

# Vorlesung 4

Karim Kouz

WS 2016/2017: Grundlagen der medizinischen Biophysik

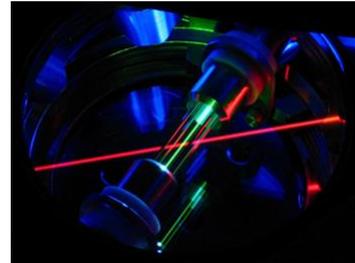
# (VIII) Wärmehlehre

Karim Kouz

WS 2016/2017: Grundlagen der medizinischen Biophysik

# Wärmelehre

- Ein zentraler Begriff der Wärmelehre ist die Temperatur (SI-Basisgröße)
- Sie ist eine Eigenschaft 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
  - Farbe
  - Elektrischer Widerstand
  - Druck eines Gases



In die Ionenfalle, die Teil einer Atomuhr ist, werden Thoriumionen bis nahe an den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt. Die Genauigkeit dieser Atomuhren ist damit so exakt, dass auf das Alter des Universums von knapp 14 Milliarden gerechnet, gerade einmal eine Abweichung von rund einer Zehntelsekunde festzustellen wäre.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [http://www.physik.uni-dortmund.de/~www/166633/News\\_Buamrtrng\\_Les\\_dtrapsntrng\\_Nakrtrng.html](http://www.physik.uni-dortmund.de/~www/166633/News_Buamrtrng_Les_dtrapsntrng_Nakrtrng.html)

3

# Temperaturabhängige Eigenschaften

- Die Veränderung von Eigenschaften eines Körpers, abhängig von seiner Temperatur, wird in vielen Geräten ausgenutzt
- Z.B. wird die Ausdehnung von Flüssigkeiten in Thermometern ausgenutzt, um die Temperatur zu messen



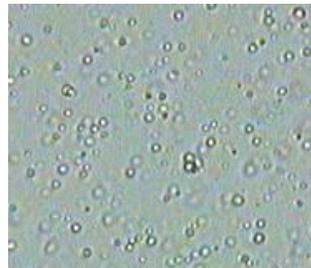
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: [http://www.fachbereich-physik.uni-dortmund.de/~www/166633/News\\_Buamrtrng\\_Les\\_dtrapsntrng\\_Nakrtrng.html](http://www.fachbereich-physik.uni-dortmund.de/~www/166633/News_Buamrtrng_Les_dtrapsntrng_Nakrtrng.html)

4

# Thermische Energie

- Die thermische Energie eines Körpers umfasst die Energie der verschiedenen Bewegungen der Teilchen innerhalb eines Körpers und die Wechselwirkungsenergien dieser Teilchen
- Die Bewegung von Teilchen in Flüssigkeiten oder Gasen, aufgrund von thermischer Energie, wird Brownsche Molekularbewegung genannt



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.kit.edu/de/lehre/biophysik/temperatur-und-lebensebenenmodell/fernebeobachtung>

5

# Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

- Versuch:
  - Ein heißer Kupferstab wird in engen Kontakt mit einem kalten Eisenstab gebracht
- Beobachtung:
  - Der Kupferstab kühlt sich ab und der Eisenstab wird wärmer – beide Stäbe stehen im thermischen Kontakt
  - Dabei verkürzt sich der Kupferstab und der Eisenstab dehnt sich beim Erwärmen aus
  - Nach einiger Zeit kommen beide Vorgänge zum Stillstand und es lässt sich keine Längenänderung mehr beobachten – die beiden Stäbe stehen im thermischen Gleichgewicht



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Messen, Genaue Messen, Christen, Christen, 2015, Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., Hr. v. Jerry Walker, Springer Spektrum

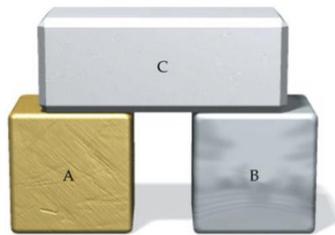
6

# Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

## • Versuch:

- Ein heißer Kupferstab wird in eine Schale mit kaltem Wasser gelegt
- Der Kupferstab kühlt dabei ab und wird kürzer, wohingegen die Wassertemperatur ansteigt
- Sobald der Stab nicht mehr kürzer wird (thermisches Gleichgewicht), wird ein kalter Eisenstab etwas entfernt von dem Kupferstab in die Schale gelegt
- Der Eisenstab wird wärmer, bis er mit dem Wasser im thermischen Gleichgewicht steht
- Werden nun beide Stäbe in engen Kontakt gebracht, ändern sich ihre Längen nicht mehr – diesen Grundsatz nennt man Nullten Hauptsatz der Thermodynamik

