

## 3.1. Elektrostatik

### 3.1.1. Elektrische Ladungen

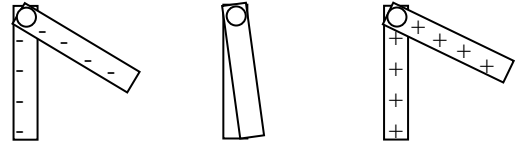
Luftballon mit Styropor, Wasserstrahl, Haaren, OHP-Folien und Papier, Katzenfell und Gummistab, Selbstgebautes Elektroskop aus Plastikbecher, Alufolie, Büroklammer und Filzstift

#### 3.1.1.1. Elektrische Ladungen

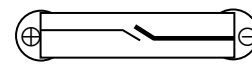
Es gibt **positive** und **negative** elektrische Ladungen. **Gleichnamig** geladene Körper stoßen sich ab, **entgegengesetzt** geladene Körper ziehen sich an.

#### 3.1.1.2. Nachweis elektrischer Ladungen

Ladungen lassen sich mit einem **Elektroskop** nachweisen. Es besteht im Wesentlichen aus zwei leichten, isoliert aufgehängten Metallstreifen, die sich bei elektrischer Aufladung voneinander wegspreizen.



Die **Unterscheidung positiver und negativer Ladungen** ist nur mit einer **Glimmlampe** möglich. Dabei handelt es sich um eine sehr kleine und empfindliche **Leuchtstoffröhre** mit sehr eng aneinander liegenden Elektroden (Polen). Die Leuchtwirkung entsteht durch abgelöste Elektronen immer nur am **negativen Pol**.



#### 3.1.1.3. Einheiten für Ladung und Stromstärke

Die Einheit der **elektrischen Ladung Q** ist das **Coulomb C** (nach Charles Augustin de Coulomb 1736 – 1806).

Übungen. Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 1

### 3.1.2. Atome und Elementarteilchen

Alle Stoffe bestehen aus **Atomen** (griech. atomos = untrennbar). Jedes Atom enthält einen winzigen positiv geladenen **Kern**, der aus positiv geladenen **Protonen** und neutralen **Neutronen** besteht. In der **Hülle** kreisen die sehr kleinen und leichten negativ geladenen **Elektronen** auf verschiedenen **Energienstufen** um den Kern. Jedes Atom besitzt **gleich viele** Elektronen und Protonen, deren Ladungen **den gleichen Betrag** von ca.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C haben. Man nennt diesen Betrag daher **Elementarladung**. Die Anzahl der Elektronen bzw. Protonen wird durch die **Ordnungszahl** des Elementes angegeben.

Die **Edelgase** in der 8. Hauptgruppe des Periodensystems sind mit 2 (Helium) bzw. 8 Elektronen (alle übrigen) auf der äußersten Energienstufe besonders **stabil**. Alle anderen Atome versuchen durch **Abgabe** oder **Aufnahme** von Elektronen diesen **Edelgaszustand** zu erreichen.

	1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe	5. Gruppe	6. Gruppe	7. Gruppe	8. Gruppe
1. Periode	1 H 1+							2 He 2+
2. Periode	3 Li 3+	4 Be 4+	5 B 5+	6 C 6+	7 N 7+	8 O 8+	9 F 9+	10 Ne 10+
3. Periode	11 Na 11+	12 Mg 12+	13 Al 13+	14 Si 14+	15 P 15+	16 S 16+	17 Cl 17+	18 Ar 18+

**Metalle** im linken unteren Bereich des Periodensystems sind **große Atome mit wenigen Außenelektronen**, die vom positiv geladenen Kern nur schwach angezogen werden. Sie erreichen den Edelgaszustand durch **Abgabe** ihrer wenigen Außenelektronen, wobei durch die überschüssige Ladung im Kern **positiv geladene Kationen** entstehen.

**Nichtmetalle** im rechten oberen Bereich des Periodensystems sind kleine Atome mit vielen fest gebundenen Außenelektronen. Sie erreichen den Edelgaszustand durch **Aufnahme** zusätzlicher Elektronen, wobei **negativ geladene Anionen** entstehen.

