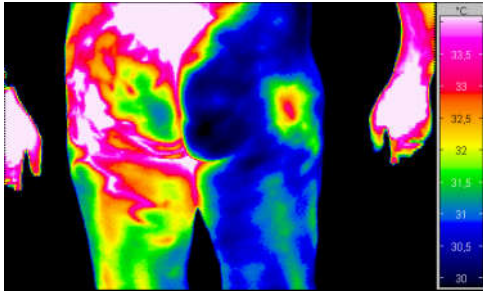
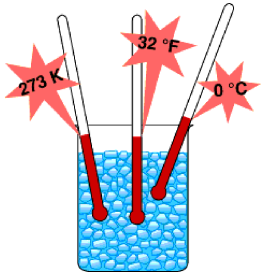


# Grundlagen der medizinischen Biophysik

7. Vorlesung 01. 10. 2020

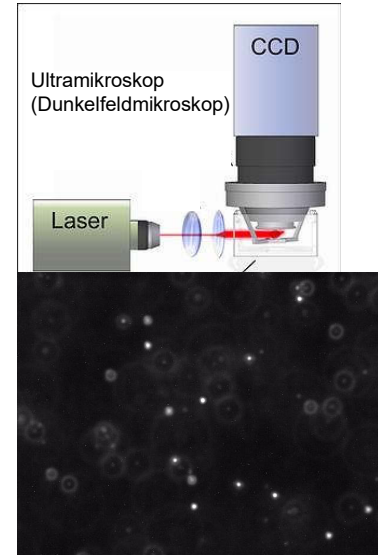
Ádám Orosz  
Wärmelehre



1. Thermische Energie
2. Temperatur und Temperaturskalen
3. Wärme
4. Wärmekapazität und spezifische Wärmekapazität
5. Aggregatzustände
6. Phasenumwandlung und Umwandlungswärme
7. Ideales Gas

1

# Thermische Bewegung und thermische Energie



Die thermische Energie eines Körpers umfasst die Energie der verschiedenen Bewegungen (Translation, Vibration, Rotation) der Teilchen innerhalb eines Körpers.

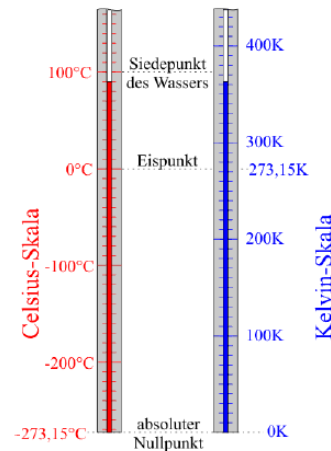
- Die **Temperatur** ist ein Maß für die **thermische Energie** des Körpers

$$\left( \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT \right)$$

2

## Temperatur und Temperaturskalen

- Ein zentraler Begriff der Wärmelehre ist die Temperatur (SI-Basisgröße)
- Sie charakterisiert den Zustand des jeweiligen Körpers und ein **Maß für die thermische Energie** des Körpers
- Gemessen wird die Temperatur in der Physik auf der **Kelvin-Skala** (Einheit: Kelvin)
- Die Kelvin-Skala besitzt einen **absoluten Nullpunkt** (0 K), aber keine obere Grenze
- Beim absoluten Nullpunkt würden, sofern dieser erreicht werden könnte, sich die Teilchen des Körpers nicht mehr bewegen
- **Viele Eigenschaften von Körpern verändern sich abhängig von** ihrer jeweiligen **Temperatur**, wie z.B.:
  - Volumen (thermische Ausdehnung)
  - Farbe
  - Elektrischer Widerstand
  - Druck eines Gases



$$t_{\text{Celsius}} = T_{\text{Kelvin}} - 273$$

$$T_{\text{Kelvin}} = t_{\text{Celsius}} + 273$$

- Die zwei Temperaturskalen sind im Vergleich zueinander verschoben – die Schritte der beiden Skalen sind jedoch gleich groß