Befinden sich zwei Körper im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten, so stehen sie auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene: Kommer, Christoph (2013): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jerry Walker, Springer: Spektrum

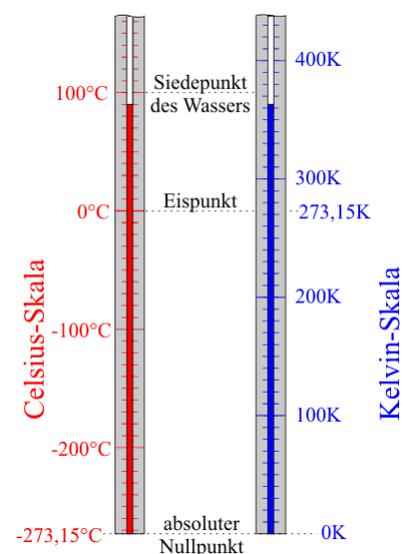
7

# Temperaturskalen

- Die für uns gängigen Temperaturskalen sind die Celsius- und die Kelvinskala
- Für den nichtwissenschaftlichen Gebrauch ist bei uns die Celsiusskala von Bedeutung (Einheit: Grad Celsius), wobei gilt:

$$T_{Celsius} = T_{Kelvin} - 273^{\circ}$$

- Die Celsiusskala hat als willkürlich festgelegten Nullpunkt 0°C – die Temperatur von schmelzendem Eis
- Die zwei Temperaturskalen sind also im Vergleich zueinander verschoben – die Schritte der beiden Skalen sind jedoch gleich groß



Quelle: <http://www.bsp.physik.de/Themenbereich/Temperatur-und-Lebtema.html>

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

8

## Unterkühlung (Thermodynamik)

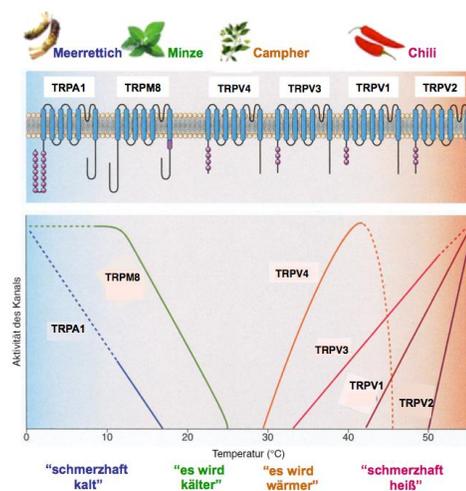
- Bezeichnet in der Thermodynamik die Absenkung der Temperatur einer Flüssigkeit unter den Gefrierpunkt, ohne dass die Flüssigkeit erstarrt
- Der Schmelzpunkt von Eis liegt bei 0°C – beim Gefrierpunkt von Wasser verhält es sich aus kinetischen Gründen anders
- Damit das Wasser gefriert, müssen Eiskristalle mit einer bestimmten Mindestgröße ausgebildet werden (spontan oder durch Kristallisationskeim/Erschütterung)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

9

## Temperaturempfinden

- Das subjektive Temperaturempfinden entspricht nicht immer der objektiv messbaren Temperatur
- Ein Grund dafür ist, dass Temperaturrezeptoren, neben Wärme und Kälte, auch auf bestimmte Stoffe reagieren
- Eine andere „Täuschung“ ist die paradoxe Kälteempfindung



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Neurowissenschaften, Bear, Connors, 3. Auflage, Springer-Verlag

10

# Thermische Ausdehnung

- Die meisten Körper dehnen sich bei Erwärmung aus (Längen- und Volumenausdehnung) und ziehen sich bei Abkühlung wieder zusammen
- Dabei gilt für die Längenausdehnung:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$\alpha$ : linearer Längenausdehnungskoeffizient

- Für die Volumenausdehnung gilt:

$$\Delta V = V \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$\beta$ : Volumenausdehnungskoeffizient



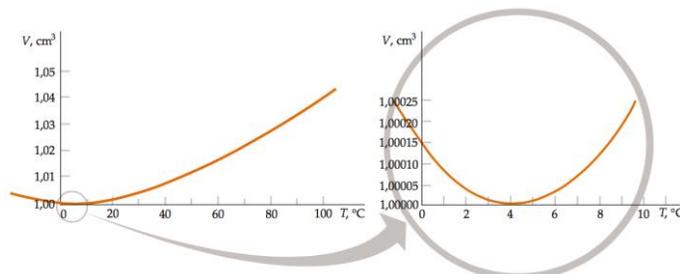
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph [2015] Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jimmy Wagner, Springer, Spektrum

