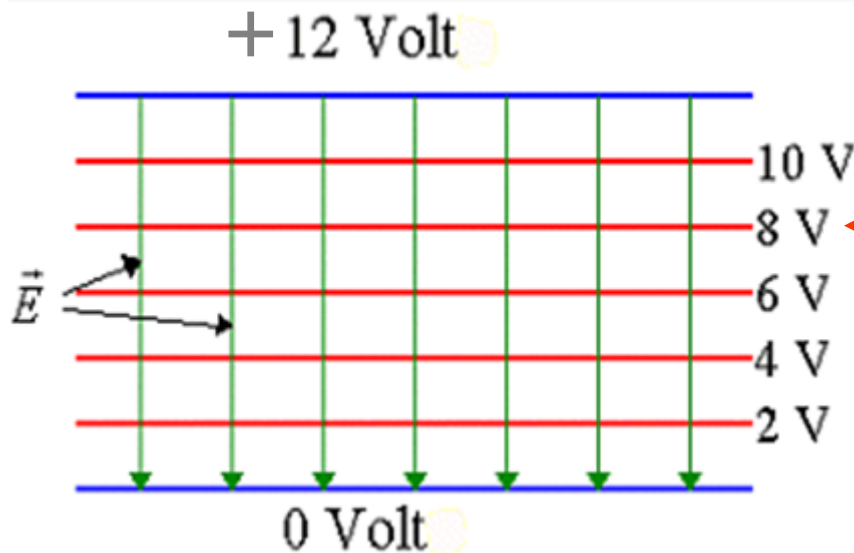
- übliche Bezeichnung für die Potenzialdifferenz: **elektrische Spannung**
- Spannung zwischen zwei Punkten a und b in einem elektrischen Feld:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \Delta \varphi$$

Einheit der Spannung: $[U] = 1\text{ Volt} = 1 \text{ Joule} / \text{Coulomb}$

Linien gleichen Potentials heißen **Äquipotenziallinien**

Beispiel: Äquipotenzial- und Feldlinien zwischen zwei Metallplatten (Plattenkondensator):



← **Äquipotenziallinien**

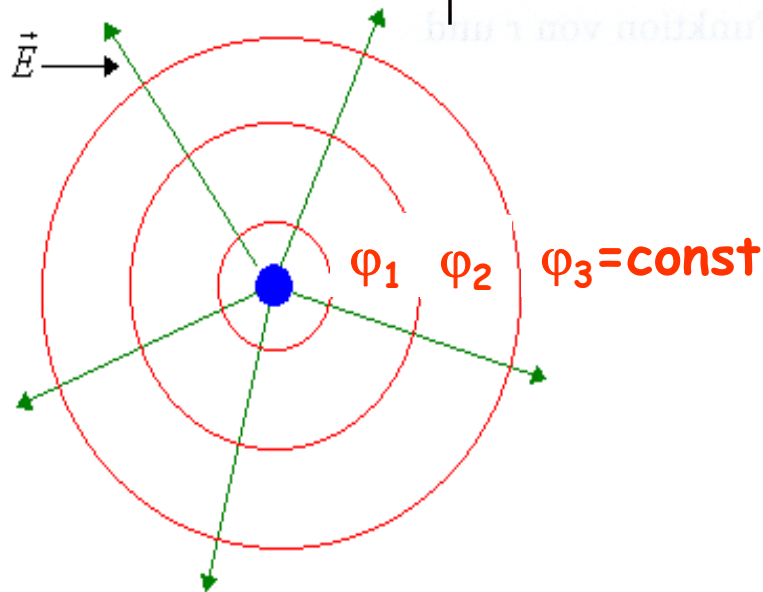
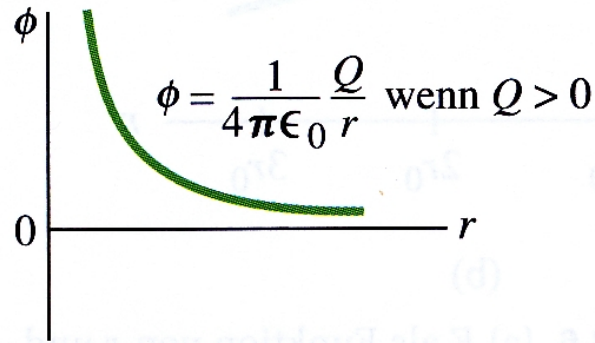
Äquipotenziallinien und elektrische Feldlinien stehen $\perp$ aufeinander



