

# Vorlesung 2

Karim Kouz

WS 2015/2016: Grundlagen der medizinischen Biophysik

## (IV) Mechanik 3: Energie und Arbeit

Karim Kouz

WS 2015/2016: Grundlagen der medizinischen Biophysik

# Energie im menschlichen Körper

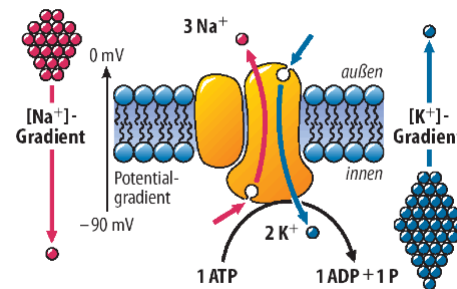
- Energie spielt nicht nur in der Physik eine entscheidende Rolle
- Für die täglichen Lebens- und Leistungsprozesse benötigt der Körper kontinuierlich Energie:
  - Muskelarbeit (Herz, glatte Muskulatur, Skelettmuskulatur)
  - Informationsfluss und Verarbeitung
  - Syntheseleistungen
  - Abbau von Stoffen (toxisch und nicht toxisch)
  - Anpassungsvorgänge
- Der größte Teil der Energie (ca. 70%) wird im Körper dafür verwendet, Ionenpumpen zu betreiben und somit Ionengradienten über Zellmembranen aufrechtzuerhalten – dabei spielt die Natrium-Kalium-Pumpe die weitaus größte Rolle

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

## Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-Pumpe

- Primär aktiver Transporter
- Hemmung durch:
  - Herzglykoside/Digitalis (Digoxin, Digitoxin)
  - Ouabain (g-Strophanthin)
- Arbeitet elektrogen

Die Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-Pumpe erzeugt nicht das Ruhe-Membranpotential, ihr Anteil am Membranpotential beträgt nur wenige mV!



Quelle: Physiologie des Menschen Schmidt, Lang: 30. Auflage Springer Verlag

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

# Klinische Bedeutung – Intoxikation

- Toxine, die die  $\text{Na}^+\text{-K}^+$ -Pumpe hemmen, führen sehr schnell zum Tod
- Bereits kleinste Mengen Toxin (2-3 Blätter vom Fingerhut, Giftpfeilwirkung des Ouabains) können zum Tod führen
- Symptome: Übelkeit und Erbrechen, Durchfall; schwere verschiedenartige, teilweise rasch wechselnde Herzrhythmusstörungen; zentralnervöse Störungen, Delirium, Halluzinationen



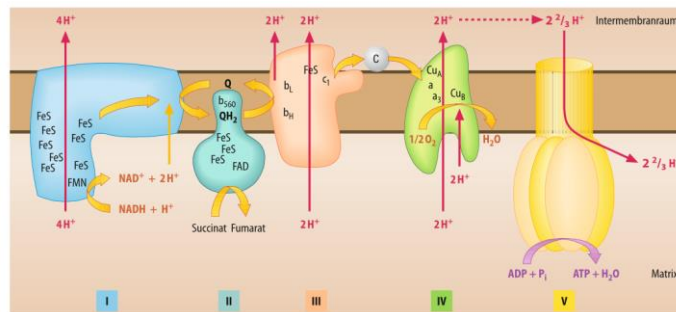
Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: <http://www.botanikstud.de/Botanik/Ordnung/Fingerhutfingerhut.html>; <http://de.wikipedia.org/wiki/Ouabain>

5

# Grundlagen der Thermodynamik

- Energie kann weder erzeugt, noch vernichtet werden – sie kann nur von einem System auf ein anderes übertragen bzw. von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden
- D.h., es ist eigentlich falsch zu sagen, dass der Körper Energie in Form von ATP produziert – vielmehr wandelt er die in einem Protonengradienten steckende Energie in eine andere Energieform – ATP – um



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: Heinrich, Peter C.; Müller, Matthias; Gräber, Peter E.; Biochemie und Zellbiologie, 9. vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch)

6

# Arbeit (W)

- Beim Dehnen einer Feder wird Energie von der Hand auf die Feder übertragen:



- Diese übertragene Energie ist gleich der Arbeit, die die Hand an der Feder verrichtet
- Wird die Feder losgelassen, zieht sich diese zusammen – die übertragene Energie wird dabei sichtbar
- Arbeit ist die Übertragung von Energie durch eine Kraft – die Kraft hat Arbeit an dem Objekt verrichtet

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

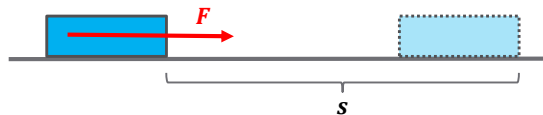
Quelle: Tipler, Paul A. Mosca, Gene Komar, Christoph (2010) Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Aufl. Hr. v. Jenny Wüster, Springer Spektrum

7

# Arbeit (W)

- Arbeit ist das Produkt aus der Kraft (F) und dem Weg (s), sofern:
  - Die Kraft längs des gesamten Weges konstant bleibt
  - Die Kraftwirkung und die Bewegung die gleiche Richtung besitzen

$$W = F \cdot s \text{ [N} \cdot \text{m} = \text{J]}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

