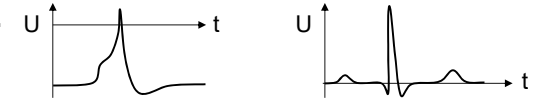


# Elektrizitätslehre

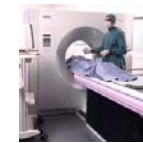


# Warum?

- Elektrische Erscheinungen in lebender Materie: Ruhepotential, Aktionspotential, EKG, EMG...



- Elektrische Geräte in der ärztlichen Praxis: EKG, EMG, Ultraschall, Defibrillator, CT, NMR, Wärmetherapie...



# Elektrische Erscheinungen

Reibungselektrizität



Entladung



# Elektrische Geräte

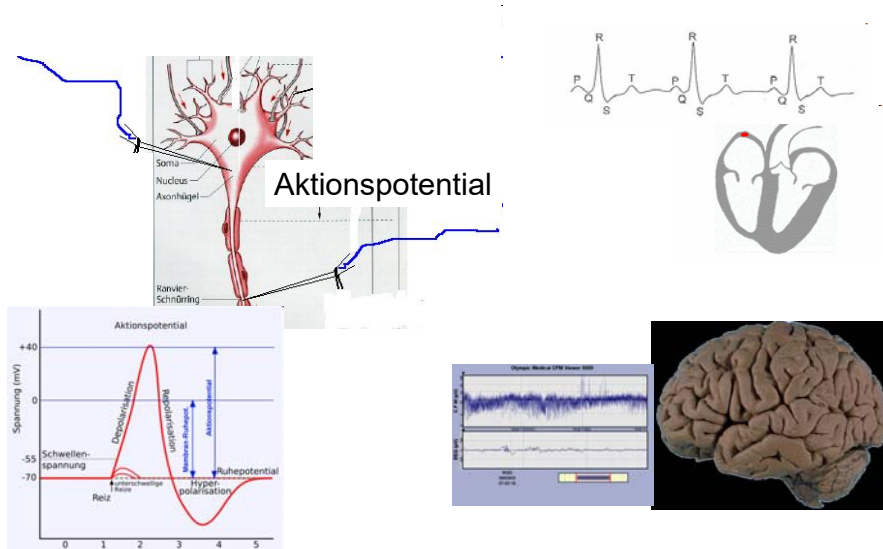
In Haushalt



In Medizin



# Bioelektrische Erscheinungen



**Ladung:** eine wesentliche Eigenschaft der Materie  
(wie z.B. die Masse)

Elementarteilchen:

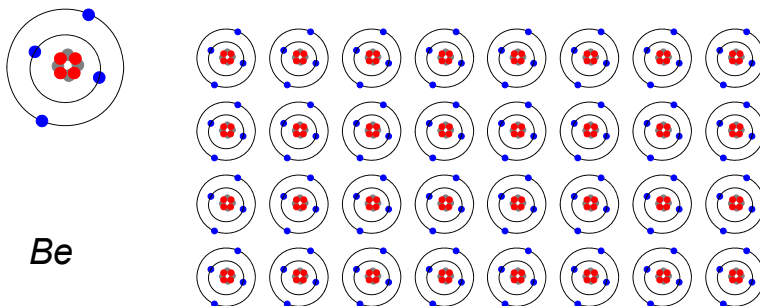
Proton	Neutron	Elektron
+	0	-

**Elementarladung:** Ladung des Protons  
Das Elektron hat -1 Elementarladung.

**SI Einheit** der Ladung ist **Coulomb (C)**  
1 Elementarladung =  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Wie groß ist die Ladung von einem Mol Elektronen? (Faraday Konstante)

Makroskopische Objekte sind im Grundzustand  
neutral: gleich viele positive und negative Ladungen.



geladene Körper = Makroskopische Ladungen

Positive Ladung: Elektronenmangel

Negative Ladung: Elektronenüberschuss

elektrisch neutraler  
Körper



negativ geladener  
Körper (-)



positiv geladener  
Körper (+)



Leitung:

eine der elektrischen Grundeigenschaften der Körper:

Leiter: bewegbare Ladungen (z.B. Metalle)

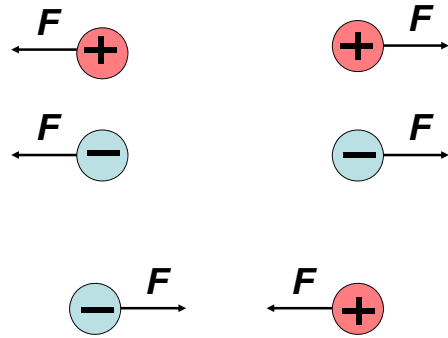
Isolator: unbewegbare Ladungen (z.B. Kunststoff)

Rechenaufgabe: Eine Kupferkugel besitzt eine Ladung von  $+2,5 \mu\text{C}$ .  
Wie viele Elektronen fehlen der Kugel?

Wie groß ist die Ladung von einem Mol Elektronen?  
(Faraday Konstante)

## Wechselwirkung zwischen den Ladungen

Qualitativ:



Bemerkung: Newton III !

## Wechselwirkung zwischen den Ladungen

Quantitativ: die Kraft zwischen der Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$ , die voneinander im Abstand  $r$  liegen beträgt:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \text{oder} \quad F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

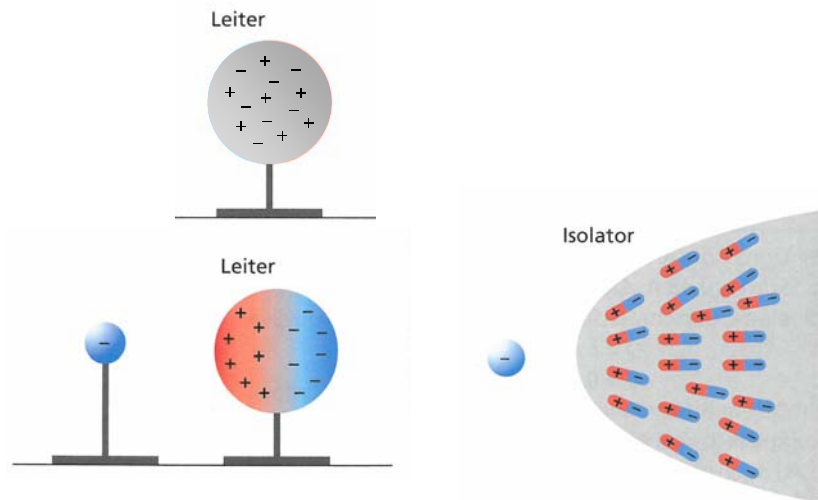
$\epsilon_0$  = elektrische Feldkonstante

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

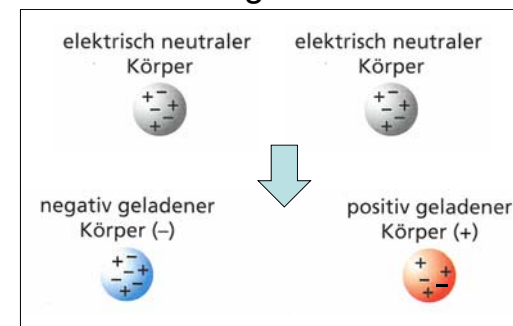
Influenz:

Eine Konsequenz der Ladungsanziehung



## Gesetz von der Erhaltung der Ladung

In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtladung erhalten

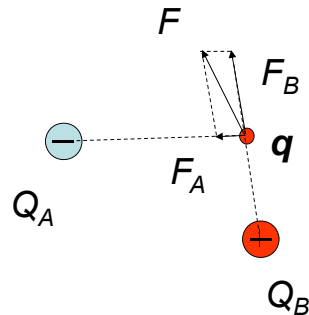


Na

$Na^+ + e^-$

## Mehrere Ladungen

Die Kräfte addieren sich als Vektorgrößen.