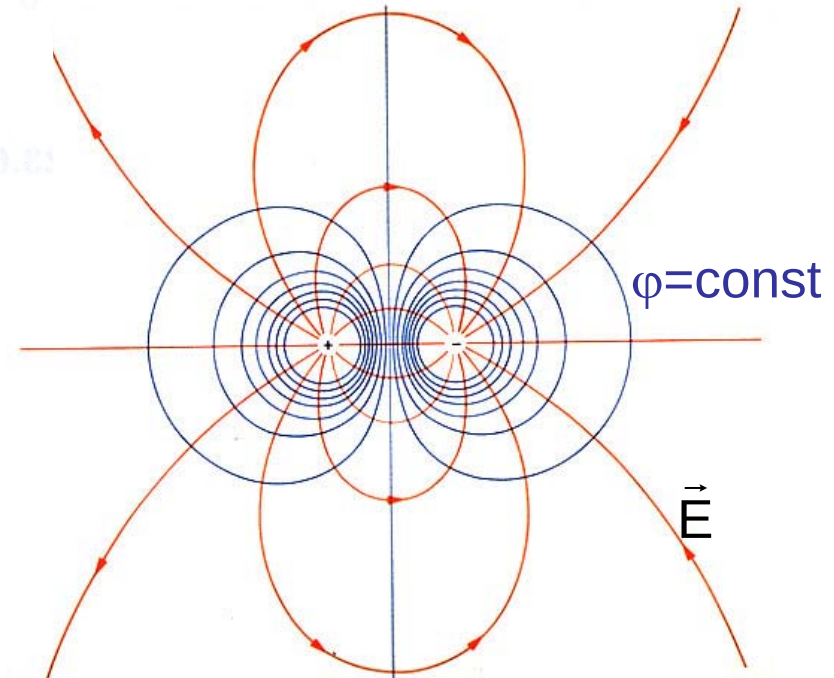
Alessandro Volta
1745 - 1827

Äquipotenzial- und Feldlinien

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$



Elektrische Feldlinien und
Äquipotenziallinien (Kreise)
einer Punktladung

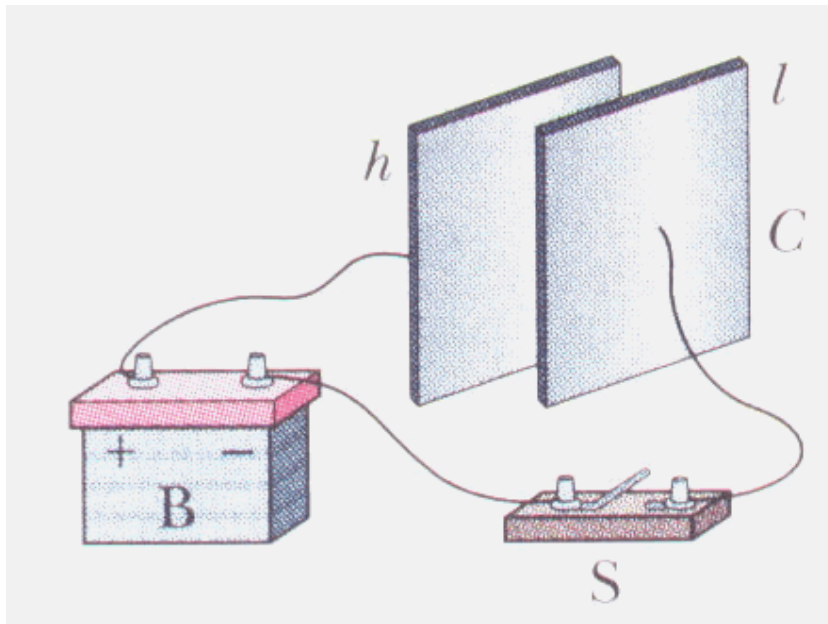


Elektrische Feldlinien und
Äquipotenziallinien eines
elektrischen Dipols

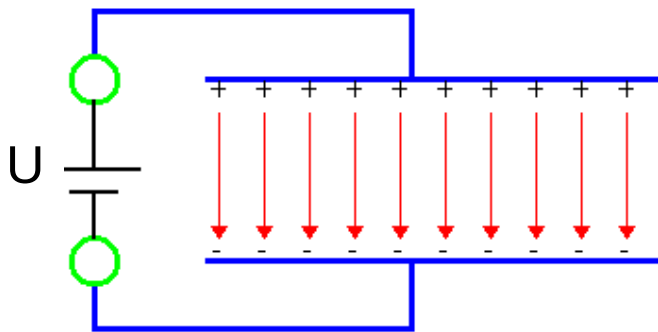
- Äquipotenziallinien und elektrische Feldlinien stehen $\perp$ aufeinander