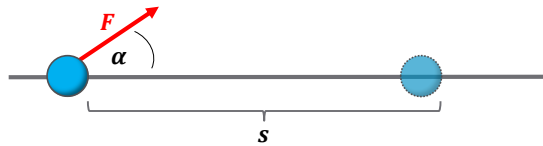
Quelle: Karim Kouz (September 2014)

8

# Arbeit ( $W$ )

- Stimmen die zwei Richtungen (Kraftwirkung und Bewegung) nicht überein, so muss der sich zwischen ihnen befindende Winkel in dem Ausdruck für die Arbeit berücksichtigt werden

$$W = F \cdot s \cdot \cos \alpha \text{ [J]}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: Karim Kouz (September 2014)

9

## Arbeit ( $W$ ) – Zusammenfassung

- Die Arbeit ist – obwohl die Kraft eine vektorielle Größe ist – ein Skalar; somit verfügt die Arbeit über keine Richtung
- Beträgt der Winkel zwischen Kraftrichtung und Bewegungsrichtung  $90^\circ$ , so wird keine Arbeit verrichtet!
- Abhängig von der Kraft, wird die verrichtete Arbeit unterschiedlich bezeichnet:
  - Mechanische Arbeit (Beschleunigungsarbeit, Hubarbeit, Spannarbeit)
  - Elektrische Arbeit
- Energie, die einem Objekt zugeführt wird, entspricht positiven Werten für die Arbeit
- Energie, die von einem Objekt abgeführt wird, entspricht negativen Werten für die Arbeit

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

10



# Leistung ( $P$ )

- Die pro Zeiteinheit verrichtete Arbeit (bzw. zugeführte Energie):

$$P = \frac{W}{t} \text{ [Watt = W]}$$

- Wird ein Körper unter der Einwirkung einer Kraft  $F$  mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt, so beträgt die Leistung:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v$$

- 2 Motoren, die das gleiche Gewicht über eine gleiche Strecke anheben müssen, benötigen dafür die gleiche Energie – der Motor, der dies jedoch schneller erledigt, hat eine höhere Leistung

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

13

# Umrechnung der Energieeinheiten

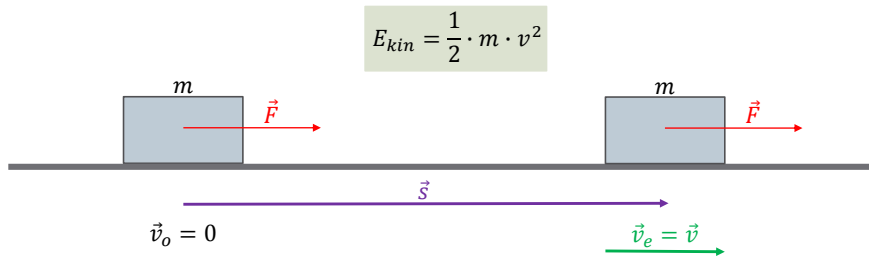
	Joule	Elektronenvolt	Kalorie
1 J =	1	$6,25 \cdot 10^{18}$	0,2389
1 eV =	$1,6 \cdot 10^{-19}$	1	Nicht relevant
1 cal =	4,186	Nicht relevant	1

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

14

# Kinetische Energie

- Ein Körper der Masse  $m$  mit einer Geschwindigkeit  $v$  besitzt kinetische Energie, die sich wie folgt berechnen lässt:



- Beachte: Die kinetische Energie...
  - ...hängt vom Betrag der Geschwindigkeit des Teilchens ab und nicht von seiner Richtung
  - ...kann nie negativ sein

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

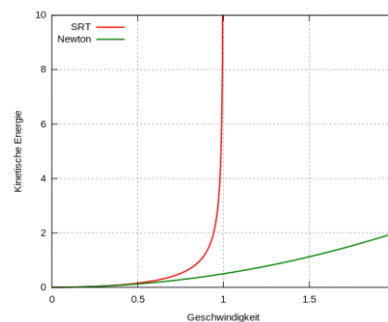
Quelle: Karim Kouz (09/2015)

15

# Relativistische Effekte

- Nähert sich die Geschwindigkeit eines Körpers einigen Prozent Lichtgeschwindigkeit, so müssen relativistische Effekte beachtet werden
- Einer dieser Effekte ist, dass bewegte Massen schwerer werden:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Fotoeffekt#/media/Datei:Relativistische\\_Energie-Impuls-Beziehung.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Fotoeffekt#/media/Datei:Relativistische_Energie-Impuls-Beziehung.png)

16



# Übung

- Ein Elektron habe in einem Stück Kupfer eine kinetische Energie von  $E_{kin} = 6,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Wie groß ist seine Geschwindigkeit?
- Lösung:
  - Gegeben sind folgende Werte:  $E_{kin} = 6,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ,  $m_{Elektron} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
  - Gesucht sind folgende Werte:  $v_{Elektron}$
  - Lösungsformel:  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
  - Umstellen nach der gesuchten Größe:  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}}$
  - Einsetzen der Werte mit den richtigen Einheiten:  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 1,2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