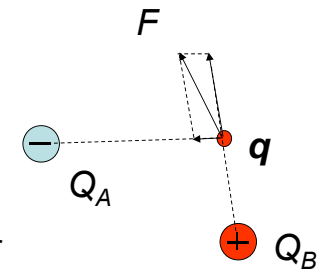
## Elektrische Feldstärke

Probeladung  $q$

Resultierende Kraft  $F$

Alle Kräfte sind proportional

Zur  $q$ .  $\Rightarrow F/q$  hängt nur von der Größe und Anordnung der Ladungen an, die auf  $q$  mit der Kraft  $F$  wirken.

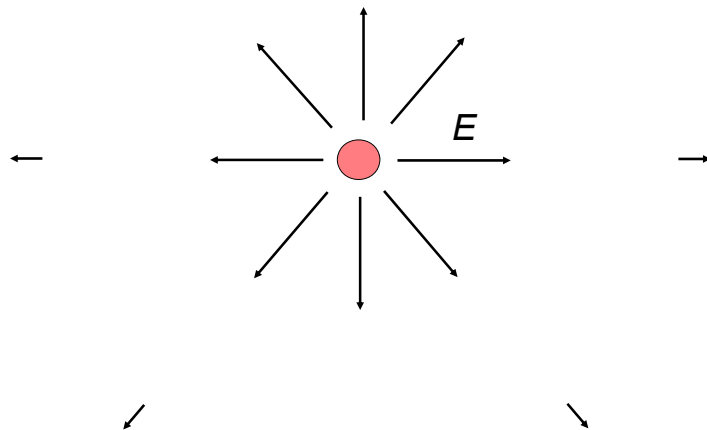


Elektrische Feldstärke  
(Vektorgröße, Ortabhängig)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \left[ \frac{N}{C} \right]$$

Charakterisierung des elektrischen Feldes mit der Feldstärke und seiner Veranschaulichung mit Hilfe der Feldlinien

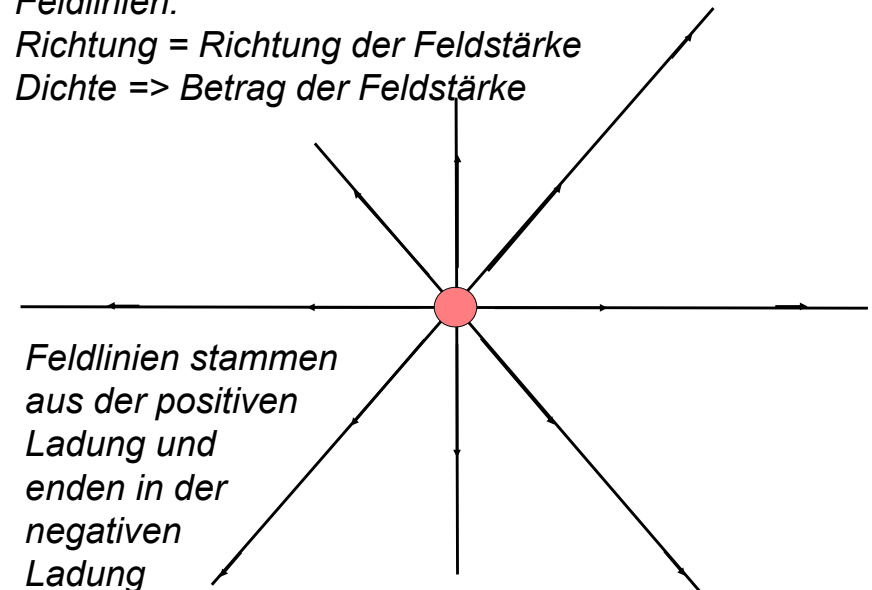
Elektrisches Feld der Punktladung:



Feldlinien:

Richtung = Richtung der Feldstärke

Dichte  $\Rightarrow$  Betrag der Feldstärke



Feldlinien stammen aus der positiven Ladung und enden in der negativen Ladung

## Feldlinien

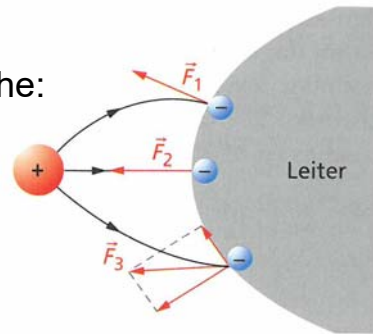
beginnen und enden in Ladungen (oder  $\infty$ )

Richtung: von + nach -

Richtung = Richtung der Kraft (+ Ladung!)