11

# Anomalie des Wassers

- Fluide und Festkörper folgen eigentlich dem Volumenausdehnungs-Gesetz
- Wasser, das bekannteste Fluid, jedoch nicht:
  - Oberhalb von 4°C dehnt sich Wasser aus
  - Zwischen 0°C und 4°C zieht sich Wasser mit zunehmender Temperatur zusammen



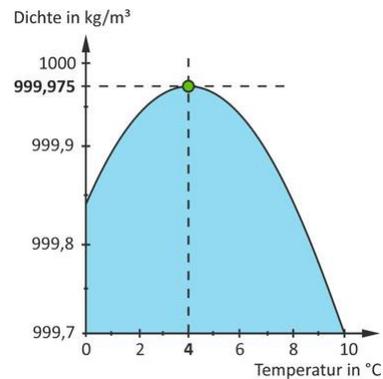
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Paul A., Mosca, Gene, Kommer, Christoph [2015] Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jimmy Wagner, Springer, Spektrum

12

# Anomalie des Wassers

- Fluide und Festkörper folgen eigentlich dem Volumenausdehnungs-Gesetz
- Wasser, das bekannteste Fluid, jedoch nicht:
  - Oberhalb von 4°C dehnt sich Wasser aus
  - Zwischen 0°C und 4°C zieht sich Wasser mit zunehmender Temperatur zusammen
- **Die Dichte von Wasser hat also bei ungefähr 4°C ein Maximum**

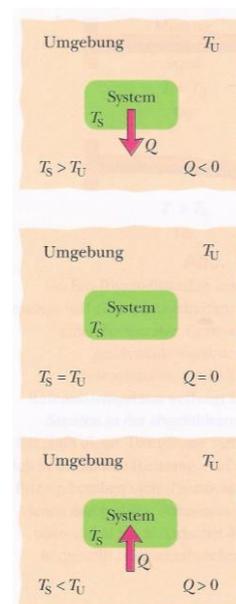


Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

13

# Wärme

- Versuch:
  - Eine heiße Tasse Kaffee wird auf den Küchentisch gestellt
  - Das System „Kaffeetasse“ gibt solange Energie ab, bis es die Temperatur der Küche erreicht, die sich bei diesem Vorgang nur vergleichsweise wenig ändert
- Die übertragene Energie wird als Wärme bezeichnet und mit  $Q$  abgekürzt
- Wärme ist also die zwischen einem System und seiner Umgebung aufgrund eines Temperaturunterschiedes ausgetauschte Energie
- Die SI-Einheit der Wärme ist das Joule



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Physik, Halliday, Resnick, Walker, WILEY-VCH

14

## Wärmekapazität ( $C$ )

- 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

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

15

## Spezifische Wärme(kapazität) ( $c$ )

- Die Wärmekapazität eines Körpers hängt von dem Material des Körpers und seiner Masse ab
- Die spezifische Wärmekapazität ist eine stoffspezifische Größe und ergibt sich als:

$$c = \frac{C}{m} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

- Ein Wert von  $c = 5 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  bedeutet, dass 5 J nötig sind, um die Temperatur von 1 kg des Stoffes um 1 K zu ändern
- Mit Hilfe der beiden Ausdrücke erhält man schließlich:

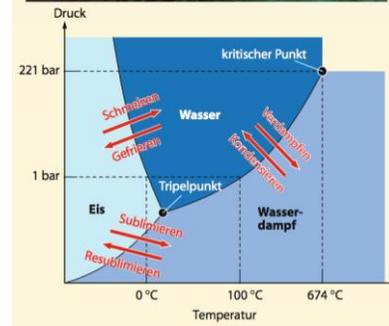
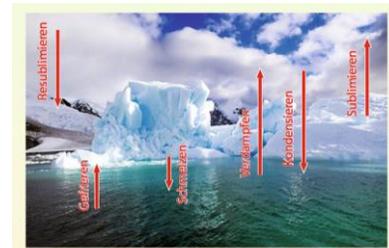
$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

16

# Aggregatzustände

- Aggregatzustände sind Erscheinungsformen, in denen ein Stoff abhängig von den äußeren Bedingungen (z.B. Temperatur und Druck) vorliegen kann
- 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