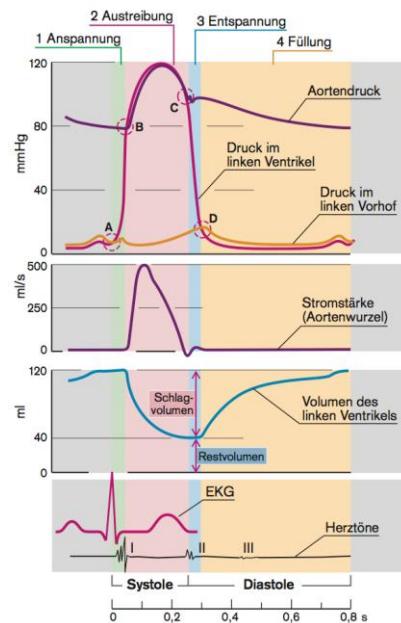
17

# Beschleunigungsarbeit

- Um einem Körper kinetische Energie übertragen zu können, muss Beschleunigungsarbeit verrichtet werden, d.h., eine Kraft muss auf den Körper wirken und diesen beschleunigen:

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (a \cdot t)^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

- Das Herz muss z.B. Beschleunigungsarbeit leisten, um das Blut in Strömung zu versetzen



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: Physiologie: Kinder, Sibermann, 6. Auflage, Thieme Verlag

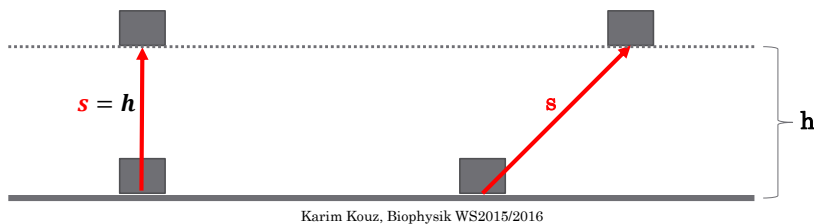
18

# Potenzielle Energie/Lageenergie

- Auf jeden Körper der Masse  $m$  auf der Erde wirkt die Gewichtskraft
- Die Energie, die benötigt wird, um einen solchen Körper auf eine bestimmte Höhe  $h$ , ausgehend von einem willkürlich festgelegten Nullniveau, zu heben, heißt potenzielle Energie und berechnet sich nach:

$$E = m \cdot g \cdot h$$

- Dabei ist die benötigte Energie unabhängig von dem zurückgelegten Weg



Quelle: Karim Kouz (August 2014)

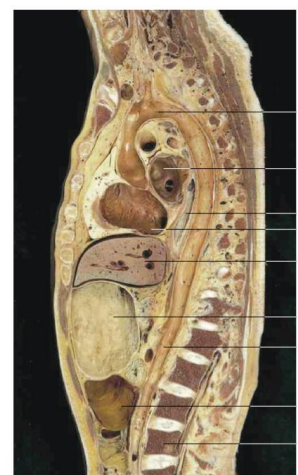
19

# Hubarbeit

- Die beim Anheben eines Körpers um die Höhe  $h$  zu verrichtende Arbeit wird als Hubarbeit bezeichnet und berechnet sich wie folgt:

$$W = F \cdot s = m \cdot g \cdot h$$

- Die verrichtete Arbeit erscheint dann als potenzielle Energie
- Auch das Herz muss Hubarbeit verrichten, da das Herz unterhalb des Aortenbogens liegt



Sagittal section through the thorax, 2 cm lateral to the median plane.

Quelle: Color Atlas of Anatomy: Böhm, Yokochi, Lütjens-Dresold: 70. Edition: Schattauer

20

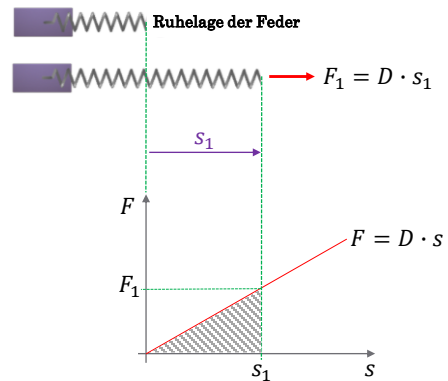
# Spannenergie/elastische Energie

- Zum Spannen einer Feder wird Energie benötigt – die Spannenergie:

$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$$

- Die zu verrichtende Arbeit wird als Spannarbeit bezeichnet:

$$W = F \cdot s = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$$



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: Karim Kouz (09/2013)

21

## Übung

- Eine Schraubenfeder wird durch einen Körper mit einer Masse von 4 kg, der an die Feder gehängt wird, um 1,5 cm verlängert. Berechnen Sie die Energie, die erforderlich ist, um dieselbe Feder um 2 cm zu dehnen.
- Lösung:
  - Gegeben sind folgende Werte:  $m = 4 \text{ kg}$ ,  $s_4 = 1,5 \text{ cm}$ ,  $s = 2 \text{ cm}$
  - Gesucht sind folgende Werte:  $E_{el}$
  - Lösungsformel:  $E_{el} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$ ,  $F = D \cdot s$ ,  $F = m \cdot g$
  - Umstellen nach der gesuchten Größe:  $D = \frac{F}{s_4} = \frac{m \cdot g}{s_4} \rightarrow E_{el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot g}{s_4} \cdot s^2$
  - Einsetzen der Werte mit den richtigen Einheiten:  $E_{el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,015 \text{ m}} \cdot (0,02 \text{ m})^2 = \mathbf{0,5232 \text{ J}}$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

22

# Energieerhaltung in der Mechanik

- Energieerhaltungssatz der Mechanik: In einem abgeschlossenen System ist die Summe der mechanischen Energien konstant, sofern die Vorgänge im System reibungsfrei ablaufen:

$$\sum E_i = E_{kin} + E_{pot} + E_{el} = \text{konstant}$$

- Abgeschlossenes System: Anordnung von Körpern, auf die keine Kräfte von Körpern außerhalb dieser Anordnung wirken (die nicht von außerhalb des Systems beeinflusst werden können)

Energieerhaltungssätze gelten keinesfalls nur in der Mechanik! So kann beispielsweise auch elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt werden!