**Beispiele:**

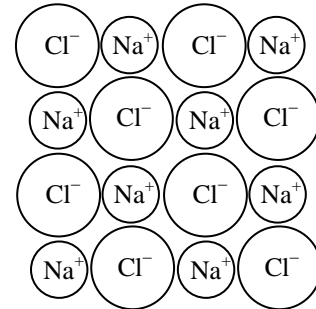
- a) Lithium  ${}_3\text{Li}$  gibt ein Außenelektron ab und erreicht damit den Elektronenzustand des Heliums:  
 ${}_3\text{Li} \rightarrow {}_3\text{Li}^+ + e^-$
- b) Magnesium  ${}_{12}\text{Mg}$  gibt zwei Außenelektronen ab und erreicht damit den Elektronenzustand des Neons:  
 ${}_{12}\text{Mg} \rightarrow {}_{12}\text{Mg}^{2+} + 2e^-$
- c) Sauerstoff  ${}_8\text{O}$  nimmt zwei zusätzliche Elektronen auf und erreicht damit den Elektronenzustand des Neons:  
 ${}_8\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ .
- d) Chlor  ${}_{17}\text{Cl}$  nimmt ein zusätzliches Elektron auf und erreicht damit den Elektronenzustand des Argons:  
 ${}_{17}\text{Cl} + e^- \rightarrow \text{Cl}^-$ .

Übungen. Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 2 und 3

**3.1.3. Der Aufbau der Stoffe**

**3.1.3.1. Salze**

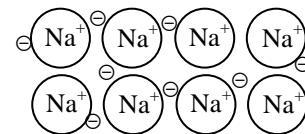
Treffen Metallatome auf Nichtmetallatome, so wird der Edelgaszustand durch Abgabe der Elektronen vom Metall an das Nichtmetall erreicht. Dabei entstehen entgegengesetzt geladene **Ionen**, die durch allseitig wirkende **elektrostatische Anziehung** in einem **Ionengitter** zusammengehalten werden. Solche Stoffe nennt man **Salze oder Mineralien**. Da die Elektronen fest an ihre Ionen gebunden sind und die Ionen ihrerseits fest im **Kristallgitter** sitzen, sind Salze im **festen** Zustand **Nichtleiter**. Wird das Kristallgitter aber beim Schmelzen, Verdampfen oder durch Auflösen in Wasser zerstört, so können sich die Ionen frei bewegen und Ladung transportieren. Im **flüssigen, gasförmigen** oder **gelösten** Zustand sind Salze daher **Leiter**.



**Beispiel: Kochsalz  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$**

**3.1.3.2. Metalle**

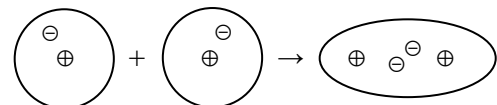
Metallatome geben ihre überschüssigen Außenelektronen unter Bildung positiv geladener Ionen **ab**. Die abgegebenen Elektronen sind frei beweglich (**Elektronengas**) und halten die positiv geladenen Atomrümpfe im dicht gepackten **Metallgitter** zusammen. Metalle sind daher auch im festen Zustand **Leiter**. **Ihre Leitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab**, da die immer stärker vibrierenden Ionen den Elektronenfluss zunehmend behindern.



**Beispiel: Natrium  $\text{Na}$**

**3.1.3.3. Nichtmetalle**

Nichtmetallatome nutzen ihre Außenelektronen paarweise gemeinsam, um trotz Elektronenmangel den Edelgaszustand zu erreichen. Die gemeinsam genutzten **Elektronenpaare** halten die beteiligten Atome in kleinen Atomgruppen, den **Molekülen** zusammen. Moleküle sind nach außen hin **elektrisch neutral** und können keine Ladung transportieren. Molekülverbindungen sind daher **Nichtleiter**.