3

## Wärme und Wärmekapazität

**Wärme** (Formelzeichen  $Q$ ): Die von einem Körper auf den anderen übertragene thermische Energie.

Eine alte Maßeinheit ist die Kalorie (cal): 1 cal = 4,186 J

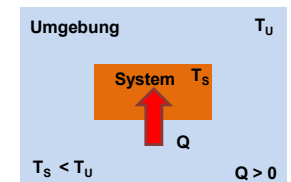
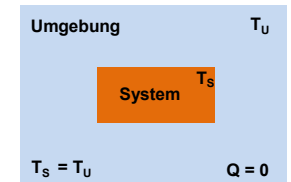
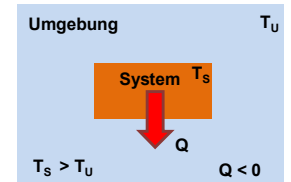
Mit Hilfe der **Wärmekapazität  $C$**  kann ein Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung  $\Delta T$  eines Körpers und der dabei aufgenommenen oder abgegebenen Wärme  $Q$  hergestellt werden:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \left( \frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$$

- Möchte man die Temperatur eines Körpers erhöhen, so muss ihm Wärme zugeführt werden:  $Q$  und  $\Delta T$  sind positiv
- Möchte man die Temperatur eines Körpers erniedrigen, so muss Wärme von ihm abgeführt werden:  $Q$  und  $\Delta T$  sind negativ
- Die Wärmekapazität eines Körpers hängt von dem **Material** des Körpers und seiner **Masse** ab,  $C \sim m \rightarrow$

**Spezifische Wärmekapazität  $c$ :**  $c = \frac{C}{m} \left( \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \right)$

Die Kombination der zwei Formeln:  $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$



4

## Übung

### Aufgabe:

Man möchte 2 dl Orangensaft von 28°C auf 8°C abkühlen. Wie viel Wärme muss entzogen werden? (Die Dichte des Saftes beträgt 1,02 g/cm³.)



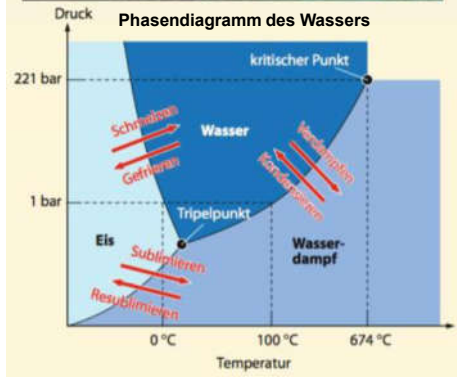
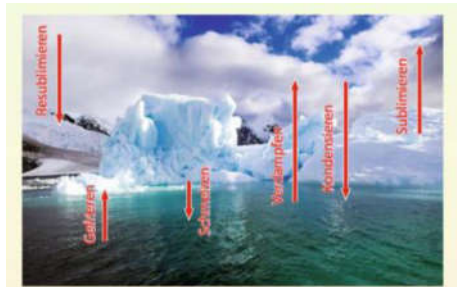
Material	Spez. Wärmekapazität, $c$ (J/kg·K)
Saft	4100



5

## Aggregatzustände

- Aggregatzustände sind Erscheinungsformen, in denen ein Stoff abhängig von den äußeren Bedingungen (z.B. Temperatur und Druck) vorliegen kann
- Die Temperatur der Umwandlungen ändert sich in Abhängigkeit vom Druck - Phasendiagramm
- Man unterscheidet dabei zwischen den 3 Zuständen: **fest**, **flüssig** und **gasförmig**
- Wasser kann so in drei Zuständen auftreten: Eis, flüssiges Wasser und Wasserdampf
- Die unterschiedlichen Zustände haben gewisse Eigenschaften:
  - Fest:** bestimmtes Volumen und bestimmte Gestalt
  - Flüssig:** bestimmtes Volumen, aber keine bestimmte Gestalt
  - Gasförmig:** kein bestimmtes Volumen und keine bestimmte Gestalt