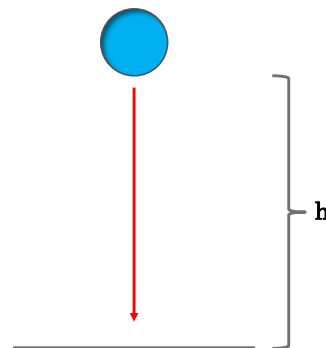
Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

23

# Energieerhaltung in der Mechanik

- Ein Ball wird aus einer bestimmten Höhe (Erdboden als Nullniveau) fallen gelassen
- Reibung und Luftwiderstand seien vernachlässigbar
- Zum Zeitpunkt  $t = 0$  s besitzt der Ball lediglich potenzielle Energie
- Sobald der Ball zu fallen beginnt, nimmt die potenzielle Energie stetig ab und erscheint in Form von kinetischer Energie, die in gleicher Weise zunimmt
- Zu jedem Zeitpunkt gilt:

$$E_{mech} = E_{pot} + E_{kin} = \text{konstant}$$



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

24

# Übung

- Ein Stein mit einer Masse von  $m = 5 \text{ kg}$  fällt von einem 20 m hohen Dach zu Boden. Berechnen Sie:
  - die Energie, die der Stein unmittelbar vor dem Fall besitzt (angenommen, der Boden ist als Nullniveau festgelegt)
  - die Geschwindigkeit, mit der der Stein auf den Boden aufschlägt
- Lösung:
  - Gegeben sind folgende Werte:  $m_{\text{Stein}} = 5 \text{ kg}$ ,  $h = 20 \text{ m}$
  - Gesucht sind folgende Werte:  $E_{\text{pot}}$ ,  $v$
  - Lösungsformel:  $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ ,  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
  - Umstellen nach der gesuchten Größe:  $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ ,  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{pot}}}{m}}$ , da beim Aufprall die gesamte potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt worden ist
  - Einsetzen der Werte mit den richtigen Einheiten:  $E_{\text{pot}} = 5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20 \text{ m} = 981 \text{ J}$ ,  
 $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 981 \text{ J}}{5 \text{ kg}}} = 19,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

25

# Energie-Masse-Äquivalenz

- Nach der Relativitätstheorie sind Masse und Energie gleichwertig und über folgende Gleichung miteinander verknüpft:

$$E = m \cdot c^2$$

- Beachte: Ein Körper besitzt nicht nur aufgrund seiner Bewegung Energie, sondern bereits wenn er ruht – die Ruheenergie:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

- Besitzt der Körper zusätzlich kinetische Energie, so muss diese zur Ruheenergie addiert werden und man erhält die Gesamtenergie:

$$E = E_0 + E_{\text{kin}}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

26



# Übung

- Eine Fahrstuhlkabine besitzt eine Masse von 1200 kg. Sie soll aus dem Stand innerhalb von 3 Minuten bis ins höchste Stockwerk (54 m vom Erdboden gemessen) fahren. Als Gegengewicht dient eine Masse von 950 kg, sodass der Motor des Aufzugs die Kabine nach oben ziehen muss. Welche durchschnittliche Leistung ist vom Motor aufzubringen, um den Fahrstuhl, wie oben beschrieben, zu bewegen?
- Lösung:
  - Gegeben sind folgende Werte:  $m_{\text{Fahrstuhl}} = 1200 \text{ kg}$ ,  $t = 3 \text{ min}$ ,  $h = 54 \text{ m}$ ,  $m_{\text{GG}} = 950 \text{ kg}$
  - Gesucht sind folgende Werte:  $P$
  - Lösungsformel:  $P = \frac{W}{t}$ ,  $W = F \cdot s$ ,  $F = m \cdot g$
  - Umstellen nach der gesuchten Größe:  $W_{\text{Schwerkraft}} = W_{\text{Motor}} + W_{\text{GG}} \rightarrow W_{\text{Motor}} = W_{\text{Schwerkraft}} - W_{\text{GG}}$   
 $\rightarrow W_{\text{Motor}} = m_{\text{Fahrstuhl}} \cdot g \cdot h - m_{\text{GG}} \cdot g \cdot h \rightarrow P = \frac{W_{\text{Motor}}}{t} = g \cdot h \cdot \frac{m_{\text{Fahrstuhl}} - m_{\text{GG}}}{t}$
  - Einsetzen der Werte mit den richtigen Einheiten:  $P = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 54 \text{ m} \cdot \frac{1200 \text{ kg} - 950 \text{ kg}}{180 \text{ s}} = \mathbf{735,75 \text{ W}}$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