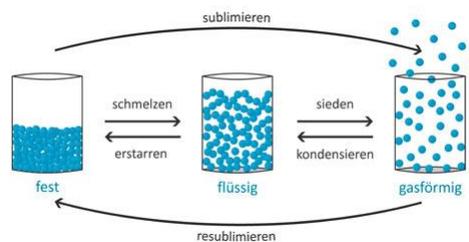
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Erlecher, Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

17

# Phasenumwandlung/-übergang

- Die verschiedenen Aggregatzustände können auch als Phase bezeichnet werden
- Wechselt ein Stoff seinen Aggregatzustand (Phase), so spricht man auch von einer Phasenumwandlung bzw. einem Phasenübergang
- Die jeweiligen Übergänge werden mit bestimmten, zum Teil mehreren Begriffen, bezeichnet



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.klausurarbeit.de/fortbildung/physik/lehre/15050.php>

18

# Umwandlungswärmen

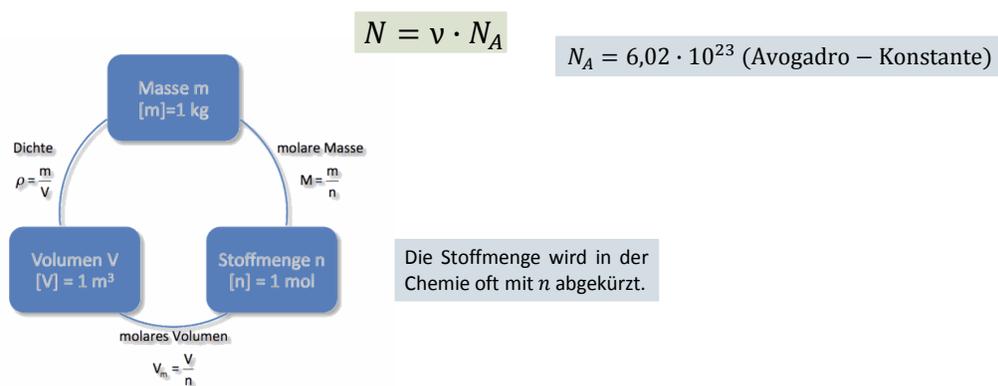
- Die Umwandlungswärme ( $Q$ ) entspricht der Menge an Wärme, die bei einer Phasenumwandlung einem Körper zu- oder abgeführt werden muss
- Es gilt:  $Q \sim m$ , die Umwandlungswärme ist also proportional zur Masse des Körpers
- Spezifische Umwandlungswärme:  $q = \frac{Q}{m} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$
- Abhängig davon, von was für einem Phasenübergang man spricht, hat die spezifische Umwandlungswärme einen eigenen Namen, z.B.:
  - Spezifische Schmelzwärme
  - Spezifische Verdampfungswärme

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

19

# Stoffmenge ( $v$ )

- 1 Mol =  $6,02 \cdot 10^{23}$  Aufbauteilchen (z. B. Atome oder Moleküle)
- Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Anzahl der Teilchen ( $N$ ) in einem System berechnen:



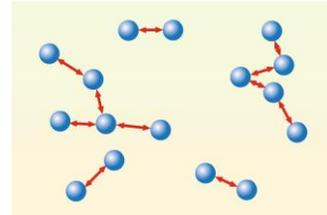
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.igk.uni-wuerzburg.de/chemie/chemie11/lehre/stoffmenge/lehre/stoffmenge.php>

20

## Ideale Gase

- 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)
- Die Temperatur des Gases ist einfach proportional zur durchschnittlichen kinetischen Energie
- Die Stoßkräfte, die die Teilchen auf die Wände des Behälters ausüben, sind zusammen als Gasdruck messbar



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

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Frische: Physik für Biologen und Mediziner, Springer Spektrum Verlag

21

## Allgemeine Zustandsgleichung

- Mit Hilfe der allgemeinen Zustandsgleichung kann der Zusammenhang zwischen Druck ( $p$ ), Volumen ( $V$ ), Stoffmenge ( $\nu$ ) und Temperatur ( $T$ ) eines idealen Gases beschrieben werden:

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$$

$$R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \text{ (ideale Gaskonstante)}$$

- Mit der Definition der Stoffmenge erhält man:

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T$$

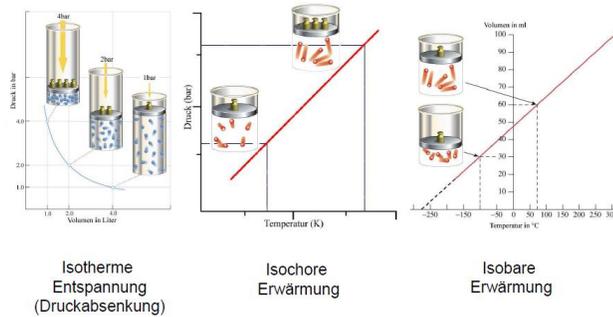
$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \text{ (Boltzmann – Konstante)}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

22

# Spezielle Zustandsänderungen

- Zustandsänderungen können unter bestimmten Bedingungen ablaufen (nicht nur bei idealen Gasen oder Gasen allgemein, sondern bei jedem System):
  - Isobar: bei konstantem Druck
  - Isotherm: bei konstanter Temperatur
  - Isochor: bei konstantem Volumen



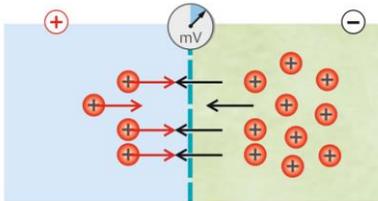
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://konkret.de/dl/fach.de/gas-zustandsaenderung/>

23

(IX, X, XI) E-Lehre 1

## Ladung in der Medizin



Auch Zellmembranen trennen geladene Teilchen (Ionen) und weisen damit einhergehend eine messbare Membranspannung auf. Änderungen der Ladungsverteilung können gefährliche Herzrhythmusstörungen erzeugen.



Ein Defibrillator muss innerhalb kürzester Zeit geladen werden können, um gefährliche Herzrhythmusstörungen beenden zu können.



Herzrhythmusstörungen können u.a. durch die Implantation eines Herzschrittmachers therapiert werden.

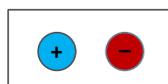
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: <http://www.defibrillator.com.au/products/defibrillators.htm>; Papp, Klaus, Sörensen: Physiologie, Georg Thieme Verlag; <http://www.life-line.com/de/Herzschrittmacher.html>

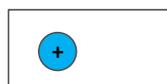
25

## Elektrische Ladung ( $q$ )

- Die Ladung ist eine entscheidende Eigenschaft der Materie
- Es gibt positive und negative elektrische Ladungen
- Ein elektrisch neutraler Körper besitzt gleich viele positive und negative Ladungen
- Positiv geladene Körper weisen einen Elektronenmangel auf
- Negativ geladene Körper weisen einen Elektronenüberschuss auf
- Einheit: Coulomb (C)



Elektrisch neutraler Körper



Positiv geladener Körper



Negativ geladener Körper

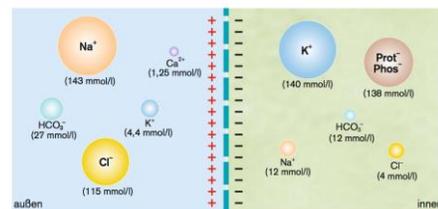
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (2016/16)

26

# Ladungsträger

- Ladungsträger sind Teilchen, die eine elektrische Ladung tragen
- Wichtige Ladungsträger sind:
  - Das Elektron, das eine Ladung von  $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$  trägt
  - Das Proton, das eine Ladung von  $e = +1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$  trägt
- Normalerweise sind Atome, Moleküle und die aus ihnen bestehenden makroskopischen Körper elektrisch neutral
- Durch das Entfernen oder Hinzufügen von Elektronen entstehen positiv oder negativ geladene Körper:
  - Entfernen von Elektronen von einem Atom: Kationen
  - Überschuss von Elektronen bei einem Atom: Anionen



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Phys. Kollo. Sauerhoff, Physiologie, Georg Thieme Verlag

27

# Die Elementarladung

- Die kleinste Ladungsmenge wird als Elementarladung bezeichnet und beträgt:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb (C)}$$

- Alle beobachtbaren Ladungen treten in ganzzahligen Vielfachen der Elementarladung auf, die elektrische Ladung ist also eine **gequantelte Größe**:
  - $\text{Na}^+$ :  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
  - $\text{Ca}^{2+}$ :  $2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
  - $\text{Cl}^-$ :  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

28

## Faraday-Konstante

- Die Faraday-Konstante entspricht der Ladung von 1 Mol Elektronen und beträgt:

$$F = N_A \cdot e = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} \approx 96500 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$$

$N_A$ : Avogadro-Konstante

- In vielen physikalischen und chemischen Berechnungen findet die Faraday-Konstante Verwendung und ist daher von entscheidender Bedeutung (z.B. Nernst-Gleichung)