Der Plattenkondensator

Plattenkondensator = zwei voneinander isolierte Leiterplatten

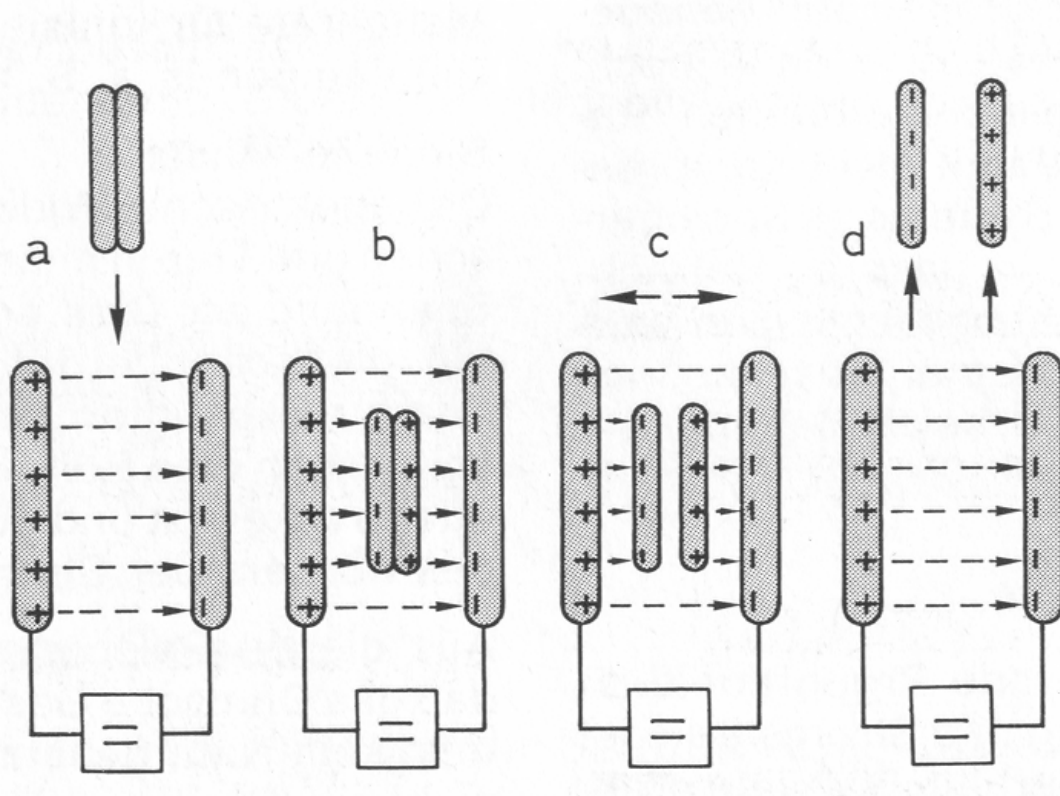
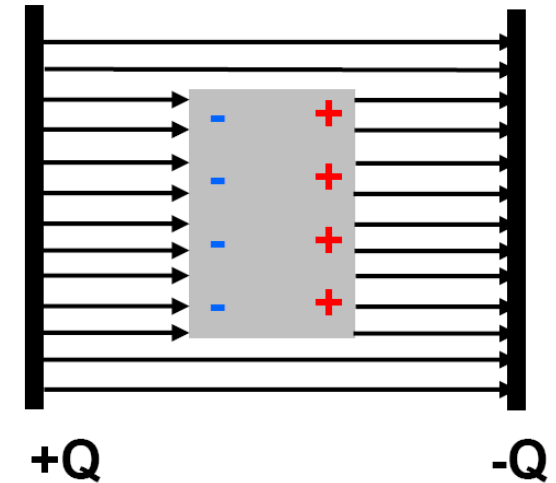


auf den Leiterplatten können
Ladungen gespeichert werden;
Aufladen über Batterie mit
Spannung U



Das elektrische Feld im Kondensator

- Bringt man einen neutralen elektrischen Leiter in ein elektrisches Feld, so bilden sich an der Oberfläche des Leiters positive und negative Ladungen aus, die ein Eindringen des Feldes ins Innere verhindern. (elektrische Ladungen in einem Leiter frei beweglich !)



Nachweis des elektrischen Feldes in einem Kondensator:

zwei Platten werden im Feld getrennt und herausgezogen; die Platten tragen jetzt entgegengesetzte Ladungen +Q und -Q



Influenz

Die Kapazität eines Kondensators

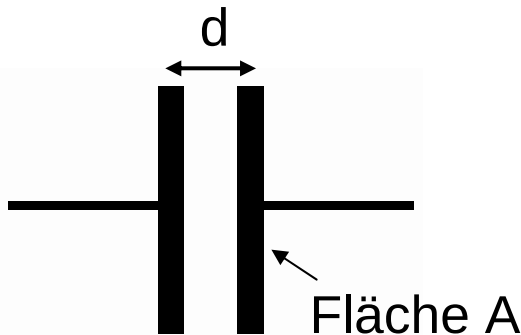
- Die **Kapazität** eines Kondensators ist das Verhältnis aus Spannung und Ladung

$$C = \frac{Q}{U}$$

Einheit $[C] = 1 \text{ C} / \text{V} = 1 \text{ Farad (nach Faraday)}$

- Die Kapazität eines Kondensators ist ein Maß für die Ladungsmenge, die er bei gegebener Spannung aufnehmen kann
(typische Kondensatoren haben Kapazitäten im pF – mF Bereich)

- Die Kapazität eines Kondensators ist durch seine **Geometrie bestimmt**
charakteristische Größen: Plattenabstand d
Plattenfläche A