29

## (V) Mechanik 4: Druck

# Druckbegriffe in der Medizin

- Der Begriff „Druck“ taucht sehr häufig v.a. in der Physiologie auf
- Bei der Betrachtung des Herzens, dem Kreislauf, der Atmung und vielen weiteren Prozessen spielen sich ständig ändernde bzw. konstant zu haltende Druckverhältnisse eine entscheidende Rolle für das menschliche Leben
- Kleinste Änderungen dieser Verhältnisse können bereits enorme Auswirkungen auf unser Leben haben
- Bei der Blutdruckmessung begegnet uns der Begriff des Druckes tagtäglich – es ist eine der wichtigsten Messungen, um den Vitalstatus eines Patienten innerhalb von Sekunden zu erfassen

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

31

## Hämodynamische Auswirkungen bei Volumenverlust



Anaphylaktischer Schock

Hypovolämie

Herzzeitvolumen

Myokardiale Funktion

Blutdruck

Koronare Perfusion

Gewebeperfusion

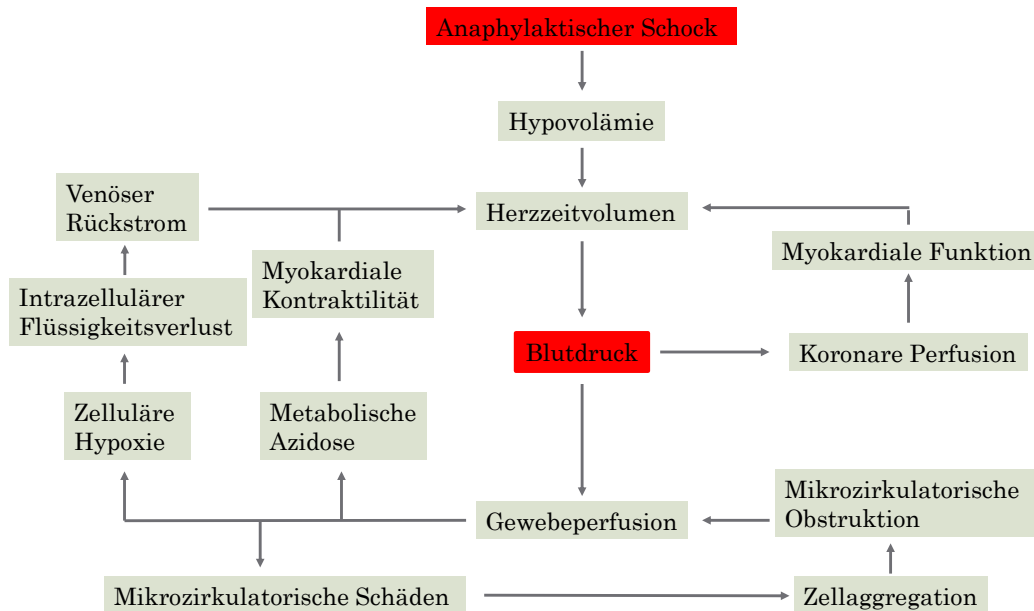
Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: <http://www.apotheken-umschau.de/Erste-Hilfe/funktionstuecht-im-Mund-War-tun-3489203.html>

32



# Hämodynamische Auswirkungen bei Volumenverlust



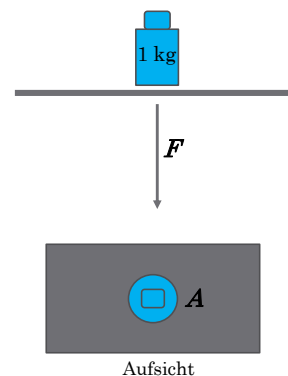
33

## Druck ( $p$ )

- Wirkt eine Kraft  $F$  senkrecht auf eine Fläche der Größe  $A$ , so kann der Druck als Quotient aus dem Betrag von  $F$  und der Größe der Fläche dargestellt werden als:

$$p = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{m^2} = Pa \right]$$

- Andere häufig gebrauchte Einheiten sind: Bar (bar), physikalische Atmosphäre (atm), Millimeter Quecksilbersäule (mmHg), Millimeter Wasser (mmH<sub>2</sub>O), Torr (torr)

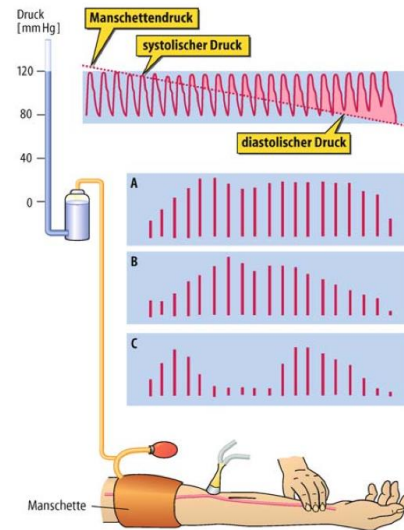


Quelle: Karim Kouz (September 2014)

34

# Blutdruckmessung

- Manschette wird solange aufgeblasen, bis Manschettendruck den Blutdruck in der A. brachialis um ca. 20 mmHg übersteigt
- Es fließt jetzt kein Blut mehr in den Arm hinein (und auch nicht hinaus)
- Das Stethoskop wird über der A. brachialis positioniert und der Druck in der Manschette wird langsam verringert
- Sobald der Druck so gering ist, dass das Blut wieder zu fließen beginnt, sind Geräusche zu hören = **Korotkow-Geräusche**
- Solange der Manschettendruck zwischen dem systolischen und dem diastolischen Druck liegt, sind Geräusche zu hören, da in diesem Bereich der Blutstrom turbulent ist