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

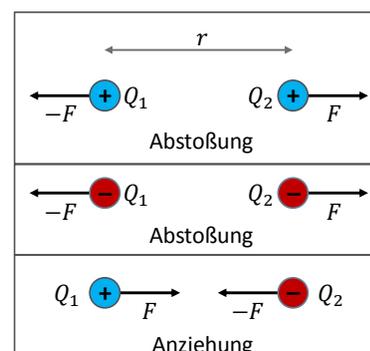
29

## Wechselwirkungen zwischen Ladungen

- Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an
- Mit Hilfe des Coulomb-Gesetzes kann die zwischen zwei Ladungen wirkende Kraft berechnet werden:

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

Stehen mehr als zwei Ladungen in Wechselwirkung zueinander, so addieren sich die Kräfte vektoriell.



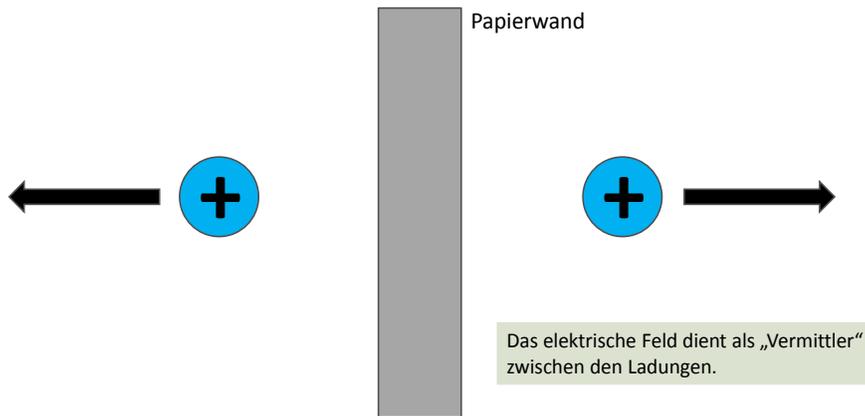
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (09/2016)

30

# Elektrisches Feld

- Woher wissen zwei Ladungen, dass sie sich anziehen oder abstoßen müssen?



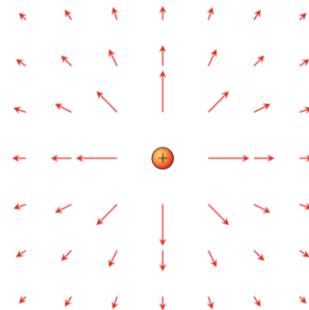
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (2015)

31

# Elektrisches Feld

- Woher wissen zwei Ladungen, dass sie sich anziehen oder abstoßen müssen?
- In der Umgebung von jedem elektrisch geladenen Körper existiert ein elektrisches Feld
- Innerhalb dieses Feldes wirkt auf eine andere Ladung eine Kraft (abstoßend oder anziehend)



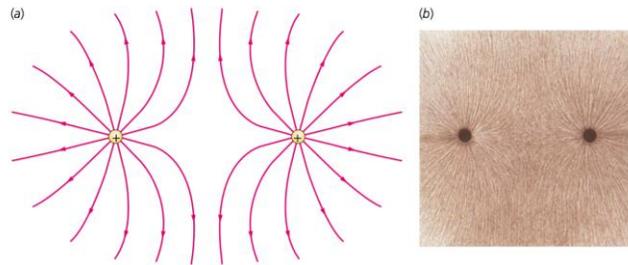
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Barfmann, Feuerhahn, Theoretische Physik, Springer, Spektrum Verlag

32

# Elektrisches Feld

- Zur Veranschaulichung des Feldes dienen Feldlinien:
  - Die Richtung der Feldlinien entspricht der Richtung der Feldstärke (immer von der positiven Ladung ausgehend)
  - Die Dichte der Feldlinien entspricht dem Betrag der Feldstärke



Wie schnell erfährt Ladung 1, dass Ladung 2 sich nähert/entfernt?  
Die Information pflanzt sich als elektromagnetische Welle mit Lichtgeschwindigkeit fort.