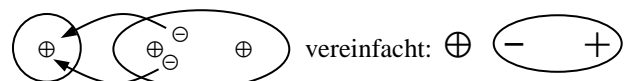


**Beispiel Wasserstoff  $\text{H}_2$ :** Zwei H-Atome verbinden sich zu einem  $\text{H}_2$ -Molekül. Durch gemeinsame Nutzung der beiden Elektronen erreichen beide Atome den Edelgaszustand des Heliums

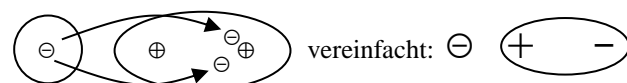
**3.1.3.4. Influenz und Polarisierung von Molekülen**

**Innerhalb** der Moleküle können sich die Elektronen unter dem Einfluss (**Influenz**) einer äußeren Ladung teilweise verschieben, wobei sich **Dipole** bilden. (**Polarisation**)

Ein positiv geladenes Ion zieht die Elektronen an sich



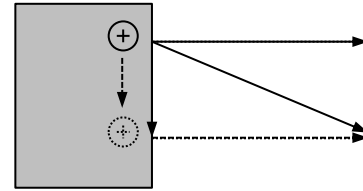
Ein negativ geladenes Ion drückt die Elektronen von sich:



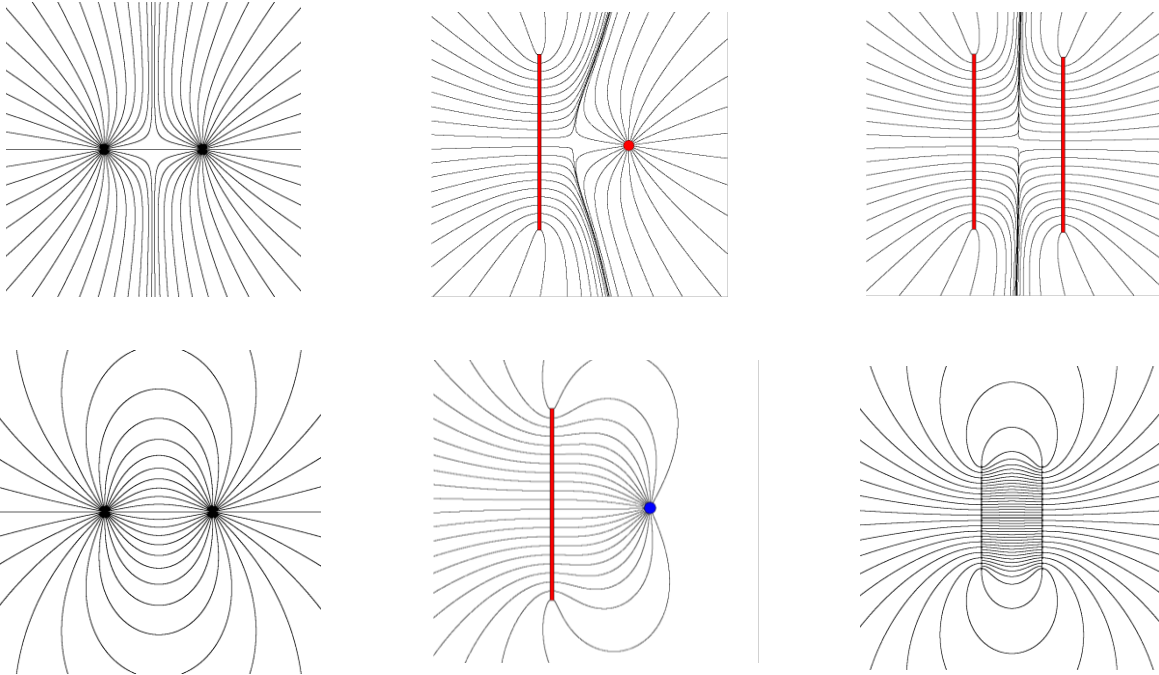
Übungen: Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 4 - 6

### 3.1.4. Feldlinien

**Feldlinien** zeigen an, in **welche Richtung die elektrische Kraft auf eine positive Ladung** wirkt. Sie beginnen in positiven Ladungen und enden in negativen Ladungen. Da sich die Ladungen in Leitern frei verschieben können, beginnen bzw. enden Feldlinien **senkrecht auf ihrer Oberfläche**. Eine schräg auf eine Leiteroberfläche auftreffende Feldlinie würde die Ladungen entlang der Oberfläche solange verschieben, bis sie wieder senkrecht steht:



**Beispiele für Feldlinienbilder:** oben gleichnamig, unten entgegengesetzt geladene Leiter.



Übungen. Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 7 und 8

### 3.1.4. Die Stärke des elektrischen Feldes

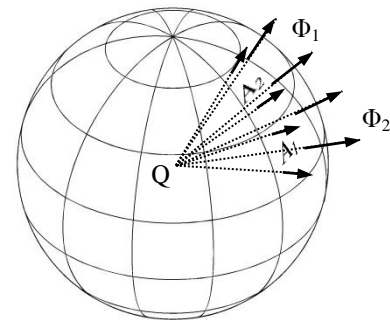
#### 3.1.4.1. Der elektrische Fluss und die Feldstärke

Je **dichter** die Feldlinien liegen, desto stärker ist die elektrische Kraft  $\vec{F}$  pro Ladung  $Q$ . Die **Feldliniendichte** bzw. **Kraft pro Ladung** heißt

**elektrische Feldstärke**  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$  mit der **Einheit**  $[E] = \frac{N}{C}$

Ein Maß für die **Gesamtzahl der Feldlinien senkrecht durch eine gegebene Fläche  $A$**  ist der

**elektrische Fluss**  $\Phi = E \cdot A$  mit der **Einheit**  $[\Phi] = \frac{N \cdot m^2}{C}$



#### 3.1.4.2. Der Satz von Gauß und die elektrische Feldkonstante

Da jede Feldlinie in einer Ladung entspringt, ist der gesamte elektrische Fluss  $\Phi_{\text{ges}}$  durch eine **geschlossene Fläche  $A$**  proportional zu der **von ihr eingehüllten Ladung  $Q$** :

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Das ist der **Durchflutungssatz** von *Carl Friedrich Gauß* (1777 – 1855). Der Proportionalitätsfaktor  $\frac{1}{\epsilon_0}$  enthält die **elektrische Feldkonstante**  $\epsilon_0 \approx 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  und dient zum Abgleich der Einheiten Coulomb, Newton und Meter.

### 3.1.4.4. Das Coulomb-Gesetz für das Feld ein Punktladung

Auf der Oberfläche  $A = 4\pi r^2$  einer Kugel mit Radius  $r$  um eine Ladung  $Q$  gilt  $\frac{Q}{\epsilon_0} = \Phi = E \cdot A = E \cdot 4\pi r^2$ .

Die **Feldstärke**  $E$  im Abstand  $r$  zur Ladung  $Q$  ist also  $E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot 4\pi r^2}$

Die **Coulomb-Kraft** zwischen zwei Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$  im Abstand  $r$  ist entsprechend  $F_C = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_0 \cdot 4\pi r^2}$

Dies ist das **Coulomb-Gesetz** (nach seinem Entdecker Carles-Augustin de Coulomb 1736 – 1806).

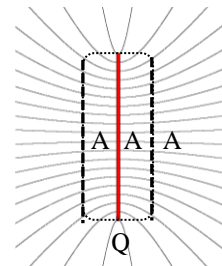
Übungen: Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 9 - 11

### 3.1.5. Der Kondensator

#### 3.1.5.1. Das Feld einer geladenen Platte

Bei einer mit der Ladung  $Q$  geladenen dünnen Platte der Fläche  $A$  kann man die wenigen aus dem Rand der Platte entspringenden Feldlinien vernachlässigen und erhält für die Feldstärke an der Vorder- bzw. Rückseite

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot 2A}$$

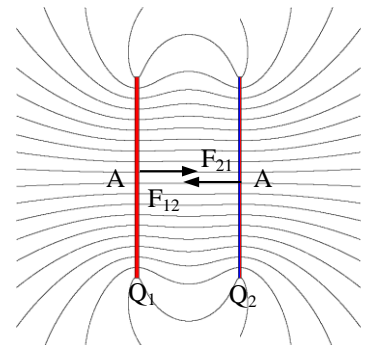


#### 3.1.5.2. Die Kraft zwischen zwei geladenen Platten

Bei zwei parallelen mit der Ladung  $Q_1$  und  $Q_2$  geladenen dünnen Platten der Fläche