Quelle: Physiologie des Menschen Schmidt, Lang, 30. Auflage, Springer Verlag

35

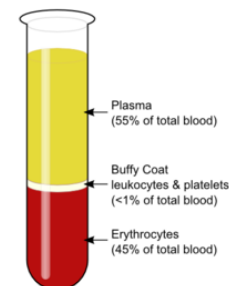
Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

# Dichte ( $\rho$ )

- Der Quotient aus der Masse  $m$  und dem Volumen  $V$  eines Körpers wird als Dichte  $\rho$  (Rho) bezeichnet:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

- Die Dichte eines Körpers ist abhängig von:
  - Material
  - Druck
  - Temperatur
- Zentrifugiert man Blut, so erhält man drei sichtbare Fraktionen: Erythrozyten, Leukozyten und Thrombozyten, Plasma



Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Buffy\\_Coat](http://de.wikipedia.org/wiki/Buffy_Coat)

36

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

# Übung

- Ein Zimmer habe folgende Abmessungen: 3,5 m (Länge) x 4,2 m (Breite) x 2,4 m (Höhe).
  - Wie groß ist das Gewicht der Luft in dem Raum (die Dichte der Luft bei Atmosphärendruck ist  $1,21 \frac{kg}{m^3}$ )?
  - Wie groß ist die Kraft, die die Luft auf den Fußboden des Raumes ausübt?
- Lösung:
  - Gegeben sind folgende Werte:  $l = 3,5 \text{ m}$ ,  $b = 4,2 \text{ m}$ ,  $h = 2,4 \text{ m}$ ,  $\rho_{Luft} = 1,21 \frac{kg}{m^3}$
  - Gesucht sind folgende Werte:  $G, F$
  - Lösungsformel:  $\rho = \frac{m}{V}$ ,  $G = m \cdot g$ ,  $p = \frac{F}{A}$
  - Umstellen nach der gesuchten Größe:  $m = \rho \cdot V \rightarrow G = \rho \cdot V \cdot g$ ,  $F = p \cdot A$
  - Einsetzen der Werte mit den richtigen Einheiten:
    - $G = 1,21 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,5 \text{ m} \cdot 4,2 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 418,78 \text{ N}$
    - $F = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 3,5 \text{ m} \cdot 4,2 \text{ m} = 1,48 \cdot 10^6 \text{ N}$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

37

## Hydrostatischer Druck (Schweredruck)

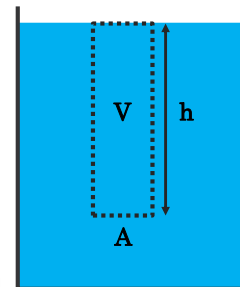
- Der Druck, der sich innerhalb einer Flüssigkeit durch den Einfluss der Gravitation einstellt
- Die auf das betrachtete Volumen  $V$  mit der Masse  $m$  wirkende Schwerkraft ergibt sich als:

$$G = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$$

- Der hydrostatische Druck ergibt sich dann als:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{G}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g$$

Beachte: Der Druck nimmt also mit zunehmender Tiefe linear zu. Dies gilt jedoch nur, wenn die Dichte der Flüssigkeit konstant bleibt (inkompressible Flüssigkeit)



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

38

# Hydrostatisches Paradoxon

- Der hydrostatische Druck lässt sich wie folgt berechnen:

$$p = \rho \cdot h \cdot g$$

- Folglich ist der hydrostatische Druck lediglich von der Dichte der Flüssigkeit und der jeweiligen Tiefe abhängig (sofern g als konstant angesehen wird)
- In allen Gefäßen herrscht in derselben Höhe derselbe Druck, trotz der unterschiedlichen Gefäßgeometrie und Füllmenge



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatisches\\_Paradoxon](http://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatisches_Paradoxon)

39

## Übung

- Ein Tauchanfänger nimmt in einer Tiefe h aus seinem Atemgerät ausreichend Luft zu sich, um seine Lunge so weit es geht zu füllen. Er lässt sein Atemgerät zurück und schwimmt an die Oberfläche und atmet entgegen der Anweisungen seiner Lehrer nicht aus. Als er die Oberfläche erreicht, beträgt der Druckunterschied zwischen dem äußeren Druck und dem Luftdruck in seinen Lungen 9,3 kPa. Aus welcher Tiefe ist er gestartet?
- Lösung:
  - Gegeben sind folgende Werte:  $\Delta p = 9300 \text{ Pa}$
  - Gesucht sind folgende Werte:  $h$
  - Lösungsformel:  $p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$ ,  $\Delta p = p - p_0 = \rho \cdot g \cdot h$
  - Umstellen nach der gesuchten Größe:  $h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}$
  - Einsetzen der Werte mit den richtigen Einheiten:  $h = \frac{9300 \text{ Pa}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,95 \text{ m}$

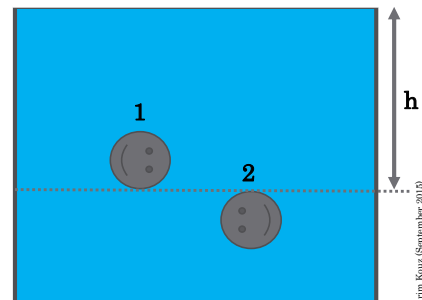
Ein Druckunterschied von 9,3 kPa (ca. 9% Atmosphärendruck) kann bereits ernsthafte Schäden hervorrufen, die zum Tod führen können!