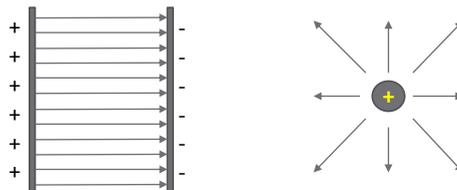
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Physik, für Wissenschaftler und Ingenieure, Springer, Spektrum

33

# Homogene und inhomogene elektrische Felder

- Homogene elektrische Felder haben an jedem Punkt den gleichen Wert: die Feldlinien laufen parallel zueinander in gleichen Abständen
- Inhomogene elektrische Felder haben nicht an jedem Punkt den gleichen Wert: die Feldlinien laufen nicht parallel zueinander und nicht in gleichen Abständen



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz, (09/2016)

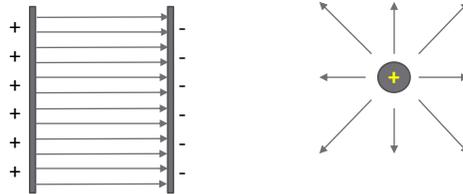
34

## Elektrische Feldstärke ( $E$ )

- Die elektrische Feldstärke beschreibt die Stärke und Richtung eines elektrischen Feldes, also die Fähigkeit des Feldes, Kraft auf Ladungen auszuüben:

$$E = \frac{F}{q} \left[ \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

Ein elektrisches Feld der Größe  $1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$  übt auf eine 1 C große Ladung eine Kraft von 1 N aus.



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (2016)

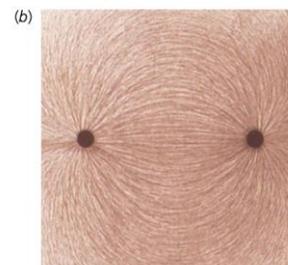
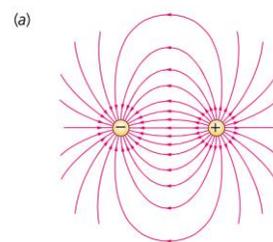
35

## Elektrischer Dipol

- Zwei Ladungen mit gleichem Betrag  $q$ , aber unterschiedlichem Vorzeichen, die einen Abstand  $d$  zueinander besitzen, bezeichnet man als Dipol mit einem dazugehörigen Dipolfeld
- Die Größe des elektrischen Dipols wird mit dem elektrischen Dipol-Moment beschrieben:

$$p = q \cdot d$$

Die Richtung des elektrischen Dipols ist definitionsgemäß vom negativen Ende des Dipols zum positiven Ende hin gerichtet.



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Tipler, Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Springer, Spektrum

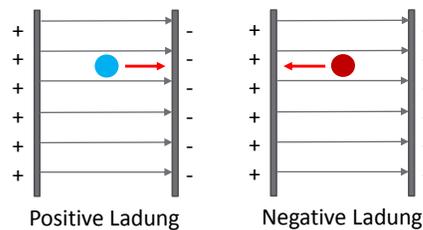
36

## Arbeit im elektrischen Feld

- Auf eine sich in einem elektrischen Feld befindende Ladung wirkt eine Kraft, die elektrische Kraft:

$$F = q \cdot E$$

- Die **elektrische Kraft** auf dieses geladene Teilchen hat:
  - Die Richtung des Feldes, falls die Ladung des Teilchens positiv ist
  - Die entgegengesetzte Richtung des Feldes, falls die Ladung des Teilchens negativ ist



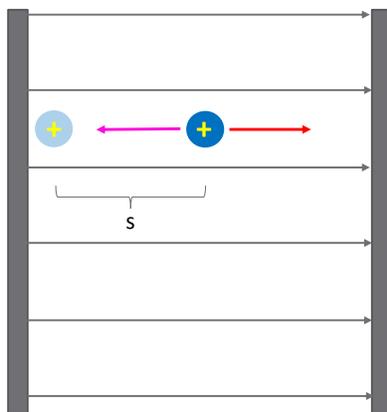
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (09/2016)

37

## Arbeit im elektrischen Feld

- Um das Teilchen entgegen der **elektrischen Kraft** entlang des Weges  $s$  zu bewegen, muss die Arbeit  $W$  verrichtet werden:



$$W = |\vec{F}_a| \cdot s = |\vec{F}_{el}| \cdot s = E \cdot q \cdot s$$

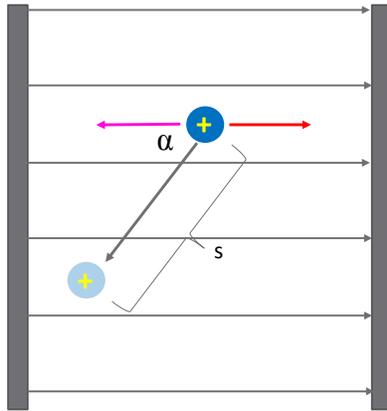
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (09/2016)