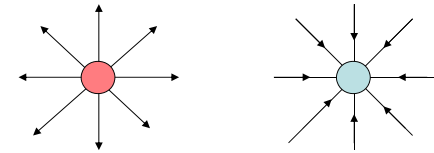
Dichte d. Feldlinien  $\sim$   
Grösse der Kraft

Feldlinien an Leiteroberfläche:  
Senkrecht!

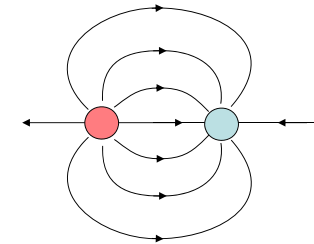


## Typische Ladungsanordnungen:

Punktladung:  
(Radialfeld)

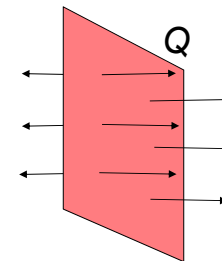


Dipol

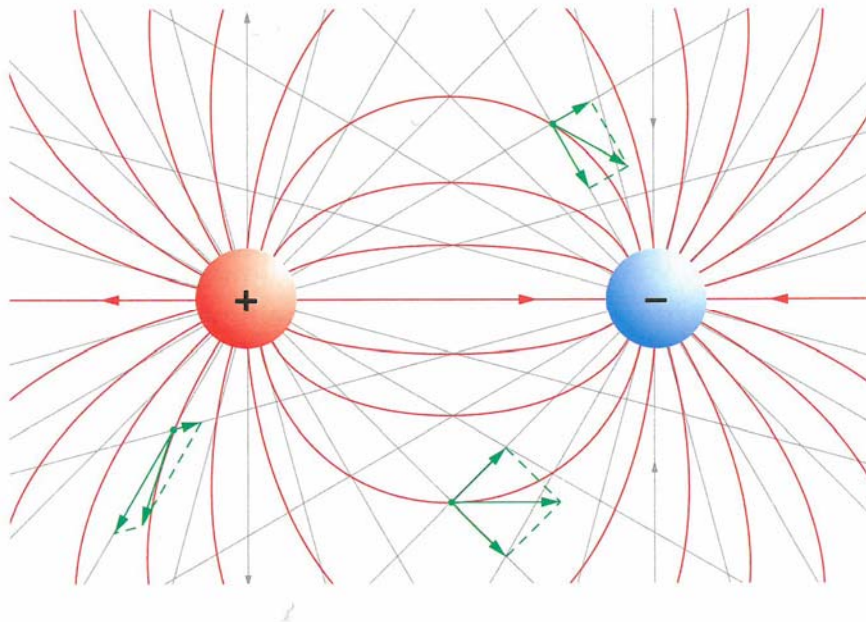
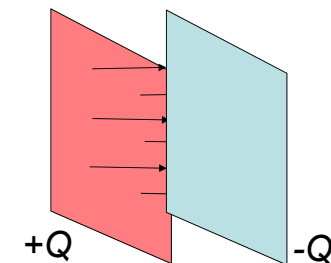


## Typische Ladungsanordnungen:

Geladene Ebene

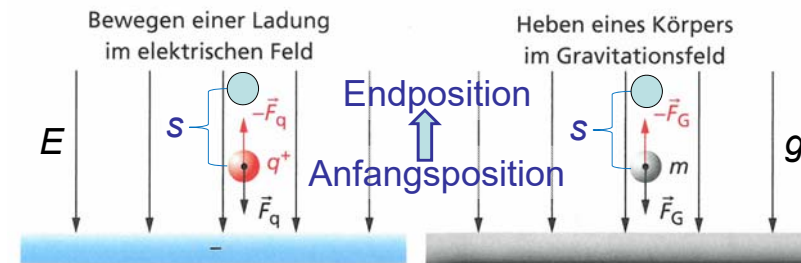


Kondensator  
(Homogenes Feld)