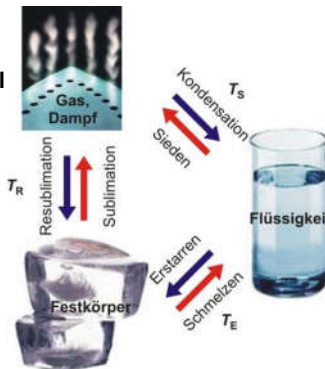
6

## Phasenumwandlung und Umwandlungswärme

- Die Umwandlungswärme  $Q$  entspricht der Menge an Wärme, die bei einer Phasenumwandlung einem Körper zu- oder abgeführt werden muss
- Es gilt:  $Q \sim m$ , die **Umwandlungswärme** ist also **proportional zur Masse** des Körpers →

$$\text{Spezifische Umwandlungswärme: } q = \frac{Q}{m} \left( \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

- Abhängig davon, von was für einem Phasenübergang man spricht, hat die spezifische Umwandlungswärme einen eigenen Namen, z.B.:
  - Spezifische Schmelzwärme
  - Spezifische Verdampfungswärme



Stoff	$q$ (kJ/kg)
Gold — Schmelzwärme	67
Aluminium — Schmelzwärme	396
NaCl — Schmelzwärme	517
Eis — Schmelzwärme	334,4
Wasser — Verdampfungswärme bei 30°C und 101 kPa	2400
Wasser — Verdampfungswärme bei 100°C und 101 kPa	2257

7

## Übung

### Fortsetzung der Aufgabe von der Folie 5:

Man möchte den Saft mit Hilfe von Eiskugeln aus dem Gefrierschrank (−18°C) abkühlen. Wie viel Gramm Eis braucht man dazu? (Die Masse einer Kugel ist 50 g)

Material	$c$ (J/kg·K)	spez. Schmelzwärme $q$ (kJ/kg)
Eis	2090	334,4



8

# Ideales Gas

Ein **Modell** eines Gases mit folgenden Eigenschaften:

- Gasteilchen sind punktförmig
- Gasteilchen besitzen kein Volumen
- Keine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilchen (Ausnahme: elastische Stöße untereinander bzw. mit der Wand des Gefäßes)

Bemerkung:

Im Gegensatz zu den extrem vereinfachten idealen Gasen hat jedes Teilchen eines realen Gases ein Volumen und steht immer wieder über Anziehungs- und Abstoßungskräfte mit seinen Nachbarn in Wechselwirkung.

Anzahl der Teilchen  $N$

Volumen des Behälters  $V$

Druck des Gases  $p$

Temperatur des Gases  $T$

$p \sim T$

$p \sim N$

$p \sim \frac{1}{V}$

**Allgemeine Zustandsgleichung eines idealen Gases:**

$pV = NkT$

Boltzmann-Konstante  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Alternativform:  $pV = \nu RT$

Universelle Gaskonstante  
 $R = 8,31 \text{ J/(molK)}$

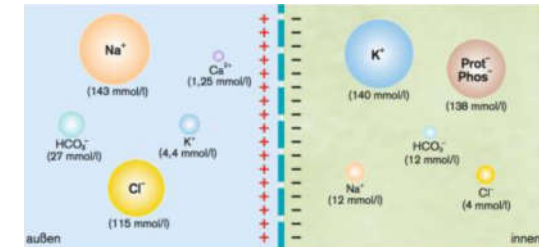
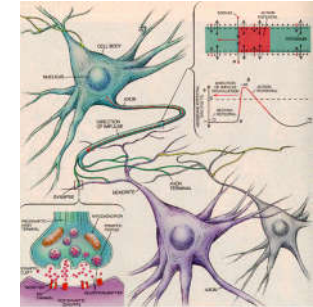
9

# Grundlagen der medizinischen Biophysik

7. Vorlesung 01. 10. 2020

Ádám Orosz

Elektrizitätslehre



10

## Elektrische Ladung und Ladungsträger

### Elektrische Ladung

- Die elektrische Ladung ist **an Materie gebunden**, sie ist eine wesentliche Eigenschaft der Materie (wie die Masse)
- Es gibt positive und negative Ladungen
- **SI-Einheit** der Ladung: **Coulomb (C)**
- Die elektrische Ladung ist eine **gequantelte Größe** und die kleinste Ladungsmenge wird als **Elementarladung (e)** bezeichnet:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