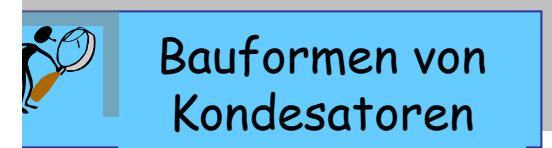
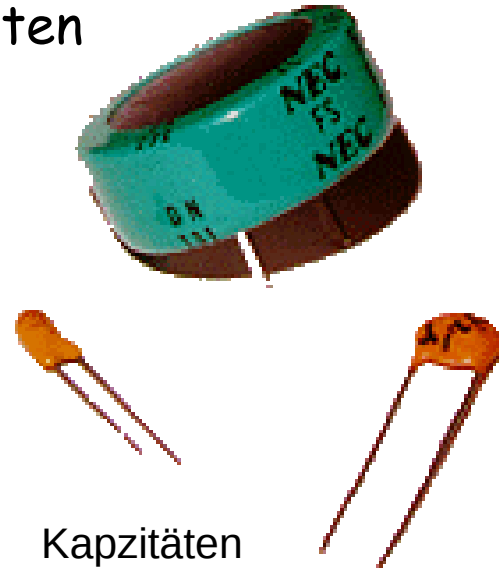
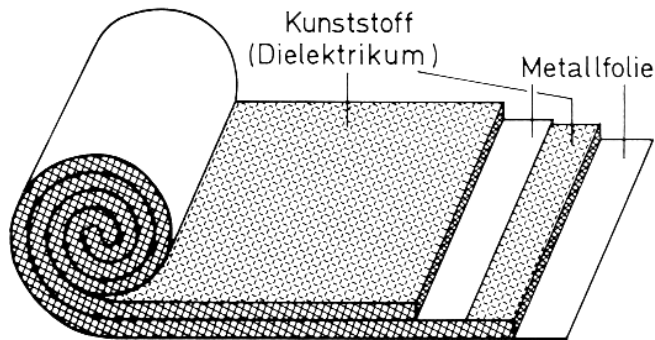


$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} = 8,85 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$$

Bauformen von Kondensatoren

aufgewickelte Folien statt Platten



Beispiel:

- Welche Kapazitäten hat eine Kondensator mit quadratischen Platten von 10 cm Seitenlänge in einem Abstand von 1mm ?

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} = \frac{8,85 \frac{\text{pF}}{\text{m}} \cdot (0,1\text{m})^2}{1 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 88,5 \text{pF} = 8,85 \cdot 10^{-11} \text{F}$$

- Welche Ladung kann er bei einer Spannung von 12 V speichern ?

$$Q = C \cdot U = 8,85 \cdot 10^{-11} \text{F} \cdot 12 \text{V} = 1,06 \cdot 10^{-9} \text{C} = 1,06 \text{nC}$$

Kondensator als Energiespeicher

- Was passiert mit der Spannung, wenn wir bei geladenem Kondensator den Plattenabstand verändern?
- Bei Vergrößerung des Plattenabstands d verkleinert sich die Kapazität:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} : \text{ wenn } d \uparrow \Rightarrow C \downarrow \quad \text{andererseits: } U = \frac{Q}{C} \quad \text{wenn } C \downarrow \Rightarrow U \uparrow$$

bei konstanter Ladung auf den Kondensatorplatten nimmt die Spannung mit Vergrößerung des Abstands zu: $U \sim d$



Kondensator: $U \sim d$

- beim Auseinanderziehen der Kondensatorplatten leisten wir Arbeit gegen die Kraft des elektrischen Feldes zwischen den Kondensatorplatten; diese Energie ist im Kondensator gespeichert:

gespeicherte Energie W in einem Kondensator der Kapazität C , der auf eine Spannung U aufgeladen wurde:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} C \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q \cdot (C \cdot U)}{C} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$$

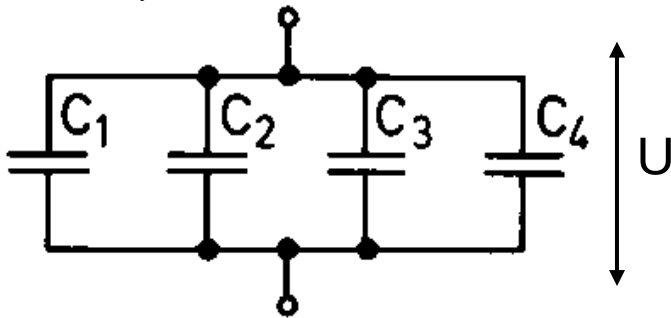
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$$



Entladen eines
Kondensator

Parallelschaltung von Kapazitäten

- was passiert, wenn mehrere Kondensatoren zusammengeschaltet werden ?
- Parallelschaltung von Kondensatoren: (entspricht einer Vergrößerung der Platten)



gleiche Spannung U an allen Kapazitäten:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ges}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \\ &= C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U + C_4 \cdot U \\ &= U \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) = U \cdot C_{\text{ges}} \end{aligned}$$

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

bei Parallelschaltung der Kondensatoren addieren sich die Kapazitäten:

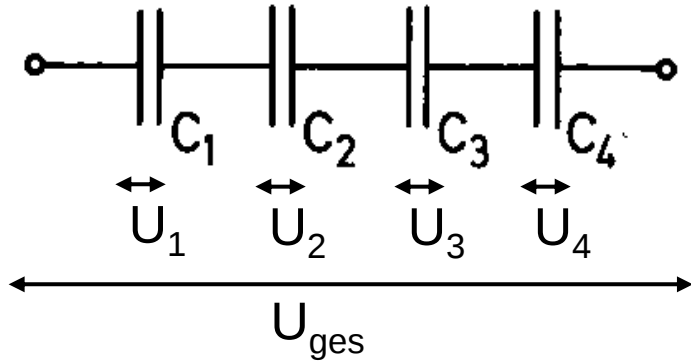
Beispiel:

Zwei Kondensatoren von 10 nF und 30 nF werden parallel geschaltet.
Wie groß ist die Gesamtkapazität ?

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 = 10\text{nF} + 30\text{nF} = 40\text{nF}$$

Serienschaltung von Kondensatoren

- Serien- (Reihen-) Schaltung von Kondensatoren:



alle Ladungen betragsmäßig gleich (Influenz)

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = \frac{Q}{C_{\text{ges}}}$$
$$= \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \frac{Q}{C_4} = Q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} \right)$$

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$

bei Serienschaltung addieren sich die Kehrwerte der Kapazitäten:

Beispiel:

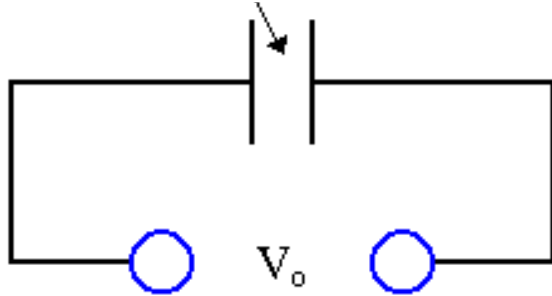
Zwei Kondensatoren von 20 pF und 30 pF werden in Serie geschaltet.
Wie groß ist die Gesamtkapazität ?

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{30} \right) \cdot \frac{1}{\text{pF}} = \frac{30 + 20}{600} \cdot \frac{1}{\text{pF}} = \frac{1}{12 \text{ pF}} \Rightarrow C_{\text{ges}} = 12 \text{ pF}$$

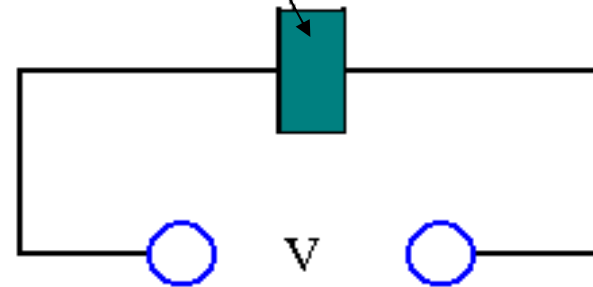
Dielektrikum: Materie im Kondensator

- Einbringen eines Isolators (Ladungsträger nicht frei beweglich) in das elektrische Feld eines Kondensators

vorher: Vakuum



Nachher: Isolator



Was passiert mit der Spannung ??

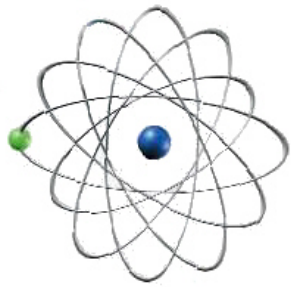


Die Spannung nimmt ab: für $U \downarrow \Rightarrow C = \frac{Q}{U} \uparrow$ bei konstanter Ladung Q
 $\Rightarrow$ die Kapazität C nimmt zu !!

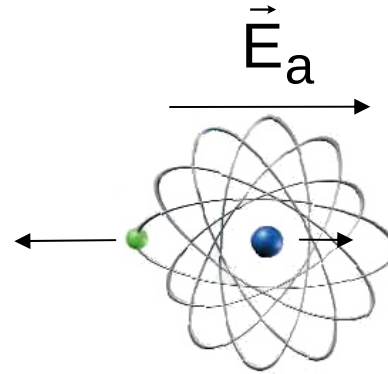
- Was ist die Ursache für die Spannungsabnahme ?
- das Dielektrikum reduziert die elektrische Feldstärke im Kondensator
Was ist die Ursache für diese Feldabschwächung ?