## Energieumwandlung (Arbeit) im elektrischen Feld

Bewegung einer Ladung gegen die Feldstärke:

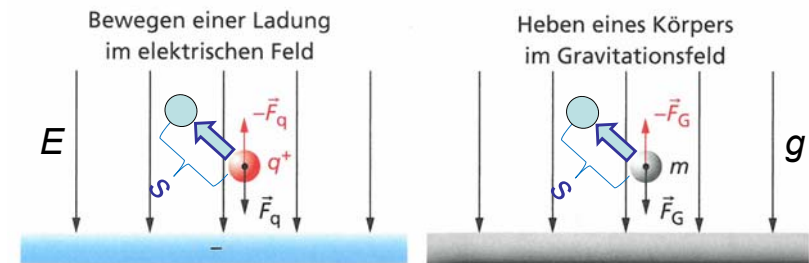


$$W = F_{\text{Hub}} s \quad \vec{F}_{\text{Hub}} = -\vec{F}_q \quad F_{\text{Hub}} = Eq$$

$$W = qEs$$

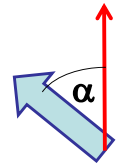
## Energieumwandlung (Arbeit) im elektrischen Feld

Bewegung einer Ladung schräg zu den Feldlinien:



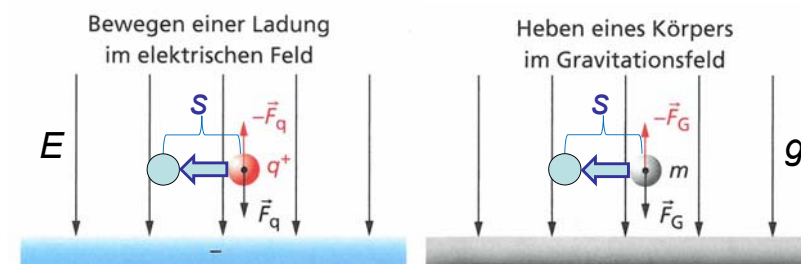
$$W = F_{\text{Hub}} s \cos \alpha \quad \vec{F}_{\text{Hub}} = -\vec{F}_q$$

$$F_{\text{Hub}} = Eq \quad W = qEs \cos \alpha$$



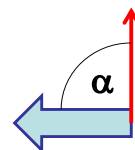
## Energieumwandlung (Arbeit) im elektrischen Feld

Bewegung einer Ladung senkrecht zu den Feldlinien:



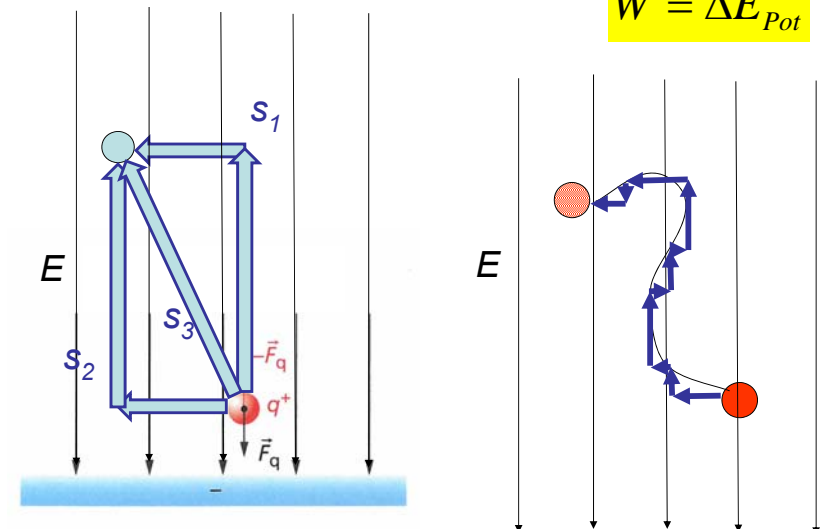
$$W = F_{\text{Hub}} s \cos \alpha = 0$$

$$\alpha = 90^\circ \quad \cos \alpha = 0$$



W ist unabhängig vom Weg!

$$W = \Delta E_{\text{Pot}}$$



## Elektrisches Potential

Man braucht  $W_{0 \rightarrow i}$  Energie um eine  $q$  Probeladung aus einem  $P_0$  Bezugspunkt zum Punkt  $P_i$  zu bringen.