### Elektrische Ladungsträger

- Ladungsträger sind Teilchen, die eine elektrische Ladung tragen, z. B.
  - das Elektron, seine Ladung ist  $-e$
  - das Proton, seine Ladung ist  $+e$

### Faraday-Konstante (F)

- Die Faraday-Konstante entspricht der **Gesamtladung von 1 mol Protonen**:

$$F = N_A \cdot e = 6,03 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 96500 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$$

11

## Aufladung eines Körpers

- Atome, Moleküle, makroskopische Objekte sind im allgemeinen elektrisch neutral, da diese gleich viele Elektronen wie Protonen enthalten
- Körper (Atome, Moleküle, makroskopische Körper) können durch Entfernung oder durch Zuführen von Elektronen netto elektrische Ladung erhalten



Z. B.:

11 Protonen

11 Elektronen

Na

Ein Elektron wird entfernt.

$\text{Na}^+$ : Positives **Kation** mit einer Ladung von  $1e$

17 Protonen

17 Elektronen

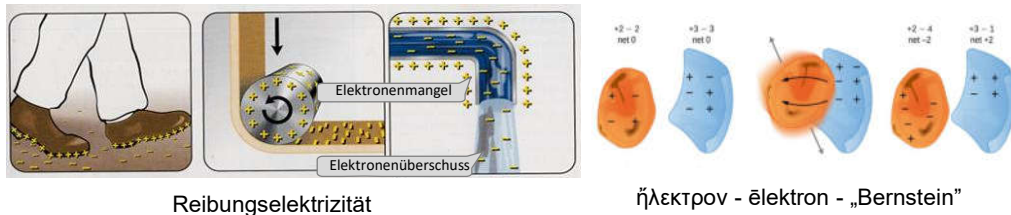
Cl

Ein Elektron wird zugeführt.

$\text{Cl}^-$ : Negatives **Anion** mit einer Ladung von  $-1e$

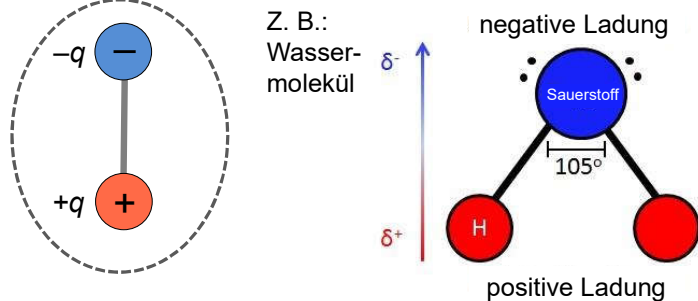
12

# Aufladung eines Körpers



## Elektrischer Dipol

- Die **Anordnung** von **zwei gleich großen ungleichnamigen Ladungen**  $q$  bei einem Abstand.
- Insgesamt bleibt der Körper neutral.



13

# Wechselwirkungen zwischen Ladungen

Gleichnamig geladene Körper stoßen einander ab.	Ungleichnamig geladene Körper ziehen einander an.
$F \leftarrow + \quad + \rightarrow F$ $F \leftarrow - \quad - \rightarrow F$	$+ \rightarrow F \quad F \leftarrow -$

$$\text{Coulomb-Gesetz: } F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Das Gesetz ist analog zum Gravitationsgesetz
- Die elektrische Anziehungskräfte zwischen dem Atomkern und den Elektronen halten das Atom zusammen!

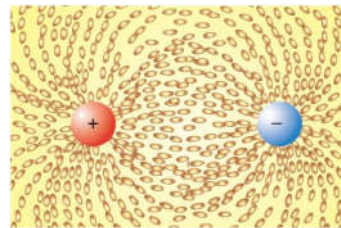
Woher wissen zwei Ladungen von einer Entfernung, dass sie sich anziehen oder abstoßen müssen?

Das elektrische Feld dient als „Vermittler“ zwischen den Ladungen.