Dielektrikum: Materie im Kondensator

- Im Dielektrikum (Isolator) gibt es keine beweglichen Ladungen; aber Elektronenhülle (negativ) und Atomkern (positiv) können im elektrischen Feld gegeneinander verschoben werden $\Rightarrow$ **Polarisation des Mediums**

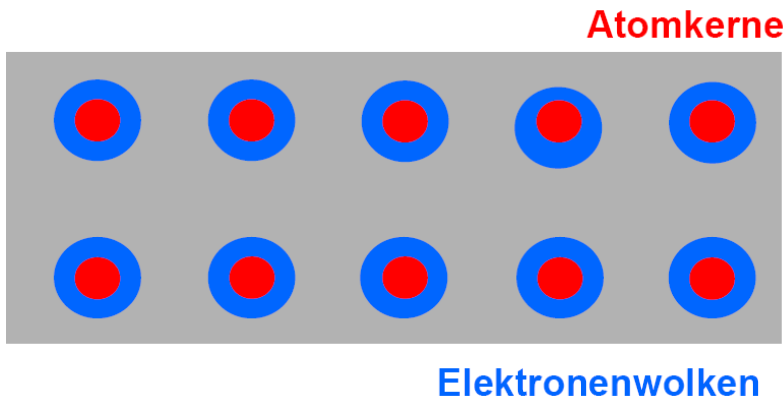


positives und negatives
Ladungszentrum
fallen zusammen

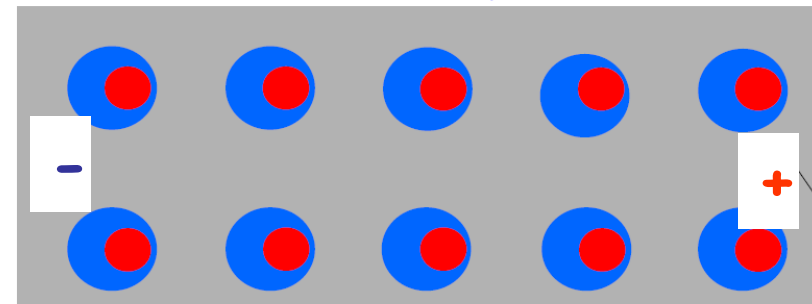


Verschiebung der
Ladungszentren
 $\Rightarrow$ Dipol

$$\vec{E} = \vec{E}_a + \vec{E}_p$$



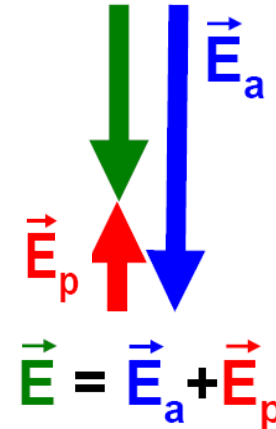
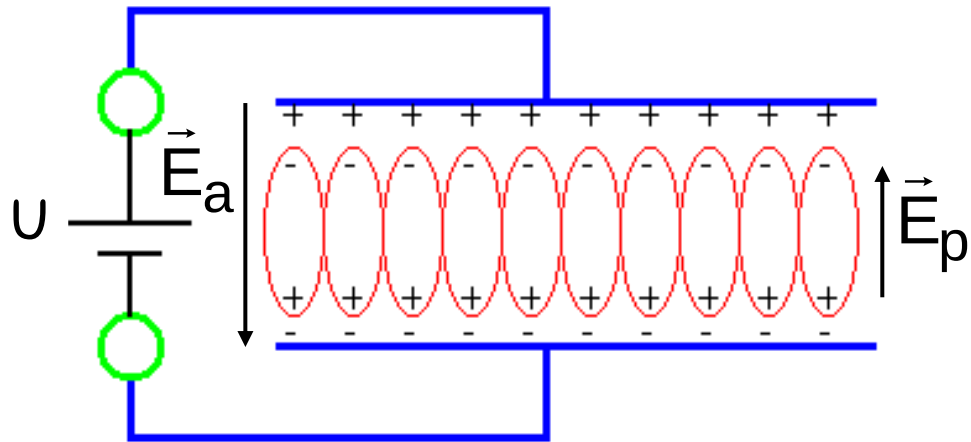
unpolarisiertes Medium



verschobene Elektronenwolken

Polarisation des Mediums
im äußeren elektrischen Feld

Dielektrikum: Materie im Kondensator



resultierendes Feld: $\vec{E} = \vec{E}_a + \vec{E}_p$

- durch Polarisation entsteht im Medium ein elektrisches Feld $\vec{E}_p$, das dem äußeren Feld $\vec{E}_a$ entgegengesetzt gerichtet ist. Das äußere Feld $\vec{E}_a$ wird um den Faktor ε geschwächt

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_a}{\varepsilon}$$

ε = Dielektrizitätskonstante (materialabhängig)