$A$  wirkt Platte 1 mit der Kraft  $F_{12} = E_1 \cdot Q_2 = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_0 \cdot 2A}$  auf Platte 2 und Platte 2 mit der

Kraft  $F_{21} = E_2 \cdot Q_1 = \frac{Q_2 \cdot Q_1}{\epsilon_0 \cdot 2A} = F_{12}$  auf Platte 1. **Auf Platte 1 wirkt nur das Feld von Platte 2 und umgekehrt.**

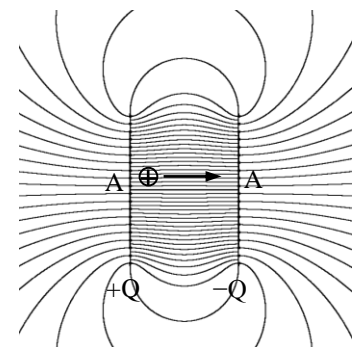


#### 3.1.5.3. Das Feld zwischen zwei Plattenladungen

Befindet sich aber eine zusätzliche Probeladung  $q$  zwischen den beiden Platten, so addieren sich die Kräfte auf diese dritte Ladung. Bezogen auf eine zusätzliche Ladung  $q$  ist die Feldstärke zweier entgegengesetzt gleich mit  $Q_1 = +Q$  und  $Q_2 = -Q$  geladenen Platten der Fläche  $A$  und Abstand  $d$  also **doppelt** so groß wie bei einer Platte:

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A}$$

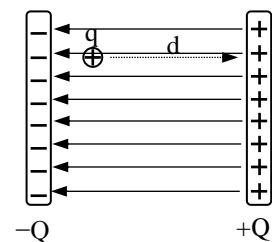
Eine solche Anordnung wird **Plattenkondensator** genannt und dient zur Erzeugung homogener Felder mit parallelen Feldlinien in **Teilchenbeschleunigern** z.B. für **Mikrowellen** oder **Röntgengeräte** und konstanten Feldstärken sowie als **Ladungsspeicher** z.B. beim **Standlicht** am Fahrrad



#### 3.1.5.4. Die Spannung

Verschiebt man die **Probeladung**  $q$  entgegen der Feldlinien eines **homogenen** Feldes  $E$ , so muss man die **Coulombkraft**  $F_C = E \cdot q$  überwinden und verrichtet dabei die **Arbeit**  $W = F \cdot d = E \cdot q \cdot d$ . Die geleistete **Arbeit**  $W$  bezogen auf die **transportierte Ladung**  $q$  heißt

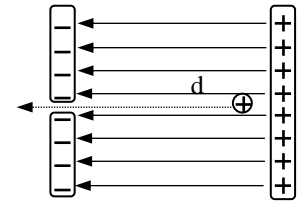
**elektrische Spannung**  $U = \frac{W}{q} = E \cdot d$



mit der **Einheit**  $[U] = \frac{N \cdot m}{C} = \text{Volt V}$  nach **Alessandro Volta** (1745 – 1827), dem Erfinder der **Batterie**.

### 3.1.5.5. Teilchenbeschleuniger und Elektronenvolt

Wird ein Teilchen mit Masse  $m$  und Ladung  $Q$  im elektrischen Feld  $E = \frac{U}{d}$  losgelassen, so wird es durch die **Coulombkraft**  $F_C = E \cdot Q$  beschleunigt und hat nach „Durchfallen“ der gesamten Wegstrecke  $d$  zwischen den Platten die **kinetische Energie**  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 = U \cdot Q$ . Bohrt man in die gegenüberliegende Platte ein Loch, so tritt durch dieses Loch ein Teilchenstrahl mit der kinetischen Energie  $U \cdot Q$  aus. Da es sich häufig um **Elektronen** oder **Protonen** mit der **Elementarladung**  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  handelt, verwendet man in diesen Fällen die Einheit **Elektronenvolt**  $eV = 1 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Ein Elektronenvolt ist also die kinetische Energie, die ein Teilchen mit Elementarladung nach „Durchfallen“ der Spannung 1 V besitzt.