14

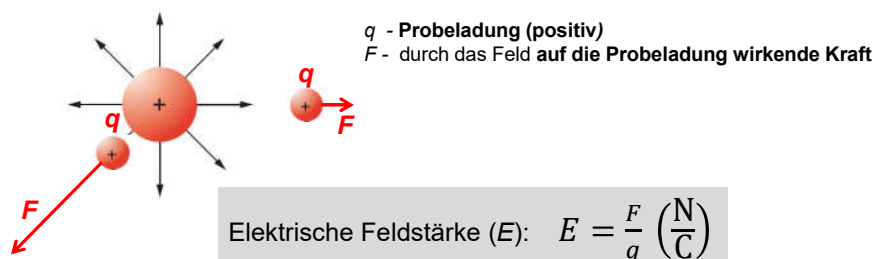
## Elektrisches Feld

- Ein **Modell** für die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Ladungen: **Ladungen erzeugen** um sich herum ein **elektrisches Feld** und üben nicht direkt **Kräfte** aufeinander aus, sondern **durch das elektrische Feld**.
- Das Feld wird durch **Feldlinien** veranschaulicht; dies sind Kurven, deren **Tangenten** an jedem Punkt die **Richtung des Feldes**, d. h. die Richtung der Kraftwirkung, anzeigen und deren **Dichte** zur **Stärke** des Feldes proportional ist.



1 Grißkörner im elektrischen Feld zwischen zwei ungleichnamig geladenen Elektroden

## Elektrische Feldstärke



15

## Homogene und inhomogene elektrische Felder

- Elektrische Feldstärke ist **an jedem Ort gleich**.
- Die Feldlinien laufen parallel und in gleichem Abstand voneinander.

- Elektrische Feldstärke (Richtung oder Größe oder beide) ist **von Ort zu Ort unterschiedlich**.

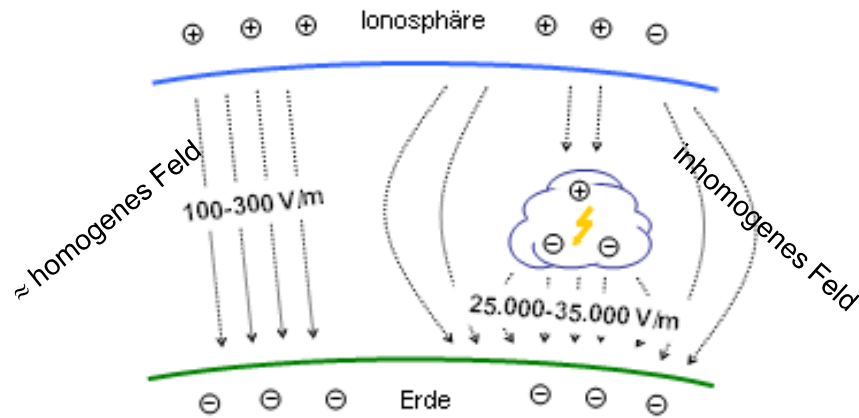
Homogenes Feld	Inhomogene Felder	
Feld zwischen zwei ungleichnamig geladenen Platten	Feld zwischen zwei geladenen Kugeln Dipolfeld	Feld um eine geladene Kugel (Radialfeld) Radialfeld

z. B. Plattenkondensator (zwei leitende Platten durch einen Isolator voneinander getrennt)

16



# Elektrisches Feld der Erde

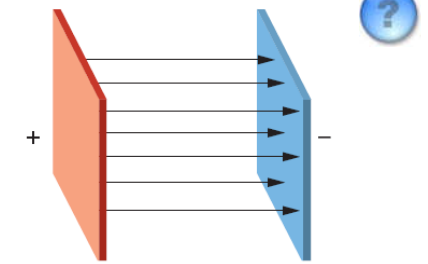


17

# Übung

Die Feldstärke des homogenen Feldes in der Abbildung beträgt 2400 N/C.

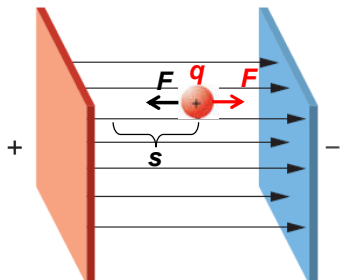
a) Man platziert eine Probeladung  $q = 0,05 \text{ C}$  in das Feld. Welche Kraft wirkt auf die Probeladung (Betrag und Richtung)?