$\frac{W_{0 \rightarrow i}}{q}$  ist unabhängig von der Probeladung und vom Weg!

Elektrisches Potential:  
Einheit: Volt [V]

$$\varphi_i = \frac{W_{0 \rightarrow i}}{q} \quad 1V = \frac{1J}{1C}$$

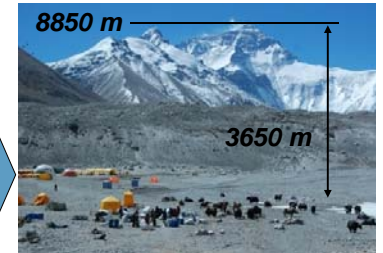


## Spannung

Elektrische Spannung zwischen zwei Punkten  $P_1 P_2$   
(Spannung des Punktes  $P_2$  gegenüber  $P_1$ )

$$U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} \quad \text{Einheit: Volt [V]}$$

Basislager  
auf 5200 m  
Noch 3650m



Bemerkungen:

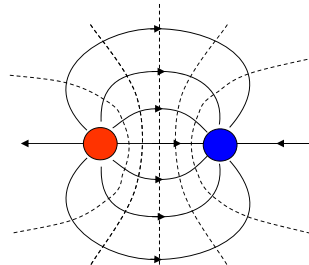
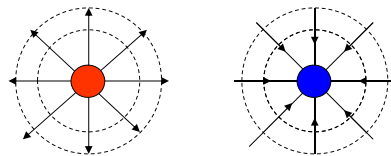
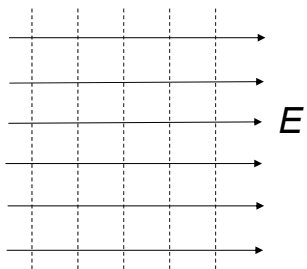
$$U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$$

Wenn  $U_{21} > 0 \Rightarrow P_2$  ist „positiver“ als  $P_1$

$$U_{21} = -U_{12}$$

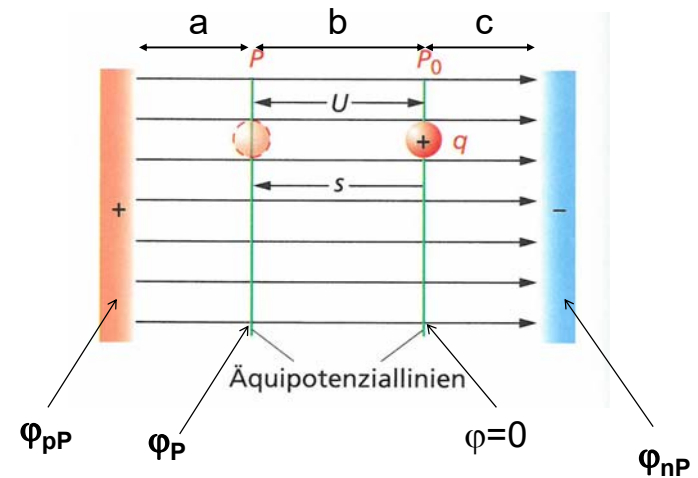
In homogenem Feld:  $U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} = \frac{q|\vec{E}|s}{q} = Es$