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

40

# Pascalsches Gesetz

- Eine Druckänderung in einer abgeschlossenen und inkompressiblen Flüssigkeit wird unvermindert auf jeden Teil der Flüssigkeit sowie auch die Wände des Behälters übertragen
- Beispiel:
  - Die Taucher 1 und 2 tauchen so, dass sich jeweils das linke Trommelfell beider Taucher in gleicher Höhe befindet
  - Auf beide Trommelfelle wirkt der gleiche Druck, obwohl ein Trommelfell nach oben und das andere nach unten ausgerichtet ist
  - Dies liegt daran, dass in dieser Höhe in der gesamten Flüssigkeit derselbe Druck herrscht und somit die Ausrichtung des betrachteten Punkts keine Rolle spielt



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: Karim Kouz (September 2015)

41

# Archimedisches Prinzip

- Taucht ein Körper ganz oder auch teilweise in ein Fluid, so wirkt auf ihn eine Auftriebskraft, ausgehend von dem ihn umgebenden Fluid
- Diese Kraft ist nach oben gerichtet und vom Betrag her gleich dem Gewicht des von dem Körper verdrängten Fluids
- Das archimedische Prinzip gilt in allen Fluiden (Flüssigkeiten oder Gasen)

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

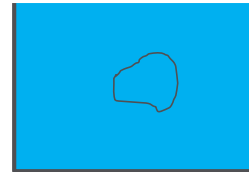
42

# Archimedisches Prinzip

- Ein Taucher beobachtet eine im Wasser schwebende dünnwandige Plastiktüte (statisches Gleichgewicht)
- Die Auftriebskraft muss folglich (da statisches Gleichgewicht) genauso groß sein, wie das Gewicht des sich in der Tüte befindenden Wassers:

$$F_A = m_{\text{Tütenwasser}} \cdot g$$

- Die Auftriebskraft beruht auf dem zunehmenden Druck in dem umgebenden Wasser mit zunehmender Tiefe – der Druck auf den unteren Teil der Tüte ist also größer als auf den oberen Teil
- Somit sind auch die auf den unteren Teil wirkenden Kräfte größer als auf den oberen Teil



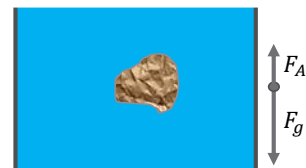
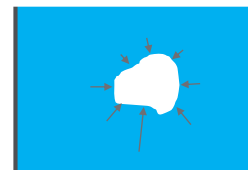
Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

43

# Archimedisches Prinzip

- Die Summe der auf die Tüte wirkende Kräfte ergibt die Auftriebskraft, wobei sich nur die vertikalen Komponenten addieren und die horizontalen einander aufheben
- Wird die Tüte durch einen Stein mit exakt gleicher Form ausgefüllt, so verdrängt dieser das Fluid an dieser Stelle vollständig – die Auftriebskraft ist somit genauso groß wie vorher
- Die nach unten gerichtete Schwerkraft ist jedoch vom Betrag her größer als die Auftriebskraft – der Stein sinkt:

$$F_A = m_{\text{verdrängtes Wasser}} \cdot g < m_{\text{Stein}} \cdot g$$



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

44

# Archimedisches Prinzip

- Die nach unten gerichtete Schwerkraft ist jedoch vom Betrag her größer als die Auftriebskraft – der Stein sinkt:

$$F_A = m_{\text{verdrängtes Wasser}} \cdot g < m_{\text{Stein}} \cdot g$$

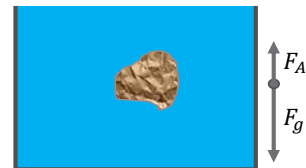
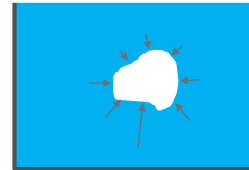
- Wird der Ausdruck Masse mit der Definition der Dichte ersetzt, so ergibt sich:

$$\rho_{\text{Wasser}} \cdot V_{\text{verdrängtes Wasser}} \cdot g < \rho_{\text{Stein}} \cdot V_{\text{Stein}} \cdot g$$

- Da das Steinvolumen genau dem Volumen an Wasser gleicht, das verdrängt wurde, kann der Volumenausdruck aus der Ungleichung gekürzt werden:

$$\rho_{Wasser} < \rho_{Stein}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016



45

# Archimedisches Prinzip

- Wie wir mathematisch gezeigt haben, gilt also unsere Alltagserfahrung:
  - \*  $\rho_{\text{Körper}} < \rho_{\text{Fluid}}$  → Körper steigt
  - \*  $\rho_{\text{Körper}} = \rho_{\text{Fluid}}$  → Körper schwebt
  - \*  $\rho_{\text{Körper}} > \rho_{\text{Fluid}}$  → Körper sinkt