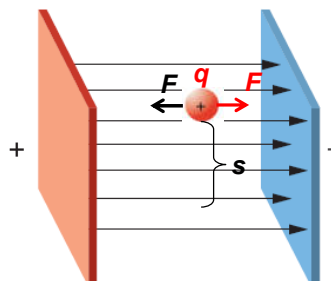
b) Man platziert ein Elektron in das Feld. Welche Kraft wirkt auf das Elektron (Betrag und Richtung)?

18

## Arbeit im elektrischen Feld



- Auf eine sich in einem elektrischen Feld befindende Ladung wirkt eine Kraft, die **elektrische Kraft**:  $F = E \cdot q$
- Um das Teilchen **entgegen der elektrischen Kraft** entlang des **Weges s** zu **bewegen**, muss die **Arbeit W** verrichtet werden:  $W = F \cdot s = E \cdot q \cdot s$

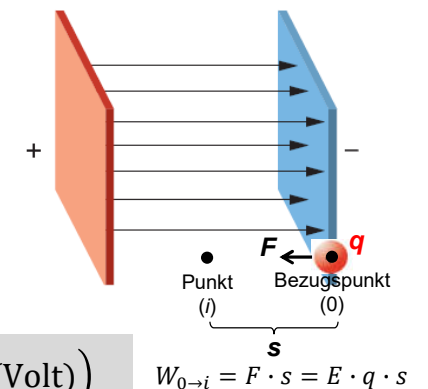


- Wird das Teilchen **senkrecht zu den Feldlinien** bewegt, so muss **keine Arbeit** verrichtet werden:  $W = E \cdot q \cdot s \cdot \cos 90^\circ = 0$
- Eine schräge Bewegung im Feld kann aus einer wagrechten und einer senkrechten Bewegung zusammengesetzt werden

19

## Elektrisches Potenzial

- Jedem Punkt eines elektrischen Feldes kann ein **Potenzial** ( $\varphi$ ) zugeordnet werden
- Dieses Potenzial entspricht der Arbeit, die man verrichten müsste, um eine Ladung von 1 C vom (willkürlich gewählten) Bezugspunkt (0) zum entsprechenden Punkt des Feldes (i) zu befördern
- Zum Bezugspunkt wird das Potenzial von 0 **willkürlich** zugeordnet



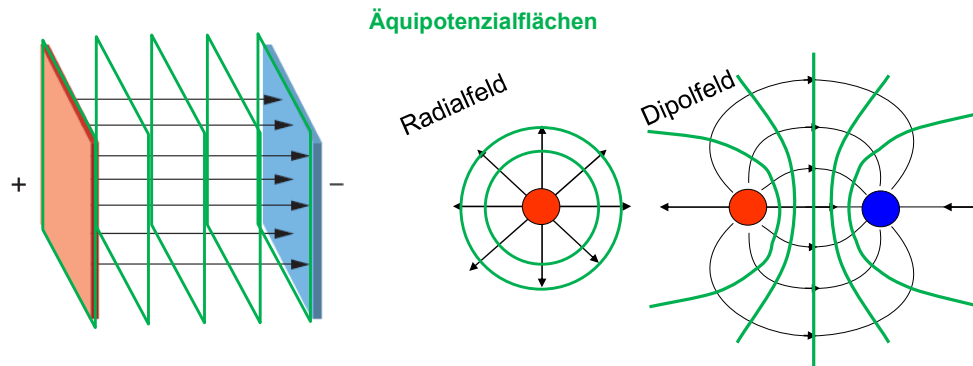
$$\text{Elektrisches Potenzial } (\varphi): \varphi_i = \frac{W_{0 \rightarrow i}}{q} \left( \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V (Volt)} \right)$$

$$\text{Im Falle eines homogenen Feldes: } \varphi_i = \frac{W_{0 \rightarrow i}}{q} = \frac{E \cdot q \cdot s}{q} = E \cdot s$$