## Äquipotentialflächen



Äquipotentialflächen  
verlaufen senkrecht zu den  
Feldlinien

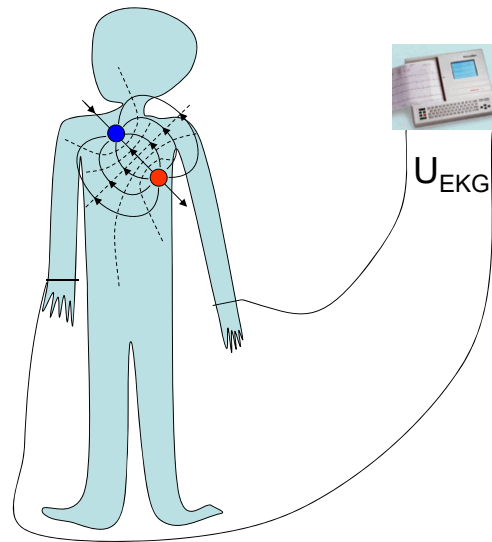
Bewegung an einer Äquipotentialfläche: keine Arbeit!



zB:  $E = 140 \text{ N/C}$ ,  $a = 2 \text{ cm}$ ,  $b = 3 \text{ cm}$ ,  $c = 2 \text{ cm}$

$\varphi_{pP} = ?$   $\varphi_P = ?$   $\varphi_{nP} = ?$

## Medizinische Anwendung: EKG



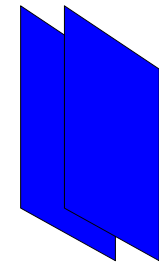
## Kapazität des Kondensators

$$Q = C U \quad \text{Ladungsspeicherungsfähigkeit}$$

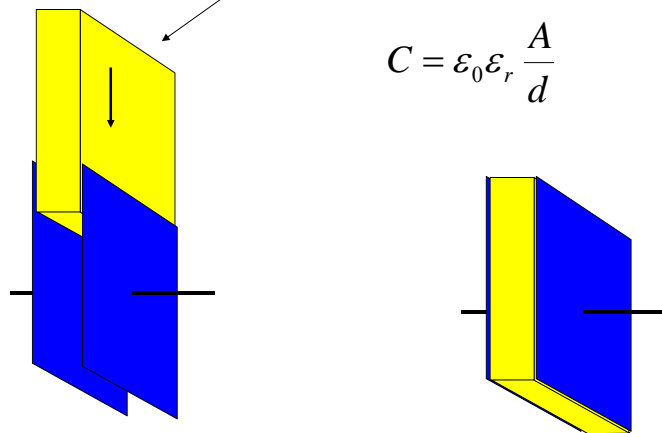
$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{Einheit: Farad, F} \quad 1\text{F} = \frac{1\text{C}}{1\text{V}}$$

Für Plattenkondensator gilt:

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

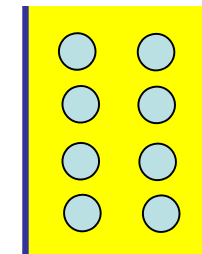


Dielektrikum zwischen  
Kondensatorplatten



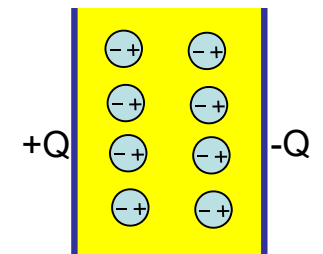
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Ohne Feld

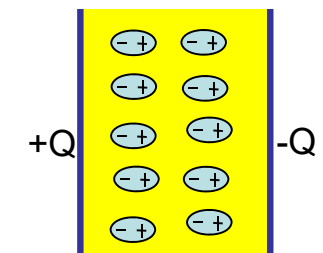
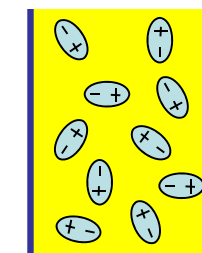