38

## Arbeit im elektrischen Feld

- Wird das Teilchen schräg zu den Feldlinien bewegt, so gilt für die zu verrichtende Arbeit:



$$W = E \cdot q \cdot s \cdot \cos \alpha$$

Achtung:

1. Wird das Teilchen senkrecht zu den Feldlinien bewegt, so muss keine Arbeit verrichtet werden:

$$W = E \cdot q \cdot s \cdot \cos 90^\circ = 0 \text{ J}$$

2. Die verrichtete Arbeit ist unabhängig vom Weg.

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (2016)

39

## Elektrisches Potential ( $\varphi$ )

- Jedem Punkt eines elektrischen Feldes kann eine potenzielle Energie zugeordnet werden
- Diese potenzielle Energie entspricht der Arbeit, die man verrichten müsste, um eine Ladung  $Q$  von einem feldfreien Raum (Bezugspunkt) zum entsprechenden Punkt des Feldes zu befördern

$$\varphi_i = \frac{W_{0 \rightarrow i}}{Q} \left[ \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V} \right]$$

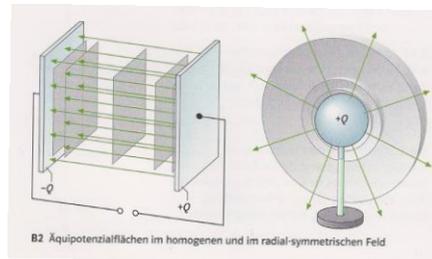
- Das elektrische Potential ist eine Eigenschaft des elektrischen Feldes, unabhängig davon, ob eine Probeladung in das Feld gebracht wurde oder nicht

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

40

# Äquipotentialflächen

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



B2 Äquipotentialflächen im homogenen und im radial-symmetrischen Feld

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Impulse Physik 11/12, W. Bröthamer, Feld + Vorig

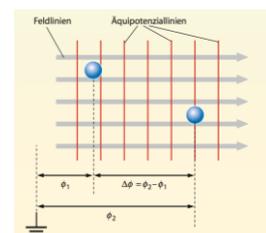
41

# Elektrische Spannung ( $U$ )

- Die elektrische Spannung entspricht der Potentialdifferenz 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:

$$U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} = \varphi(2) - \varphi(1)$$

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



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

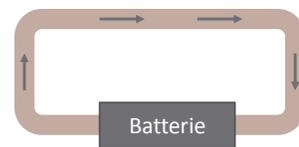
Quelle: Fritzsche, Physik für Biologen und Mediziner, Springer, Spektrum Verlag

42



## Driftgeschwindigkeit

- In einem Kupferdraht bewegen sich die freien Elektronen (Leitungselektronen) ungeordnet aufgrund ihrer thermischen Energie mit Geschwindigkeiten in der Größenordnung  $10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Ein effektiver Ladungstransport findet jedoch nicht statt: es fließt kein Strom
- Wird eine Batterie in die Leiterschleife eingesetzt, so baut sich ein elektrisches Feld innerhalb der Leiterschleife auf
- Die Elektronen beginnen, sich gerichtet zu bewegen: ein Strom fließt
- Die Geschwindigkeit dieser gerichteten Bewegung wird Driftgeschwindigkeit genannt: sie liegt im Bereich von einigen mm/s



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Karim Kouz (©2016)

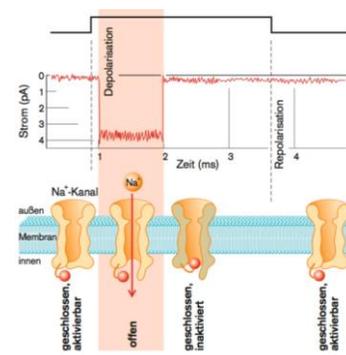
45

## Elektrische Stromstärke ( $I$ )

- Die elektrische Stromstärke ist definiert als die Ladungsmenge  $\Delta q$ , die während der Zeit  $\Delta t$  durch eine gedachte Querschnittsebene eines Leiters tritt:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \text{ [Ampere, A]}$$

Natrium-Ionen, die während des Aktionspotentials durch Natriumkanäle in der Zellmembran fließen, stellen einen elektrischen Stromfluss dar. Die Anzahl der pro Zeiteinheit durch den Kanal fließenden Natrium-Ionen bestimmt dabei die Größe dieses Stromflusses.



Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

Quelle: Peper, Kille, Sillmann, Physiologie, Georg Thieme Verlag

46