20

# Äquipotenzialflächen

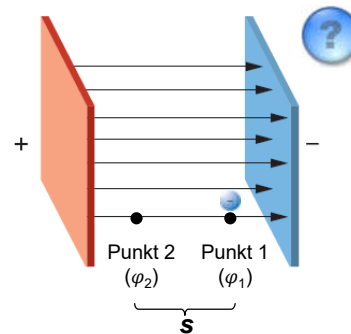
- **Alle Punkte**, die das **gleiche Potenzial** besitzen, liegen auf einer Fläche, der **Äquipotenzialfläche**
- Die **Feldlinien** verlaufen **senkrecht** zu den Äquipotenzialflächen
- Bewegt man eine Ladung **innerhalb** einer Äquipotenzialfläche, so wird **keine Arbeit** verrichtet
- In **homogenen Feldern** sind die Äquipotenzialflächen **Ebenen**, in **inhomogenen Feldern** beliebig **gekrümmte** Flächen



21

## Übung

1. Die Feldstärke des Feldes in der Abbildung beträgt 2400 N/C.
- b) Berechnen Sie die Potenzialwerte der Punkte 1 und 2.



- a) Berechnen Sie die Spannung zwischen den Punkten 1 und 2.

2. Man platziert ein Elektron in den Punkt 1.

- a) Wie groß ist die Arbeit, die das Feld an dem Elektron vom Punkt 1 bis zum Punkt 2 verrichtet?

- b) Wie groß ist die Geschwindigkeit des Elektrons im Punkt 2, wenn es im Punkt 1 aus Ruhe startet?

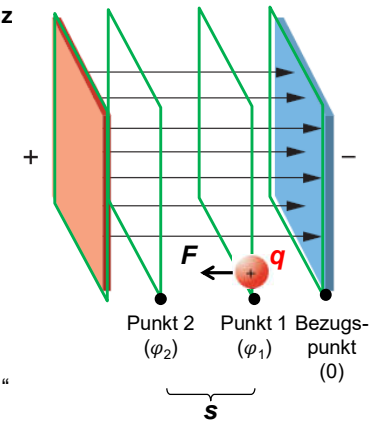
23

# Elektrische Spannung

- Die elektrische **Spannung** entspricht der **Potenzialdifferenz** zwischen zwei Punkten
- Dies entspricht der Arbeit, die geleistet werden muss, um eine Ladung der Größe 1 C von einem „Punkt 1“ zu einem anderen „Punkt 2“ in dem elektrischen Feld zu bringen:

$$U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$$

- Muss **gegen das Feld** Arbeit verrichtet werden, so ist die Arbeit und auch die Spannung **positiv** – „Punkt 2“ hat also ein höheres elektrisches Potenzial als „Punkt 1“
- Ist die Arbeit und damit auch die Spannung **negativ**, so hat „Punkt 2“ ein niedrigeres elektrisches Potenzial als „Punkt 1“



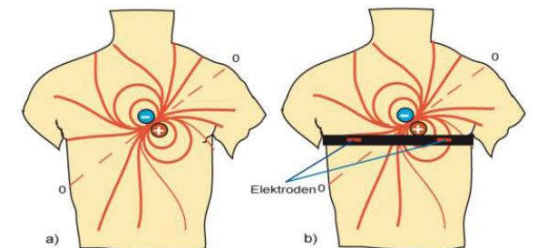
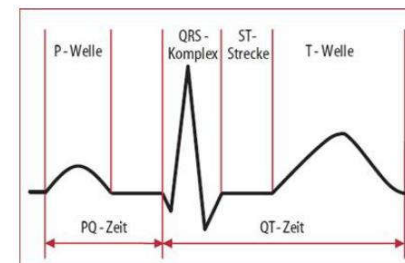
Im Falle eines homogenen Feldes:  $U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} = \frac{E \cdot q \cdot s}{q} = E \cdot s$

$$U_{21} = E \cdot s$$

22

## Äquipotenzialflächen bei EKG

- Beim EKG werden zwischen verschiedensten Punkten (Elektroden) **Potentialdifferenzen** gemessen (Ableitungen)
- Sitzen zwei Elektroden auf einer ÄP, so ist die Potentialdifferenz:  $U = 0$  V
- Anhand der gemessenen Potentialdifferenzen und deren **zeitlichem Verlauf** kann auf die Herzaktivität und pathologische Prozesse zurückgeschlossen werden



24

**Hausaufgaben:** Grundschrift Kapitel 9 und 10