### 3.1.4.6. Die Kapazität

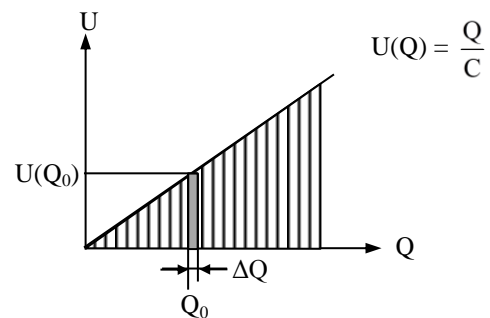
Die **Kondensatorspannung** zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Platten mit den Ladungen  $+Q$  bzw.  $-Q$  und der Fläche  $A$  im Abstand  $d$  beträgt  $U = E \cdot d = Q \cdot \frac{d}{\epsilon_0 \cdot A}$

Die **Kapazität** (Aufnahmefähigkeit)  $C$  gibt an, welche Ladung  $Q$  bei einer Spannung von  $U = 1 \text{ V}$  auf dem Kondensator gespeichert werden kann:  $C = \frac{Q}{U}$  mit der **Einheit**  $[C] = \frac{C}{V} = \text{Farad } F$  nach *Michael Faraday*

Die **Kapazität eines Plattenkondensators** der Fläche  $A$  und dem Plattenabstand  $d$  ist also  $C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$

### 3.1.4.7. Die Energie des elektrischen Feldes

Um die zusätzliche Ladung  $\Delta Q$  gegen die Spannung  $U(Q) = \frac{Q}{C}$  der bereits vorhandenen Ladung  $Q_0$  hinzuzufügen, benötigt man die zusätzliche Energie  $\Delta W = U \cdot \Delta Q$ . Dies entspricht dem Flächeninhalt des senkrechten Streifens unter  $U(Q_0)$  im  $U$ - $Q$ -Diagramm. Zählt man alle Streifen zusammen, so erhält man für die insgesamt aufzuwendende **Ladeenergie** die Dreiecksfläche

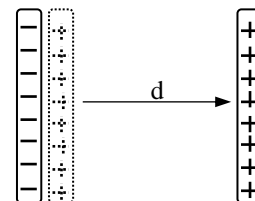


$$E = \frac{1}{2} \cdot U \cdot Q = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

Dies ist gleichzeitig die **gesamte im Kondensator gespeicherte Energie**.

Auf die gleiche Formel kommt man, wenn man den Kondensator **mechanisch** auflädt, indem man die zunächst ganz dicht beieinander liegenden Platten gegen die Kraft  $F_{12} = F_{21} = \frac{Q^2}{\epsilon_0 \cdot 2A}$  um den Weg  $d$  auseinanderzieht.

Die geleistete Arbeit ist  $E = F \cdot d = \frac{Q^2 \cdot d}{\epsilon_0 \cdot 2A} = \frac{1}{2} \cdot U \cdot Q = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$ .



Übungen: Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 12 - 19

### 3.1.6. Materie im elektrischen Feld

#### 3.1.6.1. Influenz

Die Verschiebung der Ladungsträger in einem Körper unter dem Einfluss einer äußeren Ladung nennt man **Influenz**. In **Metallen** können sich die **Elektronen** über den ganzen Körper verschieben und am nächsten bzw. weitesten Ende des Körpers bezogen auf die äußere Ladung hohe **Influenzladungen** ausbilden. Auch die **Ionen** der Salze und Minerale in **Lebewesen** oder im können sich in der Nähe von äußeren Ladungen wie z.B. in **Gewittern** oder **Rundfunksendern** verschieben und biologische Funktionsstörungen hervorrufen.

Das elektrische Feld der Influenzladungen ist entgegengerichtet zu dem Feld der äußeren Ladung und gleicht dieses aus. Das Innere eines Leiters ist daher immer **feldfrei**.

Auch **Hohlräume** in Leitern sind feldfrei: Aus Symmetriegründen könnten die Feldlinien in einem kugelförmigen Hohlraum nämlich nur radial vom Mittelpunkt nach außen verlaufen. Nach dem Coulomb-Gesetz müsste dann im Zentrum eine Ladungsquelle sitzen, was aber bei einem leeren Hohlraum nicht der Fall ist.