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: Karim Koz (2011): <http://worldcanreview.com/wor-1/verschmutzung/muell/>  
[http://www.stockmaritime.eu/details.php?id\\_webserie=377&action=2&rite\\_insort&index=3&id\\_bild0=34202](http://www.stockmaritime.eu/details.php?id_webserie=377&action=2&rite_insort&index=3&id_bild0=34202)

46

# Gase

- Bestehen aus räumlich weit voneinander getrennten Molekülen (z.B.  $O_2$ ) oder Atomen (z.B. Helium), die sich frei in schneller Bewegung befinden
- Können mit beliebigen Gasen in jedem Verhältnis völlig homogen miteinander vermischt werden
- Füllen Gefäße vollständig aus
- Sind leicht komprimierbar

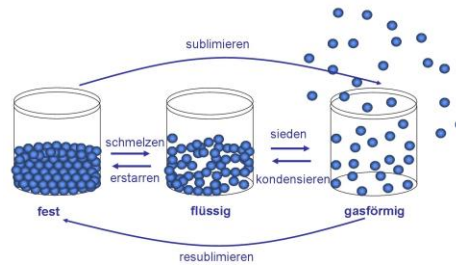


Abb.: Übergänge der Aggregatzustände: fest, flüssig, gasförmig

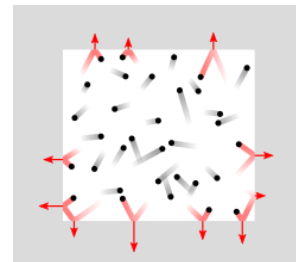
Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: <http://www.champagne.de/buchbeitrag/grant.htm>

47

# Gasdruck

- Die Gasteilchen bewegen sich aufgrund ihrer thermischen Energie in alle beliebigen Richtungen (thermische Energie wird in kinetische Energie umgewandelt)
- Dabei prallen die Gasteilchen auch auf die Wände des Behälters, in dem sie sich befinden und es finden elastische Stoßereignisse statt
- Die bei diesen Stoßereignissen auf die Wand ausgeübten Druckkräfte ergeben den Gasdruck
- Der Gasdruck entsteht somit als Summe aller durch ein Gas oder Gasgemisch wirkenden Kräfte auf die Gefäßwand



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

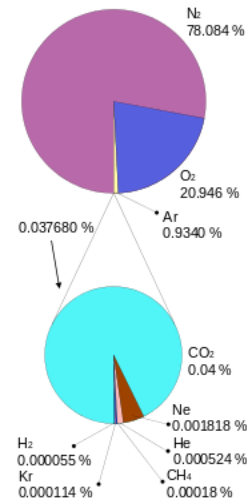
Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Druck\\_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Druck_(Physik))

48



# Partialdruck (Teildruck)

- Luft besteht aus einem Gasgemisch (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid,...)
- Jedes einzelne Gas in dem Gasgemisch trägt zu einem gewissen Teil zum Gesamtdruck bei
- Der Partialdruck entspricht dem Druck, den eine einzelne Gaskomponente eines Gasgemisches bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Luft>

49

# Luftdruck

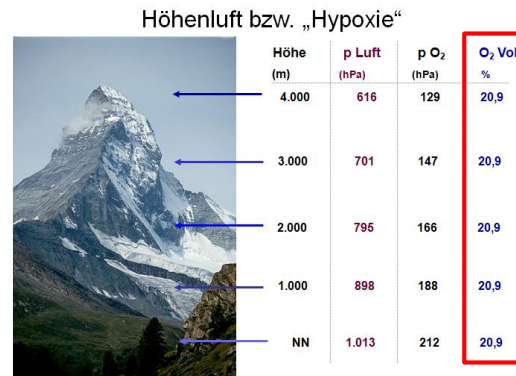
- In der Erdatmosphäre setzt sich der Luftdruck aus den einzelnen Partialdrücken der Luftbestandteile zusammen
- Er ist nicht überall auf der Welt gleich:
  - Mit steigender Höhe nimmt der Luftdruck ab
  - Er ist abhängig von Wetterverhältnissen und unterliegt zusätzlich kleinen Schwankungen
- Auf Meeresniveau beträgt der Luftdruck ca. 101 kPa (= 1 atm)
- Etliche Angaben in den Naturwissenschaften beziehen sich auf den sogenannten Normdruck – dieser ist willkürlich festgelegt auf den Wert 101 kPa

Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

50

# Atmung in großer Höhe

- Die prozentuale Zusammensetzung der Luft verändert sich nicht (kaum) mit zunehmender Höhe im Bereich von für den Menschen relevanten Höhen
- Trotzdem bekommen wir mit zunehmender Höhe Probleme mit der Atmung und unsere Leistungsfähigkeit nimmt ab (→ Höhenttraining)
- Ursächlich dafür ist der abnehmende Luftdruck und somit auch Partialdruck von Sauerstoff, der maßgeblich die Sauerstoffaufnahme und -abgabe des Körpers beeinflusst



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

51

# Adaptation des Körpers in großer Höhe

- Stimulation der Erythropoese mit Erhöhung des Gesamthämoglobins und Zahl der Erythrozyten
- Hyperventilation
- Linksverschiebung der Sauerstoffbindungskurve
- Um sich optimal an große Höhe anpassen zu können, braucht der Körper Zeit (→ Höhenttraining)
- Bei zu schnellem Aufstieg bzw. Abstieg in zu große Höhen → Höhenkrankheit!



Karim Kouz, Biophysik WS2015/2016

52