Polarisierbare  
Moleküle

Im elektr. Feld



Polare  
Moleküle



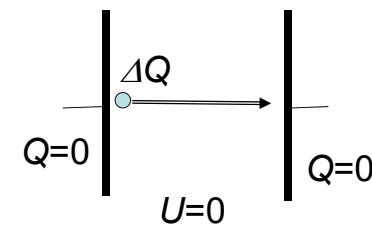


## Energiespeicherung im Kondensator

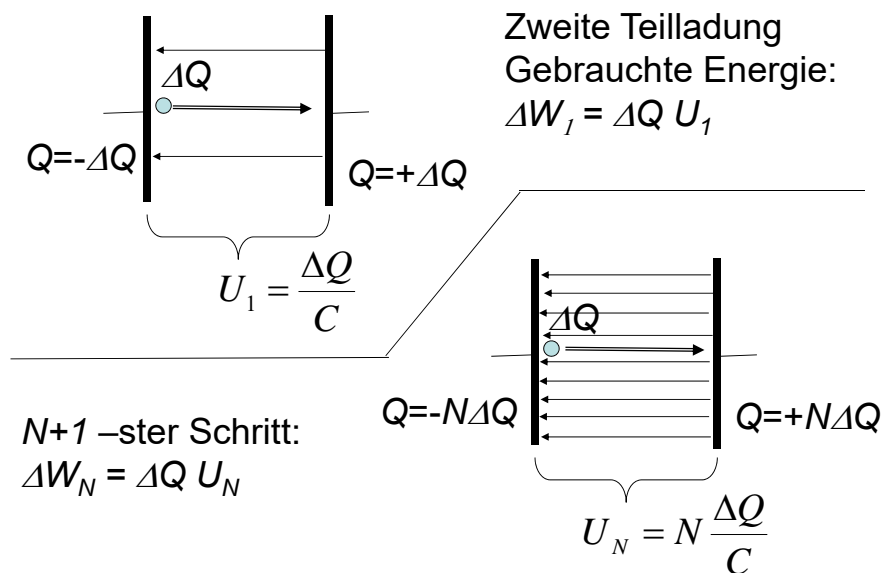
Welche Energie ist nötig um einen Kondensator mit  $Q$  Ladung an  $U$  Spannung aufzuladen?

Aufladung in kleinen Schritten:

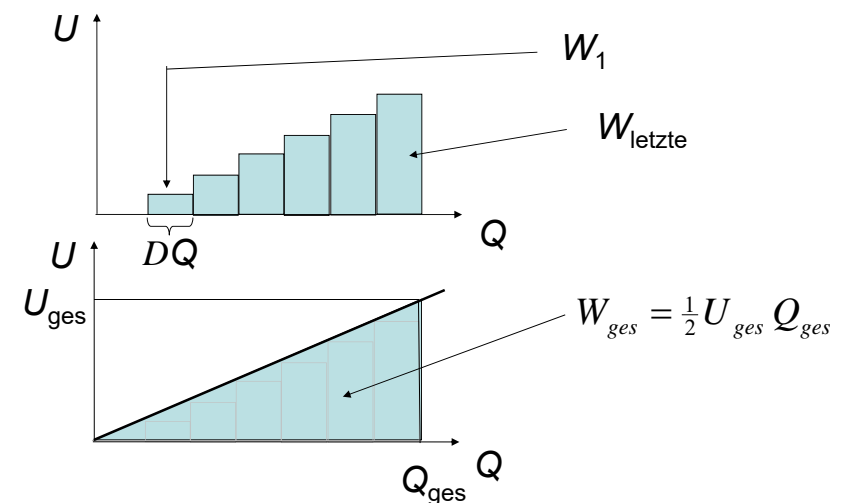
$\Delta Q$  Teilladung wird von einer Platte zur anderen Platte gebracht



Erste Teilladung:  
Ohne Energie!  
Kein Feld !



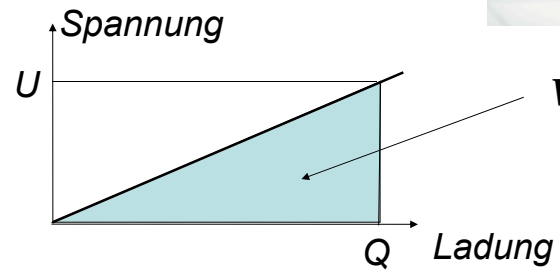
## Graphische Darstellung der Aufladungsenergie



Die in dem Kondensator gespeicherte Energie:

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

$(Q = UC)$



$$W = \frac{1}{2} U Q$$