In einem **Faradayschen Käfig** (nach dem Buchbinder **Michael Faraday** 1791 – 1876, einem der genialsten Experimentalphysiker aller Zeiten) aus Metall ist man sicher vor Blitzen und elektromagnetischen Strahlen, solange die Maschen nicht zu groß sind und man nicht nach außen greift: Alle Influenzladungen sitzen außen und das Innere ist feldfrei.

#### 3.1.6.2. Polarisation und Permittivität

Bei **Molekülverbindungen** und **festen Salzen** beschränkt sich die Bewegung der Elektronen auf das Innere der Ionen bzw. Moleküle. Diese **Polarisation** kann das äußere Feld nicht vollständig kompensieren sondern nur auf den  $\epsilon_r$ -ten Teil abschwächen. Die Feldstärke sinkt also auf

$$E = \frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A}$$

Die **Permittivität**  $\epsilon_r$  hat bei Feststoffen je nach Zahl der beweglichen Elektronen Werte von 1 bis 10. Höhere Werte werden in Flüssigkeiten erreicht, welche bereits **Dipolmoleküle** enthalten, die sich im elektrischen Feld nur noch entsprechend **ausrichten** müssen:

Die Kapazität eines Kondensators lässt sich durch Füllung mit einem Stoff hoher Permittivität stark erhöhen, denn durch die Schwächung des Gegenfeldes benötigt man weniger Spannung, um ihn zu laden. Die **Kapazität eines Plattenkondensators mit einer Füllung der Permittivität  $\epsilon$**  ist

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

#### 3.1.6.3. Entstehung von Gewittern

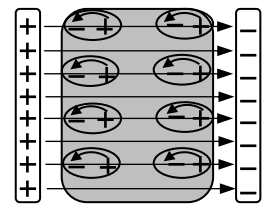
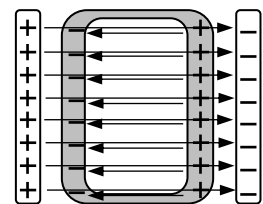
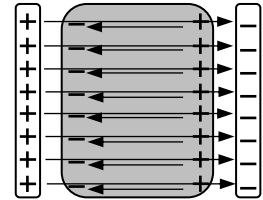
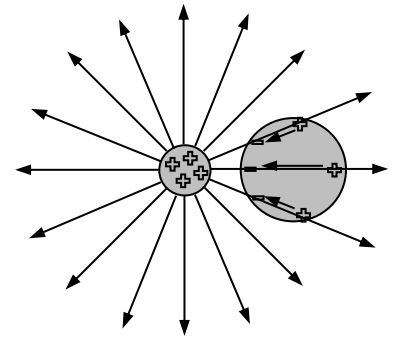
Die wichtigste und eindrucksvollste natürliche Ladungstrennung geschieht in einer **Gewitterwolke** durch Reibung zwischen nach oben steigenden kleinen **Eiskristallen** und nach unten sinkenden größeren Eis-Wasser-Teilchen, den **Graupelteilchen**.

Dabei gehen Elektronen von den Eiskristallen auf die Graupelteilchen über, so dass am unteren Rand der viele km hohen **Cumulus-Wolke** eine **negative** und am oberen Rand ein **positive** Ladung entsteht. Der **Erdboden** unter der Wolke wird durch **Influenz** wiederum **positiv** geladen.

Die Ladungen können so groß werden, dass auch Luftmoleküle Elektronen abgeben oder aufnehmen und dadurch zum Ladungstransport fähig werden. Schließt sich zufällig eine Kette solcher ionisierter Moleküle vom oberen zum unteren Rand der Wolke, so fließt kurzzeitig ein sehr hoher **Strom**. Die plötzliche starke Bewegung der Ionen bewirkt eine große **Hitzentwicklung**.

Die umgebende Luft **dehnt** sich schlagartig **aus** und es entsteht ein **Donnerknall**.

Übungen: Aufgaben zur Elektrostatik Nr. 20 – 23



Stoff	$\epsilon_r$
Vakuum, Luft	1
Gummi	2
Plexiglas	3
Glas	10
Ethanol	20
Aceton	25
dest. Wasser	30