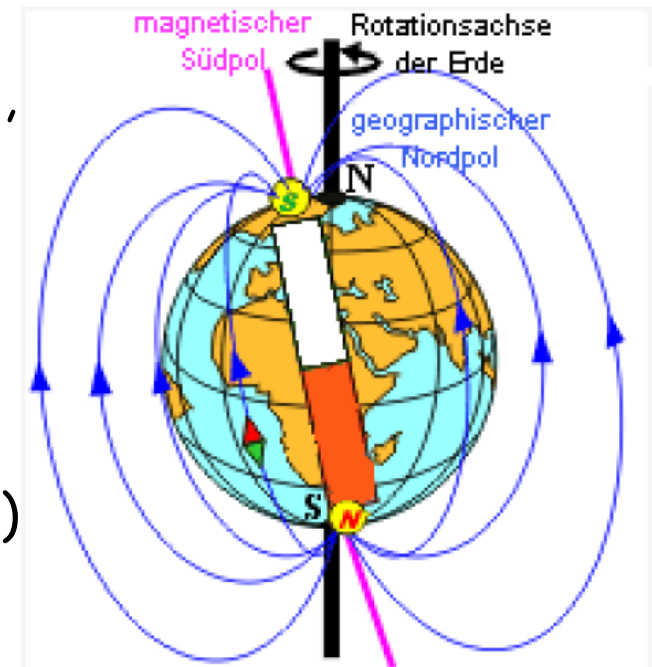
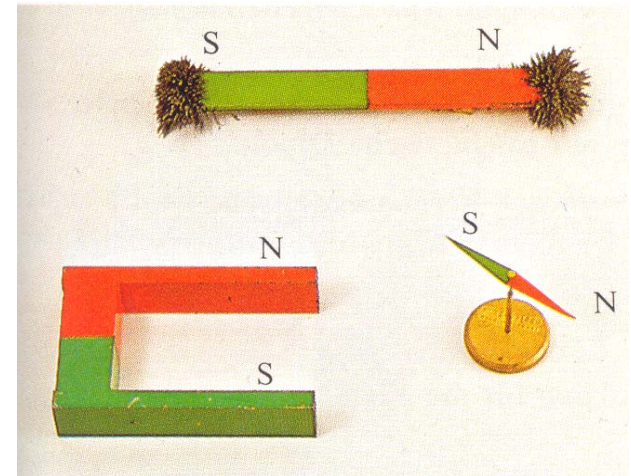
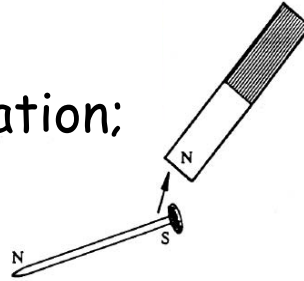
z.B. $\varepsilon_{\text{Wasser}} \approx 80$; $\varepsilon_{\text{Glyzerin}} \approx 41$; $\varepsilon_{\text{Luft}} = 1,0005$

Magnetische Kräfte



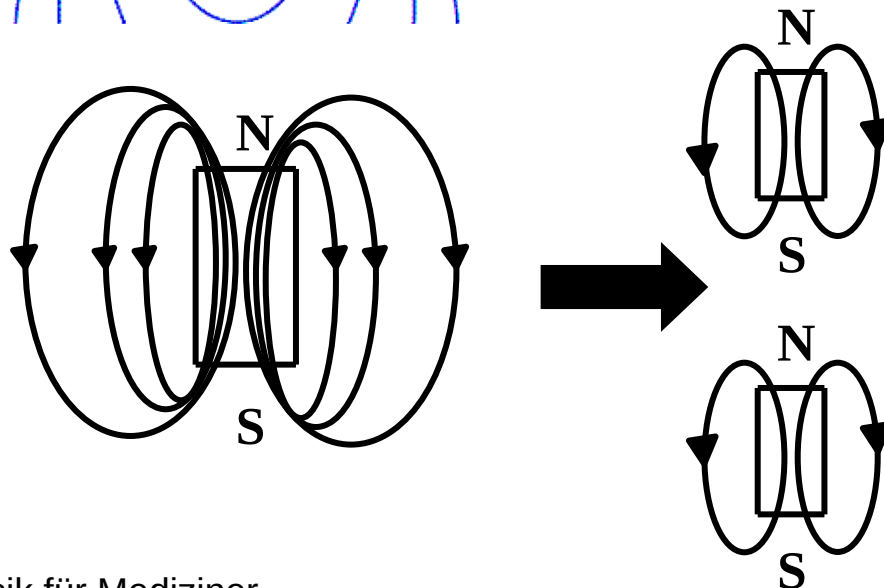
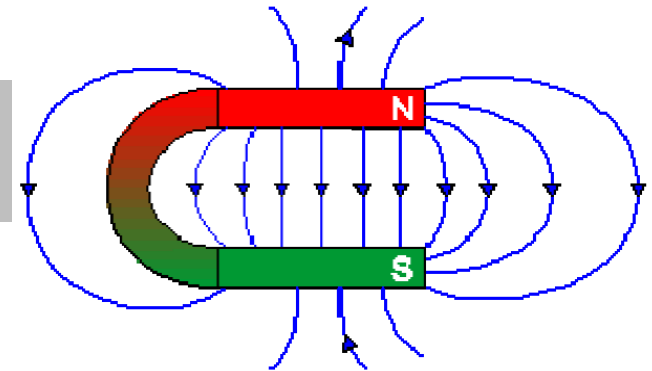
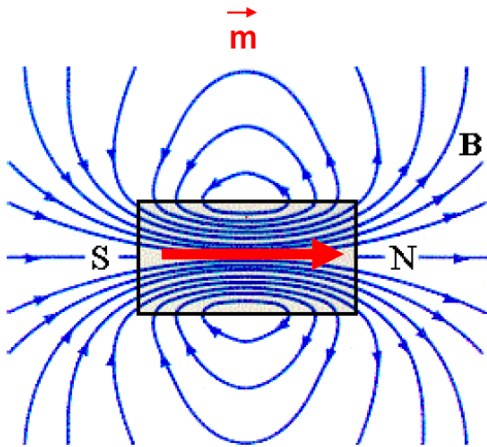
Magnetische Kräfte

- Magnetische Kräfte $\gg$ Gravitation; Anheben von Nadeln (ohne elektrische Ladungen)
- Es gibt **keine magnetischen Monopole**; Magnete sind immer mindestens Dipole mit **Nord- und Südpol (N,S)**
- gleichnamige Pole (S-S, N-N) stoßen sich ab, ungleichnamige (S-N) ziehen sich an; magnetische Dipole erfahren ein Drehmoment
- Der Nordpol einer Magnetrnadel richtet sich aus zum geographischen Nordpol (magnetischem Südpol des Erdmagnetfeldes)



Magnetfelder

Wie das elektrische Feld ist auch das Magnetfeld $\vec{B}$ durch Feldlinien darstellbar; da es **keine magnetischen Monopole** gibt, von denen Feldlinien ausgehen oder bei denen sie enden könnten, sind **magnetische Feldlinien immer geschlossen**.

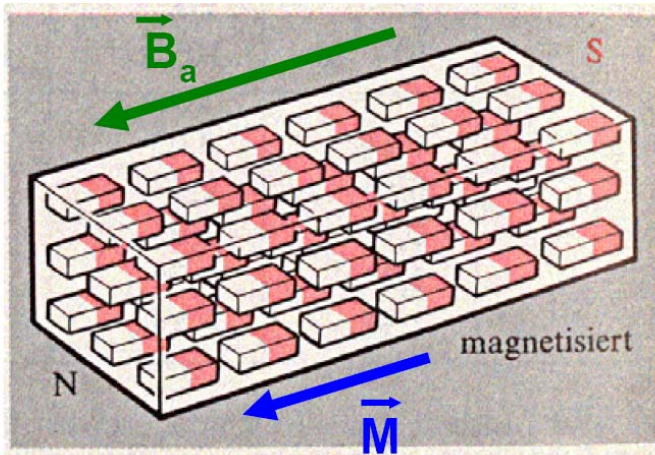
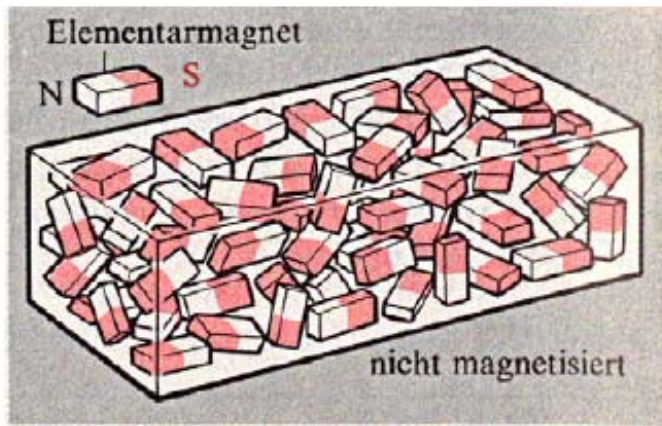


- Das Durchtrennen eines Magneten lässt nicht etwa separate Nord- und Südpole sondern zwei neue Dipole entstehen (es gibt keine magnetischen Monopole !)



Magnetisierung

- Viele Stoffe können mit einem Magneten magnetisiert werden;



ohne äußeres Magnetfeld:
elementare magnetische Dipole
sind beliebig orientiert. Die
Gesamtmagnetisierung $\vec{M}$ ist Null.

mit äußerem Magnetfeld:
elementare magnetische Dipole richten sich
alle in Feldrichtung aus und addieren sich zu
einer makroskopischen Magnetisierung $\vec{M}$,
die das äußere Magnetfeld $\vec{B}_a$ verstärkt



Modell
Ferromagnet

Zusammenfassung

- **elektrische Ladungen** und die **Coulomb-Wechselwirkung** zwischen ihnen sind für alle elektrischen Phänomene verantwortlich
- die Coulomb-Kraft ist **viel stärker** als die Gravitationskraft
- die Kraft auf eine elektrische Probeladung lässt sich durch ein **elektrisches Feld** beschreiben.
- elektrische Felder im Raum sind darstellbar durch **Feldlinien** und **Äquipotenziallinien**. **Feld- und Äquipotenziallinien stehen $\perp$ zueinander**
- elektrische Ladungen lassen sich in einem **Kondensator** speichern
- bringt man einen Isolator in das elektrische Feld E_0 eines Kondensators, so wird das Medium **polarisiert**. Die elektrische Feldstärke sinkt auf den Wert $E = E_0/\epsilon$; ϵ = Dielektrizitätskonstante (materialabhängig)
- es gibt **keine magnetischen Monopole**: **magnetische Feldlinien sind stets in sich geschlossen**
- die **Magnetisierung** eines Stoffes ergibt sich durch die Ausrichtung von Elementarmagneten in einem äußeren Feld